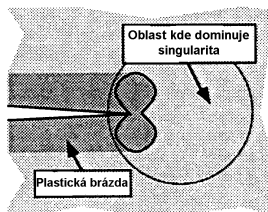
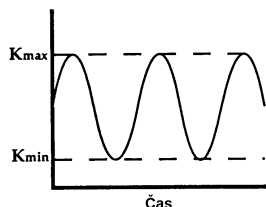




1. Šíření trhliny při cyklickém zatěžování

Koncept podobnosti poskytuje teoretický základ pro lomovou mechaniku. Tento koncept říká, že podmínky na špičce trhliny jsou jednoznačně dány jedním zatěžovacím parametrem jakým je faktor intenzity napětí. Pro monotónně zatěžovanou trhlinu jsme hovořili v okamžiku lomu o lomové houževnatosti K_{IC} v případě existence oblasti na špičce trhliny kde dominuje singularita. Nyní budeme hovořit o tom, že za určitých podmínek může být růst únavové trhliny také určen hodnotou faktoru intenzity napětí.



Uvažujeme rostoucí únavovou trhlinu při působení cyklického zatěžování popsaného změnou faktoru intenzity napětí. Obr. 1. Plastická zóna vyniká na špičce trhliny a v případě, že trhlina roste, zanechává za sebou oblast, ve které proběhla cyklická plastická deformace; tuto oblast budeme označovat jako plastickou brázdu. V případě, že plastická zóna je dostatečně malá tzn., že se vejde do oblasti, kde dominuje singularita, pak

podmínky na špičce trhliny jsou jednoznačně dány okamžitou hodnotou K a rychlost růstu je charakterizována hodnotami K_{min} a K_{max} . Je tedy vhodné vyjádřit funkční závislost pro růst trhliny v následujícím tvaru:

$$\frac{da}{dN} = f_1(\Delta K, R) \quad (1)$$

kde $\Delta K = (K_{max} - K_{min})$, $R = K_{min}/K_{max}$ a da/dN je přírůstek trhliny za jeden cyklus.

Vliv plastické zóny i plastické brázdy je implicitně dán rov. (1), protože velikost plastické zóny závisí pouze na K_{min} a K_{max} .

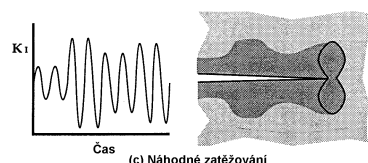
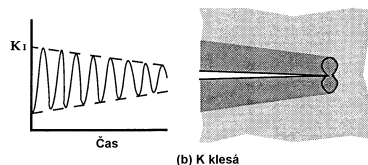
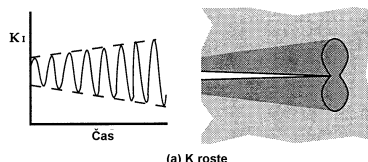
V literatuře byl publikován velký počet výrazů pro f_1 , z nichž většina je empirických, některé z nich si uvedeme za chvíli. Integrací rov. (1) získáme odhad únavové životnosti. Počet cyklů nutný k nárůstu únavové trhliny z počáteční délky a_0 na konečnou délku a_f je dán vztahem

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{f_1(\Delta K, R)} \quad (2)$$

Jestliže K_{min} nebo K_{max} se mění během cyklického zatěžování, pak růst trhliny v daném cyklu může záviset stejně tak na historii zatěžování jako i na okamžitých hodnotách K_{min} a K_{max} :

$$\frac{da}{dN} = f_2(\Delta K, R, \Omega), \quad (3)$$

kde Ω představuje závislost na historii, která je výsledkem předchozí plastické deformace. Rovnice (3) určitým způsobem porušuje předpoklad podobnosti; dvě stejné součásti cyklicky zatěžované stejnými hodnotami ΔK a R nebudou vykazovat stejný růst trhliny, pokud obě součásti nebudou mít stejnou předcházející historii zatěžování.



Na obr. 2 je několik příkladů neplatnosti předpokladu podobnosti. V každém případě předchozí historie zatěžování ovlivňuje aktuální podmínky na špičce trhliny. O příčinách závislosti šíření trhliny na deformační historii se zmíníme za chvíli.

Rozsáhlejší plastická deformace poškozuje princip podobnosti, a tedy K v tomto případě již necharakterizuje podmínky na špičce trhliny. Proto se v řadě prací objevuje snaha použít J integrál k popisu únavového šíření trhliny doprovázené větším rozsahem plastické deformace – zákon růstu únavové trhliny má potom tvar

$$\frac{da}{dN} = f_3(\Delta J, R), \quad (4)$$

kde ΔJ je krivkový integrál pro cyklické zatěžování, analogicky k J integrálu pro monotónní zatěžování. Rovnice (4) je platná v případě konstantní amplitudy zatěžování a malou plastickou zónu, kdy platí $LELM - \Delta J = \Delta K^2/E'$. Platnost rovnice (4) v případě významné plastické zóny je víceméně nejasná.

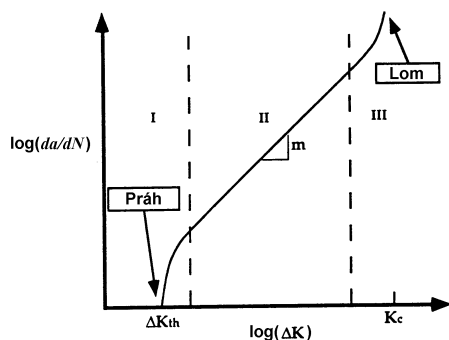
Vzpomeňme si na Rice jak zavedl J -integrál. Nahradil plasticitu nelineární elasticitou. Tento předpoklad je správný v případě monotónního zatěžování, ale neplatí v okamžiku odlehčení. To je důvod proč charakterizovat únavový růst trhliny J – integrálem je přinejmenším diskutabilní.

Přesto existují jak experimentální, tak i teoretické práce, které používají rovnici (4). Za jistých předpokladů učiněných vzhledem k zatěžovací a odlehčovací větvi cyklické křivky napětí deformace je možné ukázat, že ΔJ jednoznačně charakterizuje změnu napětí a deformace v daném cyklu.



Platnost rovnice (4) nebyla dokázána jednoznačně, ale tento přístup se zdá být použitelný pro řadu inženýrských problémů. Ovšem rov. (4) má stejná omezení předcházející historií jako rov (1). Rychlost růstu trhliny může ovlivnit historie zatěžování, jestli ΔJ nebo R se mění během cyklického zatěžování.

2. Empirické rovnice vyjadřující růst únavové trhliny.



Na obr. 3 je vynesena schematicky závislost da/dN versus ΔK v log-log souřadnicích. Tato závislost charakterizuje rychlost šíření únavové trhliny. Křivka tvaru písmene S obsahuje tři odlišné oblasti. Ve střední části hodnot ΔK je závislost lineární, ale jak při vysokých, tak i nízkých hodnotách ΔK dochází k odklonu od lineární závislosti. V prvním případě se rychlost růstu trhliny výrazně zvyšuje, když hodnota K_{max} se blíží k hodnotě K_{crit} (hodnota blízká hodnotě lomové houževnatosti materiálu). V druhém případě se rychlost růstu trhliny da/dN blíží k nule, když se hodnota ΔK blíží k tzv. prahové hodnotě - ΔK_{th} .

Lineární oblast v souřadnicích log-log je vyjádřena mocninným zákonem

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m, \quad (5)$$

kde C a m jsou materiálové charakteristiky, které se určují experimentálně. Podle rovnice (5) rychlost růstu únavové trhliny závisí pouze na ΔK ; da/dN je v oblasti II necitlivá na hodnotu nesymetrie cyklu R .

Paris a Erdogan (Paris P.C., Erdogan F.: Critical analysis of crack propagation laws. Journal of Basic Engineering, Vol. 85, 1960, pp. 9-14) byli pravděpodobně první, kteří použili exponenciální zákon k popisu růstu únavové trhliny v oblasti II. Navrhli hodnotu exponentu rovnou čtyřem, protože jim tato hodnota vyšla z jejich experimentálních zkoušek. Výsledky experimentálních prací v následujících třiceti letech ukázaly, že hodnota m není vždy rovna 4, ale leží v intervalu hodnot 2 až 7. Rovnice (5) vešla do povědomí jako Parisův zákon.

Řada výzkumníků se pokoušela zpracovat takový model, který by zachytil celou a nebo alespoň větší část zmíněné S-křivky. Mnohé z těchto rovnic jsou empirické, ale některé jsou založeny na fyzikálních úvahách. Poměrně známý je Formanův vztah, který zahrnuje oblast II a III:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^m}{(1-R)K_{crit} - \Delta K}; \quad (6)$$

tento vztah můžeme přepsat na tvar

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^{m-1}}{\frac{K_{crit}}{K_{max}} - 1} \quad (7)$$

Tedy rychlost růstu trhliny se stává nekonečně velká v případě, že $K_{max} \rightarrow K_{crit}$. Poznamenejme, že vztah (6) zahrnuje i vliv poměru R ve srovnání se vztahem (5), kde se předpokládá, že da/dN je pouze funkcí ΔK . Další podstatný fakt je, že materiálové charakteristiky C a m mají pro jeden a tentýž materiál různé číselné hodnoty podle toho, zda se vztahují k Formanově či Parisově rovnici.

Weertman navrhl alternativní vztah pro oblast II a III

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^4}{K_{crit}^2 - K_{max}^2}. \quad (8)$$

Tato rovnice se také někdy používá s obecnou hodnotou exponentu proměnné ΔK .

Obě rovnice – Formanova i Weertmanova – předpovídají nestabilní lom, když $K_{max} = K_{crit}$, ale nezahrnují prahovou hodnotu.

Klesnil a Lukáš (Brno) zahrnuli jako první do Parisova zákona prahovou hodnotu

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (9)$$

V literatuře byl uveden podobný výraz, kde však na exponent m je umocněn rozdíl $(\Delta K - \Delta K_{th})$. V obou případech se prahová hodnota určuje na základě experimentálních výsledků. Problém těchto vztahů je v tom, že nezohledňují skutečnost, že ΔK_{th} často závisí na poměru R .

Třetí skupinu tvoří vztahy, které zahrnují vliv jak K_{crit} , tak i vliv prahové hodnoty na rychlost šíření únavové trhliny. Jako příklad uvedeme alespoň dva vztahy



$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{\Delta K - \Delta K_{th}}{K_{crit} - K_{max}} \right)^m \quad (10)$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K - \Delta K_{th})^2 \left(1 + \frac{\Delta K}{K_{crit} - K_{max}} \right) \quad (11)$$

Rovnice 5 až 11 mají v podstatě tvar rovnice (2). Většina těchto rovnic zahrnuje čtyři materiálové charakteristiky – C , m , K_{crit} a ΔK_{th} (prahová hodnota rozkmitu faktoru intenzity napětí není skutečnou materiálovou charakteristikou, protože závisí na poměru R). Pro daný materiál rychlost růstu únavové trhliny je dána pouze dvěma zatěžovacími parametry ΔK a R , viz rov. (5) až (12).

Všechny předcházející výrazy vychází z modelu elastické podobnosti pro podmínky růstu trhliny a tedy žádná z těchto rovnic nezahrnuje závislost na historii zatěžování a tedy platí pouze pro konstantní amplitudu (faktoru intenzity napětí) zatěžování. Mnohé z těchto výrazů, přestože byly vyvíjeny s uvážením historie zatěžování, nemají, jak si povíme dále, obecnou platnost.

Příklad 1

Odvodte výraz pro počet napětíových cyklů nutných pro růst polokruhové povrchové trhliny o počátečním poloměru a_0 na konečnou velikost a_f . Pro popis růstu trhliny použijte Parisův zákon. Předpokládejme, že a_f je malé ve srovnání s rozměry stěny a rozkmit napětí, $\Delta\sigma$, je konstantní.

Řešení

V návodu do cvičení (číslo 5) najdeme přibližnou hodnotu faktoru intenzity napětí pro polokruhovou povrchovou trhlínu ve tvaru $\Delta K = \frac{1,04}{\sqrt{2,464}} \Delta\sigma \sqrt{\pi a} = 0,663 \Delta\sigma \sqrt{\pi a}$; v případě, že zanedbáme

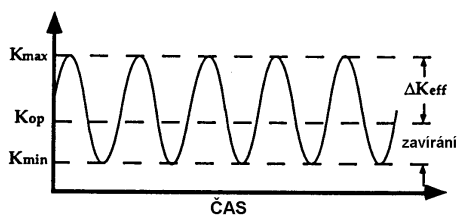
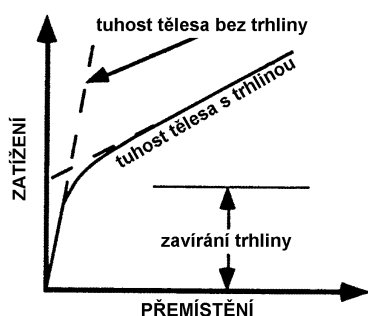
závislost λ_s na ϕ . Dosazením tohoto výrazu do rovnice (5) dostáváme výraz $\frac{da}{dN} = C(0,663 \Delta\sigma)^m (\pi a)^{m/2}$, který pro určení únavového života musíme integrovat

$$N = \frac{1}{C(0,663 \Delta\sigma \sqrt{\pi})^m} \int_{a_0}^{a_f} a^{-\frac{m}{2}} da = \frac{a_0^{1-\frac{m}{2}} - a_f^{1-\frac{m}{2}}}{C(\frac{m}{2}-1)(0,663 \Delta\sigma \sqrt{\pi})^m} \quad (\text{platí pro } m \neq 2)$$

K bylo v jednoduchém tvaru a tedy integrace nebyla problémem. V řadě složitějších výrazů pro K je nutná numerická integrace.

3. Zavírání trhliny a prahová hodnota faktoru intenzity napětí při únavě

Jak bylo ukázáno na schématu v obr.3, závislost da/dN versus ΔK v log-log souřadnicích není přímková, ale má spíše esovitý charakter zvláště v případě, že měření je provedeno v dostatečně širokém intervalu hodnot ΔK . Nyní se zaměříme na problém chování závislosti da/dN versus ΔK v oblasti nízkých hodnot rozkmitu faktoru intenzity napětí.



Elber (Elber W.: Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 2, 1970, str. 37-45) učinil zajímavý objev, který pomohl objasnit jak prahovou hodnotu, tak i vliv R při šíření únavové trhliny. Všiml si anomálie v průběhu tuhosti součásti s únavovou trhlínou. Tato anomálie je schematicky znázorněna v obr. 4a. Při vysokých zatíženích poddajnost ($d\Delta/dF$) souhlasí s teoretickými hodnotami těles s trhlínou, ale při nízkých zatíženích je hodnota poddajnosti blízká hodnotě tělesa bez trhliny. Elber dospěl k názoru, že změna poddajnosti je způsobena kontaktem povrchů trhliny při nízkém nenulovém zatížení.

Elber postuloval, že zavírání trhliny snižuje rychlost šíření únavové trhliny tím, že redukuje hodnotu rozkmitu faktoru intenzity napětí na tzv. efektivní hodnotu. Obr. 4(b) ilustruje představu zavírání trhliny. Když je těleso s trhlínou cyklicky zatěžováno – K_{max} a K_{min} – pak stěny trhliny jsou v kontaktu, je-li K nižší než K_{op} – faktor intenzity napětí, při kterém se trhlina otevírá. Elber předpokládá, že část cyklu, ve které je K menší než K_{op} , nepřispívá k šíření trhliny a proto definoval rozkmit efektivní hodnoty faktoru intenzity napětí



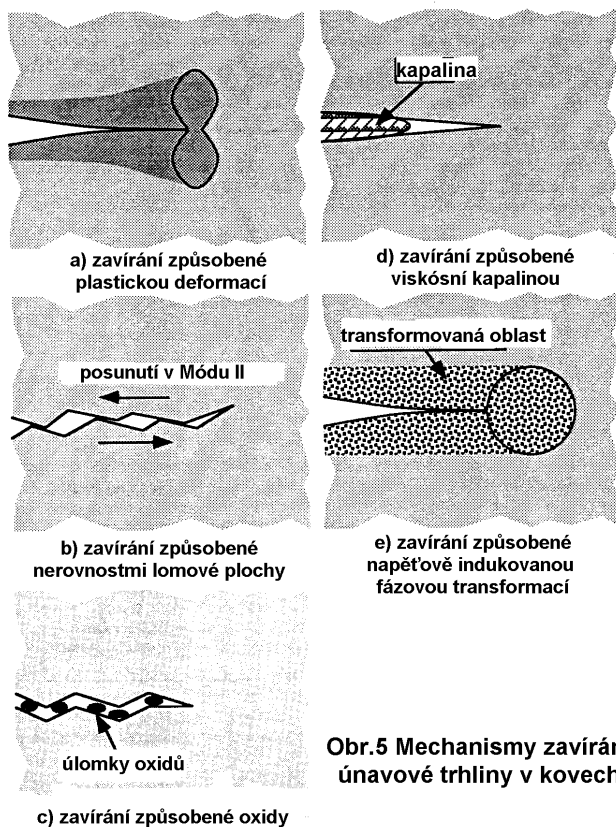
$$\Delta K_{eff} \equiv K_{max} - K_{op} \quad (12)$$

Elber také zavedl poměr rozkmitu efektivního faktoru intenzity napětí

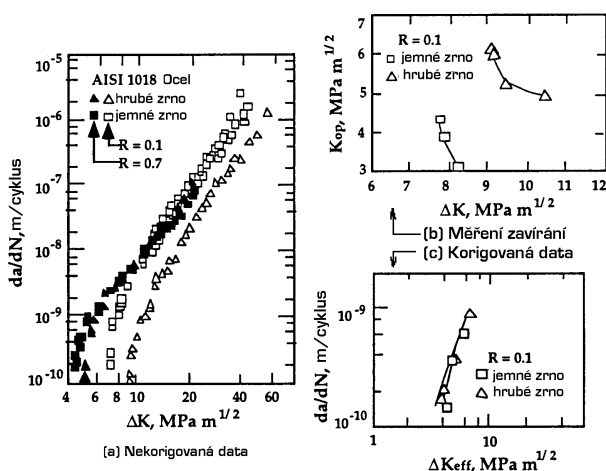
$$U \equiv \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} \quad (13)$$

Elber na základě předchozích úvah navrhl úpravu Parisova Erdoganova vztahu

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{eff}^m \quad (14)$$



Obr.5 Mechanismy zavírání únavové trhliny v kovech



vznik procesní zóny na špičce trhliny. Zbytková napětí v této zóně vedou k zavření trhliny při nenulovém zatížení.

O projevu toho kterého mechanismu zavírání rozhoduje mikrostruktura, mez kluzu a prostředí.

3.1 Zjednodušený obraz zavírání a ΔK_{th}

Elberova představa vlivu zavírání trhliny na šíření trhliny byla potvrzena řadou dalších prací. Na obr. 5 je schematicky znázorněno pět různých mechanismů zavírání trhliny.

- ✓ 5(a) zavírání způsobené plastickou deformací – je výsledkem působení zbytkových napětí v plastické zóně a brázdě.
- ✓ 5(b) zavírání způsobené drsností povrchu trhliny souvisí s mikrostrukturou materiálu. Únavová trhlina se z makroskopického hlediska šíří kolmo na maximální tahové napětí (mód I), ale na úrovni mikrostruktury může dojít k odklonu trhliny od roviny kolmé na hlavní napětí. Pak při šíření dochází k posunutí v módu II, jak ukazuje obr.5(b). Tato posunutí způsobí nesoulad mezi horní a dolní plochou trhliny, což má za následek dotyk ploch trhliny a tedy zavření při zatížení větším než je zatížení nulové. Materiál s větším zrnem, zvláště pokud se únavová trhlina šíří po hranicích zrn, má zpravidla větší stupeň drsnosti únavové plochy a tedy i vyšší zavírací zatížení. Obr. 6 ukazuje vliv velikosti zrna na rychlost šíření únavové trhliny v oceli 1018. Při nízkém poměru R, kde je tento jev mnohem výraznější, má hrubozrnný materiál větší hodnotu ΔK_{th} , což je způsobeno vyšším zavíracím zatížením daným větší povrchovou nerovností trhliny – viz obr. 6(b). Poznamenejme, že vliv velikosti zrna mizí, když jsou data charakterizována veličinou ΔK_{eff} – obr. 6(c).
- ✓ 5(c) zavírání způsobené oxidy je obvykle spojováno s agresivním prostředím. Částice oxidů, příp. jejich úlomky, se zaklíní mezi plochy trhliny při zatížení větším než je nulové.
- ✓ 5(d) zavírání způsobené viskózní tekutinou. Tekutina způsobí zaklínění ploch trhliny podobně jako je tomu v případě oxidů.
- ✓ 5(e) zavírání způsobené fázovou transformací. Vznik napětově indukované martenzitické transformace na špičce trhliny rostoucí únavové trhliny má za následek



Zavírání trhliny zmenšuje rychlost růstu únavové trhliny a je příčinou existence prahové hodnoty. Vliv zavírání trhliny můžeme odhadnout, když přijmeme dva zjednodušující předpoklady

- faktor intenzity napětí charakterizující otevření trhliny K_{op} je materiálovou charakteristikou, tj. je nezávislý na K_{min} , K_{max} a předcházející historii zatěžování
- ΔK_{th} není materiálovou charakteristikou; rov. (14) používáme tak dlouho, pokud $\Delta K_{eff} > 0$.

Přestože ani jeden z předpokladů není zcela oprávněný (viz další odstavce 3.2, 3.3) následující příklad slouží jen k ilustraci důsledku zavírání, nezávisle na jiných faktorech.

Elberův výraz pro únavový růst trhliny můžeme napsat ve tvaru

$$\frac{da}{dN} = C(U\Delta K)^m \quad (15)$$

kde U je definováno rov. (13) pro $K_{min} < K_{op}$. Když $K_{min} \geq K_{op}$, pak $U = 1$ a zavírání nesnižuje rychlost, růst únavové trhliny je dán dříve uvedeným Parisovým zákonem.

Přepsáním rov. (13) v termínech ΔK a R dostáváme

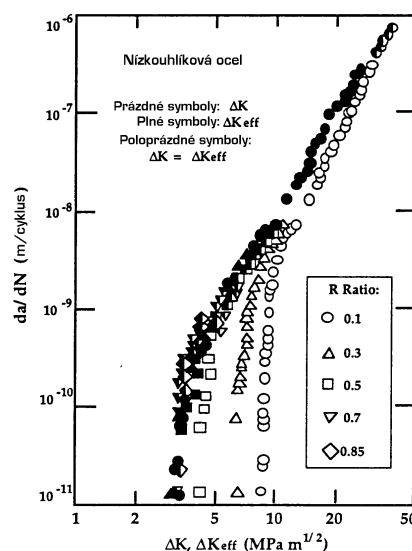
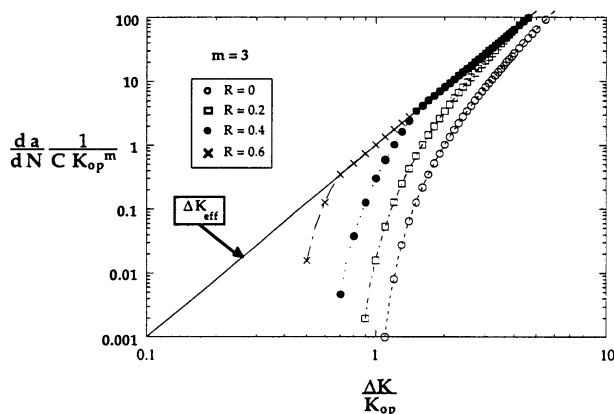
$$U = \frac{1}{1-R} - \frac{K_{op}}{\Delta K} \quad (16)$$

Prahová hodnota může být odvozena dosazením za $U = 0$:

$$\Delta K_{th} = K_{op}(1-R) \quad (17)$$

rov. (17) se týká následujícího rozmezí hodnot ΔK

$$K_{op}(1-R) \leq \Delta K \leq K_{op}\left(\frac{1}{R}-1\right)$$



Na obr. 7↑ jsou vyneseny bezrozměrné veličiny vypočtené z rov.

15 pro různé hodnoty R s U daným vztahem (16). Křivky na obrázku vykazují typické oblasti chování – oblast I a oblast II.

Prahová hodnota rozkmitu faktoru intenzity napětí, ΔK_{th} , klesá s rostoucím poměrem R , ale předpovězená rychlost šíření únavové trhliny v režimu Parisova zákona je necitlivá na R . Na obr.8 ↗ jsou vyneseny hodnoty naměřené pro nízkouhlíkovou ocel, které vykazují podobné trendy jako výpočet na obr. 7. Závěrem můžeme říci, že tato jednoduchá analýza předpovídá chování, které je kvalitativně v souladu s experimentem.

3.2 Vliv zatěžovacích podmínek na zavírání

Faktor intenzity napětí pro zavření trhliny není skutečnou materiálovou charakteristikou, ale závisí na řadě faktorů. Elber naměřil faktor intenzity napětí zavření trhliny hliníkové slitiny 2023-T3 při různých úrovních zatížení a poměru R – výsledkem bylo získání následujícího empirického vztahu:

$$U = 0,5 + 0,4R \quad (-0,1 \leq R \leq 0,7) \quad (18)$$

Další výzkumníci vyvodili podobné empirické rovnice pro jiné slitiny.

Podle rov. (18) U závisí pouze na R .

Poměrně velký zmatek a nesrovnalosti se vyskytly kolem závislosti U na K_{max} . Hudak a Davidson citovali z literatury protichůdné příklady, kde výzkumníci zjistili, že U roste, klesá nebo zůstává konstantní s rostoucí hodnotou K_{max} . Hudak a Davidson provedli měření zavírání pro hliníkovou slitinu 7091 a nerez ocel 304 v širokém intervalu zatěžovacích proměnných. Pro oba materiály odvodili vztah ve tvaru

$$U = 1 - \frac{K_o}{K_{max}} = 1 - \frac{K_o(1-R)}{\Delta K} \quad (19)$$



kde K_o je materiálová charakteristika. Hudak a Davidson dospěli k závěru, že odporující si výsledky uváděné v literatuře mohou být ovlivněny řadou faktorů

- rozmezí hodnot ΔK v experimentech bylo příliš úzké
- hodnoty ΔK nebyly dostatečně blízko prahové hodnoty
- měřicí technika neměla požadovanou citlivost.

Vliv zatěžovacích proměnných na K_o můžeme odvodit dosazením do vztahu pro U (rov. 13). Např. Elberova rovnice vede k následujícímu vztahu pro K_{op} :

$$K_{op} = \Delta K \left(\frac{1}{1-R} - 0,5 - 0,4R \right) \quad (20)$$

Poznamenejme, že poměr $K_{op}/\Delta K$ závisí pouze na poměru R . Nicméně rov. (19) vede k jinému výrazu pro K_{op} :

$$K_{op} = K_o(1-R) + K_{max}R = K_o(1-R) + \frac{\Delta KR}{1-R} \quad (21)$$

Tedy K_o je faktor intenzity napětí otevření pro $R = 0$.

Hudak a Davidson přisoudili zmatky a spory o vlivu zatěžovacích proměnných na zavírání experimentálním faktorům. Později McClug uvedl rozsáhlý přehled experimentálních i analytických výsledků zavírání a dospěl k závěru, že existuje několik rozdílných režimů zavírání trhliny. Blízko prahové hodnoty, úroveň zavírání klesá s rostoucím faktorem intenzity napětí, když U je nezávislé na K_{max} při střední úrovni K . Při vysokých hodnotách ΔK v okolí trhliny ke ztrátě koncentrace napětí a U klesá s rostoucím K . McClung dospěl k závěru, že nelze jediným vztahem vyjádřit obecně vliv zavírání. Většina zdánlivě protichůdných výsledků uváděných v literatuře může být přehodnocena s uvážením režimu, za kterého byla získána.

Vliv mikrostruktury může také vést k různým závěrům v pozorování chování zavírání u různých materiálů. Obr. 6 např. ukazuje vliv hranic zrn na zavírání trhliny u oceli 1018. Rov. (19) obsahuje parametr K_o , který se určuje zpravidla metodou nejmenších čtverců z experimentálních výsledků. Zůstává na dalších výzkumech, zda tento empirický výraz je dostatečně pružný, aby obsáhl celou oblast lomového chování různých slitin.

3.3 Únavový práh

Zavírání trhliny ovlivňuje únavový práh, ale zavírání trhliny není jedinou příčinou existence ΔK_{th} . Prahový rozkmit faktoru intenzity napětí může být rozdělen na skutečnou (základní) a vnější složku

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th(eff)} + \Delta K_{th(cl)} \quad (22)$$

kde $\Delta K_{th(eff)}$ je skutečný únavový práh a $\Delta K_{th(cl)}$ je příspěvek k prahové hodnotě od zavírání trhliny. Přesný mechanismus skutečného únavového prahu není znám. V literatuře je popsáno několik modelů výkladu $\Delta K_{th(eff)}$ založených na dislokačních mechanismech (emise dislokací na špičce trhliny, blokování skluzových pásů hranicemi zrn).

Na obr. 8 jsou vyneseny výsledky měření růstu únavové trhliny v blízkosti prahové hodnoty pro nízkouhlíkovou ocel. Data vykazují očekávaný vliv poměru R , když podmínka zatěžování vyjadřuje ΔK . Vyjádřením zatěžování veličinou ΔK_{eff} mizí závislost na R , ale prahová hodnota zůstává. Tedy Elberova rov. (14) nemůže být použita při nízkých rychlostech růstu trhliny. Nicméně, vnitřní prahová hodnota je velice malá v tomto případě ($\approx 3 \text{ MPa m}^{1/2}$) a rychlost růstu musí být menší než 10^{-9} m/cyklus při nápadné odchylce od rov. (14). Nicméně závislost popsaná mocninným zákonem se používá v řadě praktických aplikací.

Klesnil a Lukáš navrhli empirický vztah mezi ΔK_{th} a R

$$\Delta K = \Delta K_{tho} (1-R)^\gamma \quad (23)$$

kde ΔK_{tho} je prahová hodnota pro $R = 0$ a γ je parametr, který se určuje experimentálně. Když $\gamma = 1$, pak rov. (23) je shodná s rovnicí (17).

Vliv zatěžovacích proměnných na prahovou hodnotu může být odvozen z výrazu pro zavírání trhliny z předchozího odstavce.

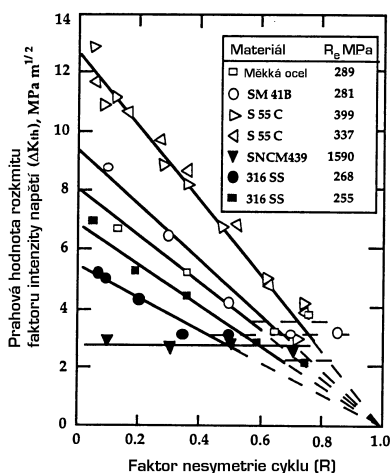
Prahové podmínky se získají dosazením $\Delta K_{eff} = \Delta K_{th(eff)}$ a $\Delta K = \Delta K_{th}$. Např. Elberova rovnice (18) vede k následujícímu výrazu pro ΔK_{th} :

$$\Delta K = \frac{\Delta K_{th(eff)}}{0,5 + 0,4R} \quad (24)$$

Řešení pro prahovou hodnotu faktoru intenzity ze vztahu navrženého Hudakem a Davidsonem (19)

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th(eff)} + K_o(1-R) \quad (25)$$

Je-li hodnota $\Delta K_{th(eff)}$ malá ve srovnání s ΔK_{th} , rov. (25) splývá s rov. (17) a stejně i s rov. (23) pro $\gamma = 1$. Vzpomeňme si, že rov. (17) byla odvozena za předpokladu, že K_{op} je materiálová charakteristika. Nicméně podle rov. (25) takovýto předpoklad není nutný pro získání lineární závislosti mezi ΔK_{th} a R .





☛ Obr. 9 shrnuje prahové hodnoty různých ocelí. Bez ohledu na vysocepevnou martenzitickou ocel, kde ΔK_{th} je zdánlivě nezávislé na R , vztah mezi ΔK_{th} a R přibližně lineární mezi $R = 0$ a $R = 0,8$. Nad $R = 0,8$ data dosahují ustálení, což můžeme označit jako vnitřní práh.

3.4 Léčky a omezení ΔK_{eff}

Efektivní rozkmit faktoru intenzity napětí, ΔK_{eff} , může být s úspěchem použit pro charakterizování rychlosti růstu únavové trhliny. Zdánlivě nahodilé trendy v datech mohou být často vysvětleny na základě zavírání trhliny. Nicméně tento přístup obsahuje mnoho léček.

Protože zavírání je ovlivněno mikrostrukturou i historií zatěžování a různé režimy zavírání se vyskytují při různých úrovních K , empirické vztahy pro U a ΔK_{op} nejsou spolehlivé pro odhad ΔK_{eff} . Empirické přizpůsobení danému souboru dat je možné jen pro určité zatěžovací podmínky (vlastnosti blízko prahové hodnoty) a nemohou být extrapolovány pro jiné režimy zatěžování, příp. jiné materiály.

Jedinou spolehlivou metodou pro stanovení zavíracího zatížení je jeho přímé měření. V odst. 7 jsou uvedeny hlavní rysy několika metod měření K_{op} . Tato měření však mohou být nepřesná. Otevírání a zavírání trhliny je průběžná závislost a nelze ji charakterizovat jedinou hodnotou zatížení. Obr. 4a ilustruje typické chování závislosti zatížení-přemístění; vidíme, že poddajnost se spojitě mění od případu zcela zavřené trhliny k případu otevřené trhliny. Definice zavíracího napětí je v takovém případě obtížná. Vhodná definice K_{op} je předmětem probíhajícího výzkumu.

I v případě, že neuvažujeme neurčitost v měření zavíracího napětí, definice ΔK_{eff} je komplikovaná vlivem historie zatěžování. Všechny rovnice v dost. 3 zahrnují podobnost. Předpokládáme, že růst únavové trhliny je funkcí pouze K_{min} , K_{max} (rov. 1). Tento předpoklad je striktně platný pro konstantní amplitudu, tedy pro $dK/da = 0$.

Rychlost růstu únavové trhliny závisí na dK/da . V důsledku toho napětíové pole s rostoucím K i napětíové pole s klesajícím K vyvolá různou rychlost růstu únavové trhliny pro dané K_{min} a K_{max} . Většinou vliv historie může být vysvětlen mechanismem zavírání trhliny: historie zatěžování určuje K_{op} , což se pak odrazí ve vlivu na rychlost růstu únavové trhliny.

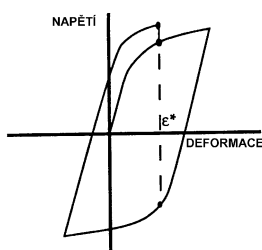
Hertzberg ukázal, že únavová zkouška při konstantním poměru R , ale s klesajícím ΔK může vést k přeceňování ΔK_{th} ; záporná hodnota dK/da má za následek velké zavírací zatížení, které redukuje ΔK_{eff} . Použití těchto výsledků pro konstrukci může být nekonzervativní, zvláště je-li v konstrukci $dK/da > 0$.

Jednou z metod vysvětlení vlivu historie je měření K_{op} tak, aby bylo zajištěno, že ΔK_{eff} obráží okamžité vlastnosti zavírání. Tento přístup komplikuje když K_{op} je určováno přerušovaně a hodnocení zavíracího zatížení cykl od cyklu je nepraktické. Víceméně zde není záruka, že charakteristická hodnota ΔK_{eff} jednoznačně charakterizuje rychlost růstu trhliny, když $dK/da \neq 0$. Dokonce jestli podobnost ΔK_{eff} bude platná obecně, nebude mít praktický význam, pokud nebude známo K_{op} pro zatěžovací podmínky sledované konstrukce. Vliv historie a proměnné amplitudy zatěžování je vysvětlováno dále.

4. Proměnná amplituda zatěžování a zpoždění (retardace)

Podobnost podmínek na špici trhliny, která zajišťuje jednoznačný vztah mezi da/dN , ΔK a R přesně platí pro konstantní amplitudu zatížení (t.j. $dK/da = 0$). Skutečné konstrukce zřídka splňují tuto podmínku. V těchto případech rychlost růstu trhliny v každém okamžiku závisí nejen na okamžitých zatěžovacích podmínkách, ale také na předcházející historii zatěžování.

4.1. Vratná plastická deformace na špici trhliny

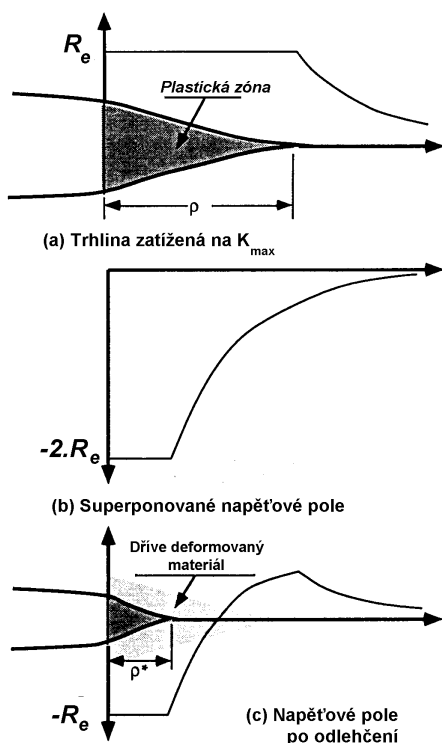


Vliv historie v únavě je přímým důsledkem plastické deformace. ☛ Obr. 10 ilustruje cyklickou odezvu napětí-deformace elasticko-plastického materiálu. Deformaci ϵ^* odpovídají tři různá napětí. Tzn. pro určení napětí je nutné znát nejen hodnotu deformace, ale také deformační historii, která předcházela této deformaci.

Obr. 11(strana 8 ↓) ilustruje plastickou deformaci na špici trhliny jako výsledek jednoho zátěžného cyklu. Plastická zóna se začne formovat při zatížení na K_{max} . Při odlehčování materiál blízko špice trhliny vykazuje zpětnou plastickou deformaci, což má za následek tlakovou plastickou zónu. Tlaková napětíová pole v okolí špice trhliny ovlivňují následující deformaci a růst trhliny. Příkladem tohoto jevu je

zpomalení růstu trhliny při přetížení (viz odstavec 4.2).

Následující model navrhl Rice. Zpětnou plastickou deformaci rozebereme na základě Irwinova výrazu pro velikost plastické zóny. Výhoda tohoto modelu je, že umožňuje superpozici napětíových polí při zatížení a odlehčení. Vyjdeme z obr. 11a, kde je ukázáno zatížení na hodnotu K_{max} . Při uvážení platnosti lineárně elastické lomové mechaniky můžeme říci, že velikost plastické zóny je dána



kladné zavírací napětí.

$$\rho = \frac{1}{\beta\pi} \left(\frac{K_{max}}{R_e} \right)^2 \quad (\beta = 2 \text{ rovinná napjatost, } = 6 \text{ rovinná deformace}) \quad (26)$$

Nyní přiložíme tlakové zatížení, - ΔK . Skutečná mez kluzu pro zpětnou (tlakovou) plastickou deformaci je $-2R_e$, protože materiál v tlakové plastické zóně musí být zatížen hodnotou $-R_e$ z původní hodnoty R_e . Obr. 11b ilustruje superpozici napětového pole při tlakovém zatížení a obr. 11c napětové pole při odlehčení. Odhadnutá velikost tlakové plastické zóny je

$$\rho^* = \frac{1}{\beta\pi} \left(\frac{\Delta K}{2R_e} \right)^2 \quad (27)$$

Následkem redistribuce napětí při odlehčení část materiálu, který byl dříve v plastické zóně vzniklé při monotónním zatížení, je nyní v tlaku. Podle rov. (27) tlaková plastická zóna odpovídá 1/4 velikosti plastické zóny při monotónním zatěžování. Analýza tohoto problému provedená metodou konečných prvků předpovídá cyklickou plastickou zónu ještě menší.

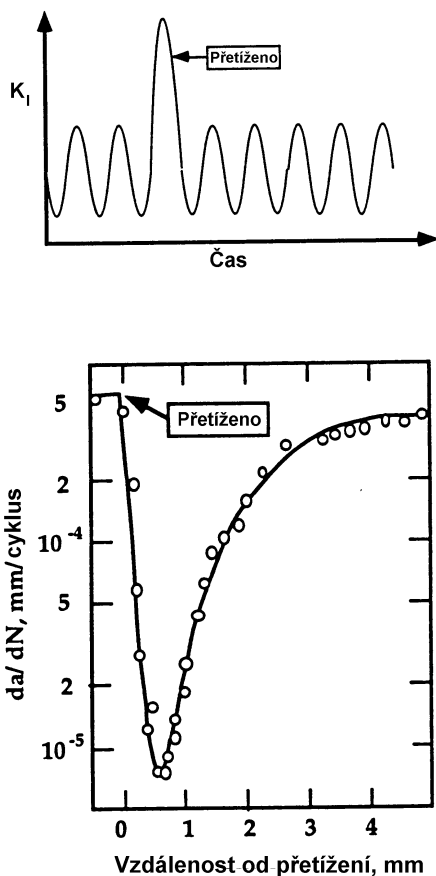
Poněkud komplikovanější verze výše uváděné analýzy cyklické plastické zóny byla vytvořena na základě modelu zavírání trhliny. V modelu je včleněna plastická brázda do plastické zóny a je zde ukázáno, že zbytková napětí v brázdě vyvolají

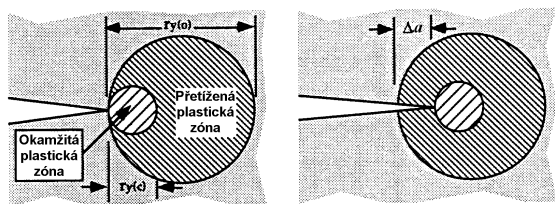
4.2 Vliv přetížení

Uvažujme historii únavového zatěžování znázorněnou na obr. 12. Cyklické zatěžování s konstantní amplitudou K je přerušeno jedním přetížením; po přetížení se amplituda K vrací na původní hodnotu. Před přetížením bude mít cyklická plastická zóna ustálenou velikost, ale cyklus, jež vyvolá přetížení, způsobí významné zvětšení cyklické plastické zóny. Když zatěžování klesne na původní hodnoty K_{min} a K_{max} , tak zbytková napětí, která jsou důsledkem plastické zóny vzniklé při přetížení, budou ovlivňovat následující únavové chování. Obr. 13 ukazuje skutečná experimentální data, kde jedno přetížení je vloženo do zkoušky s konstantní amplitudou. Bezprostředně po aplikaci přetížení klesá rychlost da/dN velice výrazně. Přetížení má za následek výskyt tlakových zbytkových napětí na špičce trhliny a ten způsobí zpomalení růstu trhliny. Rychlost růstu trhliny se vrátí na původní velikost až tehdy, když trhlina proroste cyklickou plastickou zónu vytvořenou přetížením. Obr. 13 ilustruje příklad, kde pravidlo podobnosti je porušeno, protože okamžité hodnoty ΔK a R jednoznačně neurčují rychlost da/dN .

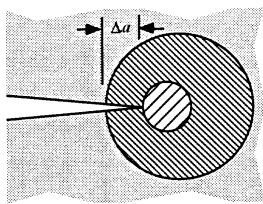
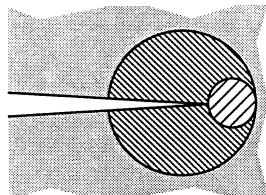
Zpoždění v růstu únavové trhliny (retardace), které následuje po přetížení, je komplikovaným jevem, který ještě není matematicky popsán. Existuje řada empirických a semiempirických vztahů pro výpočet zpoždění (retardaci). Některé modely předpokládají, že retardace (zpoždění) je způsobena efektem zavírání trhliny, jiné za příčinu retardace považují cyklickou plastickou zónu. Wheelerův model, který bere v úvahu druhou možnost, je jedním z jednoduchých a nejrozšířenějších modelů používaných pro analýzu zpoždění.

Model dává do vztahu rychlost růstu trhliny k velikosti plastické zóny vzniklé přetížením a velikostí okamžité plastické zóny – obr. 14. Velikost cyklické plastické zóny daná přetížením je:





(a) Bezprostředně po přetížení

(b) Po růstu trhliny o Δa 

Obr. 14 Wheelerův model únavového zpoždění. Rychlost růstu trhliny závisí na velikosti a poloze okamžité plastické zóny ve vztahu k poloze přetížené plastické zóny.

(c) Šíření přes přetíženou plastickou zónu

$$r_{y(o)} = \frac{1}{\beta\pi} \left(\frac{K_o}{R_e} \right)^2 \quad (28)$$

kde K_o je faktor intenzity napětí při maximu přetížení. Cyklická plastická zóna, která odpovídá současné hodnotě K_{max} je dána

$$r_{y(c)} = \frac{1}{\beta\pi} \left(\frac{K_{max}}{R_e} \right)^2 \quad (29)$$

Wheeler předpokládá, že vliv zpoždění trvá tak dlouho, pokud $r_{y(c)}$ je obsaženo uvnitř $r_{y(o)}$ (obr. 14(a) a 14(b)), ale vliv přetížení mizí, když okamžitá plastická zóna se dotkne vnitřní hranice $r_{y(o)}$, jak ukazuje obr. 14 (c). Pro trhlínu, která cyklicky narostla o Δa po přetížení, Wheeler definoval faktor zpoždění jako

$$\phi_R = \left(\frac{\Delta a + r_{y(c)}}{r_{y(o)}} \right)^\gamma \quad (30)$$

kde γ je parametr, který se určuje (fituje) z experimentálních výsledků. Rychlost růstu trhliny je redukována vzhledem k základní rychlosti

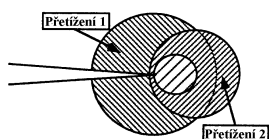
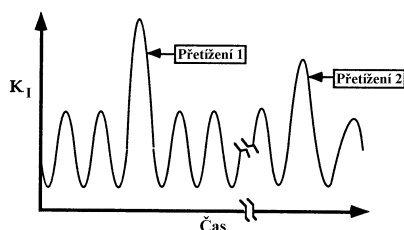
$$\left(\frac{da}{dN} \right)_R = \phi_R \frac{da}{dN} \quad (31)$$

Základní rychlost růstu únavové trhliny je získána ze vztahu (1). Tedy pro jedno přetížení počet cyklů nutný k růstu trhliny přes plastickou zónu vzniklou přetížením je dán integrálem

$$N_R = \int_{a_o}^{a^*} \frac{da}{\phi_R \{r_{y(o)}, r_{y(c)}, \Delta a\} f_1 \{ \Delta K, R \}} \quad (32)$$

kde a_o je délka trhliny v okamžiku přetížení, f_1 je základní vztah pro růst trhliny rov. (1), $a^* = a_o + r_{y(o)} + r_{y(c)}$.

4.3 Analýza proměnné amplitudy únavového zatěžování



$$\phi_R = \left(\frac{\Delta a_2 + r_{y(c)}}{r_{y(o)2}} \right)^\gamma$$

Proměnlivá amplituda únavového zatěžování zahrnuje pravidelný průběh od cyklického napětí nebo náhodnou posloupnost zatížení. Obr. 2 ilustruje několik příkladů proměnné amplitudy zatěžování. Podobnost není splněna v těchto případech a vliv historie může být zcela zřetelný.

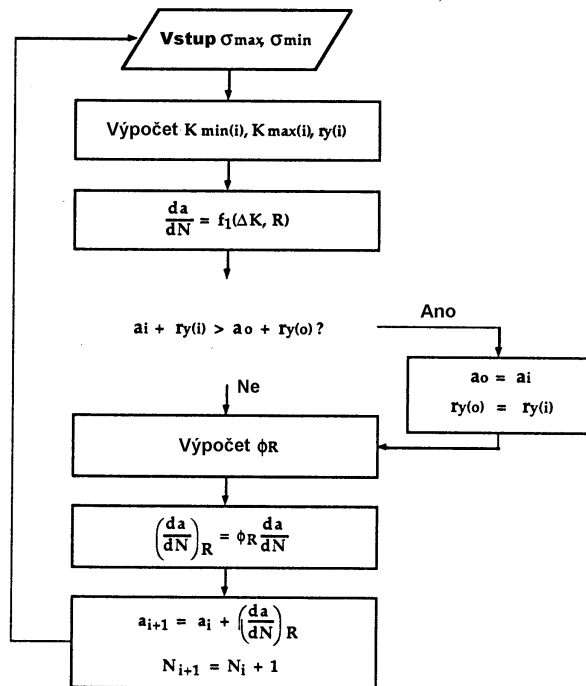
V některých případech to může být vhodné k analýze proměnné amplitudy únavy na základě zákona růstu trhliny ve tvaru rov. (1). Např. v rostoucím nebo klesajícím poli K -faktoru podobnost může být také platná, je-li dK/da malé. Podobnost může také platit, když zatěžování konstantní amplitudou následuje po jednom přetížení za předpokladu, že trhlina se šíří mimo plastickou zónu vyvolanou přetížením.

Jednoduchý zákon růstu únavové trhliny je zpravidla konzervativní, když působí proměnná amplituda zatěžování. Efekt zpoždění, který jednoduchá rovnice nezahrnuje, má sklon prodloužit únavový život konstrukce.

Analýza proměnné amplitudy, která vysvětluje zpoždění, může být velmi komplikovaná a výpočtově náročná. Některé modely vyžadují integraci přes jednotlivé cykly během růstu trhliny. Jako příklad uvažujeme Wheelerův model pro případ aplikace proměnné amplitudy zatěžování.

Wheelerův model zpoždění je v mnohém zaveden stejně jako v případě přetížení s tím rozdílem, že v případě proměnné amplitudy musí být plastické zóny –přetížená $r_{y(o)}$ a ustálená $r_{y(c)}$ – hodnoceny v každém cyklu. Obr. 15 ↗ znázorňuje typický scénář, kde cyklus s velice vysokým napětím proběhne v historii zatěžování nejdříve a cyklus se středně velkým napětím později. Plastická zóna daná přetížením je zvolena tak, že faktor zpoždění ϕ_R je minimalizován. V tomto případě je uvažováno poslední přetížení, navzdory faktu, že toto přetížení vytvořilo menší plastickou zónu ve srovnání s prvním přetížením.

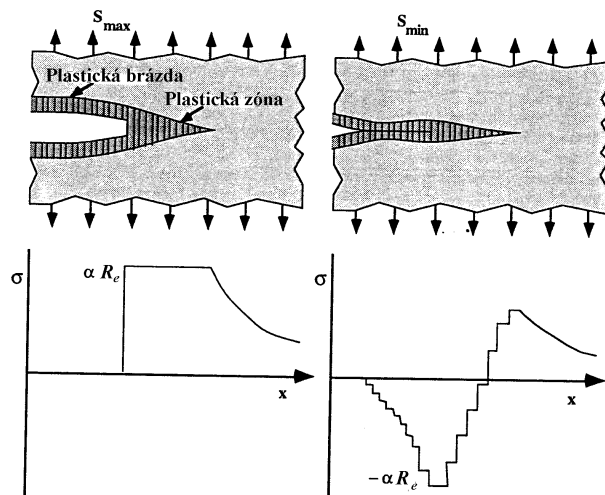
Obr. 16 ↘ (strana 10) ukazuje blokové schéma pro výpočet růstu únavové trhliny podle Wheelerova modelu. Ačkoliv algoritmus výpočtu je poměrně jednoduchý, vlastní výpočet může být velmi časově náročný, protože je vyžadována sumace jednotlivých cyklů. Napěťový vstup se skládá ze dvou komponent: spektrum (škála možností) a sekvence (pořadí, sled). Spektrum představuje statistické rozdělení amplitud napětí, které je



kvantifikováno poměrnou frekvencí výskytu cyklů s nízkým, středním a vysokým napětím. Sekvence je definována pořadím různých amplitud napětí a může být buďto pravidelná nebo náhodná.

Důležitým bodem Wheelerova modelu je, že exponent γ v rov. (30) závisí na materiálových vlastnostech a napěťovém spektru. Protože tento parametr musí být získán empiricky z experimentu, musí mít při experimentu napěťové spektrum stejný charakter jako v konstrukci. Analýza proměnné amplitudy zatěžování musí být nejprve připravena experimentálně pro určení hodnoty γ , která dává nejlepší předpověď růstu trhliny. Pak může být model použit k předpovědi chování konstrukce. Jestliže je analyzována konstrukce s jiným napěťovým spektrem, pak Wheelerův model musí být překalibrován na základě nového experimentu. Empirické modely zpoždění, tak jako Wheelerova metoda, obsahují nastavitelné parametry a ty musí být kalibrovány experimentálně.

Newman vyvinul model zavírání trhliny který může být aplikován v případě zatěžování proměnnou amplitudou.



Jednou z výhod Newmanova modelu je schopnost apriorní předpovědi, zatím co empirické přístupy jako např. Wheelerův model jsou schopny pouze korelovat hodnoty růstu trhliny na základě faktu. Newmanův model je založen na principu konceptu vratné plastické deformace – obr. 11.

← Obr. 17 ilustruje Newmanův model zavírání. Plastická zóna je rozdělena na segmenty a zbytková napětí v každém segmentu jsou počítána pro danou zatěžovací historii. Při napětí působícím daleko od trhliny S_{max} je trhlina zcela otevřena a plastická zóna je zatížena napětím αR_e , kde $\alpha = 1$ pro rovinnou napjatost a $\alpha = 3$ pro podmínky rovinné deformace. V případě minimálního napětí S_{min} je trhlina zavřená. Rozdělení zbytkových napětí v plastické brázdě určuje vzdálené otevírací

napětí S_o . Efektivní faktor intenzity napětí ΔK_{eff} je pak počítán z amplitudy efektivního napětí $S_{max} - S_o$.

5. Růst krátkých trhlín

Únavové chování krátkých trhlín je často velice rozdílné od chování dlouhých trhlín. Neexistuje přímá definice krátké trhliny, ale zpravidla za krátké trhliny se považují trhliny menší než 1 mm.

Obr. 18 umožňuje srovnání hodnot rychlosti šíření získaných pro krátké a dlouhé trhliny v blízkosti prahové hodnoty. V tomto případě krátké trhliny byly iniciovány z tupého (oblého) vrubu. Poznamenejme, že krátké trhliny vykazují konečnou rychlost šíření trhliny i při hodnotách nižších než je hodnota ΔK_{th} dlouhých trhlín. Tedy trend v rychlosti da/dN je jiný než bychom očekávali; při rozkmitu napětí 60 MPa rychlost růstu trhliny klesá s rostoucím ΔK a v případě rozkmitu napětí 76 MPa křivka da/dN versus ΔK dokonce vykazuje minimum. K anomálnímu chování krátkých trhlín přispívá řada faktorů. Únavový mechanismus růstu trhliny závisí na tom, zda trhlina je mikrostrukturně nebo mechanicky krátká, jak si ukážeme dále.

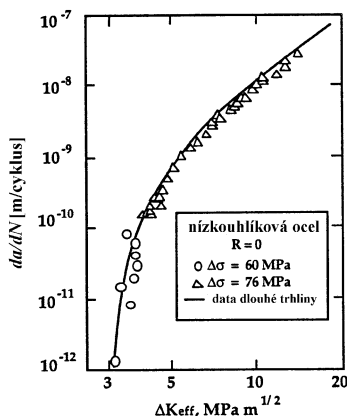
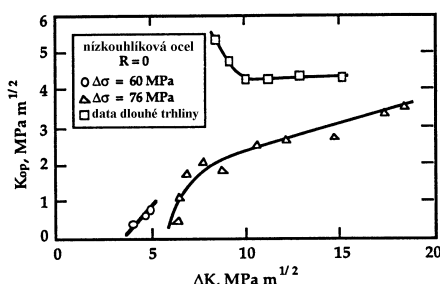
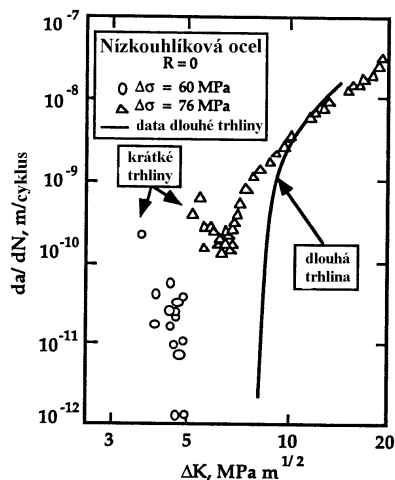
5.1. Mikrostrukturně krátké trhliny.

Mikrostrukturně krátké trhliny mají délku, která je menší nebo srovnatelná s průměrem zrna materiálu. Trhliny s menší délkou než 100 μm jsou považovány obecně za mikrostrukturně krátké. V tomto případě rozměru trhliny již nelze chování materiálu popisovat jako chování homogenního kontinua; v takovém případě je růst významně



ovlivněn mikrostrukturními rysy. Růst mikrostrukturně krátkých trhlin je velice nahodilý; trhlina může růst rychle v jistých intervalech a zastavit se při setkání s bariérami jako jsou hranice zrn a částice sekundární fáze.

5.2 Mechanicky krátké trhliny.



Trhlina o délce mezi 100 μm a 1 mm je mechanicky krátká. V tomto případě je velikost trhliny dostatečná pro aplikaci teorie homogenního kontinua, ale mechanické chování není stejné jako v případě dlouhých trhlin. Pro mechanicky krátké trhliny je charakteristické, že rostou při stejné úrovni ΔK mnohem rychleji než dlouhé trhliny, speciálně v blízkosti prahové hodnoty (← obr. 18).

K rychlejšímu růstu krátkých trhlin přispívají dva faktory: a) velikost plastické zóny a b) zavírání trhliny

Ad a) V případě, že plastická zóna je srovnatelná s velikostí trhliny, pak neexistuje na špičce trhliny elastická singularita a tedy nelze hovořit o faktoru intenzity napětí K jakožto charakteristice napjatosti na špičce trhliny. Můžeme hovořit o efektivní hnací síle, která může být interpretována pomocí Irwinovy korekce délky trhliny na plastickou zónu. El Haddad se spolupracovníky zavedl „skutečnou délku trhliny“, která po přičtení k fyzické délce trhliny dává délku trhliny, která data pro krátkou trhlínu převede na data trhliny dlouhé. Vlastní délka trhliny

je toliko parametrem získaným na základě přizpůsobení výsledkům a neodpovídá rozměrům fyzikální délky trhliny v materiálu. Tanaka, a řada dalších výzkumníků, navrhuje vyhodnotit data v případě významnější plastické deformace na špičce trhliny charakterizováním rychlosti da/dN parametrem ΔJ raději než ΔK .

Ad b) Uvažujeme-li vliv zavírání, pak krátké trhliny vykazují jiné chování při zavírání než trhliny dlouhé a data pro různou velikost trhliny mohou být rozumně zpracována přes veličinu ΔK_{eff} . Obr.

19(a) ukazuje hodnoty K_{op} naměřené pro krátké a dlouhé trhliny na obr. 18. Zavírací zatížení jsou význačně větší v případě dlouhých trhlin, zvláště při nízkých úrovních ΔK . Obr. 19(b), data pro malé i velké trhliny jak leží na jedné závislosti da/dN versus ΔK_{eff} , což propůjčuje věrohodnost teorii vlivu zavírání na chování krátkých trhlin.

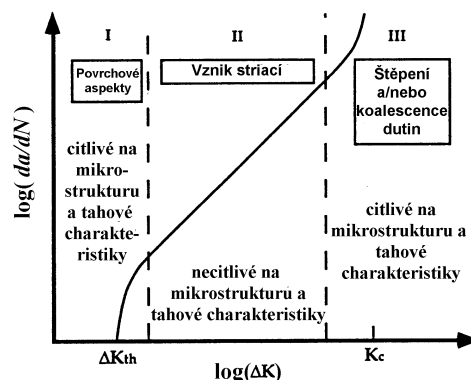
6. Mikromechanismus únavy

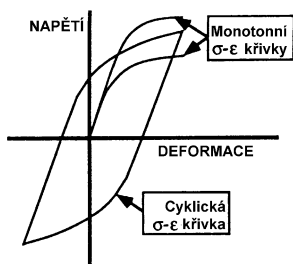
Obr. 20 sumarizuje mechanismy poškození kovů ve třech oblastech křivky růstu únavové trhliny. V oblasti II, kde da/dN poslouchá mocninný zákon, rychlost růstu trhliny je poměrně nezávislá na mikrostruktuře a základních mechanických charakteristikách určených z tahového diagramu, naproti tomu da/dN v každé okrajové oblasti je velice citlivá na tyto proměnné. Popišme si únavový mechanismus v každé z oblastí detailněji.

6.1 Únava v oblasti II

V oblasti II rychlost únavové trhliny není funkcí mikrostruktury i tahových charakteristik. Např. dvě hliníkové slitiny s rozdílnými mechanickými charakteristikami budou mít pravděpodobně velmi podobné charakteristiky růstu únavové trhliny. Nicméně ocel a hliníková slitina vykazují významně rozdílné únavové charakteristiky. Tedy da/dN není citlivé na tahové charakteristiky v rozmezí určitého typu materiálu.

Možným výkladem omezené citlivosti na materiálové charakteristiky je skutečnost, že rychlost růstu únavové trhliny ve slitinách určitého typu je učená pravděpodobně cyklickou křivkou napětí-deformace a ne tahovým diagramem určeným při monotónním zatěžování. Na obr. 21 jsou schematicky porovnány monotónní a cyklická závislost $\sigma \sim \epsilon$ pro dvě různé slitiny stejného materiálu. Slitina s nízkou pevností má tendenci cyklicky zpevňovat a slitina

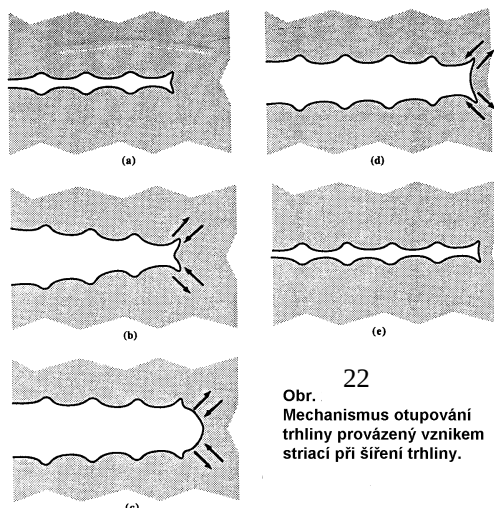




s vysokou pevností cyklicky změkčovat. Ustálená hysterese smyčka obou materiálů je stejná a tedy je necitlivá na počáteční strukturní stav.

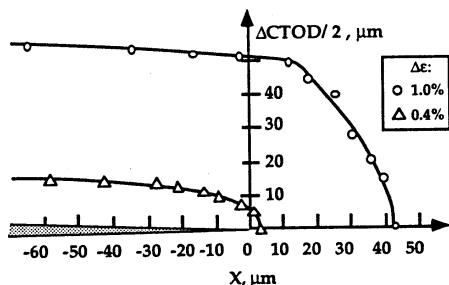
Šíření únavové trhliny je často provázeno vznikem striací na povrchu lomové plochy. Striace jsou malé brázdy, které jsou kolmé na směr šíření trhliny. Obr. 22 ilustruje navrhovaný mechanismus vzniku striací během šíření únavové trhliny. Zaoblení na špičce trhliny roste, když roste zatížení a dojde k velice malému přírůstku trhliny jako důsledku vzniku zóny vytažení (stretch zóny). Skluz je lokalizován v rovinách skloněných pod úhlem 45° k rovině lomu. Když zatížení klesá, směr kluzu se obrací a na čele trhliny se vytvoří záhyb směrem dovnitř. Proces se opakuje v jednotlivých cyklech a v každém cyklu se

vytvoří striace jak na horním, tak i spodním povrchu trhliny. Vzdálenost mezi striacemi podle tohoto mechanismu je rovna přírůstku trhliny za jeden cyklus (da/dN).



22

Obr. Mechanismus otupování trhliny provázený vznikem striací při šíření trhliny.



Druhý možný pohled na únavu je na ni pohlížet jako na mechanismus kumulace poškození, podle kterého je nutný určitý počet cyklů ke vzniku kritické velikosti poškození a tedy určitý čas pro malý přírůstek trhliny. Tento mechanismus byl navržen Lankfordem a Davidsonem, kteří pozorovali, že vzdálenost mezi striacemi nemusí vždy odpovídat přírůstku trhliny za jeden cyklus. K vytvoření jedné striace může být zapotřebí několik cyklů v závislosti na úrovni ΔK ; počet cyklů na striaci podle toho klesá s rostoucím ΔK a tedy vzdálenost mezi striacemi = da/dN při vysokých hodnotách ΔK .

Mnozí z výzkumníků, kteří se pokusili dát do relace pozorovanou rychlost růstu trhliny a mikromechanismus únavy měli jen omezený úspěch. Mechanismus otupování, kde postup trhliny se děje v důsledku stretch zóny, v sobě zahrnuje skutečnost, že nárůst trhliny za cyklus je úměrný $\Delta CTOD$. Z toho však implicitně vyplývá, že da/dN musí být úměrné

$(\Delta K)^2$. Skutečný exponent v Parisově zákoně má typickou hodnotu pro kovy mezi třemi až čtyřmi. Jedno z možných vysvětlení tohoto nesouhlasu je, že představa o úloze mechanismu otupování není správná. Jiné vysvětlení proč exponent má hodnotu větší než 2 může být v tom, že tvar zaoblení trhliny není geometricky podobný při velkých a malých hodnotách K . ←Obr. 23 ukazuje pro měď profil otevření trhliny při dvou různých únavových zatíženích; poznamenejme, že tvary zaoblení trhliny jsou různé.

6.2 Mikromechanismy blízko prahové hodnoty.

Lomová plocha vznikající při únavovém zatěžování v blízkosti prahové hodnoty je plochá, její vzhled se podobá štěpení. Jak se zdá, trhlina sleduje specifické krystalografické roviny a mění směr, když se setká s bariérou, jako je např. hranice zrna.

Rychlost růstu únavové trhliny v této oblasti je citlivá na velikost zrna, jelikož částečně hrubozrnná mikrostruktura vytváří povrchové nerovnosti a tyto nerovnosti indukují zavírání trhliny (obr. 6). Velikost zrna může také ovlivnit v některých případech základní (vlastní) prahovou hodnotu. Jeden z modelů $\Delta K_{th(eff)}$ uvádí, že prahové hodnoty může být dosaženo, když hranice zrn blokuje kluzové pásy a tím jim brání v šíření do sousedících zrn. Toto se podle všeho stává, když velikost plastické zóny je přibližně rovna střední velikosti průměru zrna. Tento model dává do relace velikost zrna a $\Delta K_{th(eff)}$ pomocí vztahu:

$$\sqrt{d} = A \frac{\Delta K_{th(eff)}}{R_e}, \quad (33)$$

kde d je střední průměr zrna a A je konstanta. Tedy základní prahová hodnota vzrůstá s rostoucí velikostí zrna za předpokladu, že mez kluzu je konstantní. Dále platí Hallův Petchův vztah, podle kterého mez kluzu roste, když klesá průměr zrna

$$R_e = \sigma_o + k_y d^{-1/2} \quad (34)$$

Lze tedy říci, že závislost meze kluzu na velikosti zrna vyrovnává tendenci růstu základní prahové hodnoty s rostoucím průměrem zrna.



6.3 Únava při vysokých hodnotách ΔK

V oblasti III dochází k výraznému nárůstu da/dN vlivem interakce mezi únavou a lomovým mechanismem. Vzhled lomové plochy v této oblasti je charakteristický směsí únavových striací, propojováním mikroductin a (v závislosti na materiálu a teplotě) štěpnými fasetami. Celková rychlost růstu může být odhadnuta na základě součtu vlivů různých mechanismů:

$$\left. \frac{da}{dN} \right|_{\text{celková}} = \left. \frac{da}{dN} \right|_{\text{únava}} + \left. \frac{da}{dN} \right|_{\text{spojování-mikroductin}} + \left. \frac{da}{dN} \right|_{\text{štěpení}} \quad (35)$$

Relativní příspěvek únavového mechanismu šíření trhliny klesá s rostoucím $K_{\max}$. Při dosažení K_C je rychlost růstu dána pouze propojováním mikroductin, štěpením, případně oběma mechanismy.

7. Experimentální měření únavového růstu trhliny

Americká společnost pro zkoušení a materiály (The American Society for Testing and Materials – ASTM) vydala standard E 647-93, který shrnuje hlavní rysy zkušební metody měření růstu únavové trhliny. Metodika, která je shrnuta dále, se netýká zavírání trhliny. Příslušná komise ASTM v současné době studuje zavírání trhliny a analyzuje tyto metodiky. V odstavci 7.2 jsou popsány metodiky měření zavírání trhliny, které se v současné době používají.

7.1 ASTM Standard E 647

The Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, (Standard zkušební metody pro měření rychlosti růstu únavové trhliny), ASTM E 647-93 popisuje jak určit da/dN jako funkci ΔK na základě experimentu. Trhlina roste cyklickým zatěžováním – $K_{\min}$ a $K_{\max}$ – a délka trhliny je monitorována během zkoušky.

Požadavky na zkušební tělesa a jejich způsob uchycení jsou prakticky identické s požadavky zkoušky měření lomové houževnatosti. Standard E 647 připouští dva typy zkušebních těles - CT těleso a těleso ve tvaru pásu opatřené centrální trhlinou.

Standard E 647 vyžaduje, aby chování vzorků během zkoušky bylo převážně elastické. V normě je specifikován následující požadavek pro ligament ($W-a$) kompaktního tělesa

$$W - a \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{\max}}{R_e} \right)^2. \quad (36)$$

V normě není specifikována tloušťka zkušební tělesa; tato zkouška se často používá pro hodnocení lomového chování desek používaných pro stavbu letadel. Únavové vlastnosti mohou záviset na tloušťce, podobně jako závisí na tloušťce lomová houževnatost. Následkem toho tloušťka zkušební tělesa bude zpravidla volena stejná jako skutečná tloušťka stěny konstrukce.

Všechna zkušební tělesa musí být před zkouškou opatřena únavovou trhlinou. $K_{\max}$ na konci přípravy únavové trhliny musí být menší než hodnota $K_{\max}$ použitá při hodnocení rychlosti šíření únavové trhliny. Tento požadavek zaručuje, že naměřená rychlost růstu únavové trhliny není ovlivněna efektem zpoždění (retardace).

Délka trhliny se měří během zkoušky periodicky. K měření délky se používá některá z následujících technik – optická metoda – metoda compliance z odlehčovací charakteristiky – metoda měření elektrického potenciálu. Přesné měření délky trhliny optickou metodou vyžaduje měřicí mikroskop s možností měření velkých posuvů. První nevýhoda této metody je, že detekuje růst trhliny pouze na povrchu zkušební tělesa; v případě tlustých zkušebních těles naměřená délka trhliny na povrchu musí být korigována na efekt tunelování trhliny, který je možné zjistit až po rozlomení zkušební tělesa. Druhou nevýhodou je, že výsledky tohoto měření se zpravidla zaznamenávají ručně (automatické optické měření délky trhliny je v současné době možné, ale ve většině mechanických laboratoří je zápis ruční) na rozdíl od jiných technik, u kterých je zápis automatizován. Metoda měření compliance vyžaduje přerušení zkoušky při každém měření délky trhliny. V případě, že vzorek je zatížen po určitou dobu, pak materiál v plastické zóně může creepovat. V agresivním prostředí dlouhá doba zatížení může způsobit růst trhliny korozním praskáním, příp. vytvořením oxidické vrstvy na lomové ploše. Z těchto důvodů měření poddajnosti musí být provedeno co nejrychleji. Norma připouští maximální prodlevu deset minut, je-li to možné, provést měření poddajnosti v čase kratším než jedna minuta.

ASTM E 647 uvádí hlavní zásady dvou typů únavových zkoušek:

1. konstantní amplituda zatěžování, kde K vzrůstá
2. zkoušky s klesající hodnotou K .

V druhém případě amplituda zatěžování klesá během zkoušky, až je dosaženo záporného gradientu hodnoty K . Zkouška s rostoucí hodnotou K je vhodná pro rychlost růstu trhliny větší než 10^{-8} m/cyklus, ale je ji obtížné aplikovat pro nižší rychlosti vzhledem k podmínkám vytvoření počáteční únavové trhliny. Procedura s klesající hodnotou K se používá v případě, že chceme získat hodnoty blízké prahové hodnotě. Protože při změně amplitudy K se může projevit vliv historie, E 647 vyžaduje, aby normalizovaný gradient K byl počítán a vyjádřen ve tvaru

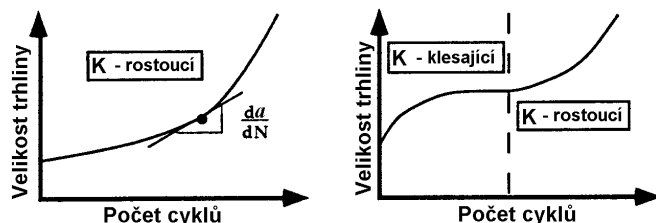


$$G \equiv \frac{1}{K} \frac{dK}{da} = \frac{1}{\Delta K} \frac{d\Delta K}{da} = \frac{1}{K_{min}} \frac{dK_{min}}{da} = \frac{1}{K_{max}} \frac{dK_{max}}{da} \quad (37)$$

Zkouška s klesajícím K je mnohem vhodnější k posouzení vlivu historie, protože předchozí cykly vytváří větší plastické zóny, které mohou brzdit růst trhliny. Zpoždění (retardace) ve zkouškách s rostoucím K nepřináší žádné potíže, protože plastická zóna vytvořená v daném cyklu je nepatrně větší než plastická zóna vytvořená v předcházejícím cyklu. Zkouška s rostoucím K však není imunní na vliv historie zatěžování, protože šířka plastické brázdy vzrůstá s rostoucí trhlinou, což má za následek jiné vlastnosti spojené se zavíráním trhliny než zkouška s konstantní amplitudou K .

ASTM norma doporučuje, aby algebraická hodnota G byla větší než $-0,08 \text{ mm}^{-1}$ v případě zkoušky s klesajícím K . V případě, že zkouška je řízena počítačem, pak může být naprogramován spojitý pokles zatížení tak, aby byl získán požadovaný gradient K . Z jiného hlediska, amplituda zatěžování může klesat po stupních za předpokladu, že velikost skoku bude menší než 10% okamžité hodnoty zatížení ΔF . V každém případě bude zatížení klesat tak dlouho, dokud je dosažena požadovaná rychlost růstu trhliny. Zpravidla již není vhodné provádět měření pro rychlost menší než $da/dN = 10^{-10} \text{ m/cyklus}$.

Standard E 647 zahrnuje v hrubých rysech metodiku pro hodnocení vlivu historie při zkoušce s klesajícím K . Za prvé je udělána zkouška při záporném G až rychlost růstu poklesne na určitou hodnotu. Pak je gradient K obrácen a trhlina roste, až rychlost jejího růstu je zcela mimo oblast prahové hodnoty. Části zkoušky odpovídající klesajícímu K a rostoucímu K musí vykázat stejnou $da/dN \approx \Delta K$ křivku. Tato dvojstupňová procedura je časově náročná, ale provádí se pouze jednou pro daný materiál a poměr R k zaručení, že skutečné prahové chování je dosaženo následující zkouškou s klesajícím K .



Obr. 24 ilustruje schematicky typické křivky délka trhliny versus počet cyklů. Pro odvození hodnot da/dN musíme experimentální křivky diferencovat. Standard E 647 navrhuje dvě alternativní numerické metody pro výpočet derivace. Lineární diferenciací je jednodušší, ale je zatížena velkým rozptylem. Derivace v daném bodě křivky může být také získána tak, že proložíme několika okolními body parabolou.

Lineární metoda je založena na výpočtu sklonu ze dvou sousedních bodů (a_i, N_i) a (a_{i+1}, N_{i+1}) . Rychlost růstu trhliny pro $a = \bar{a}$ je dána vztahem

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_{\bar{a}} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i}, \text{ kde } \bar{a} = \frac{a_{i+1} + a_i}{2} \quad (38)$$

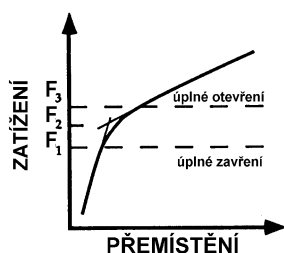
Druhý způsob zahrnuje proložení kvadratické rovnice v určitém intervalu křivky délka trhliny versus počet cyklů a derivování matematicky. Je vybrána skupina $(2n+1)$ sousedních bodů, kde n je typicky 1, 2, 3 nebo 4 a (a_i, N_i) je střední hodnotou z $(2n+1)$ bodů. Následující rovnice jsou prokládány v intervalu $a_{i-n} \leq a \leq a_{i+n}$:

$$\hat{a}_j = b_0 + b_1 \left(\frac{N_j - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_j - C_1}{C_2} \right)^2, (i-n \leq j \leq i+n) \quad (39)$$

kde b_0 , b_1 a b_2 jsou koeficienty proložené křivky a $\hat{a}_j$ je proložená hodnota délky trhliny po N_j cyklech. Koeficienty jsou dány $C_1 = (N_{i-n} + N_{i+n})/2$; $C_2 = (N_{i-n} - N_{i+n})/2$. Rychlost růstu trhliny $\hat{a}_i$ je dána derivací rov. (39)

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_{\hat{a}_i} = \frac{b_1}{C_2} + \frac{2b_2(N_i - C_1)}{C_2^2} \quad (40)$$

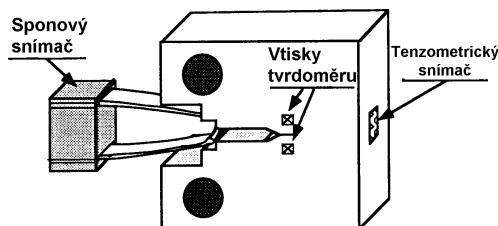
V normě E 647 je program psaný ve Fortranu na prokládání křivky a výpočet da/dN .



7.2 Měření zavírání

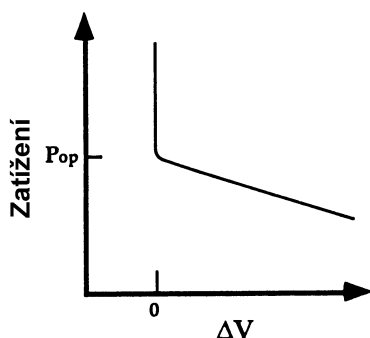
V současné době existuje řada experimentálních metod pro měření zavírání. Allison udělal přehled existujících metod.

Většina měření zavírání je odvozena z tuhosti. Obr. 25 ilustruje schematicky závislost zatížení – přemístění tělesa s trhlinou, které vykazuje zavírání. Přesná hodnota zatížení kdy dochází k zavírání je obtížně definovatelná, protože zpravidla existuje široká oblast zatížení, kde trhlina je částečně zavřena. Zavírací zatížení může být definováno odchylkou od linearitě buďto v případě zcela otevřeném, příp. zcela zavřeném (F_3 příp. F_1), nebo extrapolací do bodu F_2 .



snímače. Špatné uchycení snímače může mít za následek nelinearitu, příp. hysterese. Hystereze může však také být způsobena plastickou deformací na špičce trhliny. Měření přemístění daleko od špičky trhliny má zpravidla malou citlivost. Technika zpracování signálu nazývaná „diferenční poddajnost“ může zvýšit citlivost při celkovém měření přemístění. Základní poddajnost je odvozena ze zcela otevřené trhliny v oblasti křivky síla-přemístění, jak ilustruje obr. 25. Diferenční přemístění sponového snímače ΔV je definováno následovně:

$$\Delta V = k(V - CF) \quad (41)$$



kde C je poddajnost tělesa v případě úplně otevřené trhliny a k je faktor zesílení. Obr. 27 ukazuje schematicky závislost zatížení – diferenční přemístění. V případě, že těleso je odlehčováno, původně svislá závislost vykazuje konečný sklon, když dojde k zavírání trhliny. Citlivost této metody je dána faktorem k .

Tenzometr na zadní straně vzorku má poměrně velkou citlivost. Toto měření není ovlivněno hysteresí v případě malé plastické zóny na špičce trhliny.

Interferometrická metoda umožňuje lokální měření zavírání trhliny a je založena na interferenci laserových paprsků odražených z míst vpichů tvrdosti.

Zavírání trhliny je trojrozměrný jev. Vnitřek vzorku vykazuje jiné chování při zavírání než povrch. Proto může být rozdíl mezi

interferometrickou metodou a prvními dvěma metodami.

8. Metodika tolerovatelného poškození

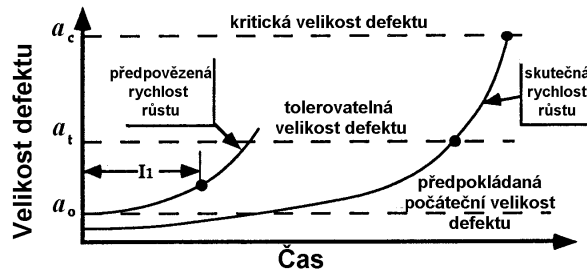
Závěrem popíšeme, jak využít únavová data a modely růstu trhliny pro zajištění bezpečnosti konstrukce jako součást schématu označovaného jako tolerovatelné poškození. Termín tolerovatelné poškození má různý význam, ale zpravidla pod tímto termínem rozumíme metodiku návrhu bezpečné konstrukce, která na základě lomové mechaniky předpovídá jak zbytkovou životnost konstrukce, tak i inspekční intervaly během provozu konstrukce. Tento přístup je zpravidla používán na konstrukce, ve kterých může docházet k časově závislému růstu trhlín (tj. únava, korozní praskání, creepový růst trhliny). Jak říká samotný název, filozofie tolerovatelného porušení počítá s defekty v konstrukci, pokud tyto defekty mají menší velikost než je velikost kritická.

Procedura zabránění lomu se mění s uvažováním různých provozních (pracovních) podmínek konstrukce; podrobný popis jednotlivých přístupů je mimo rámec našeho kurzu. Protože jsme se zabývali únavou, zůstaneme u tohoto problému, ale v principu dále uvedený postup může být v principu použitý pro všechny typy časově závislého růstu trhlín.

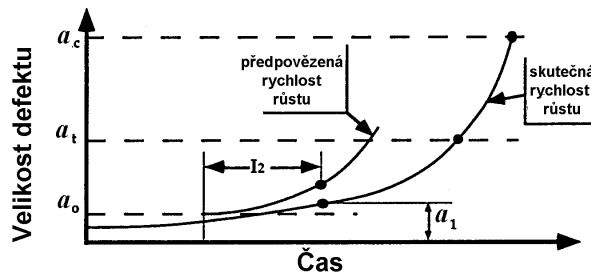
Jedním z prvních úkolů analýzy tolerovatelného poškození je odhad kritické velikosti defektu – a_c . V přednášce o lomové houževnatosti jsme hovořili o tom, jak se počítá kritická velikost trhliny. V závislosti na vlastnostech materiálu, havárie konstrukce z titulu materiálu může být způsobena buďto lomem nebo plastickým kolapsem.

Pokud byla odhadnuta kritická velikost defektu, pak se zvolí bezpečnostní faktor k určen tolerovatelné velikosti defektu a_t . Bezpečnostní faktor je často volen libovolně, ale mnohem racionálnější volba je založena na neurčitosti vstupních parametrů (napětí, houževnatost) v analýze havárie. Další faktor, který je třeba brát v úvahu při specifikaci tolerovatelné velikosti defektu je rychlost růstu trhliny; a_t by měla být zvolena tak, že da/dt při této velikosti trhliny je relativně malá a tedy zbývá dostatečně dlouhá doba nutná k zvětšení trhliny z a_t na a_c .

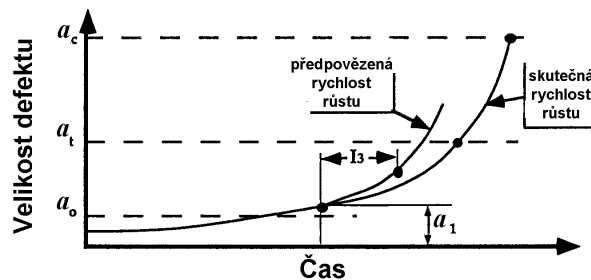
V proceduře zabránění lomu je analýza prováděná pomocí lomové mechaniky úzce svázána s nedestruktivními (defektoskopickými) zkouškami (NDT). Defektoskopické zkoušky dávají vstupní hodnoty k analýze šíření defektu, která pak zpětně určuje délku inspekčních intervalů. Konstrukce je defektoskopy prověřena na začátku provozu a je určena počáteční velikost defektů. Jestliže nebyly detekovány významné defekty, počáteční velikost defektu je zvolena a_0 , tato velikost defektu odpovídá největšímu defektu, který může být přehlédnut použitou defektoskopickou zkouškou. Velikost a_0 by neměla být zaměňována s detekovatelnou velikostí dané NDT, což je nejmenší defekt, který může být detekován použitou NDT technikou (když má defektoskop dobrý den). V řadě případů a_0 je významně větší, než detekovatelná velikost a to díky podmínkám dostupnosti všech částí konstrukce a zručnosti defektoskopů.



(a) určení prvního inspekčního intervalu, I_1



(b) určení druhého inspekčního intervalu, I_2



(c) určení třetího inspekčního intervalu, I_3

◀ Obr. 28 (a) postup určení prvního inspekčního intervalu v konstrukci. Spodní křivka vyjadřuje skutečné chování nejhoršího defektu v konstrukci, zatímco horní křivka předpovídá růst předpokládaného defektu počáteční velikosti a_0 . Provede se výpočet doby nutné k růstu defektu o velikosti a_0 na velikost a_t . První inspekční interval by měl být kratší než tato doba, za účelem zabránění nárůstu trhliny přes délku a_t před první inspekci. V případě, že při inspekci není v konstrukci detekována trhlina větší než a_0 je druhý inspekční interval I_2 volen stejný jako interval I_1 – obr. 28 (b). Předpokládejme, že další inspekce odhalí trhlínu délky a_1 , která je větší než a_0 . Další inspekční interval I_3 má být menší než I_2 – obr. 28 (c). Inspekční intervaly se progresivně zkracují podle toho jak se konstrukce blíží ke konci své životnosti. Konstrukce musí být opravena, nebo vyřazena z provozu, když velikost defektu dosáhne hodnotu a_t , nebo když požadované inspekční intervaly jsou příliš krátké a brání běžnému provozu.