VŠB-TU OSTRAVA

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálového inženýrství

Lomová mechanika

Učební text

doc. Ing. Stanislav Lasek, Ph.D.

Ostrava-Poruba, 2013

Předmluva

Tato studijní opora je určena především pro studenty kombinované formy bakalářského studia, kteří mají v omezeném rozsahu přímou výuku s učitelem. Tato opora je koncipována pro úvodní studium předmětu Lomová mechanika a (v 1. Ročníku magisterského studia, specializace Diagnostika a design materiálů) má mít také motivační úlohu k dalšímu a rozsáhlejšímu studiu daného předmětu.
Předmět Lomová mechanika navazuje hlavně na předměty Fyzika, Nauka o materiálech a Základy pevnosti a pružnosti. Lomová mechanika je multidisciplinární technický obor o porušování materiálů vlivem trhlin a lomů. Úzce také souvisí s diagnostikou, defektoskopií a jakostí výrobků.

Poznatky z předmětu Lomová mechanika jsou uplatňovány při posouzení poškození materiálu anebo porušení konstrukcí, pro zvyšování spolehlivosti a životnosti dílců a zařízení. Znalosti z daného předmětu lze využít při projektování a konstrukci mnoha dílců s požadavky na snižování hmotnosti (hlavně dopravních prostředků), úspory energie a snižování celkových nákladů při provozu zařízení. Poznatky z lomové mechaniky se dále využívají při výzkumu a vývoji nových progresivních materiálů, zejména vysokopevných slitin a keramických materiálů.

Studijní opora je rozdělena na 8 hlavních kapitol, z nichž každá obsahuje předepsané náležitosti: čas věnovaný studiu, cíle studia, vlastní výklad, shrnutí poznatků anebo hlavních názvů. Ke konci kapitol jsou otázky, úlohy vyřešené anebo úlohy k samostatnému řešení s výsledky pro kontrolu. Zároveň v rámci jednotlivých kapitol je uvedena literatura a další zdroje poznatků a informací pro studium.

Postupy řešení a výsledky příkladů studenti mohou konzultovat s vyučujícím přímo v jeho kanceláři anebo prostřednictvím e-mailu, případně telefonicky.
V případě nejasnosti, dotazů anebo připomínek kontaktujte autora opory na e-mailové adrese (stanislav.lasek@vsb. cz) nebo telefonicky na tel. č. 596995205.

Úspěšné zvládnutí předmětu Lomová mechanika Vám přeje autor opory

doc. Ing. Stanislav Lasek, Ph.D.

Obsah

1. ÚVOD K LOMOVÉMU CHOVÁNÍ MATERIÁLŮ

Čas věnovaný studiu této kapitoly je cca 2 hod.

Navrhování součástí nebo konstrukcí je obvykle spojeno s požadavkem na minimalizaci možného porušení, snižování spotřeby materiálu i celkových nákladů. Proto je důležité pochopit chování materiálů v praxi a procesy porušení – např. křehké lomy, únavové porušení anebo korozní praskání. Zároveň je nutné respektovat zásady, které mají být využívány pro zabránění porušení v provozu.

Cíl:

Po prostudování této kapitoly budete umět

- Vyjádřit a použít skutečné deformace a skutečná napětí.
- Charakterizovat křehké a tvárné lomy z makroskopického i mikroskopického hlediska.
- Popsat základní podmínky vzniku trhliny pro křehký a tvárný způsob porušení.
- Vymezit obsah pojmu lomová mechanika

Výklad

Velký rozmach výroby a použití ocelových konstrukcí byl v minulém století doprovázen porušením a haváriemi konstrukcí (mostů, rozměrných zásobníků, lodí, kotlů, dvojkolí železničních vozidel, apod.). Hlavní příčinou uvedených havárií byl výskyt defektů v materiálech, v některých případech také špatné konstrukční návrhy nebo nepředvídané provozní podmínky.

K dalším problémům (i katastrofickým případům v minulém století) docházelo v důsledku náhlých křehkých lomů ve svařovaných konstrukcích. Hlavními iniciátory nebezpečných lomů byly **materiálové defekty a konstrukční vruby**, ve kterých dochází ke koncentraci napětí a ke vzniku trojosého stavu napjatosti. Lomy měly křehký charakter a k jejich vzniku přispěly změny složení a struktury materiálu v oblasti svarových spojů. Pro snížení či odstranění rizika křehkého lomu byly zdokonaleny technologie svařování a používány defektoskopické kontroly. Významné bylo též omezení výskytu míst s vysokou koncentrací napětí.

Vývoj ocelí s vyšší pevností umožňoval realizovat konstrukce s nižší hmotností, menšími příčnými rozměry. Nevýhodou těchto ocelí je relativně nižší houževnatost, tj. menší odpor proti nestabilnímu šíření trhlin, a tedy ke křehkému lomu.

Šířením trhlin dochází v původně celistvém materiálu k vytváření nových povrchů, tj. lomových ploch.

Lom je degradačním procesem časově i prostorově nehomogenním, skládá se z etapy iniciace (vzniku, v řadě lokalizovaných míst) a z etapy šíření a propojování jednotlivých necelistvostí.

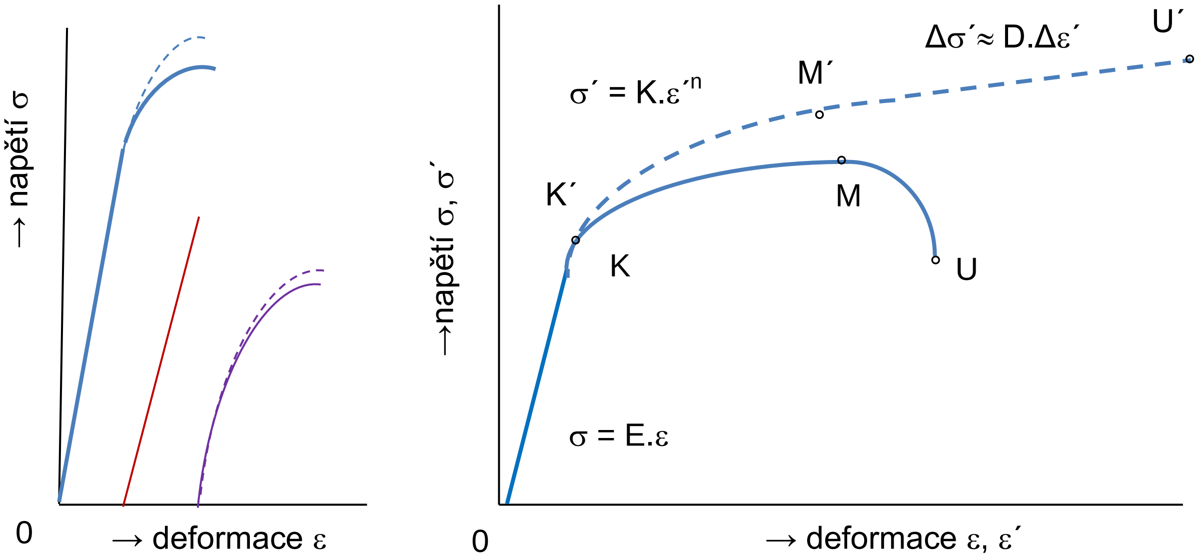
Vedle negativní úlohy lomových procesů je třeba se zmínit o jejich praktickém využití s prospěšným anebo kladným výsledkem, např. lomové dobývání ložisek nerostných surovin, lámání ledu ledoborcem, oddělení materiálu pomocí ulomení, drcení křehkých materiálů.

Následující první podkapitola je vhodná pro zopakování základních pojmů z oblasti nauky o materiálu, pružnosti a pevnosti, potřebných pro studium dalších kapitol z oblasti porušení materiálů a lomové mechaniky.

1.1 Hlavní napěťově deformační charakteristiky

Při popisu napěťově deformačního a dalšího lomového chování materiálů se zpravidla vychází z tahových zkoušek a diagramů, obr. 1.1. Tahová zkouška spočívá v pomalém zatěžování zkušební tyče (vzorku, výrobku), zpravidla až do lomu.

Smluvní (konvenční) diagram $\sigma = f(\varepsilon)$. Skutečný (reálný) diagram $\sigma' = g(\varepsilon')$



Obr. 1.1. Porovnání smluvních a skutečných tahových diagramů křehkých a tvarných kovových materiálů. Rozdíly do meze kluzu (mezi smluvním a skutečným diagramem – čárkovaně) jsou zanedbatelné.

Základní mechanické vlastnosti jsou stanoveny na základě smluvního diagramu v souřadnicích napětí σ - poměrná deformace ε a s využitím naměřených hodnot předepsaných rozměrů vzorku:

Mez kluzu $R_p = \frac{F_p}{S_0}$ [MPa], kde S_o je počáteční nosný průřez, F_p – síla na mezi kluzu (bod K)

Mez pevnosti $R_m = \frac{F_m}{S_0}$ [MPa], kde F_m je síla na smluvní mezi pevnosti (bod M)

Tažnost	$A = \frac{Lu-Lo}{Lo}.100$ [%], kde L_o je počáteční měřená délka tyče, L_u - po ulomení
Kontrakce	$Z = \frac{So-Su}{So}.100$ [%], kde S_o je počáteční průřez $S_o \perp F$, S_u – v místě ulomení

Smluvní mez pevnosti je užitečná pro klasifikaci a porovnání materiálů, pro konstrukční výpočty nosnosti.

Pro přesnější popis lomového chování materiálu je nutno uvažovat skutečná napětí

$$\boldsymbol{\sigma' = \frac{F}{S}}\,, \tag{1.1}$$

kde S je skutečný průřez kolmý na působící sílu F, a skutečné (logaritmická) deformace

$$\boldsymbol{\varepsilon' = \ln \frac{L}{L_o}}, \tag{1.2}$$

kde L je délka tyče při zatížení silou F a Lo je počáteční délka tyče (při F = 0). Mezi smluvními a skutečnými parametry lze odvodit vztahy: $\sigma' = \sigma(1+\varepsilon)$ a $\varepsilon' = \ln(1+\varepsilon)$. Smluvní diagram lze transformovat na skutečný nebo naopak.

Skutečná pevnost, resp. lomové napětí

$$\boldsymbol{\sigma_u' = \frac{F_{u'}}{S_u}} \tag{1.3}$$

Skutečná deformace v místě lomu (ve středu krčku) - tzn. lomová deformace

$$\boldsymbol{\varepsilon_u' = \ln \frac{1}{1-Z}}\;. \tag{1.4}$$

Do meze úměrnosti platí Hookův zákon, tj. lineární závislost mezi napětím a elastickou (pružnou) deformací

$$\sigma = E.\varepsilon \text{, resp. } \boldsymbol{\sigma' = E.\varepsilon'}, \tag{1.5}$$

kde E je modul pružnosti v tahu. S rostoucí deformací se zvyšuje napětí nutné pro pokračování další deformace – dochází ke zpevňování. Z hlediska probíhajících fyzikálních procesů, jejichž projevem je zpevňování, je výhodné sledovat závislost skutečného napětí na skutečné deformaci. Empirický Ramberg-Osgoodův vztah

$$\boldsymbol{\sigma' = K.\varepsilon'^{n}} \tag{1.6}$$

platí v oblasti rovnoměrné plastické deformace (mezi body K´a M´), kde materiálová konstanta K se též nazývá pevnostní parametr (součinitel) a **n je exponent deformačního zpevnění**, který charakterizuje intenzitu zpevnění plastickou deformací. Obecně n = 0 - 1, u kovů a slitin zpravidla: n = 0,1 - 0,5.

Pro ideálně elasticko- plastický materiál n = 0, pro lineárně elastický materiál n = 1.

Pro nerovnoměrnou deformaci po vzniku krčku (K´- U´) je možno použít přibližný aproximativní vztah mezi přírůstky napětí a deformace $\Delta\sigma' \approx D.\Delta\varepsilon'$, kde D je modul zpevnění.

Skutečné napětí je zde průměrné tahové jednoosé napětí ve středu krčku (v okamžiku před lomem), v mikroskopických objemech materiálu lokální maxima napětí jsou mnohem vyšší, hlavně z důvodu koncentrace napětí na částicích, kolem mikrodutin, mikrotrhlin apod.

Pro srovnání, při smluvní pevnosti oceli R_m = 500 MPa, může být skutečná pevnost (lomové napětí) σ_u' = 1000 MPa, přitom teoretická pevnost železa $\sigma_t' \approx 15000\ MPa$.

Hustota elastické deformační energie je dána známým vztahem $w_e = \frac{\sigma.\varepsilon_e}{2}$, kde ε_e je elastická složka deformace a napětí $\sigma = E.\varepsilon_e$. Práce vnější síly vynaložená na deformaci materiálu se rovna vnitřní elastické energii W_e a plastické deformační energii W_p, resp. jejím přírůstkům.

Celková anergie $W_c = W_e + W_p$ nebo podobně pro hustotu energie $w_c = w_e + w_p$, která je úměrná ploše pod tahovým diagramem v souřadnicích skutečná deformace - skutečné napětí:

$$\mathbf{w_c} = \int_0^{\varepsilon_u'} \boldsymbol{\sigma' \, d\varepsilon'} \tag{1.7}$$

S využitím vztahu $\sigma' = K.\varepsilon'^{n}$ pak $w_c = \int_0^{\varepsilon_u'} K.\,\varepsilon' \, d\varepsilon' = \frac{K}{1+n} (\varepsilon_u')^{1+n}$. Z fyzikálního hlediska hustota plastické energie, která je úměrná ploše pod skutečným diagramem, vyjadřuje houževnatost materiálu.

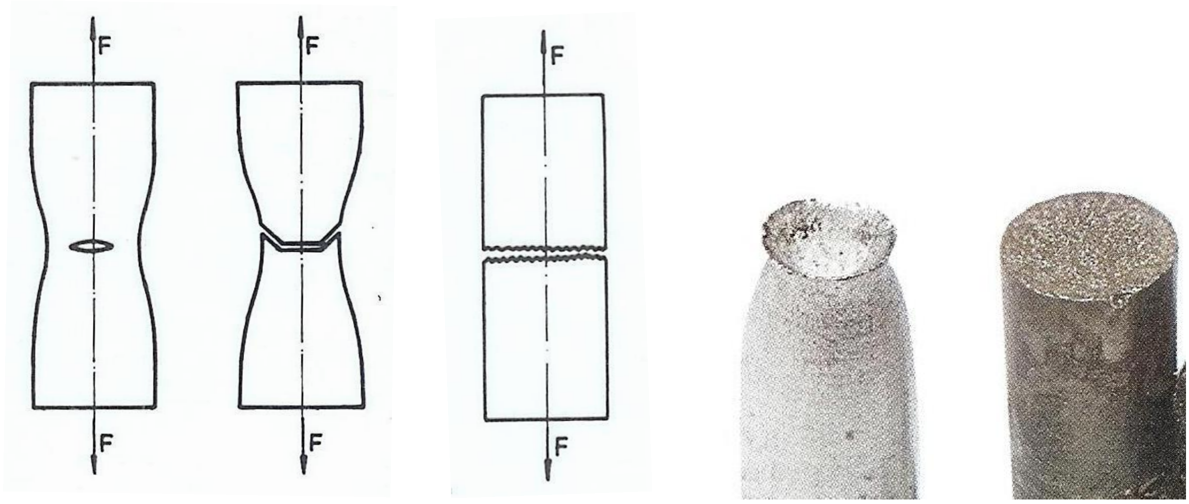
1.2 Základní poznatky o lomech

V této kapitole jsou zopakovány některé poznatky z předmětu nauka o materiálu nebo pružnost a pevnost.

Lomy a mezní stavy je možno klasifikovat podle několika hledisek:
Podle velikosti plastické deformace: Tvárný (houževnatý), křehký (štěpný), smíšený
Podle možnosti a rychlosti šíření: Trhliny a lomy stabilní nebo nestabilní.
Podle podmínek degradačních procesů: únavové lomy, korozní praskání, vodíkové praskání, lomy při tečení, trhliny vznikající při opotřebení.
Podle rozvoje vzhledem k hranicím zrn: interkrystalické, transkrystalické, smíšené.

Příklady několika typických lomů a detailů lomových povrchů jsou uvedeny na obr. 1.2 - 1.4. Zkoumáním trhlin a lomových ploch s ohledem na příčiny a mechanismy porušení se zabývá obor **fraktografie**.

Makrofraktografie dává integrální obraz o lomovém procesu na základě makroskopických znaků lomové plochy, viditelných pouhým okem, pomocí lupy anebo světelného mikroskopu (stereomikroskopu) se zvětšením maximálně 100 x.

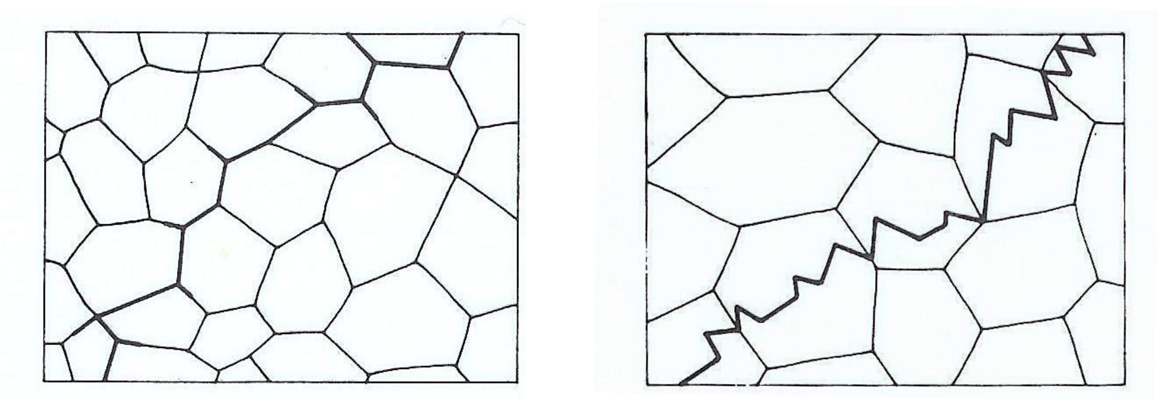


Obr. 1.2 Scéma tvárného a křehkého lomu – makroskopický pohled

Tvárné lomy anebo houževnaté lomy jsou předcházeny nebo doprovázeny trvalou plastickou deformací. Na houževnaté lomy se spotřebuje více energie – vysokoenergetické lomy.

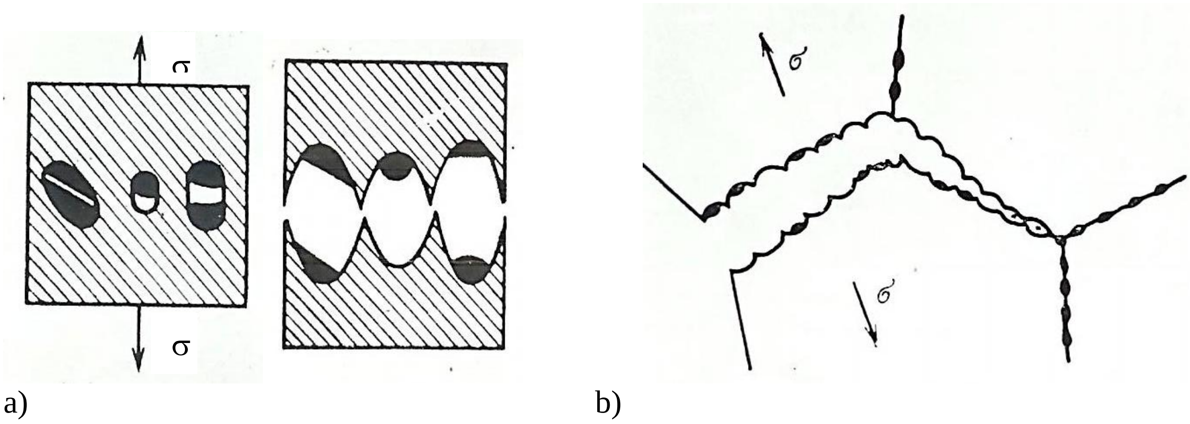
Obr. 1.3 Lopatka spojená s hřídelí svarem byla. provozována poměrně krátkou dobu v potrubí čerpací soustavy do vzniku porušení (trhliny a lomu) u svarového spoje

Mikrofraktografie studuje lomovou plochu při vysokém zvětšení a získává informace o mechanismu porušování materiálu na základě mikroskopických znaků (stop), jako jsou štěpné roviny, interkrystalické nebo transkrystalické fazety (obr. 1.4 a 1.6), sekundární mikrotrhliny, mikroskopické dutiny, (obr. 1.6) apod.



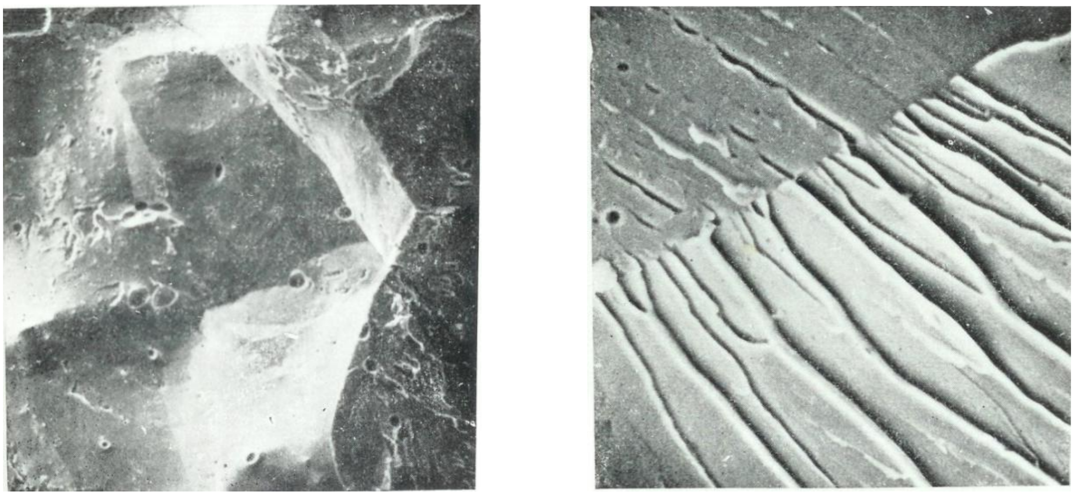
a) *b)*

Obr. 1.4 Schéma interkrystalického a transkrystalického štěpného křehkého lomu. Lomový profil povrchu je vyznačen tučně.



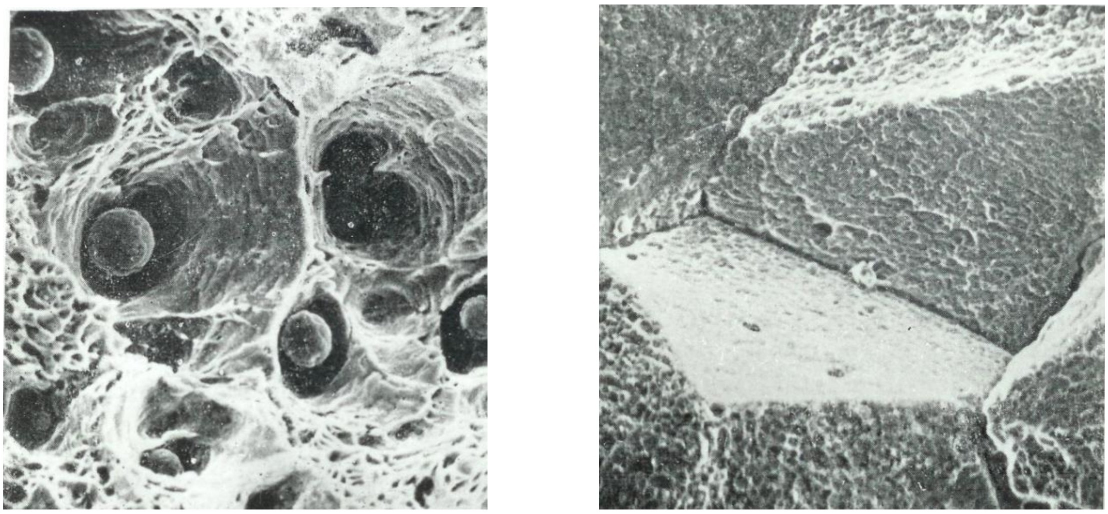
a) b)

Obr. 1.5 Schéma dutinového transkrystalického mechanismu tvárného porušení(a). Schéma interkrystalického dutinového porušení, šíření trhliny(b)



a) b)

Obr. 1.6 Křehký lom a) mezikrystalový (interkrystalový), b) transkrystalový. V kovech s kubickou prostorově centrovanou mřížkou probíhá transkrystalové štěpení podél krystalografických rovin typu {100 }. Rastrovací elektronový mikroskop (zv. 1000x)



a) b)

Obr. 1.7 Oblast dutinového transkrystalického tvárného porušení (a), REM, 800 x. Dutinové interkrystalické porušení, vyvolané precipitací fází po hranicích zrn (1000x)

Vznik a rozvoj mikroskopických dutin je doprovázen plastickou deformaci a spotřebou energie. V případech rozsáhlejší plastické deformace vznikají **vysokoenergetické lomy**.

Pomocí fraktografických rozborů porušených dílců a částí zařízení můžeme zjistit, co bylo příčinou porušení anebo kdo je viníkem havárie (technolog, konstruktér, provozovatel). Výsledky fraktografické analýzy jako objektivní důkazový materiál, mohou být použity při soudních či arbitrážních sporech.

1.3 Rozvoj lomů v kovech

Rozdíl v hodnotách mezi ideální a reálnou pevností kovů neplyne jen z existence mřížkových poruch, ale též z rozdílného mechanismu vzniku a šíření lomu ve skutečných polykrystalických materiálech oproti představě náhlého porušení celého průřezu v tzv. ideálních kovech. Lom v reálných kovech se uskutečňuje procesem deformace a lokálního porušení na špici pomalu nebo rychle se šířící trhliny. Z toho plyne, že **lomový proces se uskutečňuje ve více fázích (etapách)**, které lze stručně charakterizovat takto:

a) Vznik (iniciace) trhliny

Trhlina může vzniknout už ve výrobním procesu (apriorní trhlina) anebo během namáhání tělesa. Pod pojmem **trhlina** rozumíme trvalé odtržení atomových vazeb za současného vzniku nových povrchů. Trhlina může vzniknout v důsledku mechanického, tepelného anebo chemického účinku. Tyto faktory mohou působit i současně, např. korozním praskání při zvýšených teplotách.

Mechanismy iniciace trhlin při různých způsobech namáhání jsou popsány v dalších kapitolách.

b) Stabilní růst (šíření) trhliny

Při stabilním růstu se délka trhliny zvětšuje plynule malou rychlostí. Trhlina může růst, když je hodnota napětí:

- stoupající,
- konstantní (např. při tečení),
- časově proměnlivá (cyklické namáhání při únavě).

Stabilní růst trhliny se prakticky také uplatňuje při tvárném (houževnatém) lomu kovových materiálů (kromě zmíněných případů tečení a únavy).

c) Iniciace nestabilní trhliny

Iniciační stádium nestabilní trhliny je časový okamžik na začátku přechodu od stabilní trhliny anebo od stabilního rozvoje trhliny k jejímu nestabilnímu šíření. Trhlina se podle zásad lomové mechaniky začne nestabilně šířit, když energie elastické napjatosti dosáhne hodnotu povrchové energie nově vznikajících povrchů rozbíhající se trhliny. Tento stav nastane v případech, kdy délka trhliny anebo hodnota působícího napětí dosáhne kritickou velikost.

d) Nestabilní růst (šíření) trhliny

Nestabilní šíření trhliny probíhá při konstantním napětí při stoupající rychlosti a působením elastické energie nahromaděné v tělese. Nestabilní trhlina poruší těleso částečně nebo úplně na dvě anebo více částí. Přebytečná volná elastická energie, která se nespotřebovala na šíření trhliny, se přemění na kinetickou energii oddělených části tělesa a na zvukový efekt doprovázející porušení.

e) Zastavení nestabilní trhliny

Nestabilní trhlina se při svém rozvoji zastaví, když se změní podmínky, které ovlivňují její nestabilní šíření, tzn.

- pokud se zvýší odpor proti nestabilnímu šíření (zvýšením teploty, zvýšením houževnatosti materiálu apod.)
- když se náhle sníží napětí (trhlina přejde do většího průřezu),
- když náhle poklesne energie elastické napjatosti na nepatrnou hodnotu.

Poruchové stavy v provozu, které vznikají z materiálových příčin, se vyskytují zejména při složitých podmínkách namáhání:
- při dynamickém namáhání svařovaných konstrukcí za nízkých teplot,
- při cyklickém zatěžování,
- při namáhání materiálu v oblasti vysokých teplot (při tečení)
- při spolupůsobení korozního prostředí, včetně vodíkového praskání.

1.4 Odolnost proti křehkému porušení

Křehké porušení je možno považovat za separaci (oddělení) části materiálu tělesa, která nastává při nominálním napětí nižším, než je mez kluzu materiálu, zjištěná statickou tahovou zkouškou.

Křehké porušení se vyznačuje těmito hlavními znaky:

a) vzniká při napětí nižším než je mez kluzu materiálu ($\sigma < R_p$),
b) před porušením a v průběhu lomu nedochází k větší makroplastické deformaci,
c) vzniká náhle a šíří se vysokou rychlostí (až nad 1000 m/s),
d) lomová ploch je orientována kolmo na největší normálové tahové napětí
e) energie plastické deformace spotřebované na porušení je minimální (nízkoenergetický lom),
f) uskutečňuje se štěpným transkrystalickým mechanismem anebo interkrystalickým oddělením (štěpením) a má obvykle krystalický vzhled.

Porušení části stroje nebo konstrukce má zpravidla nepříznivé důsledky. Vzniká často na začátku životnosti konstrukce bez předcházejících příznaků. Nejčastěji se vyskytuje ve svařovaných ocelových konstrukcích, zřídka na slitinách hliníku.
Na základě analýzy mnoha případů poškození křehkým lomem je možno uvést tyto hlavní **faktory a podmínky, které podporují vznik křehkého lomu**:

a) mikroskopické a makroskopické koncentrátory napětí (vruby, trhliny, náhlé změny průřezu apod.),
b) velké tloušťky materiálu,
c) dynamické namáhání,
d) velká energie elastické deformace v namáhaném tělese (kumulovaná v systému)
e) nízké teploty.

Křehkost však není typická vlastnost pro všechny kovy a podmínky. Vzniká pouze u některých kovů a to za určitých podmínek zatížení a stavu struktury. Z tohoto hlediska je

možno křehkost definovat nikoli jako vlastnost, ale jako stav materiálu za daných podmínek namáhání.
Mikroskopickou podstatu porušování kovů a jejich slitin se vysvětluje hlavně v rámci fyzikální metalurgie. Proto je fyzikálně metalurgické hledisko důležitým doplněním poznání křehkého porušení kovů a jejich slitin, které vysvětluje z mikroskopického strukturálního hlediska, včetně příčiny ztráty stability lomového procesu. Podstatou vysvětlení je mikroskopická analýzy příčin **změny mikro-mechanismu porušení**, a tím také velikosti energie spotřebované na porušení.

Z pohledu fyzikální metalurgie budou v definici křehkého porušení pro různé materiály určité odlišnosti. Uvedeme dále vymezení křehkého porušení pro tři nejvíce používané skupiny kovových konstrukčních materiálů, pro které existuje nebezpečí křehkého porušení, a to pro oceli nízké a střední pevnosti, vysokopevné oceli a slitiny hliníku o vyšší pevnosti.

Oceli o nízké a střední pevnosti
V nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelích nastává křehké porušení nestabilním lomem při nominálním napětí menším, než je mez kluzu. Křehké porušení těchto ocelí souvisí se změnou mikromechanismu porušení vlivem snížení teploty anebo zvýšením rychlosti zatěžování. Vlivem teploty a rychlosti zatěžování se mění mikromechanismus lomu z tvárného dutinového na štěpný a klesá energie spotřebovaná na porušení. Z mikroskopického hlediska se nestabilní lom uskutečňuje štěpným mechanismem.

Vysokopevné oceli
Ve vysokopevných a nástrojových ocelích nastává křehké porušení nestabilním lomem při zatížení, které je nižší než zatížení odpovídající mezi kluzu. Vliv teploty a rychlosti zatížení na mikromechanismus porušení těchto ocelí je mnohem menší a závisí na složení a tepelném zpracování dané oceli. Z mikroskopického hlediska se porušení může realizovat interkrystalickým anebo transkrystalickým štěpným lomem, ale i tvárným lomem a v různých oblastech lomové plochy může být podíl štěpného a tvárného lomu různý.

Hliníkové slitiny s vyšší pevnosti
Křehké porušení hliníkových slitin nastává nestabilním lomem při zatížení, které je nižší jako zatížení odpovídající mezi kluzu. V hliníkových slitinách nedochází ke změně mikromechanismu porušování vlivem teploty (v teplotní oblasti běžného použití známých slitin).

Kromě těchto nejvíce používaných a známých konstrukčních materiálů se nebezpeční křehkého lomu vyskytuje také v dalších slitinách, intermetalických sloučeninách, v keramických materiálech, kompozitních materiálech, ve výrobcích práškové metalurgie a v amorfních materiálech (skla). Křehkému porušení podléhají také plasty, zejména ve skelném stavu, dřevo a dřevěné materiály, stavební materiály (beton) a v neposlední řadě kosti.

Kritéria a koncepce odolnosti proti křehkému porušení

Z rozboru mechanismu křehkého porušení plyne, že křehké lomy, včetně kritérii odolnosti proti jeho vzniku je možno studovat a hodnotit z několika hledisek:

a) **energetické** (velikost spotřebované energie na lom),
b) **napěťové** (kritické lomové napětí, při kterém vznikají nebo se šíří trhliny)
c) **kinetické** (stabilní nebo nestabilní šíření trhliny),
d) teplotní (úroveň přechodové teploty),
e) morfologické (mechanismus porušení)
f) na tomto základě byly stanoveny různé koncepce a kritéria, podle kterých se hodnotí odolnost materiálu proti porušení křehkým lomem. V praxi se ověřily a osvědčily tyto dvě skupiny kritérii:

- Kritéria založené na šíření defektů (podle lomové mechaniky).
- Kritéria založené na přechodové teplotě.

1.5 Koncepce lomové mechaniky

Velké množství nahromaděných poznatků o porušení a lomech z praxe i ze zkoušení materiálu přispělo k vytvoření samostatného technického oboru – lomové mechaniky.

Lomová mechanika je vědní obor o vzniku lomů z defektů, které se vyskytují v namáhaném tělese. Zabývá se zákonitostmi chování trhlin při namáhání tělesa v různých podmínkách, hlavně z hlediska vzniku křehkého porušení.
Cílem lomové mechaniky je zjistit v namáhaném tělese kritickou velikost defektu, který by způsobil náhlé křehké porušení dílce při namáhání.
Podle oblasti deformace při zatížení se lomová mechanika rozděluje na:

- **Lineárně elastickou lomovou mechaniku** (LELM), platnou pro namáhání těles v elastické oblasti deformace,
- **Elasticko-plastickou lomovou mechaniku** (EPLM), rozšířenou pro namáhání v elasticko-plastické oblasti deformací.

V případech dynamického a rázového zatížení se uvažuje dynamická lomová mechanika.

Případy katastrofických lomů nasvědčují, že reálné podmínky namáhání konstrukcí jsou složitější, než podmínky při laboratorních zkouškách mechanických vlastností, které se používají při konstrukčních výpočtech. Skutečnost, že materiály se často v praxi porušují při menším napětí, než je mez kluzu, zohledňuje lomová mechanika tím, že do pevnostních výpočtů zavádí existenci defektů a pevnost namáhaného tělesa kvalifikuje podle procesů a zákonitosti, které ovládají iniciaci a šíření trhlin.
Proto jsou kritéria lomové mechaniky založené na fyzikálně mechanických veličinách, vyjadřujících stabilitu trhliny.

Lineárně elastická lomová mechanika předpokládá, že trhlina se šíří **při elastickém stavu napjatosti.** Lom v kompaktním tělese (bez trhlin, defektů, vad) může teoreticky nastat jen

tehdy, když působící napětí dosáhne hodnotu ideální pevnosti ($R_{m,id} = (E\gamma/a_o)^{1/2}$). V tělesech obsahujících koncentrátory napětí typu trhliny se hodnota ideální pevnosti na čele (špici) trhliny se dosáhne při nižším nominálním napětí. Přitom platí, že parametr mřížky (a_o) je mnohem menší než délka defektu (c), tedy ($a_o << c$).
Z uvedeného plyne, že v tělesech s trhlinou při nominálním napětí nižším než mez kluzu materiálu, maximální napětí koncentrované trhlinou může vysoko překročit hodnotu meze kluzu, a v materiálech, které se porušují v pružném stavu, také mez pevnosti.

Základní úlohou lomové mechaniky je využít tyto poznatky pro stanovení vhodných kritérií pro hodnocení odolnosti materiálů proti křehkému porušení těles s trhlinou.
Dovolené napětí se pro konstrukční kovové materiály volí často podle hodnoty meze kluzu a bývá přibližně 2/3 R_p. Pokud takto namáhaná součást obsahuje trhlinu určité velikosti, tato se může nestabilně šířit a způsobit křehké porušení. Pevnost dané součásti obsahující trhlinu bude podmíněna odporem materiálu proti iniciaci křehkého porušení v lokalizovaném objemu na čele trhliny. V této souvislosti je třeba věnovat pozornost malému objemu materiálu na špici trhliny a analyzovat procesy, které probíhají působením koncentrovaných napětí.

V oblasti, kde napětí překročí mez kluzu, dochází k plastické deformaci. Tím na špici trhliny vznikne plastická zóna, jejíž velikost je závislá na poměru σ_y/R_p. Plastická zóna u vysoko-pevných materiálů je velmi malá. V materiálech s nižší mezí kluzu anebo při vyšších teplotách, může plastická zóna dosáhnout rozměry srovnatelné s tloušťkou tělesa a trhlina se nebude šířit za elastických podmínek.

Hlubší teoretické rozbory, potvrzené experimenty ukazují, že v kovových materiálech v souvislosti s jejich krystalickou stavbou není možné vyvolat ideálně křehký lom ani za extrémně nepříznivých podmínek namáhání. Jakékoli křehké porušení probíhá při malé doprovodné plastické deformaci.

Σ Shrnutí pojmů

Po prostudování této kapitoly měly by Vám být jasné obsahy následujících odborných termínů a názvů:
Smluvní a skutečné napětí a deformace. Ramberg-Ozgoodův vztah, Exponent deformačního zpevnění. Lomové napětí a deformace. Hustota deformační energie
Trhlina, lom, stabilní a nestabilní šíření trhliny. Křehký lom, tvárný lom, houževnatý lom, interkrystalický a transkrystalický lom. Fraktografie. Mikromechanismy porušení
Hlavní znaky a podmínky křehkého porušení.
Lomová mechanika, Lineárně elastická lomová mechanika, Elasticko-plastická lomová mechanika.

Otázky ke kapitole 1

1.1 Jak jsou definována skutečná napětí a skutečné deformace při tahové zkoušce.
4.1 Jak lze stanovit lomovou deformaci a lomové napětí?
1.3 Jakým způsobem je možno vypočítat hustotu deformační energie?
1.4 V jaké oblasti tahového diagramu platí Ramberg-Ozgoodův zákon?
1.5 Jaké jsou podmínky vzniku křehkého lomu oceli?
1.6 Podél kterých krystalografických rovin probíhá rozvoj štěpného lomu v mřížce kubické prostorově centrované?
1.7 Jaké jsou etapy (fáze) rozvoje lomového procesu.
1.8 Čím je charakterizován stabilní rozvoj trhliny?
1.9 Jaký jsou rozdíly mezi lineárně elastickou a elasticko-plastickou lomovou mechanikou?
1.10 Které skupiny kovových materiálů jsou náchylné ke křehkému porušení?

Příklady ke kapitole 1

1.1. Vypočtěte skutečné napětí a skutečné deformace na mezi kluzu $R_p0{,}2$ = 190 MPa austenitické oceli s modulem pružnosti E = 190 GPa
1.2. Jaké hodnoty nabývají skutečné napětí a deformace na mezi smluvní pevnosti R_m = 600 MPa při rovnoměrné deformaci 30% austenitické oceli (dle příkladu č. 1.1.).
1.3. Vypočtěte skutečné napětí v tyči ze slitiny Al namáhané jednoosým tahem, když smluvní napětí σ = 140 MPa, modul pružnosti E = 70 GPa, Poissonovo číslo ν=0,33.
1.4. Vypočtěte hustotu elastické deformační energie součástí vyrobené z oceli, namáhané jednoosým tahem, když pružná deformace je 0,05%.
1.5. Štěpení v bcc krystalech je převážně podél rovin (100). Zvažujte, co se může stát s energií lomu náhodně orientované polykrystalické struktury, když velikost zrna byla několikanásobně zmenšena.

Literatura

[1] Kunz J., Aplikovaná lomová mechanika, ČVUT FJFI Praha, Česká technika, 2005, 272 s.
[2] Kučera, J. Stručný úvod do mechaniky lomu, Část 1. Vruby a trhliny. Nestabilní lom. FS VŠB Ostrava, 1993, 106 s.
[3] Callister D. W., Materials Science and Engineering. An Introduction. University Iowa, John Wiley& Sons, 2007,721 p.
[4] Felbeck, D. K., Atkins A.G.: Strength and Fracture of Engineering Materials. Prentice Hall, Englewood, 1984, 542 p.
[5] Pokluda J. aj. Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek. PCDIR, Brno, 1994, 385 s.

[6] Anderson T.L: Fracture Mechanics. Fundamentals and applications, BAE, 2005, 621 p.
[7] Strnadel, B., Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství. Ostravské tiskárny, 1998, 334 s.
[8] Kautský J., Jandoš F., Vojtěch K., Lomy ocelových částí. SNTL, Praha 1976.

Odpovědi na otázky

1. Skutečné napětí $\boldsymbol{\sigma' = \frac{F}{S}}$, kde S je skutečný průřez kolmý na působící sílu F, a skutečné p deformace $\boldsymbol{\varepsilon' = \ln \frac{L}{L_o}}$, kde L je délka tyče při zatížení silou F a L_o je počáteční délka.
2. Skutečná pevnost neboli lomové napětí je dáno vztahem $\boldsymbol{\sigma_u' = \frac{F_u}{S_u}}$, kde F_u síla v okamžiku před lomem. Skutečná deformace u lomu (v krčku) - tzn. lomová deformace $\boldsymbol{\varepsilon_u' = \ln \frac{1}{1-Z}}$.
3. Obecně pomocí vztahu $w_c = \int_0^{\varepsilon_u'} \sigma' \, d\varepsilon'$, pro elastickou deformaci: $w_e = \frac{\sigma.\varepsilon_e}{2}$.
4. V oblasti rovnoměrné elasticko-plastické deformace skutečného diagramu.
5. Koncentrace napětí, nízká teplota, vysoká rychlost deformace, trojosá tahová napjatost (větší tloušťky stěn).
6. Štěpné krystalografické roviny v KSC (bcc) mřížce jsou typu {100}.
7. Zpravidla etapa iniciace stabilních (mikro)trhlin, šíření stabilní trhliny, iniciace nestabilního lomu, šíření nestabilního lomu.
8. Pro pomalý rozvoj trhliny je třeba dodávat energii.
9. Lineární lomová mechanika uvažuje lineární závislosti napětí - deformace. Elasticko-plastická lomová mechanika (EPLM) je rozšířena pro elasticko-plastické deformace tělesa.
10. Vysokopevné oceli, konstrukční oceli o střední pevnosti za nízké teploty (kromě austenitických), vysokopevné slitiny Al, intermetalické slitiny (sloučeniny).

Výsledky příkladů

1.1. Pro $\varepsilon_p = 0{,}2\% = 0{,}002$ je $\sigma' = 190{,}38$ MPa, deformace $\varepsilon_p' = 0{,}1198$ %, $\varepsilon_e = 0{,}1$ %.
1.2. Napětí $\sigma' = 780$ MPa, deformace $\varepsilon_p' = 26{,}2$ %,
1.3. Pro elastické deformace pro ($\sigma < R_p0{,}2$) $\sigma' = \sigma/(1-\nu\varepsilon_x)^2$, kde $\varepsilon_x = 0{,}002 = 0{,}2\%$, napětí $\sigma' = 140{,}185$ MPa
1.4. Hustota elastické energie $w_e = 26{,}2$ kJ/m^3 = 0,187 Jmol^{-1}.
1.5. Nápověda: Sledujte cestu trhliny přes hranice zrn).

2 NAPĚTÍ V OKOLÍ VRUBŮ A TRHLIN

Čas věnovaný studiu této kapitoly je cca 2 hod.

Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

- Stanovit koncentrace napětí u jednoduchých vrubů a defektů
- Jmenovat různé koncentrátory napětí
- Charakterizovat faktory intenzity napětí
- Vysvětlit proč pevnost křehkého materiálu je mnohem nižší než jeho teoretická pevnost.

Výklad

V oblasti studia lomových procesů je možno během historického vývoje uvažovat dvě hlavní koncepce - napěťovou a energetickou:

a) Stanovení napětí kolem defektu – lokální překročení meze pevnosti materiálu v kořeni trhliny vede k narušení soudržnosti materiálu, k šíření trhliny a vzniku lomu.
b) Energetická bilance – přebytek potenciální energie systému se využije na vytvoření nové lomové plochy (kap. 5). Oba přístupy poskytují přibližně stejné výsledky.

2.1 Koncentrace napětí v okolí vrubů

Při zatěžování součástí dochází k obtékání a koncentraci (zhuštění) silového toku kolem vrubů a otvorů, kde vznikají maximální napětí, která mohou způsobit porušení materiálu. viz. obr. 2.1. Pro vyjádření nejvyššího napětí u vrubu byl zaveden **součinitel koncentrace napětí** (α), definovaný jako podíl maximálního napětí (σ_{max}) k nominálnímu nebo střednímu napětí σ. Nominální napětí je definováno jako síla (F) působící kolmo na oslabený skutečný průřez v místě defektu S_d, tedy $\sigma_{nom} = F/S_d$. Střední napětí $\sigma = F/S_o$, kde S_o je průřez uvažovaný bez vrubu resp. defektu (a vyskytuje se v rovině s vrubem či defektem). Můžeme tedy rozlišovat dva typy součinitelů koncentrace napětí:

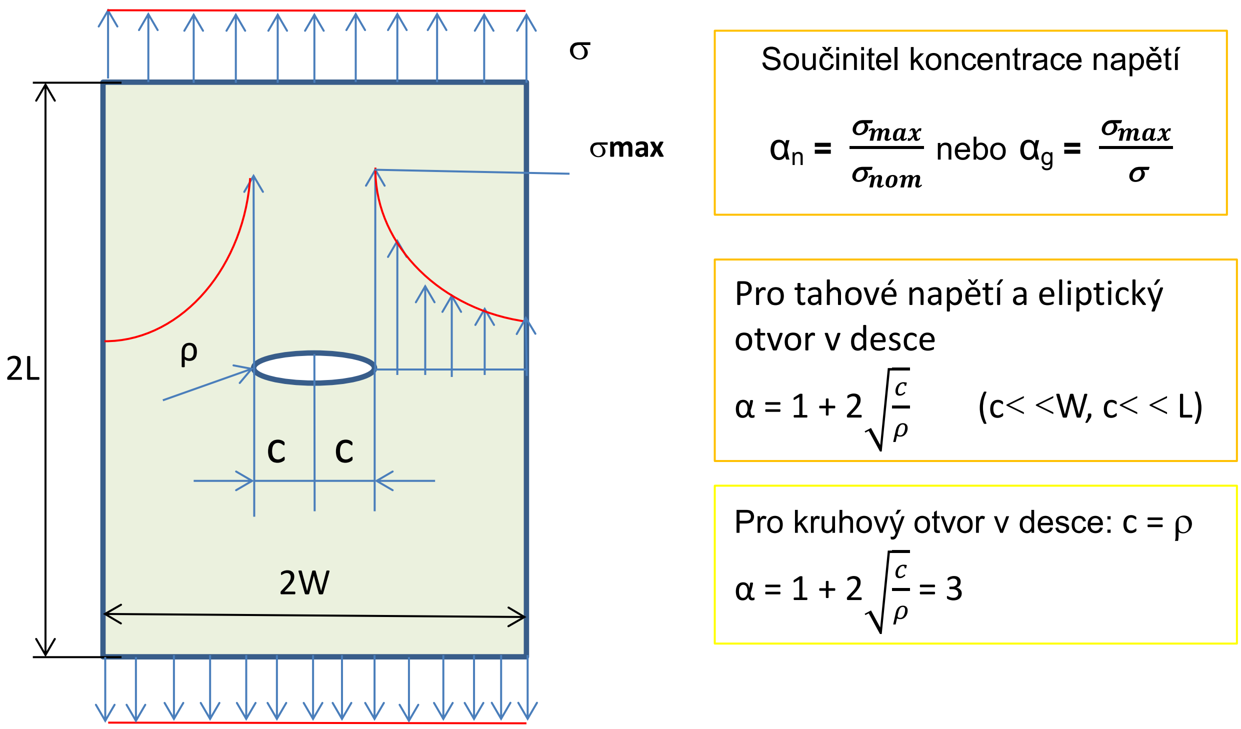
$$\alpha_n = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad , \quad \alpha_g = \frac{\sigma_{max}}{\sigma}, \tag{2.1}$$

jejichž hodnoty se značně rozcházejí při relativně velkých vrubech (c/W > 0,2), rozdílně zachycují vliv konečných rozměrů tělesa na velikost koncentrací napětí. Obecně $\alpha_n \leq \alpha_g$.
Hodnoty těchto součinitelů koncentrace napětí jsou téměř shodné v případech, když velikosti vrubů (délka c) je velmi malá vzhledem k šířce tělesa (c<<W), zpravidla pro c/W < 0,05. Nebo jinak, při dané velikosti vrubu jde o velká tělesa, teoreticky z matematického hlediska nekonečná, polonekonečná. V těchto případech platí: $\boldsymbol{\alpha_n = \alpha_g = \alpha}$ a pro zjednodušení je v dalším výkladu uvažován součinitel koncentrace napětí $\boldsymbol{\alpha}$

Pro elipsovitý otvor (vrub, defekt) o délce **c** a poloměrem zaoblení ρ lze součinitel koncentrace napětí vypočítat při tahovém napětí podle vztahu (za podmínky c << W)

$$\alpha = 1 + 2\sqrt{\frac{c}{\rho}} \tag{2.2}$$

Podobný jednoduchý vztah platí v případě ohybového napětí $\alpha = 1 + \sqrt{\frac{c}{\rho}}$. Uvedené vztahy platí pro konfiguraci, kdy osa otvoru, hlavní osa elipsy a směr napětí jsou vzájemně kolmé. Předpokládá se také homogenní a izotropní materiál.

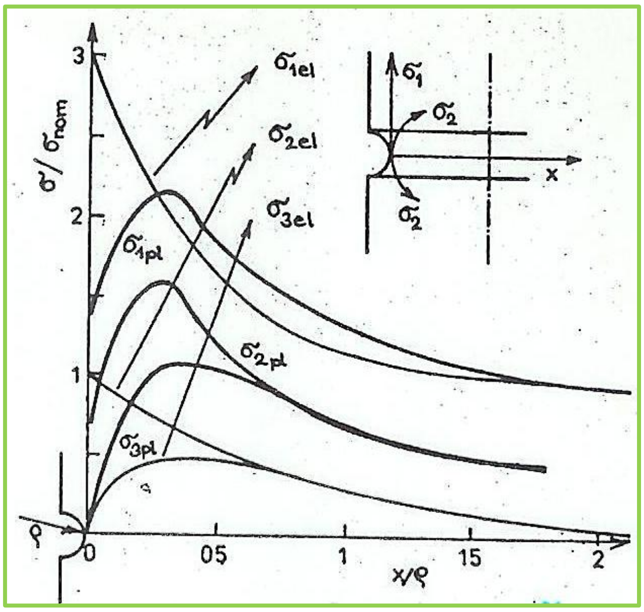


Obr. 2.1. Schéma desky s eliptickým otvorem, hlavní osa otvoru jsou orientována kolmo na tahové napětí. Čím delší a ostřejší je vrub nebo defekt, tím vyšší vzniká koncentrace napětí.

Poznámka: Řešení elastické napjatosti v okolí kruhového otvoru podal Kirsch v roce 1898 a tím položil základy k výpočtům koncentrace napětí v okolí vrubů a trhlin. Systematicky se koncentracemi napětí různých vrubů zabýval Neuber, zakladatel učení o koncentracích napětí u vrubů. Pro kulovitý tvar defektu (např. bubliny, póry) uvnitř materiálu je α = 2,24.

Výpočty koncentrací napětí a napěťově deformačních elastických polí v okolí vrubů a trhlin je obecně poměrně náročné. Z hlediska nauky o pružnosti a matematiky je nutno řešit soustavy parciálních diferenciálních rovnic. Přitom je nutno respektovat vztahy mezi složkami vektoru posuvu a složkami tenzoru deformace (Cauchyho vztahy), rovnice kompatibility, diferenciální rovnice rovnováhy, zobecněný 3D Hookův zákon, podmínky pro rovinnou deformaci a rovinnou napjatost. Při řešení se používá Airyho funkce, metoda komplexních napěťových potenciálů, apod. Tyto záležitosti přesahují rámec této opory a nebudou dále rozváděny, zájemci je najdou v příslušné uvedené literatuře.

Součinitel koncentrace napětí α platí jak pro elastické, tak pro elasticko-plastické pole napětí. V případě lineárne elastického chování materiálu se α označuje jako teoretický součinitel koncentrace napětí α_t, v případě elasto-plastického chování materiálu se značí α_σ. Podobně pro maximální deformace ε_{max} byl zaveden součinitel koncentrace deformace ve tvaru $\alpha_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon}$, kde ε je střední, nebo nominální deformace. Mezi uvedenými součiniteli platí Neuberův vztah $\alpha_t^2 = \alpha_\sigma . \alpha_\varepsilon$. Podle daného vzahu zvýšení plastické deformace vede ke snížení špiček napětí. Příklad rozložení napětí u konstrukčního vrubu je uveden na obr. 2.2. Na obrázku je porovnání napjatosti při elastickém a elasticko-plastickém chování materiálu. Při vzniku plastické deformace dochází ke vzniku složitějších průběhů napětí, maximální špičky napětí jsou otupeny, sníženy a posunuty pod povrch.



složky tenzoru napětí:
σ_1 – osové (axiální) napětí,
σ_2 – tečné (tangenciální) napětí
σ_3 – radiální napětí, $\sigma_3 \,||\, x$
σ_{nom} – nominální (střední) napětí,

σ_{iel} – elastický stav napjatosti,
σ_{jpl} – elasto-plastický stav napjatosti
i = 1,2,3; j = 1,2,3
ρ – poloměr zaoblení vrubu

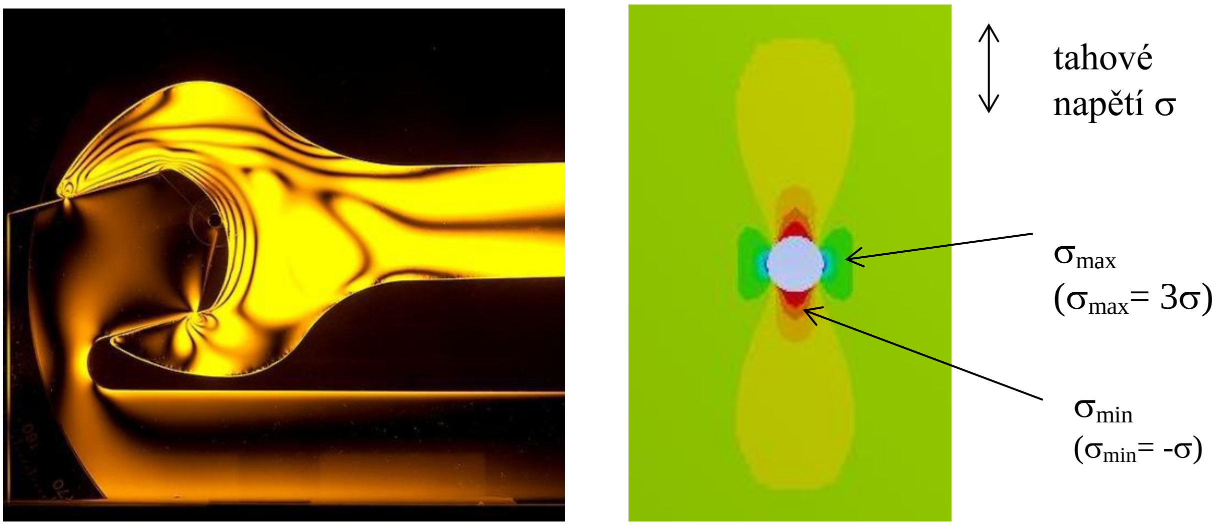
Pro pokles axiální elastické složky napětí od čela vrubu (obr. 2.2) platí závislost:

$$\sigma_{1el} = \sigma_{nom} \left[1 + 2.\left(\frac{\rho}{\rho + x}\right)^3 \right]$$

Obr. 2.2 Průběhy trojosých napětí před polokruhovým obvodovým vrubem na válcovité hřídeli. Rozdíly mezi lineárně elastickým a elasto-plastickým řešením.

Při výpočtu koncentrací napětí u vrubů nebo defektů v případě elastiko-plastického chování materiálu je nutno použít **numerické metody výpočtu**, hlavně metodu konečných prvků (MKP). Pro výzkum a zviditelnění deformačních nebo napěťových polí se používají také vhodné experimentální metody (fotoelasticimetrie, obr. 2.3; pruhy moiré), při výzkumu koncentrací napětí a stavu napjatosti lze použít metody rentgenografie (difrakce), tenzometrie, interferometrie.

Stanovení koncentrací napětí má velký význam u křehkých materiálů, kde maximální napětí mohou dosahovat vysoké hodnoty a způsobit lom. V těchto materiálech maximální napětí (špičky napětí) nejsou snižovány plastickou deformací. Koncentrace napětí jsou důležité také v případech cyklického namáhání strojních součástí, kde ovlivňují výrazně únavové charakteristiky. V této souvislosti mluvíme o tvarové pevnosti při střídavém namáhání.



Obr. 2.3 Zobrazení polí a koncentrací napětí pomocí fotoelasticimetrie (s polarizovaným světlem) a výpočetní metody (MKP) u kruhového otvoru.

Oblasti a důvody pro výskyt koncentrace napětí (shrnutí)

- *Náhlá změna tvaru* tělesa vede ke změně od jednoosého anebo jednoduchého namáhání k víceosé a složité napjatosti
- *Konstrukční vruby* (záměrně vytvořené, mají v konstrukci určitou funkci) způsobují koncentrace napětí a víceosé stavy napjatosti
- *kontaktní lokální místa* (důležité při některých druzích opotřebení, otlačení).

- *Vady materiálu* - působí obdobným vrubovým účinkem
- Vměstky, precipitáty
- Póry, bubliny
- trhliny (mohou vzniknout např. při výrobě nebo při cyklickém namáhání, únavě)

- *Vlivy povrchu* (prohlubně po obrábění, drsný povrch, nerovnosti a důlky po korozi)

Pro ostré defekty anebo trhliny platí $\rho << c$ a koncentrace napětí α i maximální napětí σ_{max} dosahují v čele defektu vysoké hodnoty. Pokud přesáhne σ_{max} teoretickou pevnost, nastane šíření trhliny a lom. V krajním případě podle vztahu (2.2) pro $\rho \rightarrow 0$ při dané délce defektu by $\alpha \rightarrow \infty$ a také $\sigma_{max} \rightarrow \infty$, napětí zde vykazuje tzv. singularitu. Poku uvažujeme vzdálenost mezi atomy (a), resp velikost atomu za nejmenší možný poloměr zaoblení (a=ρ), pak $\sigma_{max} = \sigma (c/a)^{1/2}$, přitom a<< c. V případě, že σ_{max} dosáhne teoretickou resp. ideální pevnost materiálu ($R_{m,id} = (E\gamma/a_o)^{1/2}$), pak dojde ke křehkému lomu.

2.2 Faktory intenzity napětí

Lineární lomová mechanika je založena na analýze velikosti a rozdělení napětí a deformace v těsné blízkosti čela trhliny. Vychází z lineární závislosti mezi napětím a deformací.
Při napěťové analýze těles s trhlinou se rozlišují tři základní způsoby namáhání (módy) tělesa s trhlinou s možností oddělování materiálu v jejím kořeni, která jsou schematicky znázorněny na obr. 2.4.

Způsob I. odpovídá zatížení a otevírání trhliny tahovým napětím kolmým na trhlinu. Přitom v závislosti na tloušťce tělesa mohou v oblasti čela trhliny nastat dva různé stavy napjatosti:

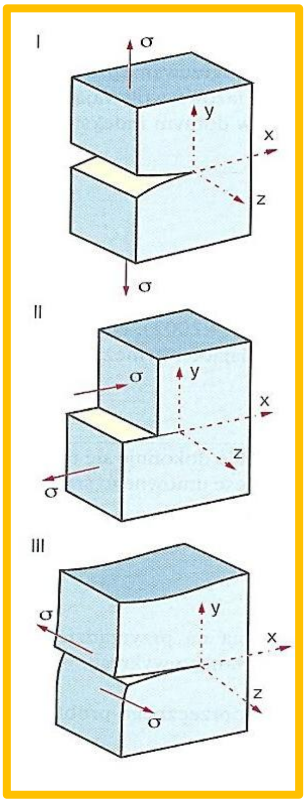
- Stav rovinné napjatosti (tenká tělesa a volné povrchy)
- Stav rovinné deformace (střední části těles o větší tloušťce)

Vymezení těchto stavů je uvedeno v další části.

Způsob II. je charakterizován rovinnou smykovou deformací způsobenou smykovým napětím kolmo na čelo trhliny.

Způsob III. představuje smykové namáhání rovnoběžně s čelem trhliny (antirovinná smyková deformace).

Podle těchto tří základních způsobů namáhání trhliny se hodnoty faktoru intenzity napětí rozlišují označením: K_I, K_{II} a K_{III}.



Obr. 2.4 Módy namáhání materiálu s trhlinou: I – tahový mód (tah), II – rovinný smykový mód (smyk), III – antirovinný smykový mód (střih)

Analýzou napjatosti v oblasti čela trhliny je možno stanovit závislosti složek tenzoru napětí v okolí čela trhliny na velikosti nominálního napětí **σ**, délce trhliny **c**, na vektoru vzdálenosti **r** a úhlu **φ**, obr. 2.5. Pro desku s velkou šířkou b s centrální trhlinou o délce 2c (za podmínky b>>2c), namáhanou tahovým napětím jsou základní napětí v elementu objemu popsány polárními souřadnicemi **r** a φ. Velikosti těchto napětí pro první způsob namáhání jsou vyjádřeny následujícími vztahy:

$$\boldsymbol{\sigma_y(r,\varphi) = \frac{\sigma\sqrt{c}}{\sqrt{2r}}\left(1+\sin\frac{\varphi}{2}\sin\frac{3\varphi}{2}\right)\cos\frac{\varphi}{2}};\quad \sigma_x(r,\varphi)=\frac{\sigma\sqrt{c}}{\sqrt{2r}}\left(1-\sin\frac{\varphi}{2}\sin\frac{3\varphi}{2}\right)\cos\frac{\varphi}{2}, \tag{2.3}$$

$$\tau_{xy}(r,\varphi) = \frac{\sigma\sqrt{c}}{\sqrt{2r}}\sin\frac{\varphi}{2}\cos\frac{\varphi}{2}\cos\frac{3\varphi}{2},\ \sigma_z(r,\varphi) = 2\nu.\frac{\sigma\sqrt{c}}{\sqrt{2r}}\cos\frac{\varphi}{2}\ (\mathrm{RD}),\ \sigma_z(r,\varphi) = 0\ (\mathrm{RN}),\ \tau_{xz}=0,\ \tau_{yz}=0$$

Výpočty a rozbory polí napětí a jejich koncentrací v čele ostré trhliny v lineárně elastickém izotrobmím materiálu vedly k **zavedení faktoru intenzity napětí** podle **definice** pro tři módy.

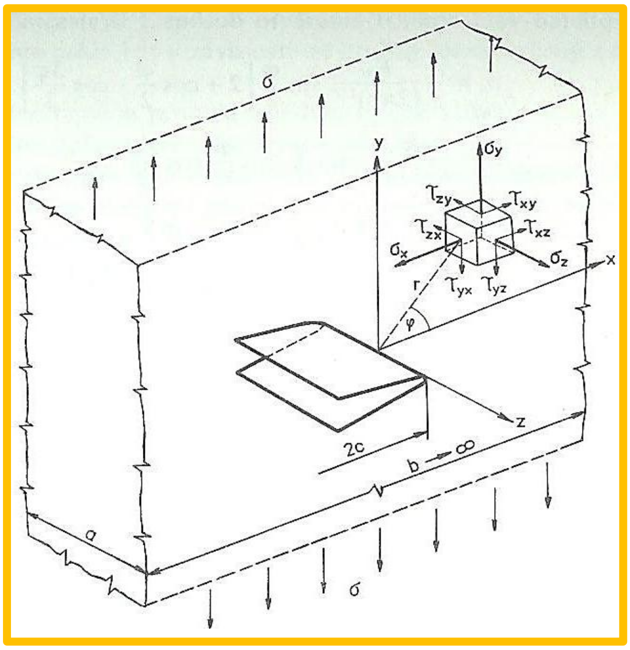
$$\boldsymbol{K_I = \lim_{r\to 0}(2\pi r)^{1/2}\sigma_y(r,0)},\quad K_{II} = \lim_{r\to 0}(2\pi r)^{1/2}\tau_{xy}(r,0),\quad K_{II} = \lim_{r\to 0}(2\pi r)^{1/2}\tau_{yz}(r,0) \tag{2.4}$$

Takto zavedený faktor intenzity napětí představuje určitou průměrnou koncentrací napětí v oblasti u čela ostré trhliny a má konečnou hodnotu při r → 0 (kdy $\sigma_{ik} \to \infty$).

Faktor intenzity napětí K_I lze použít při popisu složek tenzoru napětí u čela trhliny (pro lineárně elastický materiál), viz. vztahy 2.6, nebo obecně $\sigma_{ik} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi . r}} . f_{ik}(\varphi)$.
Na druhé straně K_I souvisí s vnějším napětím a délkou vnitřní trhliny podle vztahu

$$\boldsymbol{K_I = \sqrt{\pi c}} \, , \tag{2.5}$$

který plyne z porovnání vztahů (2.3) a (2.4). Podobné vztahy jako pro I. mód platí pro II. a III. způsob zatížení: $K_{II} = \tau . \sqrt{\pi c}$ a $K_{III} = \tau . \sqrt{\pi c}$. Hlavní jednotkou pro faktor intenzity napětí je **[MPa $\sqrt{m}$],** jak plyne např. ze vztahu (2.5). Pro krátké povrchové trhliny $K_I = 1{,}12 . \sigma\sqrt{\pi c}$.



$$\sigma_x = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \cos\frac{\varphi}{2}\left[1 - \sin\frac{\varphi}{2} \cdot \sin\frac{3\varphi}{2}\right]$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \cos\frac{\varphi}{2}\left[1 + \sin\frac{\varphi}{2} \cdot \sin\frac{3\varphi}{2}\right]$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y), \qquad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \sin\frac{\varphi}{2} \cdot \cos\frac{\varphi}{2} \cdot \cos\frac{3\varphi}{2}$$

$$u = \frac{K_I}{G}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} \cdot \cos\frac{\varphi}{2}\left[1 - 2\nu + \sin^2\frac{\varphi}{2}\right]$$

$$v = \frac{K_I}{G}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} \cdot \sin\frac{\varphi}{2}\left[2 - 2\nu - \cos^2\frac{\varphi}{2}\right]$$

$$w = 0 \tag{2.6}$$

Obr. 2.5 Složky tenzoru napětí v okolí čela trhliny, pro I. mód. Vztahy pro výpočet složek napětí a posuvu u čela trhliny, lineární elastické deformace materiálu na napětí.

Podle uvedených vztahů (2.6) Napětí u čela trhliny stoupá s klesající vzdálenosti *r* obecně podle vztahu $\sigma = K_i/\sqrt{r}$, a při r → 0 by $\sigma \to \infty$ (i = I, II, a III).
Pokud zkoumaný element materiálu bude v rovině, kde úhel φ = 0 (y = 0) budou základní napětí, která mohou způsobit šíření trhliny, dané součinem působícího napětí a délky trhliny. Například pro I. způsob bude platit:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} = \sigma\sqrt{\left(\frac{c}{2r}\right)}, \ \sigma_z = 2\nu\sigma\sqrt{\left(\frac{c}{2r}\right)}, \text{ a } \tau_{xy} = 0. \tag{2.7}$$

V praxi je nejdůležitější tahový způsob namáhání kolmo na rovinu trhliny. Stav napjatosti při tomto způsobu namáhání může být v závislosti na tloušťce tělesa dvojosý nebo trojosý.

První případ platí pro **stav rovinné napjatosti**, tj. dvojosé napjatosti, který lze znázornit velmi tenkou deskou zatíženou v její rovině reálnými hodnotami napětí σ_x a σ_y, přičemž napětí $\sigma_z = 0$ (obr. 2.5). Deformace ve směru z se nebude rovnat nule, protože podle Hookova zákona platí $\varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$, což znamená, že pro $\sigma_z = 0$ bude:

$$\boldsymbol{\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y)}, \qquad (2.8)$$

Z odvozeného stavu plyne, že ve směru kolmém na rovinu desky bude záporná deformace (zmenšení tloušťky při tahu), což má význam při šíření trhliny v namáhaném tělese. Stav rovinné napjatosti je také na povrchu těles libovolné tloušťky. Při atmosférickém tlaku (p) složka $\sigma_z = -p < 0$ a zpravidla $|\sigma_z| \ll \sigma_x$ a $|\sigma_z| \ll \sigma_y$, tj. $\sigma_z \to 0$, prakticky $\sigma_z = 0$.

Druhý případ, tj. **stav rovinné deformace** nastává, když složky deformace ε_x a ε_y jsou větší než 0, avšak ve směru z deformace $\varepsilon_z = 0$. To znamená, že obě základní deformace ε_x a ε_y působí v jedné rovině, z čehož je odvozen také název rovinná deformace. Pokud $\varepsilon_z = 0$, potom podle Hookova zákona nebo výše uvedené rovnice plyne, že

$$\boldsymbol{\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)}, \qquad (2.9)$$

a deska je namáhaná trojosým tahovým napětím. Při tomto stavu napjatosti je omezená možnost vzniku plastické deformace. Danému případu odpovídá zatížení hrubé desky, tj. s velkou tloušťkou.
Z uvedeného vyplývá, že čistá rovinná napjatost by vznikla při zatížení velmi tenké desky a čistá rovinná deformace ve velmi tlusté desce, ve střední části. Ve skutečných dílcích mohou být ve středu podmínky rovinné deformace a směrem k volnému povrchu se mění na rovinnou napjatost. Proto v širších (silnějších) zkušebních vzorcích anebo konstrukcích mohou vznikat na povrchu plasticky deformované oblasti, zatímco uvnitř je stav elastické napjatosti.

Dosud v úvahách o faktoru intenzity napětí jsme uvažovali trhlinu v tzv. polo nekonečném tělese (obr. 2.5) anebo předpokládali, že délka trhliny c je mnohem menší než rozměry tělesa (ve směru šíření trhliny a kolmo na trhlinu, $c \ll W$ nebo $c \ll b$). V těchto případech hodnota K_I (K_{II}, K_{III}) není ovlivněna rozměry tělesa.
Pokud délka či velikost trhliny vzhledem ke směrodatným rozměrům tělesa není dostatečně malá, pak hodnoty faktoru intenzity jsou také ovlivněny rozměry a způsobem zatížení tělesa podle vztahu

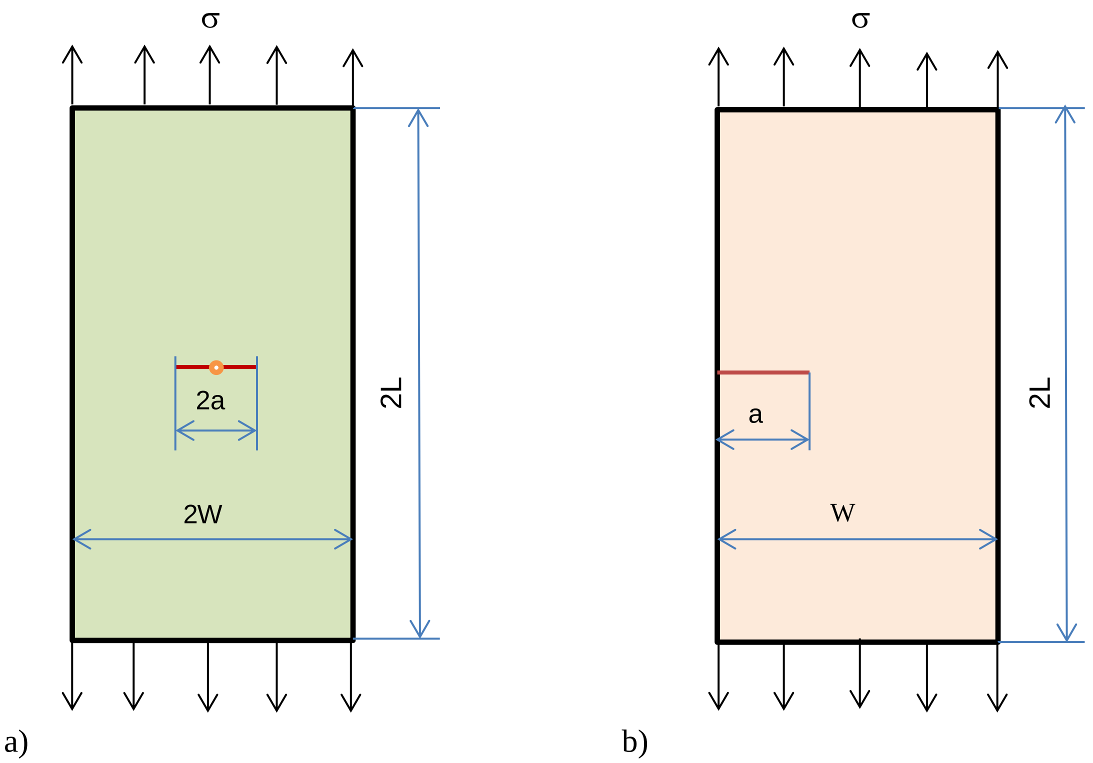
$$\boldsymbol{K_I = \sigma\sqrt{\pi a}.\mathrm{f}} \qquad (2.10)$$

kde **f je tvarová funkce**, závislá na geometrii tělesa, hlavně na poměrné délce trhliny (a/W), její poloze a na způsobu zatížení. Tvarová funkce f se také označuje jako **tvarový faktor Y** (faktor tvaru).
Tvarová funkce je bezrozměrná funkce. Hodnota tvarové funkce je obvykle tím vyšší, čím delší je trhlina (při zachování ostatních parametrů namáhání a rozměrů vzorků). Např. pro centrální trhlinu o délce 2a v desce o konečných rozměrech (obr. 2.6) bylo odvozeno pro tvarovou funkci několik vztahů. Pro obecný zápis $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}.f_1$, je funkce

$$f_l\left(\frac{a}{W}\right) = \left[\cos\frac{\pi a}{2W}\right]^{-\frac{1}{2}} \quad \text{pro a/W} \leq 0{,}8 \text{ s přesností } 1\% \qquad (2.11)$$

nebo $f_l\left(\frac{a}{W}\right) = 1 + 0{,}128\left(\frac{a}{W}\right) - 0{,}288\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 1{,}525\left(\frac{a}{W}\right)^3$, platí pro a/W≤0,7.
Obdobně pro okrajovou trhlinu (obr. 2.6) se často používá vztah ve tvaru polynomu, resp prvních členů rozvoje funkce do řady.

$$f_I\left(\frac{a}{w}\right) = 1{,}12 - 0{,}231\left(\frac{a}{w}\right) + 10{,}55\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 21{,}72\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 30{,}39\left(\frac{a}{w}\right)^4 \qquad (2.12)$$



Obr. 2.6 Těleso konečných rozměrů s centrální trhlinou namáhané tahovým napětím (a). Okrajová trhlina v konečném tělese (b).

Faktor intenzity napětí závisí také ne orientaci trhliny k hlavnímu tahovému napětí. Např. pro trhlinu, jejíž rovina svírá úhel β se směrem tahového napětí je $K_I(\beta) = K_I.\cos^2\beta$

Již pro poměrně jednoduché tvary vzorku a trhliny jsou vztahy pro výpočet tvarové funkce složité a někdy nejednoznačné. Používají se proto přehlednější grafické závislosti. Pro stanovení tvarové funkce lze používat metody analytické, numerické (MKP) a experimentální (fotoelasticimetrie, odporová tenzometrie, pruhy moiré, měření poddajnosti apod.)

Pro faktory intenzity napětí platí tzv. **princip superpozice**, který se používá při řešení určitých kombinovaných zatížení těles nebo víceosých stavů vnějších napětí.

Jestliže každému z n působících vnějších zatížení (tj. sil, momentů) odpovídá určitá hodnota faktoru intenzity napětí K_{ij}, kde i = I, II, III, j = 1,2, …n, pak výsledný faktor intenzity napětí je dán součtem jednotlivých příspěvků v daném módu (způsobu) zatěžování, tzn.

$$K_i = \sum_{j=1}^{n} K_{ij}$$

Podobným způsobem lze princip superpozice uplatnit i při výpočtu složek tenzoru napětí, tenzoru deformace a vektoru posuvu.

Jak již bylo uvedeno, důležitou roli při křehkém porušení má výskyt vrubu, trhliny anebo jiné necelistvosti v materiálu. Každá vada materiálu vyvolává ve svém okolí zvýšení napětí, což může vést k iniciaci anebo šíření nestabilního porušení. Přitom pojem vada neznamená jenom trhlinu, dutinu, cizí částici v objemu, ale také oblasti v materiálu, kde existuje náhlá místní a nežádoucí změna struktury a vlastnosti, tedy narušení homogenity, např. tepelně ovlivněná zóna při svařování, heterogenní hrubozrnná struktura.

Shrnutí pojmů

Prostudování této kapitoly měly by Vám být jasné tyto odborné termíny a pojmy.
Konstrukční vruby. Součinitel koncentrace napětí. Součinitel koncentrace deformace, Neuberův vztah, metody stanovení koncentrací napětí.
Složky tenzoru napětí, stav rovinné napjatosti, stav rovinné deformace,
Tři módy namáhání tělesa s trhlinou, faktory intenzity napětí, tvarové funkce, princip superpozice.

Otázky ke kapitole č. 2

2.1 Definujte součinitelé koncentrace napětí.
2.2 Jaké hodnoty dosahuje α pro malý kruhový otvor uvnitř velké desky ?
2.3 Ve kterých materiálech mohou vznikat vysoké koncentrace napětí ?
2.4 Jaká je závislost součinitele koncentrace napětí na délce a zaoblení eliptického vrubu?
2.5 Jaké metody jsou používány pro zjištění polí napětí nebo deformací kolem vrubů a trhlin v součástech?
2.6 Vyjmenujte základní módy namáhání dílce s trhlinou
2.7 Jaké jsou rozdíly mezi stavem rovinné deformace a rovinné napjatosti?
2.8 Jak je definován a co charakterizuje faktor intenzity napětí ?
2.9 Jak souvisí K_I s délkou defektu a vnějším napětím?
2.10 Pro jaké účely se používá tvarová funkce?

Příklady ke kapitole 2

2.1. Vypočtěte maximální napětí u čela vnitřního defektu eliptického tvaru o délce 10 mm s poloměrem zaoblení (křivosti ρ = 2,0 mm), když tahové vnější napětí má hodnotu 100 MPa a působí kolmo na hlavní osu defektu.

2.2. Vypočtěte napětí ve vzdálenosti 3,0 mm od povrchu válcovité hřídele (obr. 2.2), opatřené obvodovým polokruhovým vrubem o poloměru zaoblení 2,0 mm, při namáhání tahovým napětí 200 MPa. Předpokládáme elastické deformace.

2.3. Jakou hodnotu součinitele koncentrace napětí α má přibližně vrub V vzorku pro zkoušku vrubové houževnatosti při statickém zatížení v elastické oblasti v ohybu? Hloubka vrubu h = 2,0 mm, poloměr zaoblení vrubu ρ= 0,25 mm, vnější rozměry průřezu vzorku 10 x 10 mm (úhel mezi stěnami vrubu 45°).

2.4. Jaká je hodnota maximálního napětí, které existuje na špici vnitřní trhliny o délce $3{,}8.10^{-2}$ mm a s poloměrem zaoblení $1{,}9.10^{-4}$ mm, když nominální tahové napětí je 140 MPa ?

2.5. Jaký průběh má tvarová funkce pro centrální trhlinu a jakou hodnotu dosahuje pro poloviční poměrnou délku trhliny a/W = 0,5.

2.6. V konstrukci v různých oblastech s tahovým napětím byly pomocí ultrazvuku zjištěny tři trhliny. První o délce 16 mm v oblasti napětí 100 MPa s tvarovou funkci f = 1,2, druhá trhlina o délce 9,0 mm pod napětím 150 MPa (f = 1,1) a třetí o délce 25 mm v oblasti s napětím 70 MPa (f = 1,3). Která z těchto trhlin je nejvíce nebezpečná ?

Literatura

[1] Kunz J., Aplikovaná lomová mechanika, ČVUT FJFI Praha, Česká technika, 2005, 272 s.

[2] Kučera, J. Stručný úvod do mechaniky lomu, Část 1. Vruby a trhliny. Nestabilní lom. FS VŠB Ostrava, 1993, 106 s.

[3] Pokluda J. aj. Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek. PCDIR, Brno, 1994, 385 s.

[4] Anderson T.L: Fracture Mechanics. Fundamentals and applications, BAE, 2005, 621 p.

[5] Strnadel, B., Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství. Ostravské tiskárny, 1998, 334 s.

[6] Strnadel, B. Nauka o materiálu II. Degradační procesy a design konstrukčních materiálů. ES VŠB-TU Ostrava, 2008, 280 s.

[7] Strnadel, B. et.al. New methods of damage and failure analysis of structural parts. Workshop, VŠB-TU Ostrava, 495 s. 2012. ISBN 978-80-248-2802-2

[8] SIH G. C. Hadbook of Stress Intensity Factors. Bethlehem, PA., Lehigh University, 1973.

Odpovědi na otázky

2.1 Součinitel koncentrace napětí $\alpha_n = \sigma_{max}/\sigma_{nom}$ nebo $\alpha_g = \sigma_{max}/\sigma$

2.2 Pro kruhový otvor a za určitých podmínek je α = 3,0 (pro tahové zatížení, $\rho \ll W$)

2.3 Vysoké koncentrace napětí mohou vznikat v křehkých materiálech, v materiálech s omezenou plastickou deformací

2.4 Koncentrace napětí je úměrná délce a nepřímo úměrná zaoblení vrubu, tj. úměrná ostrosti defektu. Pro eliptický vnitřní vrub nebo vadu při tahovém namáhání $\alpha = 1 + 2(c/\rho)^{1/2}$

2.5 Výpočetní metody analytické i numerické (MKP, komplexní napěťové potenciály) experimentální metody (fetoelasticimetrie, tenzometrie)

2.6 Rozlišujeme 3 způsoby: I – tahový mód (tah), II – rovinný smykový mód (smyk), III – antirovinný smykový mód (střih)

2.7 Pro rovinnou napjatost, (tj. dvojosou napjatost, na povrchu) jedna normálová složka tenzoru napětí je nulová ($\sigma_z = 0$), složky deformace (ε_x, ε_y, ε_z) jsou nenulové. Pro rovinnou (dvojosou) deformaci je jedna složka tenzoru deformace nulová ($\varepsilon_z = 0$).

2.8 K –faktor charakterizuje střední koncentraci napětí u čela trhliny. Definice pro I. mód: $K_I = \lim (2\pi r)^{1/2}\sigma_y(r,0)$, pro $r \to 0$. Obdobně pro KII a KIII. (vztah 2.4)

2.9 Obecně $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}.f$ (tvarová funkce f = f(a/W))

2.10 Pro přesnější a správné výpočty faktoru intenzity napětí a souvisejících parametrů lomové mechaniky.

Výsledky příkladů

2.1. [σ_{max} = 416 MPa]

2.2. [$\sigma(x)$ = 318 MPa]

2.3. [α = 3,25]

2.4. [σ_{max} = 4100 MPa]

2.5. [monotónně nelineárně rostoucí, f(0,5) = 1,19]

2.6. [K_{I1} = 15,2 MPa$\sqrt{m}$, K_{I2} = $\underline{15,7}$ MPa$\sqrt{m}$, K_{I3} = 14,4 MPa$\sqrt{m}$, druhá trhlina]

3. LOMOVÁ HOUŽEVNATOST

Čas věnovaný studiu této kapitoly je cca 2 hod.

Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

- Definovat lomovou houževnatost ve stavu rovinné deformace
- Rozlišit lomové chování materiálu za stavu rovinné deformace a rovinné napjatosti.
- Vypočítat kritickou velikosti defektu podle hodnoty lomové houževnatosti
- Posoudit hodnoty lomové houževnatosti významných materiálů

Výklad

3.1 Vymezení a význam

Když je rozměr oblasti plastické deformace (zóny) na čele trhliny ve srovnání velikostí trhliny a s rozměry tělesa ve směru možného šíření trhliny velmi malý ($r_p \leq a/50$), lze plastickou zónu zanedbat a stabilitu trhliny řešit v rámci lineární lomové mechaniky. Tento elastický stav namáhání platí pro hodnoty působícího nominálního napětí $\boldsymbol{\sigma_n \leq (0{,}6\text{-}0{,}8)R_p}$.

Lomovou houževnatost můžeme definovat jako kritickou hodnotu faktoru intenzity napětí K_I v okamžiku vzniku nestabilního šíření trhliny, tj. $\mathbf{K_I = K_{Ic}}$.

Lomová houževnatost je materiálovou charakteristikou, která vyjadřuje kvantitativně odolnost materiálu proti iniciaci nestabilního lomu v případě, že v materiálu je trhlina. Označení lomové houževnatosti K_{Ic} znamená, že trhlina je při zatěžování rozevírána (I. mód zatížení) a stav napjatosti u čela trhliny splňuje podmínku rovinné deformace. Podmínka vzniku nestabilního lomu z trhliny je dána vztahem $\mathbf{K_I \geq K_{Ic}}$. Pro experimentální stanovení hodnoty K_{Ic} je nutné znát výraz pro součinitel intenzity napětí zkušebního tělesa konečných rozměrů a způsob zatěžování (tah, ohyb).

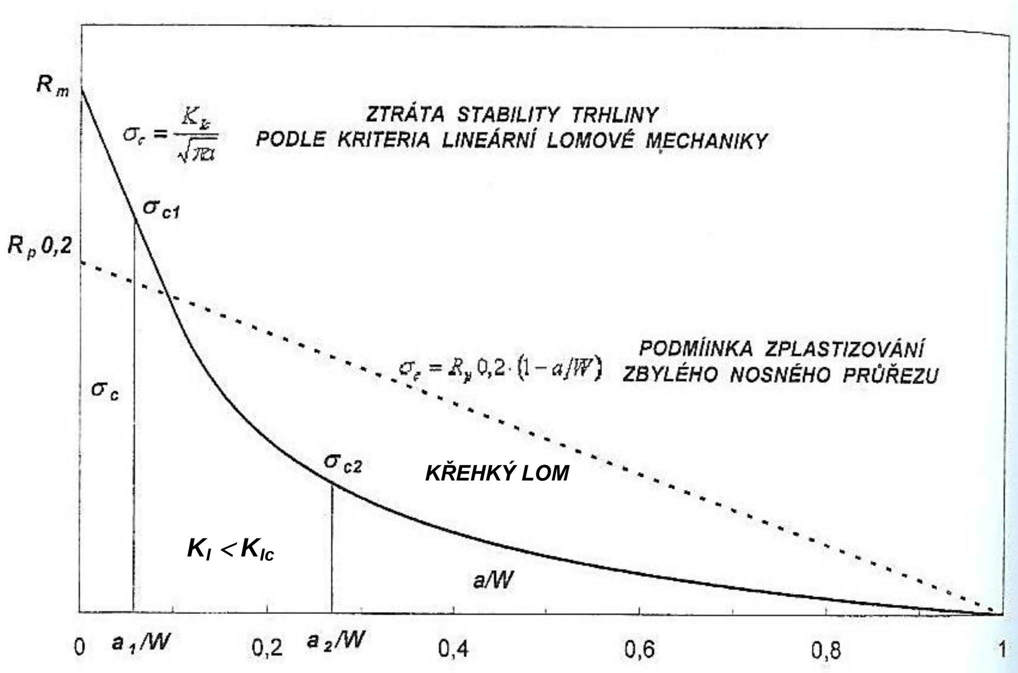
Protože hodnota K_I je vyjádřena pomocí dvou parametrů (σ, a) podle známého (zjednodušeného) vztahu $\mathbf{K_I = \sigma \sqrt{\pi . a}}$, lze výše uvedenou podmínku vyjádřit takto: Těleso s trhlinou délky a, namáhané napětím σ se křehce poruší v okamžiku, kdy jeden z parametrů (σ nebo a) dosáhne takovou hodnotu, že odpovídající hodnota K_I překročí odpor materiálu proti nestabilnímu šíření trhliny, K_{Ic}.

Vztah mezi lomovou houževnatostí K_{Ic}, nominálním napětím σ a délkou trhliny a schematicky znázorňuje obr. 3.1. Plná křivka vyjadřuje průběh funkce $\sigma_c = K_{Ic} / \sqrt{\pi . a}$ při konstantní hodnotě K_{Ic} a představuje mezní hodnoty napětí a velikosti trhlin, při jejichž překročení nastává křehké porušení. Přitom kritickou hodnotu K_{Ic} je možno dosáhnout různými kombinacemi napětí a délky trhliny.

$$\mathbf{K_{Ic} = \sigma_1 \sqrt{\pi . a_1} = \sigma_2 \sqrt{\pi . a_2} = \ldots = \sigma_n \sqrt{\pi . a_n}} \tag{3.1}$$

To také znamená, že při dané velikosti trhliny a_i nastane křehký lom, když napětí dosáhne kritickou hodnotu σ_i, nebo naopak. Pod křivkou jsou přípustné kombinace napětí a délek trhlin, které nevedou ke křehkému nestabilnímu porušení ($K_I < K_{Ic}$). Pro přesnější vymezení K_{Ic} je nutno uvažovat tvarovou funkci f (tj. tvarový faktor Y) a vztah $K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi . a}.f(a)$ nebo podobně $K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi . a_c}.f(a_c)$.

Na obrázku je také vyznačeno omezení LELM pro kovové materiály v souvislosti s plastickou deformací nosného průřezu (tečkovaná úsečka) a možností použití kritérii EPLM.



Obr. 3.1 Závislost kritického napětí σ_c na poměrné délce trhliny a/W při použití kritéria lineární lomové mechaniky.

Omezení - lineární lomovou mechaniku nelze použít pro

- materiály s nízkou lomovou houževnatostí v oblastí krátkých trhlin,
- materiály s vysokou lomovou houževnatostí,
- omezení lineární lomové mechaniky na $\sigma_c < \frac{2}{3} R_p$ (R_p – mez kluzu)

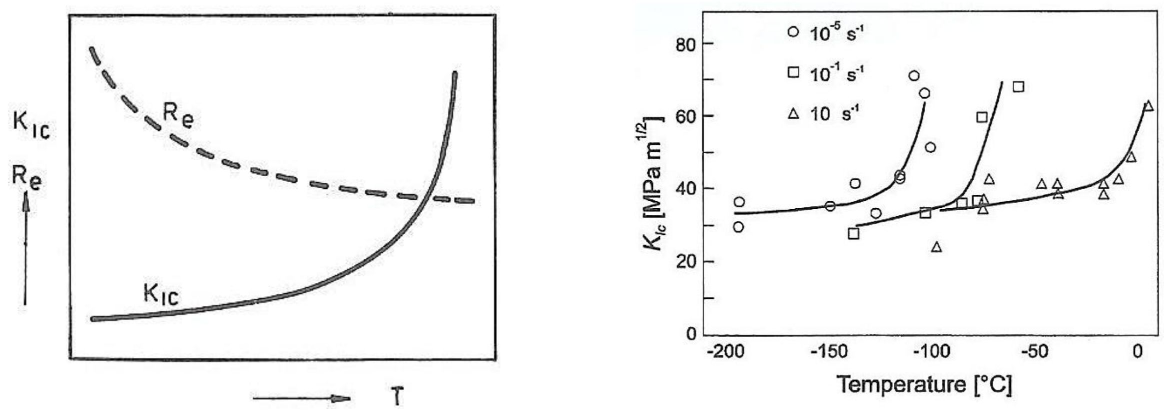
Lomovou houževnatost můžeme také odvodit z energetických úvah o počátku šíření trhliny. Z ekvivalence veličin K_I a hnací síly trhliny G_I plyne, že lomovou houževnatost lze vyjádřit pomocí intenzity uvolňování elastické deformace G_I (kap. 5). Pro kritické hodnoty a stav rovinné deformace pak platí

$$\mathbf{G_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2}{E}(1-\nu^2)}, \tag{3.2}$$

kde E je modul pružnosti a ν - Poissonův poměr.
Lomová houževnatost K_{Ic}, resp. G_{Ic} je materiálová vlastnost, která závisí na chemickém složení a na stavu struktury kovu. Její hodnota závisí také na teplotě a rychlosti zatěžování.

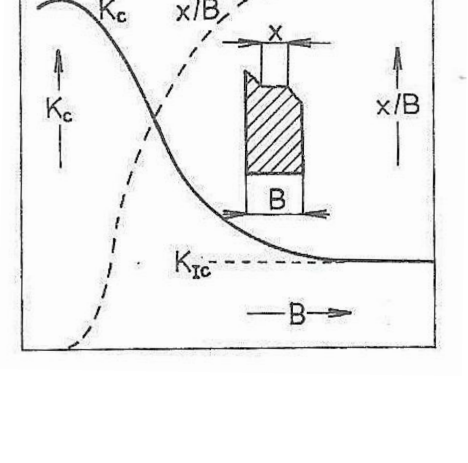
3.2 Vlivy teploty, rychlosti zatěžování

Obecná teplotní závislost lomové houževnatosti je znázorněna na obr. 3.3. S klesající teplotou se hodnota lomové houževnatosti prudce snižuje, což znamená, že křivka má tranzitní charakter. Podobně jako Vidalova křivka pro vrubovou houževnatost. Při vyšších teplotách se snižuje mez kluzu a v důsledku toho roste mez kluzu a v důsledku toho narůstá velikost plastické zóny a makroskopické plastické deformace. Proto platnost hodnoty K_{Ic} je omezená jen do určité teploty, při které je zachován stav rovinné deformace.



Obr. 3.3. Teplotní závislost lomové houževnatosti K_{Ic} a meze kluzu R_e. Vliv rychlosti deformace na tranzitní chování lomové houževnatosti

Hodnota lomové houževnatosti také závisí na tloušťce tělesa. Známý fakt, že křehké lomy vznikají přednostně v tlustostěnných konstrukcích, lze vysvětlit následovně. Čím větší je tloušťka namáhaného tělesa, tím větší je napětí ve směru tloušťky σ_z, což vytváří příznivější podmínky pro rovinnou deformaci. Závislost lomové houževnatosti na tloušťce tělesa schematicky znázorňuje obr. 3.4. Při menších tloušťkách se v daných podmínkách (teplota, materiálové vlastnosti) nedosahuje stav rovinné deformace (RD), ale jen stav rovinné napjatosti (RN). V této oblasti se hodnota lomové houževnatosti označuje symbolem K_c a její hodnota závisí na tloušťce materiálu.



Obr. 3.4 Závislost lomové houževnatosti a podílu plochého lomu na tloušťce tělesa

Stav rovinné deformace v tělese se dosáhne, když tloušťka (B) a délka trhliny (a) splňují podmínku: $\mathbf{a, B \geq 2{,}5\left(\frac{K_{Ic}}{Re}\right)^2}$.

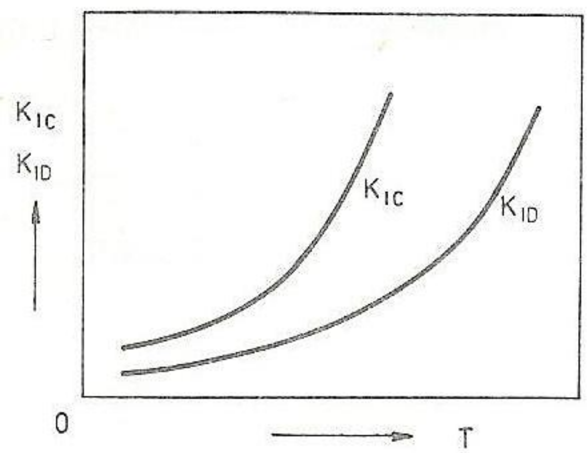
Z obrázku dále plyne, že hodnota K_c v oblasti stavu rovinné napjatostise stoupající tlouškou klesá a ustálí se na hodnotě K_{Ic} při tloušťce, odpovídající uvedené podmínce. Při dalším zvětšování tloušťky je hodnota K_{Ic} konstantní, nezávislá na tloušťce materiálu. Pro porovnání je na obrázku naznačen také průběh poměru křehké oblasti lomu k celkové tloušťce tělesa x/a. Z průběhu této křivky dále plyne, že při tloušťce a = a_{kr} oblast křehkého lomu x zaukímá celou tloušťku tělesa, to znamená, že v tělese je dosažen stav rovinné deformace.

Z uvedeného plyne, že K_c se stává platnou hodnotou lomové houževnatosti K_{Ic} ve tasu rovinné deformace tělěsa namáhaného I. způsobem, když nezávisí na tloušťce tělesa. Stav rovinné deformace a tím platné hodnoty K_{Ic} je možno dosáhnout i pro menší tloušťky těles při nižších teplotách, kdy hodnoty meze kluzu jsou vyšší a snáze je splněna uvedená podmínka pro stav rovinné deformace.

Hodnoty K_{Ic} jsou závislé také na rychlosti zatěřování, kterou v daném případě vyjadřujeme jako rychlost růstu faktoru intenzity napětí $\acute{K}$= dK_I/dt. S rostoucí hodnotou $\acute{K}$ se křivka K_{Ic} – T posouvá k vyšším teplotám, obr. 3.5. Při dynamickém zatížení se K_{Ic} označuje zpravidla jako K_{ID}. Při dynamickém zatížení lze podmínky rovinné deformace dosáhnout na tenčích vzorcích, ve srovnání se statickým namáháním.

Porovnání **rychlosti zatížení** tělesa s trhlinou:

- Kvazistatické zatížení $dK_I/dt \leq 1$ MPa.$m^{1/2}.s^{-1}$
- Rychlé zatížení dK_I/dt = 10-10^4 MPa.$m^{1/2}.s^{-1}$ ($K_{Ic}(\tau)$)
- Dynamické zatížení $dK_I/dt \geq 10^5$ MPa.$m^{1/2}.s^{-1}$ (K_{Id})



Obr. 3.5. Teplotní závislosti statické (K_{Ic}) a dynamické (K_{ID}) lomové houževnatosti.

Kritérium K_{Ic} lze použít jen pro materiály a podmínky namáhání, kdy jsou splněné zásady LELM, tzn. lineární vztahy mezi napětím a deformaci.

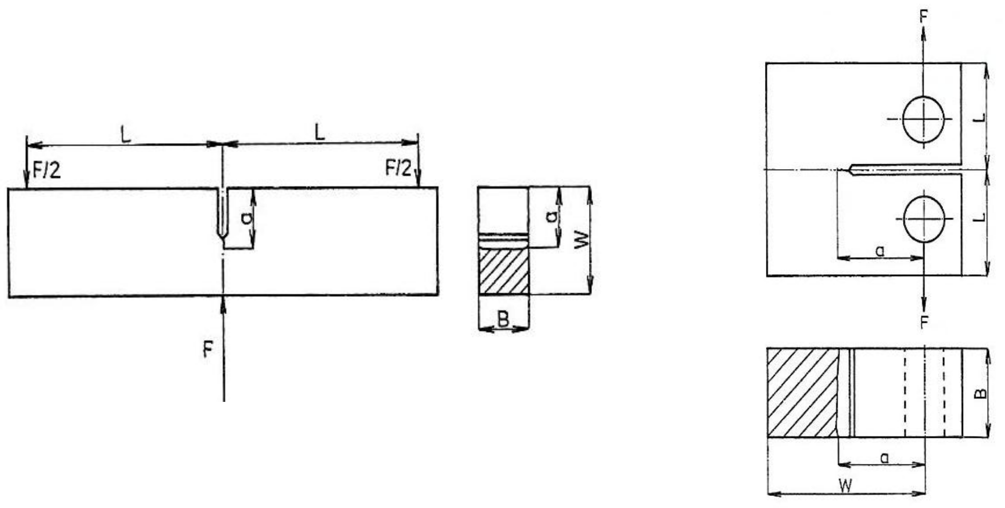
Hodnota K_{Ic} je mírou odolnosti materiálu proti křehkému porušení tělesa s definovanou trhlinou. V inženýrské praxi je tendence používat materiály pokud možno s nejvyššími hodnotami K_{Ic}. V práci konstruktéra se koncepce lomové houževnatosti může aplikovat také na jiná typy lomů, např. únavový lom, na lom při korozním praskání, vodíkovém zkřehnutí apod. V technologii kovů se kritérium K_{Ic} může použít při správném výběru legujících prvků a tepelného zpracování, zejména u konstrukčních ocelí střední a vyšší pevnosti a věrších tlouštěk, které se v praxi svařují (tlakové nádoby, potrubí, silnostěnné konstrukce).

Lomová houževnatost K_{Ic} umožňuje posoudit odolnost tělesa ke křehkému lomu. Materiál s trhlinou se neporuší, když $K_I < K_{Ic}$. Znalost lomové houževnatosti umožňuje řešit řadu úloh z oblasti křehkého porušení materiálů.
Pro naměřenou délku (a) spočteme kritické napětí σ_c ze vztahu $K_{Ic}= \sigma_c\sqrt{2\pi a}$ Y, tzn. materiál (dílec, součást) se neporuší nestabilním křehkým lomem, když reálné napětí $\sigma < \sigma_c$.
Nebo pro dané napětí σ spočteme kritickou délku defektu a_c dle $K_{Ic}= \sigma\sqrt{2\pi a_c}$.Y, materiál odolá křehkému nestabilnímu lomu, když $a < a_c$. Skutečnou délku trhliny (a) můžeme zjistit defektoskopickou metodou, zpravidla ultrazvukem.

3.3 Zkoušení lomové houževnatosti

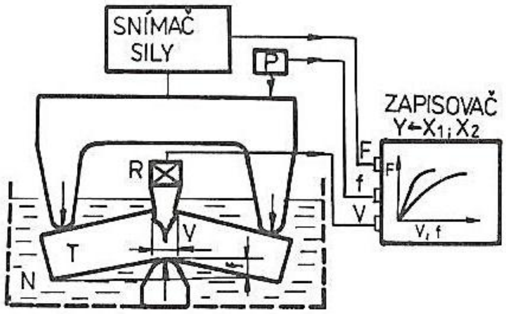
Experimentálně K_{Ic} - stanovíme na vzorcích dle norem, např. **ČSN EN ISO 12737** Kovové materiály - Stanovení lomové houževnatosti při rovinné deformaci (2010). Před zkouškou je nutné vytvořit ostrou únavovou s předepsanými parametry.

Pro zkoušku lomové houževnatosti se používají tahové zkušební stroje, které musí splňovat požadavky podle normy, zejména z hlediska tuhosti a rychlosti pohybu příčníku. Požadavky na příslušenství pro upevnění zkušebních těles jsou rovněž zahrnuty v normě. Jedná se v zásadě o zkoušku tříbodovým ohybem (typ A) a zkoušku excentrickým tahem (typ B).



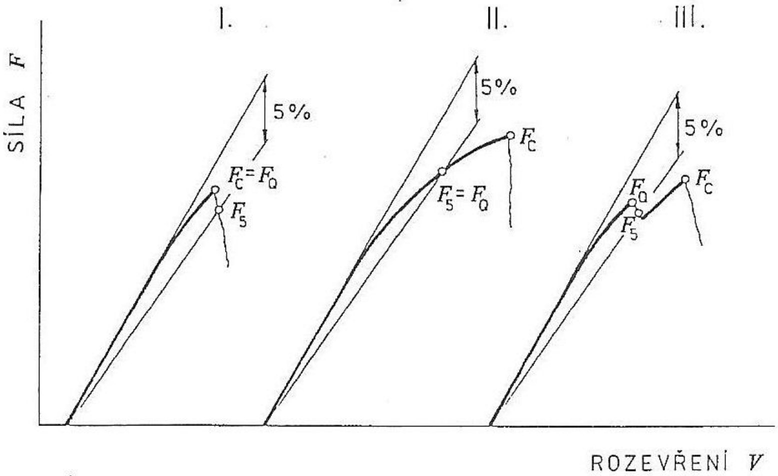
Obr. 3.6 Zkušební těleso typu A (3PB) namáhané tříbodovým ohybe.
Zkušební těleso typu B (CT) namáhané centrickým tahem.

Při zkoušce, která spočívá v rovnoměrném zatěžování vzorku až do porušení, se snímá závislost síly *F* na rozevření vrubu *V*. K měření rozevření se používají sponové snímače, které se upevňují do vybrání ve vrubech nebo do uchycení přišroubovaných na povrch tělesa, viz. obr. 3.7.



Obr. 3.7. Schéma uspořádání zkoušky lomové houževnatosti na zkušebním tělese typu A

Podle zkušebního materiálu a podmínek zkoušky lze získat různé typy závislosti F-V. Z nich je možné pro stanovení K_{Ic} použít tři druhy záznamů, při kterých došlo během zkoušky k náhlému nestabilnímu lomu, obr. 3.8.



Obr. 3.8 Charakteristické typy závislosti síla F – rozevření vrubu V při měření lomové houževnatosti

Vyhodnocení podle normy se provádí následovně:

1) Síla, při které inicioval nestabilní lom se označí F_c.
2) V průsečíku lineární části záznamu s osou rozevření *V* se narýsuje sečna s tangentou o 5 % nižší, než je tangenta lineární části. Průsečík sečny se záznamem se může označit F_5.
3) Za záznamů se pak určí síla F_Q pro další výpočet takto:
   a) pokud síla v každém bodě záznamu předcházející průsečíku je nižší F_5, potom F_5=F_Q. (typ II),
   b) jestliže na záznamu existuje maximum síly, které je vyšší než F_5, potom hodnota maxima se rovná F_Q (typ I a III),
   c) vypočítá sepoměr F_C/F_Q (pro typ II). Sílu F_Q lze použít k dalšímu výpočtu tehdy, pokud platí $F_C/F_Q \leq 1{,}1$.
   Splnění podmínky zaručuje, že od síly F_Q dochází k pomalému růstu trhliny a ne pouze k plastické deformaci. Pokud podmínka není splněna, pak je nutné vyhodnotit záznam zkoušky jinými postupy (pomocí veličin zavedených elasticko-plastickou lomovou mechanikou.

4) Z hodnoty síly F_Q určené výše uvedeným postupem a z rozměrů zkušebního tělesa se vypočítá provizorní hodnota lomové houževnatosti K_Q podle vztahu

$$K_Q = (F_Q.Y)/BW^{1/2} \quad \text{nebo} \quad K_Q = (F_Q.Y)/BW^{3/2} \qquad (3.3)$$

kde Y = f (a/W) je tvarový faktor (součinitel) závislý na typu tělesa. V tab. 3.1 jsou uvedeny vztahy pro výpočet K_Q, kde a je celková délka trhliny, včetně vrubu, naměřená na lomové ploše zlomeného tělesa, ostatní rozměry jsou zřejmě z obr. 3.6.

Tab. 3.1 Vztahy pro výpočet K_Q resp. K_{Ic} (ASTM E399, ASTM E1820-99)

Zkušební těleso	
Typ A	$K_Q = \frac{F_Q\, L}{BW^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}}\left[1{,}99 - \frac{a}{W}\left(1-\frac{a}{W}\right)\cdot\left(2{,}15 - 3{,}93\frac{a}{W} + 2{,}7\left(\frac{a}{W}\right)^2\right)\right]}{\left(1+2\frac{a}{W}\right)\cdot\left(1-\frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}}$
Tyb B	$K_Q = \frac{F_Q}{BW^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{\left(2+\frac{a}{W}\right)}{\left(1-\frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}}\left[0{,}886 + 4{,}64\left(\frac{a}{W}\right) - 13{,}32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14{,}72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5{,}6\left(\frac{a}{W}\right)^4\right].$

5) Provizorní hodnota K_Q představuje platnou hodnotu lomové houževnatosti K_{Ic} při rovinné deformaci tehdy, je-li splněna podmínka rovinné deformace. Tuto podmínku lze vyjádřit dvěma nerovnostmi; pro tloušťku zkušebního tělesa B i celkovou délku trhliny a musí platit

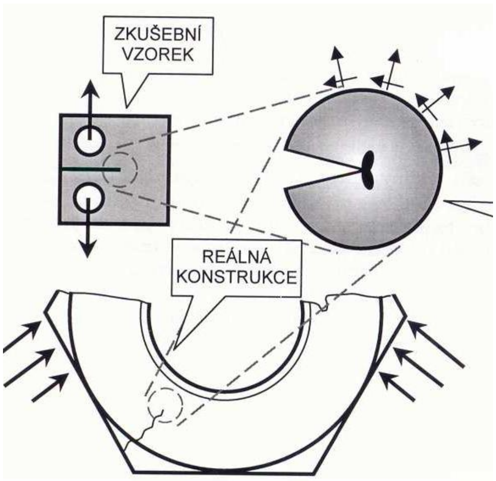
$$B \geq 2{,}5(K_Q/R_p)^2, \quad a \geq 2{,}5(K_Q/R_p)^2 \ \text{[m]}, \ W - a \geq 2{,}5(K_Q/R_p)^2 \qquad (3.4)$$

V případě, že pro danou zkoušku nejsou splněny uvedené nerovnosti, pak je nutné použít těleso o větší tloušťce (pokud skutečná tloušťka dílce to umožňuje) nebo zkoušku vyhodnotit na základě jiných charakteristik – zpravidla metodou J-integrálu nebo kritického otevření trhliny. Metodika stanovení těchto parametrů je opět popsána v příslušných normách.

U ocelí, pro něž byla zkouška původně rozpracována, charakter porušování závisí jak na teplotě, tak i na rychlosti zatěžování. Proto při měření lomové houževnatosti se obvykle určuje teplotní závislost K_{Ic}, případně teplotní závislost lomové houževnatosti při rychlém zatěžování $K_{I\tau}$ nebo rázovém zatížení K_{Id} (dynamická lomová houževnatost měřená na instrumentovaném kyvadlovém kladivu).

S ohledem na náročnost provedení zkoušky lomové houževnatosti jsou činěny pokusy pro stanovení jejich hodnot pomocí menších vzorků s rázovým zatížením, pomocí výsledků vrubové houževnatosti anebo tahové zkoušky za vymezených podmínek. Lomová mechanika opisuje pomocí jednoho nebo více parametrů stabilitu trhliny. Umožňuje přenos naměřených dat K_{Ic} ze zkušebních vzorků na reálné konstrukce, obr. 3.9.

Pokud podmínky pro rovinnou deformaci nejsou splněny se lomová houževnatost označuje K_c a její velikost je ovlivněna tloušťkou tělesa, přitom $K_c > K_{Ic}$ (obr. 3.4).



Obr. 3.9 Lomová houževnatost materiálu zkušebního vzorku a dílce, je stejná. Faktory intenzity napětí jsou rozdílné, podle rozložení zatížení, geometrie trhliny a tvaru tělesa.

Příklad – Vyhodnocení výsledků měření lomové houževnatosti

Při zkoušce lomové houževnatosti konstrukční slitiny AlCu4Mg1 na tělese typu B (CT) šířky 50 mm, tloušťky 12,5 mm byly naměřena kritická velikost síly F_Q = 9,05 kN. Při následné fraktografické analýza lomové plochy porušeného tělesa byly zjištěna průměrná délka trhliny a = 25 mm. Smluvní mez kluzu daného materiálu je $R_p0,2$ = 390 MPa.

Po dosazení za F_Q, a, W, a B do vztahu pro K_Q, dostaneme provizorní hodnotu lomové houževnatosti K_Q = 31,3 MPa.m$^{1/2}$. Z empirických podmínek pro zachování stavu rovinné deformace vyplývá požadavek, aby tloušťka tělesa B byla větší než minimální hodnota B_{min} = $2,5(K_Q/R_p)^2$ = 2,5(31,3/390)2 = 0,0161 m = 16,1 mm.

Z nerovnosti B = 12,5 mm < B_{min} = 16,1 mm je zřejmé, že hodnotu K_Q = 31,3 MPa.m$^{1/2}$ nelze považovat za lomovou houževnatost ve stavu rovinné deformace $K_{Ic.}$ Ze závislosti lomové houževnatosti na tloušťce tělesa vyplývá jednostranný odhad K_{Ic} < K_Q = 31,3 MPa.m$^{1/2}$.

Aby hodnota K_{Ic} byly platná a tedy platila podmínka B $\geq$ $2,5(K_Q/R_p)^2$ pro B=12,5 mm, měl by mít materiál hodnotu K_{Ic} $\leq$ 27,6 MPa.m$^{1/2}$.

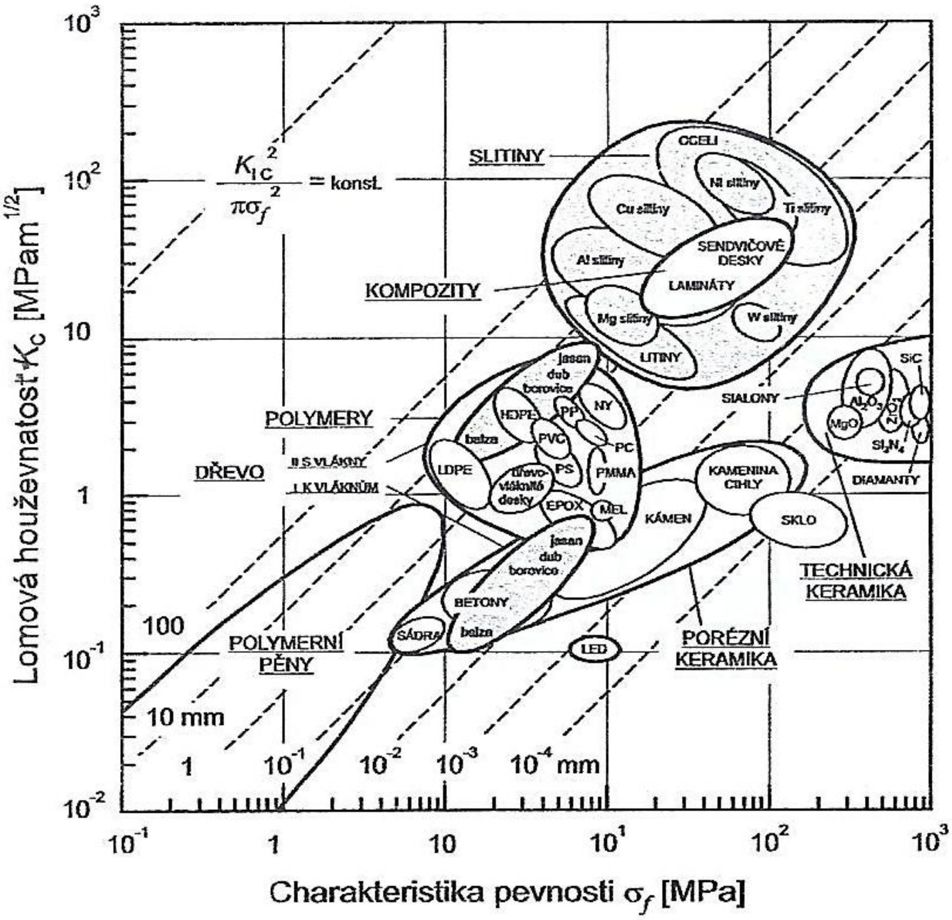
Rozmezí hodnot lomové houževnatosti významných skupin technických materiálů jsou porovnány v tab. 3.2. Nejvyšší hodnoty K_{Ic} (K_c) jsou dosahovány u austenitických ocelí.

Tab. 3.2 Hodnoty lomové houževnatosti vybraných materiálů

materiál	K_{Ic}		materiál	K_{Ic}	
	[MPa$\sqrt{m}$]			[MPa$\sqrt{m}$]	
Oceli	30 – 220		Litiny	5 - 20	
Ni slitiny	70 - 160		Technická keramika	2 - 10	
Ti slitiny	50 - 150		Technické polymery	0,5 - 7	
Al slitiny	10 - 50		Skla	0,5 - 1,2	
Mg slitiny	10 - 20		Beton	0,15 - 0,3	

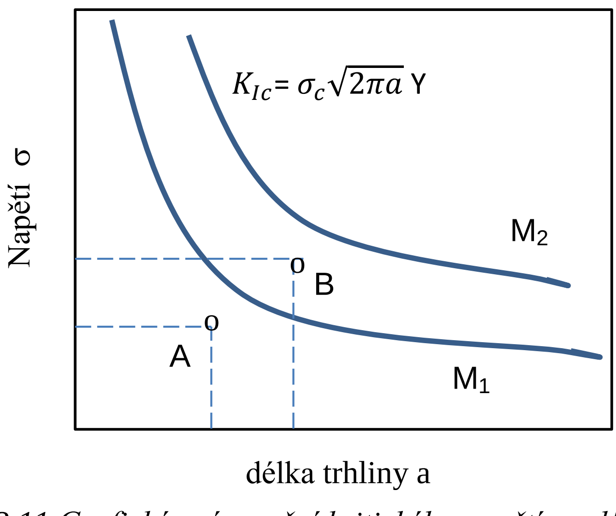
Obecně s rostoucími hodnotami pevnosti nebo meze kluzu, hodnoty houževnatosti v rámci dané skupiny kovových materiálů vykazují klesající trend.

Při porovnávání vlastnosti a volbě materiálu jsou používány Ashbyho mapy. Na obr. 3.10 jsou uvedeny souvislosti mezi lomovou houževnatostí a charakteristikou pevností (mez kluzu pro kovové materiály a polymery, pevnost v tlaku pro keramiku a skla, pevnost v tahu pro kompozity).



Obr. 3.10 Vzájemná relace mezi lomovou houževnatostí a charakteristikou pevností (Ashby)

Pro grafickou interpretaci souvislosti mezi lomovou houževnatostí, délkou trhliny a napětím se používají grafické závislosti znázorněné na obr. 3.11.



Obr. 3.11 Grafické znázornění kritického napětí na délce trhliny při dané lomové houževnatosti

Při kombinacích tahových napětí a délky trhliny pod danou křivkou (bod A), trhlina bude stabilní a náhlý křehký lom nenastane. Při dosažení dané křivky nebo překročení by nastal lom (bod B, materiálu M1, nikoli materiálu M2). Obecně materiál M2 je odolnější proti křehkému nestabilnímu lomu ve srovnání s M1.

Shrnutí pojmů

Prostudování této kapitoly měly by Vám být jasné tyto odborné termíny a pojmy.

- **Kritická hodnota faktoru intenzity napětí, lomová houževnatost K_{Ic}, kritické napětí, kritická délka trhliny, podmínky rovinné deformace, vlivy rovinné napjatosti (K_c),**
- **Statická a dynamická lomová houževnatost, teplotní závislosti houževnatosti,**
- **Zkušební tělesa typu A (3PB) nebo B (CT), sponový snímač, provizorní hodnota síly,**

Otázky ke kapitole 3

3.1 Jak je definována lomová houževnatost K_{Ic} ?

3.2 Které kovové materiály dosahují nejvyšších hodnot lomové houževnatosti ?

3.3 Jaké jsou podmínky platnosti hodnot K_{Ic} při zkoušení vzorků podle normy?

3.4 Jaký má vliv dynamické zatížení na teplotní závislost lomové houževnatosti ocelí?

3.5 Jaký trend obecně platí mezi lomovou houževnatostí K_{Ic} a hodnotou meze kluzu $R_{p0,2}$ (R_e) u téhož kovového materiálu (např. určité oceli po různém zpracování).

3.6 Jak se mění lomová houževnatost v závislosti na tloušťce tělesa?

3.7 V jakém intervalu jsou zpravidla hodnoty lomové houževnatosti K_{Ic} pro keramické materiály ?

3.8 Jaké výhody má použití hodnot lomové houževnatosti oproti vrubové houževnatosti?

3.9 Jaká jsou metalurgická (technologická) opatření pro zvýšení houževnatosti ?

3.10 Jaké jsou nevýhody zkoušení lomové houževnatosti podle norem?

Úlohy ke kapitole

3.1. Při poklesu teploty z 25°C na -50°C poklesla hodnota lomové houževnatosti 4 x. Jak se změní kritická délka trhliny a_c při stejném zatížení?

3.2. Vzorek z oceli 4340 s lomovou houževnatostí 54,8 MPa.m$^{1/2}$ má být vystaven napětí 1030 MPa. Praskne tento materiál, když je známo, že největší povrchová trhlina má délku 0,5 mm? Tvarová funkce (faktor tvaru) má pro relativně krátké povrchové trhliny hodnotu 1,12.

Řešení: Zadané parametry: K_{Ic} = 54,8 MPa.$m^{1/2}$, σ = 1030 MPa, a = 0,5 mm, Y = 1,12. Máme vypočítat kritické napětí σ_c a porovnat s napětím σ. Použijeme základní vztah pro lomovou houževnatost $K_{Ic} = \sigma_c\sqrt{\pi a}$ .Y, z něhož vypočteme σ_c. Např. přímo z rovnice 54,8 = $\sigma_c \sqrt{\pi .0{,}0005}$.1,12 dostaneme σ_c = 1235 MPa > σ = 1030 MPa, tj. lom nebude.

3.3. Vypočtěte zjednodušeně kritickou velikost ostré vnitřní trhliny v oceli s lomovou houževnatostí 30 MPa$m^{1/2}$, když součást z této oceli je zatížena tahovým napětím 100 MPa kolmo na trhlinu.

3.4. Odhadněte teoretickou lomovou pevnost křehkého materiálu, když je známo, že lom vznikne z povrchové trhliny elipsovitého tvaru o délce 0,5 mm a s poloměrem zaoblení 5.10^{-3} mm, když je aplikováno tahové napětí 103,5 MPa.

3.5. Ostrá trhlina kruhového tvaru o průměru 25 mm byla kompletně skryta v materiálu. Katastrofický lom nastal při tahovém napětí 700 MPa.
a) Jaká je lomová houževnatost pro daný materiál (předpokládejme tuto hodnotu pro podmínky rovinné deformace).
b) Jestliže plech (7,5 mm tlustý) z daného materiálu je připraven pro zkoušení lomové houževnatosti (B = 7,5 mm, a = 37,5 mm), byla by hodnota lomové houževnatosti platná (mez kluzu materiálu je 1100 MPa) ?
c) Jaká byla by dostatečná tloušťka materiálu pro platné stanovení K_{Ic} ?

3.6. Velká tabule je vyrobena z oceli, která má lomovou houževnatost 82,4 MPa.$m^{1/2}$ ve stavu rovinné deformace. Když během provozu tabule je vystavena tahovému napětí 345 MPa, stanovte minimální délku povrchové trhliny, která vede k lomu.

3.7. Vypočtěte maximální délku trhliny přípustnou pro součást ze slitiny titanu Ti-6Al-4V, která je zatížena do poloviny meze kluzu (1000 MPa) a má lomovou houževnatost K_{Ic} = 80 MPa.$m^{1/2}$. Geometrický faktor má velikost 1,5.

3.8. Lomovou houževnatost keramických materiálů lze stanovit z velikosti trhlin *(a)*, které se šíří z vrcholů vtisku při měření tvrdosti HV podle vztahu $K_{Ic} = 0{,}022(E/HV)^{2/5}(F/a)^{3/2}$. Použité zatížení F = 150 N na konci vtisku vytvořilo trhlinu o délce a = 400 μm. Jaká je houževnatost keramiky s modulem pružnosti E = 120 GPa a tvrdostí 700HV.

Literatura

[1] ČSN EN ISO 12737 Kovové materiály - Stanovení lomové houževnatosti při rovinné deformaci (2010)

[2] Kunz J., Aplikovaná lomová mechanika, ČVUT FJFI Praha, Česká technika, 2005, 272 s.

[3] Strnadel, B. Nauka o materiálu II. Degradační procesy a design konstrukčních materiálů. ES VŠB-TU Ostrava, 2008, 280 s.

[4] ASTM E399: Standard Test Method for Plane- Strain Fracture Toghness of Metallic Materials, 1997.
[5] ASTM B645: Practice for Linear- Elastic Plane- Strain Fracture Toughness Testing of Aluminium Alloys.
[6] E1820: Test Method for Measurement of fracture Toughmess
[7] E1823 Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing
[8] ASTM E399-90 Standard Test Method for Plane. Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, 1991. In. Annual Book of ASTM Standards, pp 485-515.
[9] ASTM E1820-99. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, 1999. In. Annual Book of ASTM Standards. Pp. 972-1005.
[10] Anderson T.L: Fracture Mechanics. Fundamentals and applications, BAE, 2005, 621 p.

Odpovědi na otázky

3.1 Kritická hodnota faktoru intenzity napětí pro počátek nestabilního lomu, při tahovém zatížení za podmínek rovinné deformace.
3.2 Oceli austenitické, slitiny niklu, slitiny titanu, některé vláknové kompozity
3.3 Pro K_{Ic} ve stavu rovinné deformace: $B \geq 2{,}5(K_{Ic}/R_p)^2$, $a \geq 2{,}5(K_{Ic}/R_p)^2$,
3.4 Dynamické zatížení snižuje houževnatosti K_{Ic} (tranzitní teplotu se posunuje výše) .
3.5 S rostoucí mezí kluzu klesá lomová houževnatost.
3.6 Podle obr. 3.4, v oblasti rovinné deformace je minimální, s klesající tloušťkou v oblasti smíšeného stavu napjatosti, resp. rovinné napjatosti houževnatost K_c stoupá, pro poměrně malé tloušťky opět klesá z důvodu smykového porušení.
3.7 Pro technické keramické materiály je obvykle K_{Ic} = 1- 10 $MPam^{1/2}$
3.8 Možnosti konstrukčních výpočtů pro tělesa s trhlinou nebo ostrou vadou.
3.9 Legování Ni, Mn, snížení obsahu C, S, P, zvýšení čistoty, zjemnění struktury není jednoznačné.
3.10 Nákladná výroba vzorků (příprava ostré trhliny cyklickým zatížením), zajištění podmínek rovinné napjatosti.

Výsledky příkladů

3.1. Kritická délka trhliny poklesne 16x.
3.2. Součást nepraskne.
3.3. Pro stav rovinné deformace a_c = 9,7 mm
3.4. Odhad σ_t = 2174 MPa
3.5. a) K_{Ic} = 139 $MPam^{1/2}$, b) tloušťka B = 7,5 mm nevyhovuje, c) min B = 40 mm.
3.6. Minimální délka povrchové trhlina a_c = 14,5 mm (na povrchu Y = 1,12).
3.7. Délka a_c = 3,62 mm.
3.8. Houževnatost K_{Ic} =1,3$MPam^{1/2}$.

4. PLASTICKÉ ZÓNY A OTEVŘENÍ TRHLINY

Čas věnovaný studiu této kapitoly je cca 2 hod.

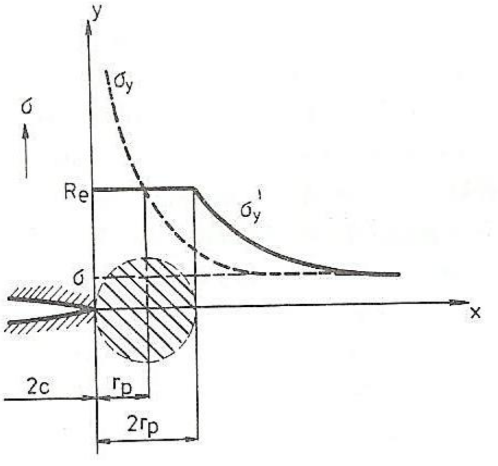
Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

Posoudit plastické zóny na odolnost materiálu proti křehkému porušení
Rozlišit tvary plastické zóny podle způsobu (módu) namáhání.
Aplikovat metodu otevření čela trhliny na lomové chování materiálu.
Vyjádřit nebo zjistit závislosti mezi kritickou hodnotou otevření čela trhliny (δ_c) a dalšími kritickými parametry lomové mechaniky.

Výklad

4.1 Plastické zóny

Vznik plastické zóny na čele trhliny je schematicky naznačen na obr. 4.1. Pro zjednodušení úvah a výpočtů předpokládáme kruhový tvar zóny s poloměrem r_p. Vzdálenost r_p od čela trhliny udává průběhu napětí σ_y s úrovní napětí na mezi kluzu R_e. Napětí σ_y' znázorňuje přeskupení napětí na čele trhliny po vytvoření plastické zóny.



Obr. 4.1 Zjednodušená plastická zóna (I. mód)

Podle vztahu $\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$ pro $\sigma_y = R_p$ a $r = r_p$ dostaneme snadno rozměr zóny

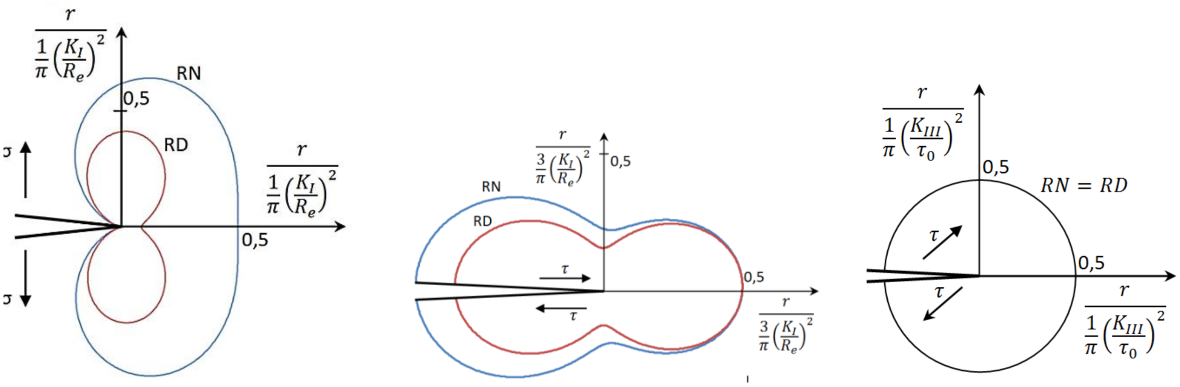
$$r_p = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_I}{R_p}\right)^2, \tag{4.1}$$

tj. velikost plastické zóny ve směru osy x, pro stav rovinné napjatosti RN (na povrchu).
Podobně pro stav rovinné deformace RD (uvnitř silnější stěny)

$$r_p = \frac{1}{6\pi}\left(\frac{K_I}{R_p}\right)^2. \tag{4.2}$$

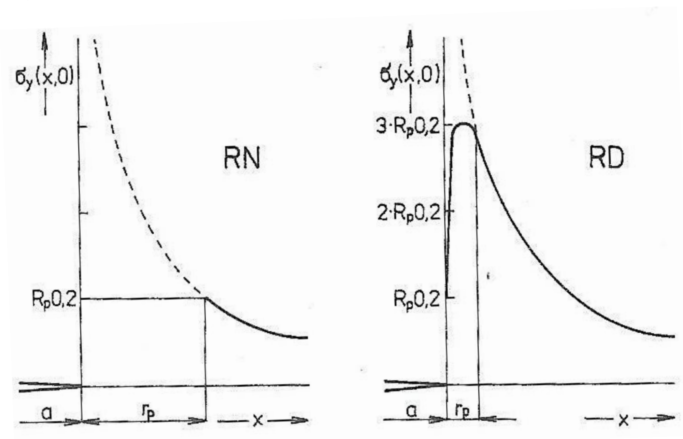
Pro přesnější analýzu tvaru zóny je nutno uvažovat smykové složky napětí a kritéria počátku plastické deformace. Na čele trhliny se vytvoří plastická zóny se skutečným tvarem, podle způsobu namáhání (módu).

Na vytvoření plastické zóny se spotřebuje část elastické energie, **plastická zóna zvyšuje povrchovou energií lomu** a tedy houževnatost materiálu. Plastické zóna vede ke snížení koncentrace napětí, k otupení špiček napětí před čelem trhliny, a tím omezuje anebo zabraňuje vzniku křehkého lomu.
Přesnější výpočty tvaru plastické zóny na základě složek tenzoru napětí, trojosého stavu napjatosti a kritéria počátku plasticity (HMH) vedou k výsledku na obr. 4.2, kde jsou patrné rozdíly mezi stavem rovinné deformace a rovinné napjatosti u I a II módu.



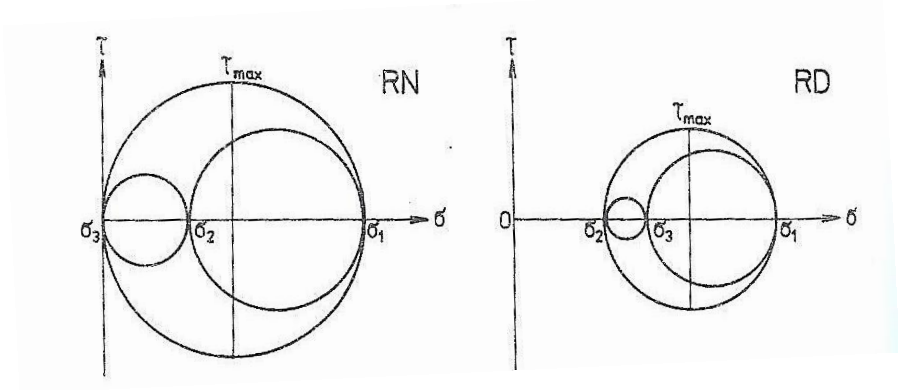
Obr. 4.2 Tvary plastické zóny pro I., II. a III. Mód, pro stav rovinné deformace (RD) a rovinné napjatosti (RN). Pro obecnější porovnání jsou použity poměrné souřadnice.

Ve stavu rovinné deformace vzniká menší plastická zóna s vyšší koncentrací napětí před čelem trhliny (obr. 4.3).



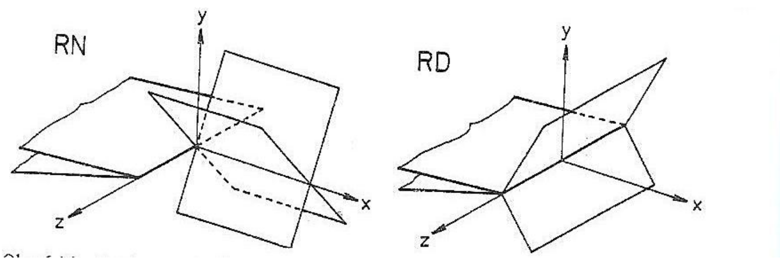
Obr. 4.3 Průběhy napětí σ_y před čelem trhliny ve stavu rovinné napjatosti (RN) a rovinné deformace (RD). Porovnání tvaru a poměrné velikosti plastické zóny pro I. mód (tah).

Při vysvětlení rozdílů výše uvedených poznatků se také používají **Mohrovy kružnice**, obr. 4.4; O možnostech plastické deformace rozhodují hodnoty smykových složek napětí.



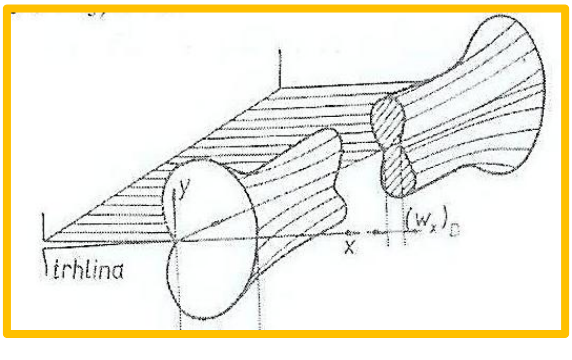
Obr. 4.4 Mohrova kružnice napětí u čela trhliny, maximální smykové napětí (stav RN a RD).

U povrchu ve stavu RN je více aktivních skluzových systémů a snadnější plastická deformace než pro stav RD (kde ve středu stěny převažuje trojosý tahový stav napjatosti).



Obr. 4.5 Roviny maximálního smykového napětí před čelem trhliny ve stavu RN a RD.

Schematický prostorový model tvaru plastické zóny u ostré trhliny je znázorněn na obr. 4.6. Ve střední části tloušťky (b) je stav rovinné deformace, při kterém vzniká malá plastická zóna. V okrajových a podpovrchových oblastech se plastická zóna zvětšuje v důsledku stavu rovinné napjatosti.



Obr. 4.6 Prostorové znázornění plastické zóny v desce s trhlinou. Porovnání velikosti a tvaru pro stav rovinné napjatosti (RN, povrch) a rovinné deformace (RD, střed)

Z uvedených vztahů pro velikost plastické zóny plyne pro tahový způsob namáhání (I. mód, a v rovině trhliny, y = 0, ve směru x), že ve stavu rovinné deformace je plastická zóny zhruba třikrát menší než ve stavu rovinné napjatosti.

Experimentální metody stanovení plastické zóny: a) metoda leptání, b) rentgenografické metody, c) tenzometrické metody, d) rekrystalizační metody, e) sledování na elektronovém mikroskopu, f) pruhy moiré, g) interferenční mikroskopie (holografická interferometrie) h) fotoelasticimetrie, i) stereometrie, j) infračervená termografie, k) měření mikrotvrdosti.

Ocelové konstrukce se většinou vyrábějí z ocelí o nižší a střední pevnosti, které se mohou porušit křehkým lomem, zejména při nižších teplotách a při dynamickém zatížení. Na těxhto materiálech a za podmínek, ve kterých jsou namáhané, je třeba počítat se vznikem větší plastické deformace před čelem trhliny, což znemožňuje použití lineární eleastické lomové mechaniky. Protože v rámci elasticko plastické lomové mechaniky uvažujeme reálnou velikost plastické zóny, musí být velikost energie plastické deformace, která se vynaloží na její vznik, zohledněná ve vztazích pro kritické hodnoty parametrů.

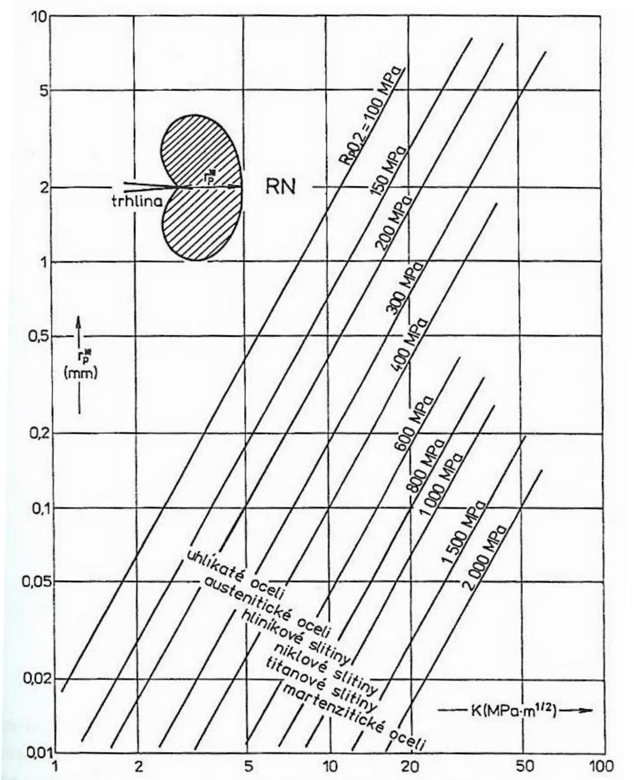
Energie plastické deformace v oblasti plastické zóny γ_p je 2-3 řády vyšší než hodnota vlastní povrchové (pružné) energie γ. Součet obou povrchových energii představuje **efektivní povrchovou energii**

$$\boldsymbol{\gamma_{ef} = \gamma + \gamma_p}. \tag{4.3}$$

Původní vztah pro výpočet kritického napětí (σ_c), resp. křehké pevnosti byl upraven do tvaru

$$\sigma_c = R_f = \sqrt{\frac{2\gamma_{ef} E}{\pi . a}}. \tag{4.4}$$

Porovnání velikosti plastické zóny na mezi kluzu materiálu $R_p0{,}2$ a faktoru intenzity napětí pro vybrané skupiny ocelí a slitin neželezných kovů je znázorněno na obr. 4.7.



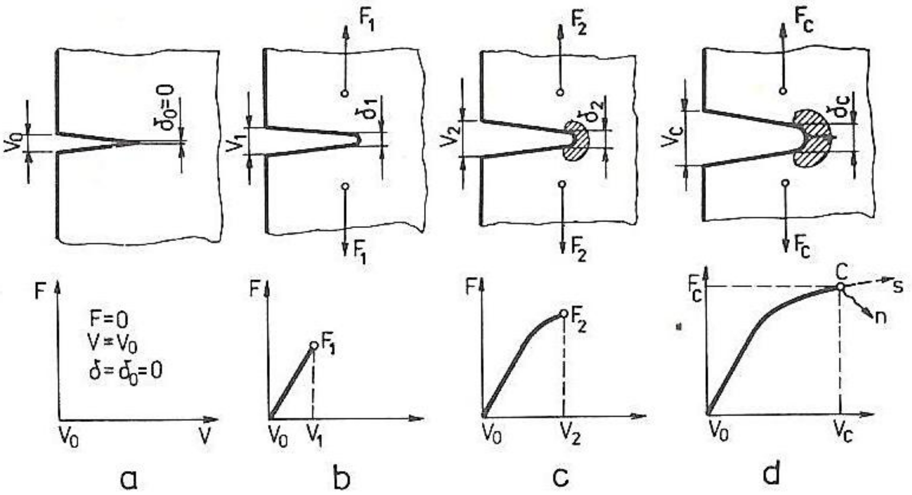
Obr. 4.7 Závislosti plastické zóny před čelem trhliny na faktoru intenzity napětí K_I a na mezi kluzu materiálu $R_p0{,}2$.

Uvnitř plastické zóny se nachází menší procesní zóna, kde dochází narušení soudržnosti materiálu při iniciaci nebo růstu trhliny (prostřednictvím mikrodutin, mikrotrhlin).

4.3 Otevření trhliny

Velikost plastické deformace v čele trhliny je úměrné velikosti rozevření lícních povrchů trhliny a možno ji stanovit experimentálně. Odtud vznikl název otevření (rozevření) trhliny, které se v odborné literatuře označuje δ nebo COD (crack opening displacement).
Tento přístup vychází z podmínky, že trhlina se začne nestabilně šířit v okamžiku, kdy **otevření trhliny δ**, úměrné plastické deformaci, dosáhne kritickou hodnotu δ_c.

Schéma postupného otevírání trhliny je uvedeno na obr. 4.8. Těleso s počáteční ostrou trhlinou je ve stavu vyznačeném na obr. 4.8a bez zatížení a velikost otevření trhliny je $\delta_o = 0$



Obr. 4.8 Schéma postupného otevření trhliny při růsti zatížení
a – stav bez zatížení, b – při zatížení silou F_1 nastává jen elastické otevření kořene trhliny, c – při síle F_2 dochází ke vzniku plastické zóny, d – okamžik kritického otevření trhliny $\delta = \delta_c$ při síle F_c, a trhlina se začne šířit. Velikost rozevření trhliny na povrchu (V) lze snadno měřit.

Při zatížení silou F_1 se kořen trhliny otevře (deformuje, stav b) na hodnotu δ_1, které odpovídá otevření ústí trhliny V_1. Při větší síle F_2 (stav c) překročí napětí v kořeni mez kluzu a vznikne plastická deformace, resp. plastická zóna. V tomto případě hodnota otevření δ_2 představuje součet pružné a plastické deformace v kořeni a tomu odpovídá hodnota V_2. Kritický okamžik nastane při zatížení silou F_c (stav d), kdy celková deformace v kořeni trhliny dosáhne kritickou (mezní) hodnotu $\delta = \delta_c$, přitom $V = V_c$. V daném okamžiku se začne trhlina šířit:
- nestabilně, pokud počátek lomu probíhá při současném prudkém poklesu síly (případ n na diagramu F-V na obr. 4.8d),
- stabilně (pomalu, podkriticky), když se trhlina šíří při konstantní anebo mírně stoupající síle (směr s).

Okamžik stavu nestability trhliny je tedy definován:
a) hodnotou kritického otevření trhliny δ_c,
b) nominálním lomovým napětím σ_f, zjištěným z kritické hodnoty síly F_c.

Kritérium δ_c má praktický význam, když jeho hodnota se stanoví v souvislosti s lomovým napětím σ_f, které způsobí nestabilní lom. Proto byly odvozeny závislosti mezi uvedenými a dalšími parametry. Pro stav rovinné napjatosti $\delta_c = \frac{\pi . c . \sigma_f^2}{E . R_e} = \frac{K_c^2}{E . R_e} = \frac{G_c}{R_e}$, a podobně pro stav rovinné deformace

$$\delta_c = \frac{K_{Ic}^2 \,(1-\nu^2)}{E . R_e} = \frac{G_{Ic}}{R_e}. \qquad (4.5)$$

Tyto vztahy udávají vzájemnou souvislost mezi parametry lineární LM (K_{Ic}, G_{Ic}) a kritériem elasticko-plastické LM (δ_c).

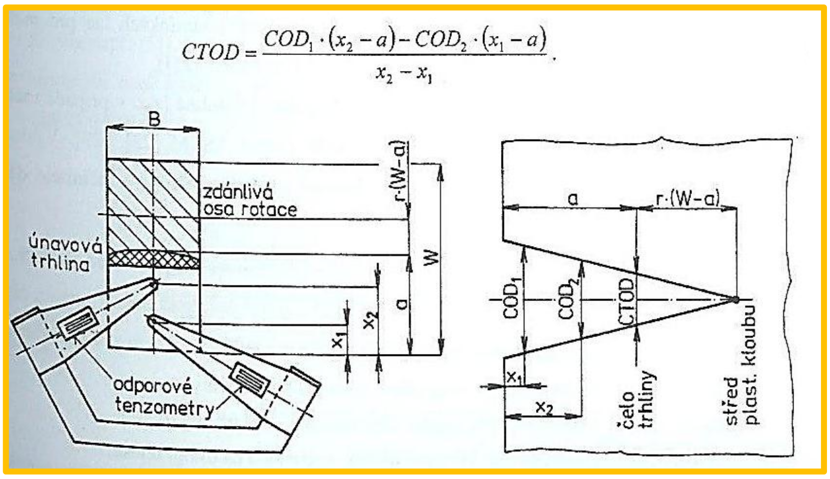
Předpokladem použití kritéria δ_c na hodnocení odolnosti materiálu proti křehkému porušení je požadavek, aby hodnota δ_c zjištěna laboratorně na zkušebních vzorcích odpovídala hodnotě v okamžiku nestability trhliny v reálné konstrukci při stejné teplotě, rychlosti zatěžování a stavu napjatosti. Přitom velikost plastické deformace v kořeni počáteční trhliny musí být menší jako je tloušťka zkušebního tělesa, což znamená, že lom musí nastat před plastickou deformací celého průřezu před trhlinou. Hodnota δ_c závisí na teplotě, podobně jako K_{Ic}.

Kritérium stability trhliny: **CTOD < CTODc** (CTODc - kritická hodnota pro nestabilní vznik lomu) nebo zkráceně **$\delta < \delta_c$**.
Použití transformačních vztahů mezi CTOD a K_I, např.

$$\delta = \frac{K_I^2}{\lambda E R_p} \qquad (4.6)$$

kde $\lambda = \pi/4 - 2$ (RN), umožňuje **nepřímé stanovení lomové houževnatosti** K_{Ic} pomocí **δ_c** (CTODc), např. podle vztahu $\delta_c = \frac{K_{Ic}^2}{\lambda E R_p}$, přitom je nutno ověřit podmínky platnosti K_{Ic} pro rovinnou deformaci a uvedené rozměry tělesa B, a, W - a $\geq 0{,}1 \frac{K_{Ic}^2}{R_p^2}$. (B – šířka vzorku, a – délka trhliny, (W – a) rozměr části vzorku před trhlinou).

Stanovení otevření trhliny pomocí dvou sponových snímačů je vyznačeno na obr. 4.9.



Obr. 4.9 Měření COD ve dvou místech tělesa, líce trhliny. Vztah mezi COD_1, COD_2 a CTOD

Shrnutí pojmů

Po prostudování této krátké kapitoly měly by Vám být jasné následující pojmy:
Plastické zóna, velikost a tvar zóny, podmínky rovinné napjatosti nebo rovinné deformace, efektivní povrchová energie.
Otevření trhliny (δ, COD), kritické otevření (rozevření) trhliny, kritérium δ_c, závislosti síla- otevření (F- V),

Otázky ke kapitole 4

4.1 Jaký význam má plastická zóna pro odolnost materiálu proti křehkému lomu.
4.2 Proč existují rozdíly ve velikosti plastické zóny na povrchu a uvnitř tělesa s větší tloušťkou stěny?
4.3 Jaký vliv má plastická zóna na maximální hodnoty tahového napětí u čela trhliny?
4.4 Jaká je závislost mezi velikostí plastické zóny a otevřením čela trhliny?
4.5 Jak stanovíme lomovou houževnatost pomocí otevření čela trhliny ?
4.6 Navrhněte způsob, jakým lze stanovit parametr λ ve vztahu (4.6).

Příklady

4.1. Porovnejte velikost plastické zóny před čelem trhliny pro II a III způsob zatížení při podmínce $K_{II} = K_{III}$, $\tau_o = R_e/2$.
4.2. Rozměrná strojní součást z oceli s lomovou houževnatostí 50 MPa $m^{1/2}$ a mezí kluzu 650 MPa praskla. Jak velká plastická zóna se vytvořila u šířící se trhliny.

4.3. Stanovte úhel spojený s maximálním rozměrem plastické zóny pro I. mód (obr. 4.2).

4.4. Jaká je velikost plastické zóny slitiny titanu s mezí kluzu 700 MPa při $K_I = 30\ MPam^{1/2}$

4.5. Vypočtěte velikost otevření čela trhliny slitiny hliníku s mezí kluzu 400 MPa při zatížení $K_I = 20\ MPam^{1/2}$

Literatura

[1] Kunz J., Aplikovaná lomová mechanika, ČVUT FJFI Praha, Česká technika, 2005, 272 s.
[2] Kučera, J. Stručný úvod do mechaniky lomu, Část 1. Vruby a trhliny. Nestabilní lom. FS VŠB Ostrava, 1993, 106 s.

[3] Kučera, J. Stručný úvod do mechaniky lomu, Část II. Únava materiálu. FS VŠB Ostrava, 1994, 75 s.
[4] ČSN EN ISO 12737 Kovové materiály - Stanovení lomové houževnatosti při rovinné deformaci (2010)
[5] Callister D. W., Materials Science and Engineering. An Introduction. University Iowa, John Wiley& Sons, 2007,721 p.
[6] Felbeck, D. K., Atkins A.G.: Strength and Fracture of Engineering Materials. Prentice Hall, Englewood, 1984, 542 p.
[7] Pokluda J. aj. Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek. PC-DIR, Brno, 1994, 385 s
[8] Anderson T.L: Fracture Mechanics. Fundamentals and applications, BAE, 2005, 621 p.
[9] Strnadel, B., Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství. Ostravské tiskárny, 1998, 334 s.
[10] Strnadel, B. Nauka o materiálu II. Degradační procesy a design konstrukčních materiálů. ES VŠB-TU Ostrava, 2008, 280 s.
[11] Strnadel, B. et.al. New methods of damage and failure analysis of structural parts. Workshop, VŠB-TU Ostrava, 495 s. 2012. ISBN 978-80-248-2802-2
[11] Strnadel, B. et.al. New methods of damage and failure analysis of structural parts. Workshop, VŠB-TU Ostrava, 437 s. 2010. ISBN 978-80-248-2265-5

Odpovědi na otázky

4.7 Plastická zóna snižuje maximální napětí u trhliny a zvyšuje povrchovou energii lomu.
4.8 Na povrchu je dvojosý stav napjatosti s vyšší smykovou složkou a více kluzových systémů.
4.3 V plastické zóně dochází ke snížení a posuvu maximálního napětí (σ_y) pod povrch. Max. napětí ve stavu rovinné deformace je cca 3 x vyšší než ve stavu rovinné deformace (obr. 4.3)
4.4 Platí přímá úměra $\delta = 4R_p.r_p/E$ (pro $\lambda = \pi/2$), podle vztahu (4.1) a (4.6).
4.5 Pomocí měření kritické hodnoty otevření trhliny δ_c a vztahu $K_{Ic} = (\lambda E R_p.\ \delta_c)^{1/2}$
4.6 Pro známé hodnoty K_I, E a R_p změříme δ a vypočteme parametr λ podle vztahu (4.6).

Výsledky příkladů

4.1. Pro úhel $\varphi = 0$ je $r_p(II) = 3/4\ r_p(III)$, tj. $r_p(II) < r_p(III)$,
4.2. Velikost zóny $r_p = 1{,}9$ mm.
4.3. Pro rovinnou napjatost (RN) přibližně $\varphi = 70°$, pro rovinnou deformaci (RD) $\varphi = 85°$.
4.4. Rozměr zóny $r_p = 0{,}292$ mm pro RN, resp. $r_p = 0{,}0{,}097$ pro RD
4.5 Otevření čela trhliny $\delta = 18{,}2\ \mu m$ (pro $\lambda = \pi/4$)

5. ENERGETICKÉ KONCEPCE A PŘÍSTUPY

Čas věnovaný studiu této kapitoly je cca 4 hod.

Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

- Griffithovou teorii křehkého lomu a možnosti její aplikace
- Hnací sílu trhliny a odpor proti šíření trhliny
- Faktor hustoty deformační energie
- J-integrál po posouzení stability trhliny.

Výklad

5.1 Griffithova teorie

Griffithova teorie křehkého lomu (1920) tvoří základ pro další pozdější energetické koncepce iniciace nebo šíření lomů. Pro šíření trhliny předpokladá, že úbytek elastické energie v tělese v závislosti na délce trhliny bude větší než přírůstek povrchové energie nově se tvořící trhliny. Pro jednotlivé formy a položky v energetické bilanci lze psát (zjednodušené odvození podle obr. 5.1):

W_a – energie desky s trhlinou o délce (a)

U_e – úbytek elastické energie růstem trhliny $\mathbf{U_e} = \frac{\pi a^2.\sigma^2}{E}$

W_s – povrchová energie trhliny, $\mathbf{W_s = 4.\gamma.a}$, kde γ [Jm^{-2}] je povrchová energie materiálu

W_o – energie systému bez trhliny (W_o = konst.). Platí:

$$\mathbf{Wa = Wo + Ws - Ue} \qquad (5.1)$$

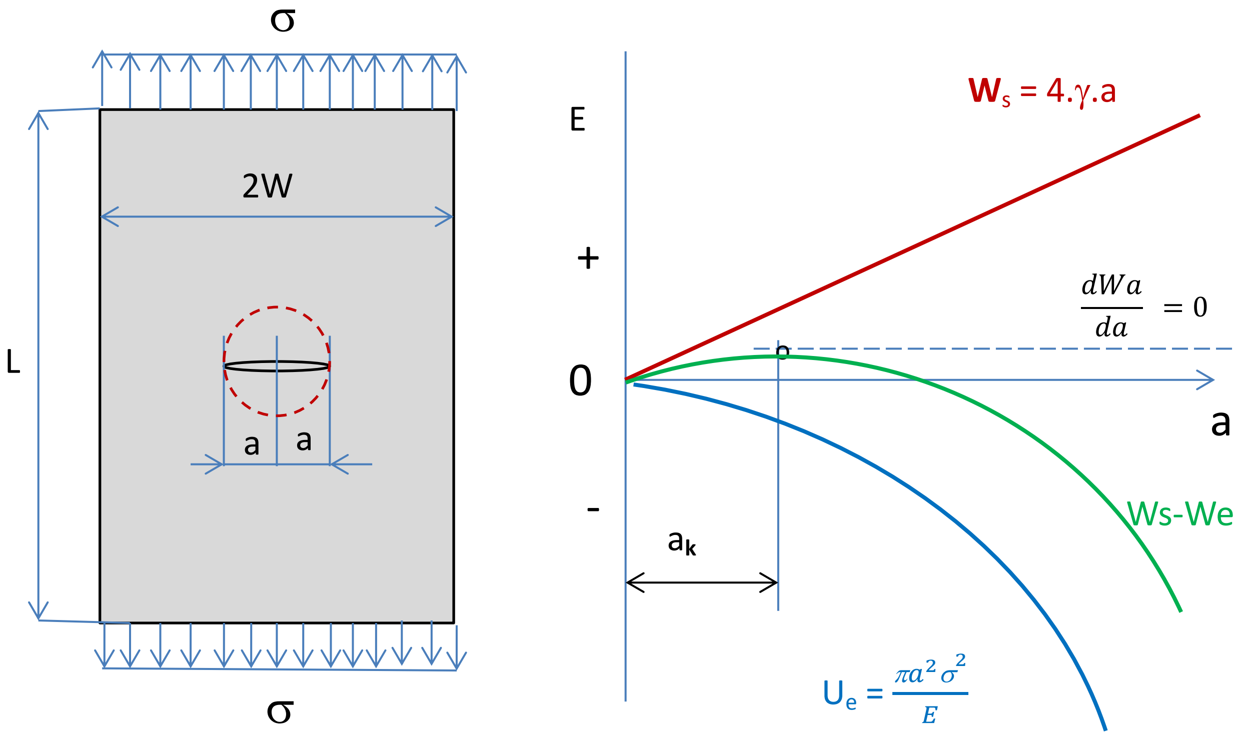
Podmínka stability trhliny: $\frac{dWa}{da} = 0 = 4.\gamma - \frac{2\pi.a.s^2}{E}$, odtud po úpravě

$$a_k = \frac{2E\gamma}{\pi\sigma^2}, \qquad (5.2)$$

pro a < a_k nestabilní lom nenastane, při daném vnějším napětí σ. Obdobně kritické napětí

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{2\gamma.E}{\pi.a}}, \qquad (5.3)$$

přitom lom nevznikne pro napětí $\sigma < \sigma_k$; nestabilní lom nastane ihned pro $\sigma \geq \sigma_k$, při dané délce ostré trhliny. Uvedené vztahy pro kritické parametry (ak nebo σk) a nerovnosti tvoří **Griffithovo kritérium** křehkého porušení. Jeho platnost byla potvrzena nejprve na skle, později na dalších křehkých materiálech.



Obr. 5.1 Uvažujeme desku z křehkého materiálu (např. skla) s centrální trhlinou o délce 2a, orientovanou kolmo na působící tahové napětí σ. Předpoklady: a < < W, a < < L, (tl. B = 1)

Povrchová energie lomu křehkých materiálů se pohybuje v mezích řádově $\gamma = 1\text{-}10$ [Jm^{-2}], mluvíme proto nízkoenergetických lomech.
Pro srovnání, vysokoenergetické tvárné lomy mají efektivní hodnoty povrchové energie řádově $\gamma_{ef} = 10^3\text{-}10^4$ [Jm^{-2}].

5.2 Hnací síla trhliny, odpor proti šíření trhliny

Tento energetický přístup rozšiřuje původní Griffithovou koncepci na materiály s částečnou plastickou deformaci a pro tzv. kvazi-křehké lomy.

Úpravou energetické koncepce počátku šíření křehké trhliny (dle Griffithe) dostaneme vztah

$$\frac{\pi a \sigma^2}{E} = 2\gamma. \qquad (5.4)$$

Levá strana této rovnice má fyzikální smysl a představuje intenzitu uvolňování energie elastické deformace na jednotku plochy povrchu trhliny při velmi (nekonečně) malém zvětšení trhliny. Označuje se mezinárodně G a nazývá se také **hnací sílou trhliny** (podle jednotky J/m = N). Hodnota G se při stabilním (podkritickém) šíření trhliny plynule zvětšuje a v okamžiku kdy délka trhliny dosáhne kritickou hodnotu a_k, hodnota G dosáhne kritickou hodnotu G_c. Po tomto okamžiku šíření trhliny pokračuje na úkor elastické energie, která se v tělese nahromadila v procesu zatěžování a předcházejícího růstu trhliny. Takové šíření trhliny označujeme jako nestabilní a je charakterizováno nekontrolovatelným průběhem, který končí křehkým lomem součásti nebo konstrukce.

Pravá strana rovnice (5.4) představuje materiálovou vlastnost a vyjadřuje odpor proti nestabilnímu šíření trhliny, označovaný písmenem R. Zřejmě platí R = 2γ a $G = \frac{\pi c \sigma^2}{E}$.
S přihlédnutím k faktoru intenzity napětí $K = \sigma\sqrt{\pi c}$ dostaneme vztah mezi parametry G a K ve tvaru $G = \frac{\pi c \sigma^2}{E} = \frac{K^2}{E}$, který platí pro podmínky rovinné napjatosti. Podobně pro stav rovinné deformace a pro I. způsob zatížení platí

$$G_I = \frac{K_I^2}{E}(1-\nu^2). \tag{5.5}$$

Odtud plyne, že veličiny G_I a K_I jsou ekvivalentní při hodnocení tělesa s trhlinou.

Druhý **obecnější přístup** k odvození G a R: Hnací síla trhliny je míra uvolňování elastické energie, která vstupuje do procesu šíření trhliny. Hnací síla trhliny je vyjádřena vztahem

$$\mathbf{G} = -\frac{dW_c}{da}, \tag{5.6}$$

kde celková mechanická energie $W_c = W_e + W_p$ a dále W_e - elastická energie, W_p – potenciální energie vnějších sil, $W_p = W_F$ – práce vnějších sil.
Pro oblast čela trhliny lze odvodit $G = \frac{a.\sigma^2}{E} = \frac{K_I^2}{E}$ pro RN, $G = \frac{a.\sigma^2}{E}(1-\nu^2) = \frac{K_I^2}{E}(1-\nu^2)$ pro RD.
Odpor proti šíření trhliny

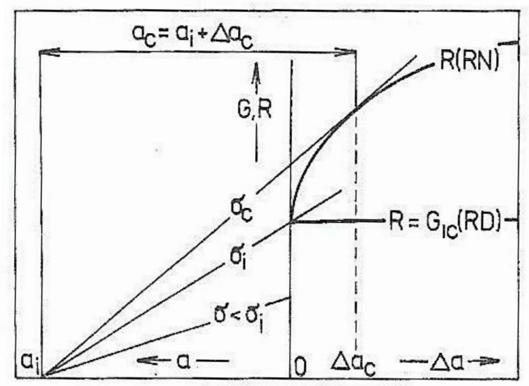
$$\mathbf{R} = \frac{dW_\gamma}{da}\ (J/m^2), \tag{5.7}$$

kde W_γ - energie trhliny (J/m), $W_\gamma = \frac{\gamma.S}{B}$ zahrnuje povrchovou energii, dále energii na plastickou deformaci, na zvýšení teploty, kinetickou energii materiálu. Podmínka stability pro elasticko-plastické materiály: $\mathbf{G_c = R}$

Odpor proti šíření trhliny $\mathbf{R} = \frac{dW_\gamma}{da}$ (J/m^2) je energie potřebná k vytvoření lomové plochy jednotkové velikosti, charakterizuje lomovou houževnatost materiálu

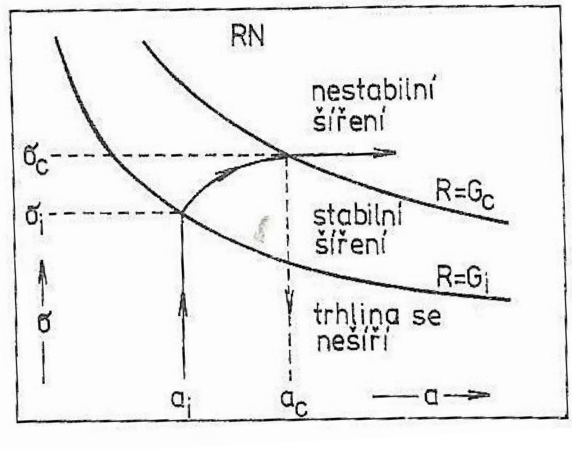
$$R = G_{Ic} = \frac{ac.\sigma^2}{E}(1-\nu^2) = \frac{K_{Ic}^2}{E}(1-\nu^2) \text{ pro RD, a pro RN: } \mathbf{R} = \mathbf{G_{Ic}} = \frac{ac.\sigma^2}{E} = \frac{K_{Ic}^2}{E}. \tag{5.8}$$

R – křivky jsou závislosti odporu R na délce trhliny (a) anebo přírůstku (Δa), tj. R = f(Δa). Vhodné grafické znázornění některých výše uvedených vztahů ($G = \frac{a.\sigma^2}{E}$). Schéma pod-kritického růstu počáteční trhliny (délky a_i) do kritické velikosti (a_c) je uvedeno na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Porovnání R křivek a kritických délek trhlin pro RN a RD. Snadnější šíření trhliny ve stavu rovinné deformace (RD) ve srovnání s rovinnou napjatostí (RN).

Možnosti šíření trhliny s ohledem na hodnoty G a R jsou znázorněny na obr. 5.3.



Obr. 5.3 Závislost délky trhliny a na napětí σ ve stavu RN, jednotlivé etapy šíření trhliny a) $G < G_i$ - trhlina se nešíří, b) $G_i \leq G < G_c$ trhlina se šíří stabilně (podkriticky) c) $G \geq G_c$ trhlina se šíří nestabilně.

Úvahy o rozložení hustoty deformační elastické energie u čela trhliny vedly k vytvoření S - faktoru hustoty elastické energie, který je možno použít pro predikci směru nestabilního šíření trhliny.

Pro materiály a dílce s větším rozsahem plastické deformace při zatížení je možno odolnost proti iniciaci stabilního i nestabilního lomu charakterizovat pomocí tzv. J - integrálu, který je zdůvodněn a používán v rámci nelineární (elasto-plastické) lomové mechaniky.

5.3 Faktor hustoty deformační energie

Na rozdíl od předchozích parametrů lineární elastické LM tento parametr umožňuje predikci směru šíření trhliny, je vhodný pro posouzení vlivu orientace trhliny na hodnoty faktoru intenzity napětí a pro posouzení vlivu kombinovaných typů zatížení.

Podle Sihovy teorie **faktor hustoty deformační energie** je definován vztahem $\mathbf{S = r \frac{dU}{dV}}$, kde $\frac{dU}{dV}$ je hustota deformační energie. $w_e = \frac{dU}{dV} = \sum_{ij}^{3} \frac{\sigma ij \varepsilon ij}{2}$. Při odvození byl použitý 3D Hookův zákon $\varepsilon_{ij} = f(\sigma_{ij}, G, \nu)$ a vztahy $\sigma_{ij} = \sigma_{ijI} + \sigma_{ijII} + \sigma_{ijIII}$ (superpozice složek napětí), přitom obecně $\sigma_{ij,k} = K_k \frac{f_{ijk}(\theta)}{\sqrt{2\pi r}}$, (i, j = x, y, z; k = I, II, III).

Pro S-faktor byly odvozeny v rámci LM vztahy:

$$\mathbf{S = a_{11}K_I{}^2 + 2a_{12}K_I\ K_{II} + a_{22}K_{II}{}^2 + a_{33}K_{III}{}^2}\ , \qquad (5.9)$$

kde koeficienty a_{ij} =f(G,ν,θ) jsou uvedeny v tab. 5.1.

Při aplikaci Sihova S-faktoru jsou uplatňovány dvě hypotézy:

Hypotéza 1 – k šíření trhliny dojde ve směru θo, kde je **min. S = S($\boldsymbol{\theta_o}$)**, tedy $\frac{\delta S}{\delta \theta} = 0$ a $\frac{\delta^2 S}{\delta \theta_2} > 0$,

Hypotéza 2 – k nestabilnímu šíření dojde, když S dosáhne kritické hodnoty S_c, tj. **S($\boldsymbol{\theta_o}$) = $\boldsymbol{S_c}$**

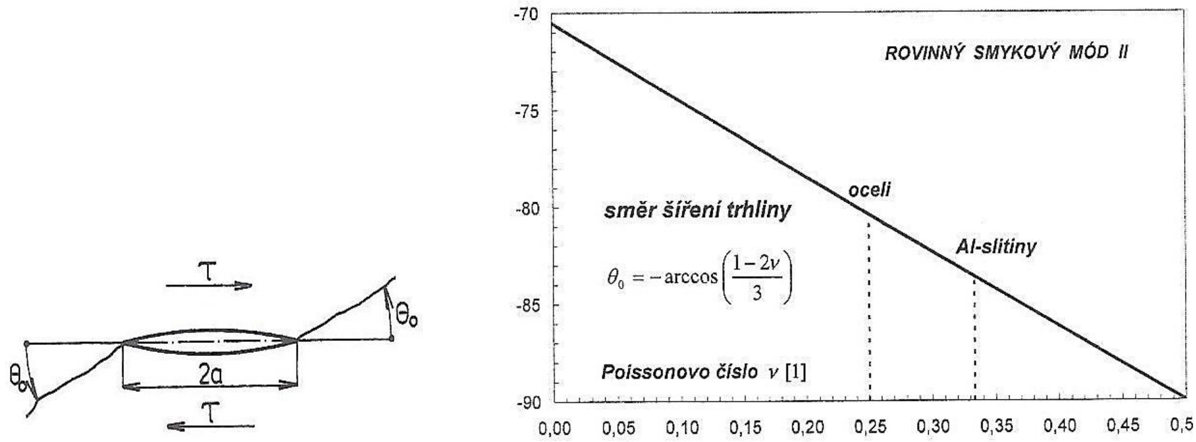
Tab. 5.1 Koeficienty pro vyjádření S- faktoru.

$a_{11} = \dfrac{1}{16\pi G}\left[(3-4\nu-\cos\theta)\cdot(1+\cos\theta)\right]$	pro stav RD
$a_{11} = \dfrac{1}{16\pi G}\left[\left(\dfrac{3-\nu}{1+\nu}-\cos\theta\right)\cdot(1+\cos\theta)\right]$	pro stav RN
$a_{12} = \dfrac{1}{8\pi G}\sin\theta\cdot\left[\cos\theta-(1-2\nu)\right]$	pro stav RD
$a_{12} = \dfrac{1}{8\pi G}\sin\theta\cdot\left[\cos\theta-\dfrac{1-\nu}{1+\nu}\right]$	pro stav RN
$a_{22} = \dfrac{1}{16\pi G}\left[4(1-\nu)\cdot(1-\cos\theta)+(1+\cos\theta)\cdot(3\cos\theta-1)\right]$	pro stav RD
$a_{22} = \dfrac{1}{16\pi G}\left[\dfrac{4}{1+\nu}(1-\cos\theta)+(1+\cos\theta)\cdot(3\cos\theta-1)\right]$	pro stav RN
$a_{33} = \dfrac{1}{4\pi G}.$	

Jednoduché příklady na aplikaci S-faktoru

1) **Pro tahový mód I** , $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$, $K_{II} = K_{III} = 0$, tj. zůstane pouze S = $a_{11}{K_I}^2$ a po výpočtu S_{min} = S(0)= $a\sigma^2\frac{1-2\nu}{4G}$, $\theta = 0°$, což potvrzuje, že trhlina se bude šířit kolmo na tahové hlavní napětí a pro kritické parametry dostaneme $\boldsymbol{S_c} = \frac{\mathbf{1-2\nu}}{\mathbf{4\pi G}}\boldsymbol{K_{Ic}}^{\mathbf{2}}$.

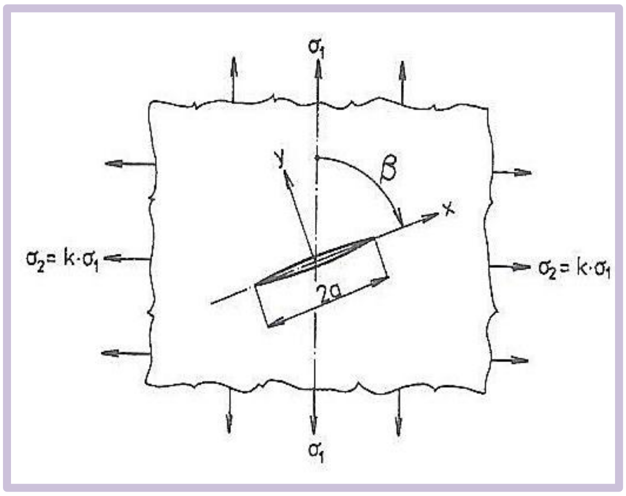
2) **Smykový mód II**, $K_{II} = \tau\sqrt{\pi a}$, $K_I = K_{III} = 0$, S = $a_{22}{K_{II}}^2$, S_{min}= $S(\theta_0) = a\tau^2\frac{2(1-\nu)-\nu^2}{12G}$,
$\boldsymbol{S_c} = \frac{\mathbf{2(1-\nu)-\nu^2}}{\mathbf{12\pi G}}\boldsymbol{K_{IIc}}^{\mathbf{2}}$**.** Zde směr šíření θ_o je závislý na Poissonovu poměru ν, obr. 5.4



Obr. 5.4 Obecné označení směru šíření po ztrátě stability trhliny v případě II. módu. Závislost směru šíření trhliny θ_o na Poissonově poměru ν

3) Dvouosé namáhání, smíšený mód I + II,

Uvažujeme těleso s vnitřní trhlinou délky 2a (jejíž rozměry jsou velmi malé vzhledem k rozměrům desky) namáhané dvojosým zatížením σ_1 a $\sigma_2 = k.\sigma_1$, kde k je reálné číslo. Osa trhliny svírá úhel β se směrem působení napětí σ_1, obr. 5.5.
Pomocí Mohrovy kružnice a principu superpozice, lze odvodit tahové napětí působící kolmo na trhlinu (ve směru osy y), smykové napětí působící ve směru osy x, a tato napětí vyvolávají příslušné faktory intenzity napětí K_I a K_{II} pro tahový a smyková mód. Výsledky jsou uvedeny u obr. 5.5.
Vztahy pro K_I a K_{II} lze dosadit do S-faktoru a po zdlouhavých matematických úpravách je možno zjistit směry θ_0, ve kterých se budou šířit trhliny.
Přehledné jsou pak grafické funkční závislosti θo = f(β,ν), S = f(β,ν), σc = f(β,ν), zjednodušené pro k = 0



$$\sigma_I = \sigma_{I1} + \sigma_{I2} = \sigma_1\left(\sin^2\beta + k\cos^2\beta\right)$$

$$\tau_{II} = \tau_{II1} + \tau_{II2} = \sigma_1(1-k)\sin\beta\cos\beta\,,$$

$$K_I = K_{I1} + K_{I2} = \sigma_1\sqrt{\pi a}\left(\sin^2\beta + k\cos^2\beta\right)$$

$$K_{II} = K_{II1} + K_{II2} = \sigma_1\sqrt{\pi a}(1-k)\sin\beta\cos\beta$$

$$K_{III} = K_{III1} + K_{III2} = 0\,.$$

Obr. 5.5 Deska s trhlinou zatíženou dvouosým namáháním při smíšeném módu.

Pro k = 0 ($\sigma_2 = 0$) dostaneme závislosti faktorů intenzity K_I a K_{II} na úhlu β.

5.4 J –integrál

Objektivním východiskem pro posouzení stability trhliny je **celková energetická bilance** porušovaného tělesa při daném vnějším namáhání. Základním kritériem stability trhliny, vycházejícím z energetických úvah, je Griffithovo kritérium, které bylo původně odvozeno pro dokonale křehké materiály, tj. pro lineárně elastický stav napjatosti v okolí čela trhliny. Toto kritérium bylo postupně rozšířeno i na reálné konstrukční materiály, u nichž dochází v okolí čela trhliny k lokální plastické deformaci, tj. ke vzniku plastické zóny malého rozsahu. Parametrem charakterizujícím stabilitu trhliny byla v těchto případech hnací síla trhliny G, jejíž výpočet vycházel z elastického řešení stavu napjatosti v okolí trhliny.

Dojde-li však v deformovaném tělese ke vzniku **plastické deformace většího rozsahu**, nelze kritéria stability trhliny popsaného pomocí hnací síly G použít, protože tato plastická deformace výrazně ovlivní pole napětí a deformací v okolí trhliny. Naznačený problém se podařilo do jisté míry odstranit zavedením nového lomového parametru, nazývaným J-integrálem (Riceův integrál). Tento **J-integrál** je zobecněním hnací síly trhliny G a umožňuje použití i v případech plastické deformace většího rozsahu.

J-integrál je **křivkový integrál**, který pro těleso s trhlinou vyjadřuje integraci hustoty deformační energie v rámci uzavřené cesty (křivky) od jednoho povrchu trhliny ke druhému okolo čela trhliny (obr. 5.6) a je definovaný vztahem

$$J = \int_{\Gamma} \left(w dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right), \tag{5.10}$$

kde Γ - libovolná uzavřená křivka,

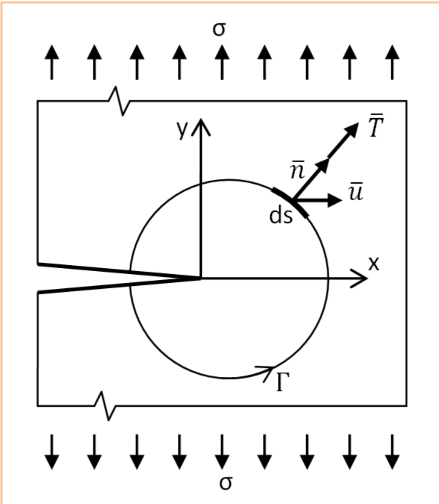
w - objemová hustota deformační energie, $w = \frac{W}{V} = \int_0^{\varepsilon m} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$,

T - vektor napětí $T = (T_x,T_y,T_z)$, tj. vektor sil na integrační cestě, síla působící ve směru normály ke křivce

ū - vektor posunutí, $\bar{u} = (u,v,w)$ nebo $\bar{u} = (u_1,u_2,u_3)$

ds - element křivky s normálou n

B = 1 (platí pro jednotkovou tloušťku tělesa)



Obr. 5.6 Označení parametrů pro stanovení J-integrálu

Když se integrační cesta Γ umístí do kořene trhliny, to znamená, že se ztotožní s obloukem zaoblení kořene trhliny, bude T = 0, protože na volných plochách nemohou být normálová napětí. Potom hodnota J-integrálu vyjadřuje změnu (úbytek) potenciální energie tělesa dW_{el} při růstu trhliny o hodnotu *dc,* tedy $J = \frac{dW_{el}}{dc}$. Z toho dále plyne, že za podmínky lineární elastické deformace je možno napsat J = G. J-integrál má jednotku J/m^2, resp. kJ/m^2.

Pro materiály, které se deformují podle zákonitosti lineární anebo nelineární deformace, bylo teoreticky dokázané, že hodnota J-integrálu nezávisí na integrační cestě To dále znamená, že pro různé integrační cesty bude rozdíl $J_1 - J_2 = 0$, resp. $J_1 = J_2$.

Hodnotu J-integrálu lze pro dané těleso stanovit výpočtem anebo experimentálně. V reálných materiálech, s pružně-plastickou deformací, je stanovení hodnoty J-integrálu složitější. Pokud se integrační cesta zvolí v blízkosti kořene trhliny tak, aby procházela jak elastickou, tak i plastickou oblastí, pak hodnota J představuje průměrné vlastnosti deformačního pole v okolí kořene trhliny.

Kritická hodnota J-integrálu, při které začíná nestabilní šíření trhliny, se zjišťuje experimentálně a slouží jako lomové kritérium odolnosti proti křehkému porušení
Pro oblast lineárně elastické LM platí (pro stav rovinné deformace)

$$J_{Ic} = G_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2\,(1-\nu^2)}{E}. \tag{5.11}$$

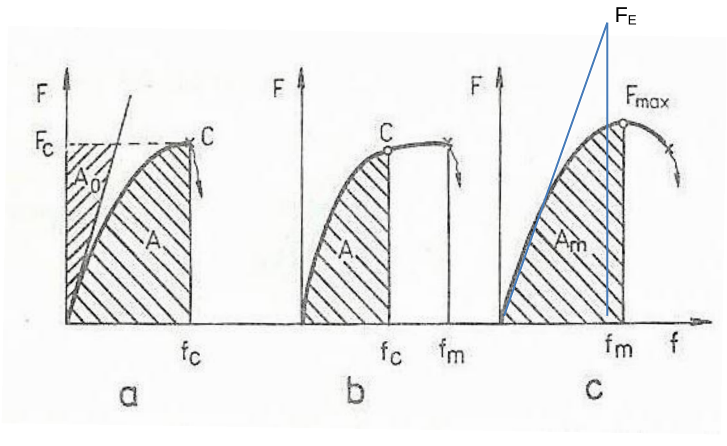
Experimentálně bylo prokázáno, že za jistých okrajových podmínek (pro vzorek zatížený v trojbodovém ohybu) je možno kritickou hodnotu J integrálu zjistit z diagramu síla F – přemístění síly f (obr. 3.16) podle vztahu:

$$J_{Ic} = \frac{2}{B(W-a)}\int_0^{f_c} F\,dv = \frac{2A_c}{B(W-a)} \tag{5.12}$$

kde B, W je tloušťka vzorku, f_c – kritická hodnota posuvu f, při které nastalo nestabilní šíření trhliny, a – délka trhliny, A – plocha pod křivkou, resp. práce síly F po dráze f.

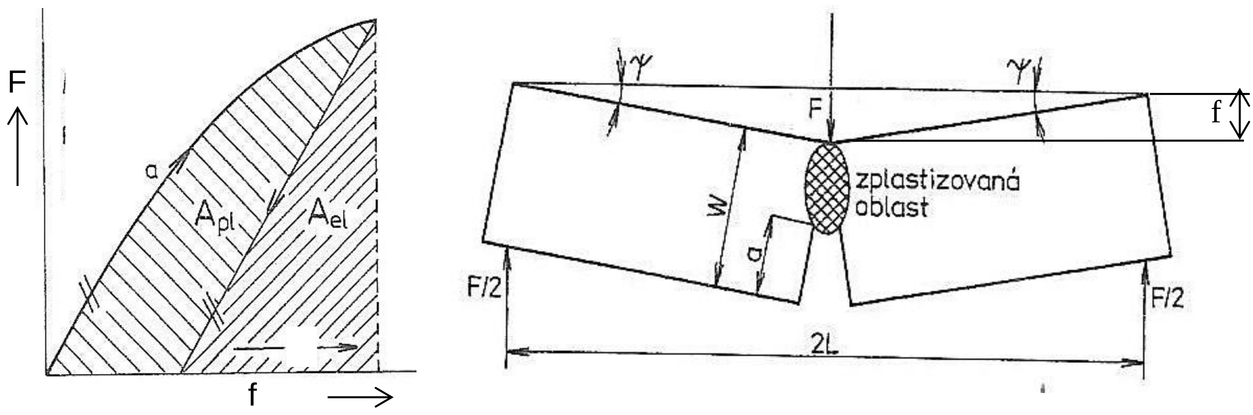
Při praktických zkouškách mohou nastat tři možnosti porušení zkušebního tělesa, obr. 5.7.

a) K porušení dojde náhlým rychlým lomem při síle F_c. Hodnota J-integrálu je úměrná ploše pod křivkou F-f.
b) Náhlé porušení nastane po předchozím pomalém růstu o hodnotu Δa (což lze zjistit na lomové ploše). Hodnotu J představuje plocha pod křivkou F-f až po bod C, kde začalo rychlé šíření trhliny.
c) Porušení nastane po předchozí makroskopické deformaci, což se projeví poklesem síly. Pro výpočet hodnoty J se uvažuje plocha A_m pod křivkou F-f po její maximální bod.



Obr. 5.7 Charakteristické závislosti F-f při zkoušení J_{Ic}: a – porušení náhlým lomem, b – porušení, kterému předchází pomalý (subkritický) růst trhliny od bodu C, c – porušení, kterému předchází makroskopická deformace

Pro přesnější stanovení kritické hodnoty J_{Ic} se doporučuje rozdělit celkovou plochu (energii) pod křivkou na část elastickou (A_{el}) a plastickou (A_{pl}), podle obr. 5.8, tj. $A_c = A_{el} + A_{pl}$.



Obr. 5.8 Diagram síla F – průhyb f při dvojparametrickém vyjádření J-integrálu. Rozdělení J-integrálu na elastickou a plastickou složku. Těleso s trhlinou namáhané tříbodovým ohybem, zbylý nosný průřez je zplastizován.

Hodnota lomové houževnatosti J_{Ic} se pro zatížení ve trojbodovém ohybu je pak dána vztahem:

$$\mathbf{J_{Ic} = J_{ce} + J_{cp}} = \frac{\boldsymbol{K_c^2\,(1-\nu^2)}}{\boldsymbol{E}} + \frac{\boldsymbol{2A_{pl}}}{\boldsymbol{B(W-a)}}, \tag{5.13}$$

přitom $K_c = \frac{Fc.Y}{B\sqrt{W}}$, kde Y je tvarový činitel (tvarová funkce pro výpočet K_I).

Metoda J-integrálu umožňuje stanovit elasticko-plastickou hodnotu lomové houževnatosti jIc za zkušebních podmínek, při kterých by hodnoty K_{Ic} nesplňovaly podmínky platnosti (menší tloušťky zkušebních vzorků, vyšší zkušební teploty, menší hodnoty meze kluzu).

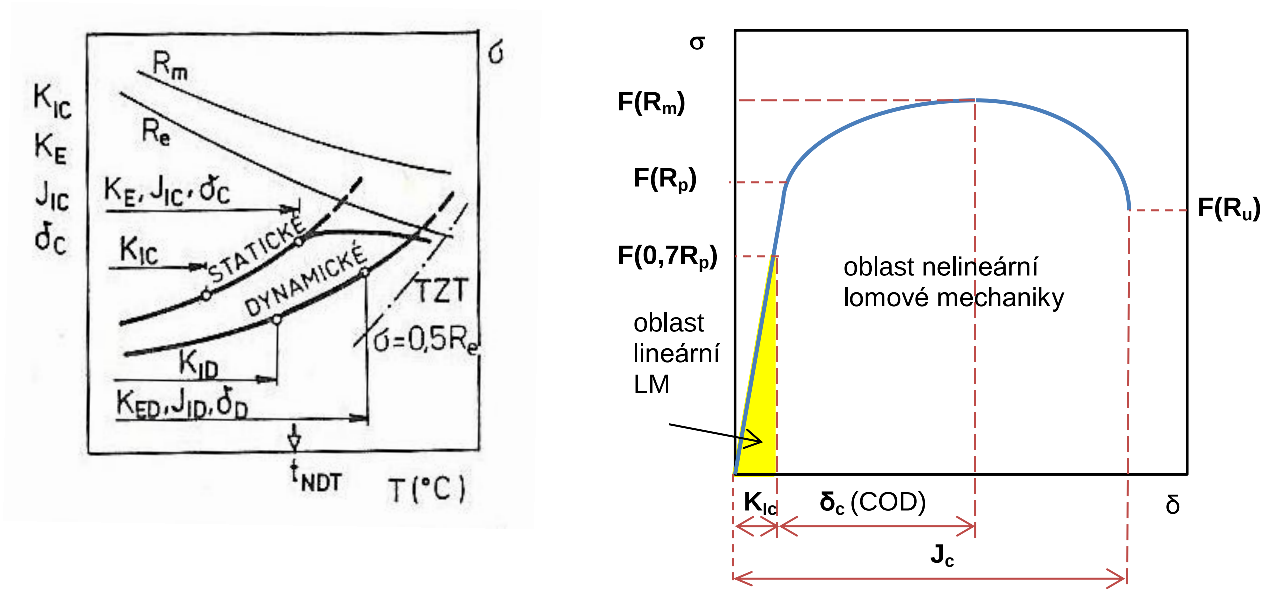
J-integrál je zobecněním hnací síly trhliny a umožňuje použití i v případech plastické deformace většího rozsahu. J-integrál je definován stejně jako hnací síla trhliny, s tím že není omezen na lineárně elastický materiál:

$$\mathbf{J} = \frac{\boldsymbol{d(A-U)}}{\boldsymbol{da}} \tag{5.14}$$

A – práce vnějších sil působících na těleso, U – deformační energie tělesa.
J-integrál je definován jako křivkový integrál nezávislý na integrační cestě.

Porovnání rozsahu platnosti hlavních parametrů lomové mechaniky v závislosti na teplotě a velikosti plastické deformace (úměrné otevření čela trhliny a velikosti plastické zóny) je přehledně uvedeno na obr. 5.9.

Poznámka: Parametr K_E (podle metody ekvivalentní energie) byl používán pro tělesa s výskytem plastické deformace. Plocha pod křivkou síla F – posuv f (např. obr. 5.7 c) byla převedena na plochu pravoúhlého trojúhelníku se stejným obsahem jako má naměřená zašrafovaná plocha, přitom jedna strana trojúhelníku procházela lineární části záznamu. Pomocí síly F_E, úměrné výšce trojúhelníku, byla pak vypočtena tzv. ekvivalentní kritická hodnota K_E, jako lomová houževnatost.



Obr. 5.9 Rozsah platnosti kritérii lomové mechaniky na teplotě a rychlosti namáhání. Graf závislosti mezi tahovým namáháním a otevřením čela trhliny se schematickým znázorněním oblasti lineárně elastické a nelineární lomové mechaniky (K_{Ic} – lomová houževnatost, δ_c – kritické otevření trhliny, J_c – kritická hodnota J-integrálu).

Σ Shrnutí pojmů

Prostudováním této kapitoly jste si osvojili následující pojmy:

- **Energetická bilance, povrchová energie, Griffithovo kritérium, kritické napětí, kritická délka trhliny, efektivní povrchová energie**
- **Hnací síla trhliny G_I, odpor proti šíření trhliny, R-křivky, kritické hodnoty G_{Ic},**
- **Faktor hustoty deformační energie (S-faktor), hypotézy pro S-faktor.**
- **J-integrál, definice, závislosti síla-posuv, podmínky platnosti parametrů LM**

Otázky ke kapitole 5

5.1 Co můžeme vypočítat pomocí Griffithova vztahu?
5.2 Jak můžeme charakterizovat povrchovou energii lomu ?
5.3 Jak můžeme definovat hnací síly trhliny?
5.4 Co znamená odpor proti šíření trhliny R?
5.5 Co představuje kritická hodnota hnací síly trhliny?
5.6 Jaké úlohy umožňuje řešit S - faktor hustoty elastické energie
5.7 Jaké hypotézy jsou spojeny s S-faktorem.
5.8 Jak je definován J- integrál
5.9 Pro jaké oblasti deformace lze použít J- integrál
5.10 Jaké jsou možnosti stanovení kritické hodnoty J- integrálu?

Příklady ke kapitole

5.1. Poměrně velká tabule skla je vystavena tahovému napětí 40 MPa. Povrchová energie daného skla je 0,3 J/m^2 a modul pružnosti E = 69 GPa. Stanovte délku povrchové vady (orientované kolmo na napětí), která by způsobila lom.

Řešení: Pro řešení je možno použít Griffithův vztah na výpočet kritického napětí $\sigma_k = \sqrt{\frac{2\gamma.E}{\pi.a}}$.

Po úpravě dostaneme pro kritickou délku trhliny při zadaném napětí σ vztah $a_k = \frac{2E\gamma}{\pi\sigma^2} =$

$$= \frac{2.(69 \times 10^9\ N/m^2)(0{,}3 N/m)}{\pi(40 \times 10^6\ N/m^2)^2} = 8{,}2 \times 10^{-6}\ m = 0{,}0082\ mm = \underline{8{,}2\ \mu m}$$

Poznámka: Numerický výpočet je vhodné provést zároveň se správnými jednotkami.

5.2. Keramická součást nesmí prasknout při napětí 13,5 MPa. Stanovte maximální přípustnou délku povrchové trhliny, když povrchová energie MgO je 1,0 J/m^2.

5.3. Vypočtěte kritickou délku trhliny ve tvrzeném plastu, u kterého byla zjištěna hnací síla trhliny G_c = 2,5 kJ/m^2 a modul pružnosti E = 2,0 GPa. Deska je zatížena tahovým napětím 70 MPa kolmým k rovině trhliny.

5.4. Vysvětlete, za jakých okolností houževnatost kovového materiálu a) vzrůstá, b) klesá s rostoucí tloušťkou t plechů opatřených vruby.

Řešení: U velmi tenkých plechů $t < t_o$, kde to je tloušťka, pro kterou je houževnatost maximální, dochází k lomovému porušené smykem a $G_c = G_c(45°) \approx \sigma_{y}.\varepsilon_{f}.t$, a houževnatost tedy s rostoucí tloušťkou také stoupá. Když $t > t_o$ lomové porušení je kombinací smykového lomu a lomu za podmínek rovinné deformace. Hnací síla trhlina je pak $G_c = SG_{Ic} + (1+S)G_c(45°)$,kde 1-S je podíl smykového lomu na lomové ploše a houževnatost klesá s rostoucí tloušťkou plechu (viz. obr. 3.4).

5.5. Vypočtěte napětí, kterým můžeme zatížit sklo, které obsahuje vadu o velikosti 2a = 30 μm. Modul pružnosti skla je 70 GPa a hnací síla trhliny Gc = 10 J/m^2.

Literatura

[1] Kunz J., Aplikovaná lomová mechanika. ČVUT Praha, Česká technika, 2005, 272 s.
[2] Anderson T.L: Fracture Mechanics. Fundamentals and applications, BAE, 2005, 621 p.
[3] Strnadel, B., Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství. Ostravské tiskárny, 1998, 334 s.
[4] Kučera J. Stručný úvod do mechaniky lomu. Část 1. Vruby a trhliny. Nestabilní lom. Část 2 Únava materiálu. FS VŠB Ostrava. 1993, 180 s.

[5] Lomová mechanika – internetové výukové programy a informace
[6] Engineering fracture mechanics – časopis, soudobé poznatky z lomové mechaniky
[7] Strnadel, B. Nauka o mateiálu II. Degradační procesy a design konstrukčních materialů. ES VŠB-TU Ostrava, 2008, 280 s.
[8] Koutský J., Degradační procesy a predikce životnosti. ZU Plzeň (skripta), 1995, 167 s.
[9] Callister D. W., Materials Science and Engineering. An Introduction. University Iowa, John Wiley& Sons, 2007,721 p.
[10] Felbeck, D. K., Atkins A.G.: Strength and Fracture of Engineering Materials. Prentice Hall, Englewood, 1984, 542 p.

Odpovědi na otázky

5.1 Kritickou velikost napětí (pevnost křehkého materiálu), který obsahuje trhlinu. Nebo obdobně vypočítat kritickou délku trhliny pro dané tahové napětí.

5.2 Povrchová energie lomu – energie vynaložena na vytvoření jednotkové plochy lomu, spotřebovaná na lom γ [Jm^{-2}]. Zahrnuje vlastní povrchovou energii materiálu (γ_o) a v případě plastické deformace povrchovou energii (γ_p)

5.3 Hnací síla trhliny (G) je intenzita uvolňování energie elastické deformace na jednotku plochy povrchu trhliny při velmi malém zvětšení délky trhliny.

5.4 Odpor proti šíření trhliny $R = dW\gamma/da$ (J/m^2) je energie potřebná k vytvoření lomové plochy jednotkové velikosti, charakterizuje lomovou houževnatost (R= $G_{Ic} = \frac{{K_{Ic}}^2}{E^{\vee}}$)

5.5 Kritická hodnota hnací síly trhliny (G_{Ic}, G_c) představuje podmínku nestability trhliny, používá se pro vyjádření lomové houževnatosti materiálu.

5.6 S – faktor se používá na výpočet, predikci směru šíření trhliny, hlavně při kombinovaném zatížení, v závislosti na orientaci trhliny (úhlu mezi trhlinou a směrem zatížení).

5.7 První hypotéza: trhlina se bude šířit ve směru θ_o, kde je hodnota min. S = S(θ_o).
Druhá hypotéza: k nestabilnímu šíření dojde, při kritické hodnotě S_c, tj. S(θ_o) = S_c

5.8 Matematicky pomocí křivkového integrálu, jehož hodnota je nezávislá na integrační cestě (vztah 5.10). Fyzikálně definován stejně jako hnací síla trhliny, s tím že není omezen na lineárně elastický materiál a menší plastické zóny: J = d(A-U)/da (vztah 5.14).

5.9 J-integrál je zobecněním hnací síly trhliny a umožňuje použití i v případech plastické deformace většího rozsahu. Používá se pro iniciaci (J_i), stabilní rozvoj trhliny (J(Δa)), nestabilní lom (J_c).

5.10 Výpočtem zpravidla při jednoduchých symetrických konfiguracích těles v rámci lineární LM a s použitím vztahů mezi J_I a K_I. Experimentálně na tělesech, pomocí měření závislosti síla F- posuv f (δ) do kritické velikosti při lomu a stanovením vynaložené práce či energie úměrné odpovídající ploše pod naměřenou závislosti F= f(δ) (obr. 5.8, vztah 5.13, nebo 5.13).

Výsledky příkladů
5.1. Délka a_k = 8,2 μm
5.2. [a_{max} = 78,6 μm]
5.3. [0,325 mm]
5.5. [$\sigma_{max} = \sigma_f$ = 122 MPa]

6. INICIACE A RŮST MIKROTRHLIN

Čas věnovaný studiu této kapitoly je cca 1,5 hod.

Obsahově a logicky tato kapitola mohla být zařazena dříve, před kapitolu o nestabilním šíření trhlin a lomové houževnatosti. S ohledem na historický vývoj metod zkoumání materiálu v mikroskopických objemech, včetně použití rastrovací elektronové mikroskopie, je možno tuto kapitolu o mikromechanismech porušení zařadit po kapitolách o makroskopickém přístupu k porušení materiálu.

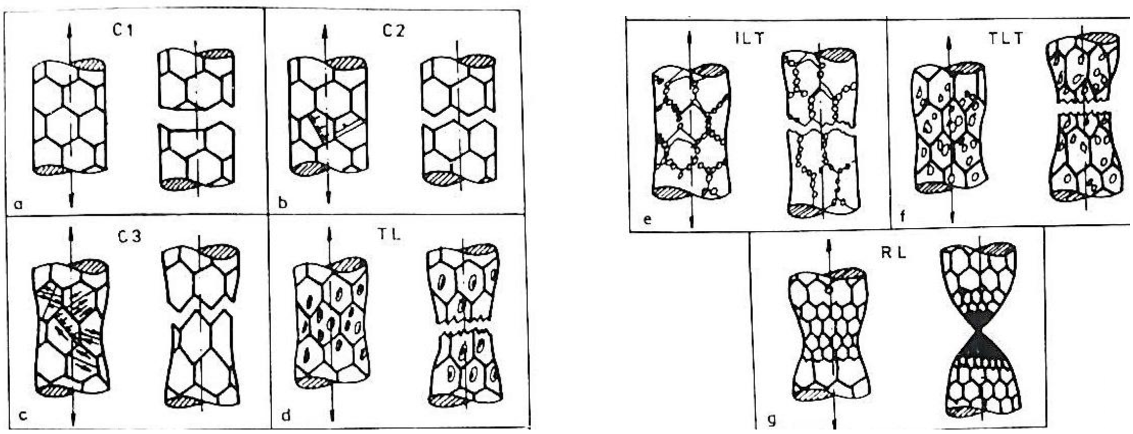
Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

Poznat tvárné a křehké porušení na mikroskopické úrovni, základní mechanismy.
Popsat štěpné transkrystalické porušení materiálu, interkrystalické křehké porušení.
Charakterizovat podmínky pro tvárné mikrodutinové porušení kovového materiálu.
Rozlišit nízkoenergetické a vysokoenergetické lomy podle fraktografického pozorování.

Výklad

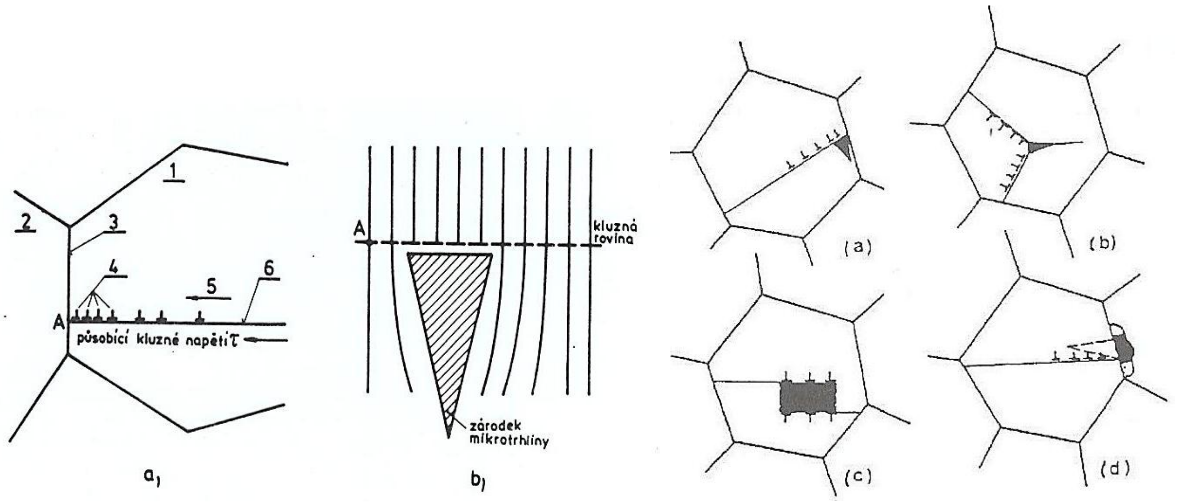
6.1 Křehké štěpení

V kovových materiálech s kubickou prostorově centrovanou mřížkou (Fe_{α}, Cr, Mo, W) nastává transkrystalické štěpení při pomalých rychlostech deformace do teplot cca 0,1-0,15 T_m (teplota tavení v K) a šíří se podél štěpných rovin typu {100}. U kovů s mřížkou kubickou prostorově centrovanou štěpení nebylo pozorována (kromě Ir). Kovy s hexagonální mřížkou (Zn, Cd, Zr, Co, Ti_{α}) se porušují transkrystalicky v rovinách (0001) do teplot 0,1-0,2 T_m. Schematické porovnání lomů při různých teplotách je uvedeno na obr. 6.1



Obr. 6.1 Schéma porušení a lomů materiálů v rozdílných napěťově teplotních podmínkách

Křehké lomy (C1,C2,C3), tvárný lom (TL), lomy při tečení (ITL,TLT) a rekrystalizaci.
V kovových materiálech je možno iniciaci mikrotrhlin vysvětlit pomocí nahromadění dislokací, viz. dislokační modely na obr. 6.2. Jejich další růst v křehkém materiálu je podmíněn výskytem lokálním tahových napětí, resp. dosažením kritické velikosti mikrotrhliny dle energetické bilance. (viz. dále)



Obr. 6.2 Mikromechanismy iniciace mikrotrhlin nakupením hranových dislokací: 1,2 -různě orientovaná zrna, 3 – hranice zrn, 4 – nahromadění dislokací před hranicí (překážkou), 5 – směr pohybu dislokací, 6 - rovina kluzu. Další možnosti vzniku mikrotrhlin interakcí řad dislokací (případ (c) charakterizuje spíše vznik mikrodutiny).

Podle Cottrelova modelu (6.2b) v kovech s mřížkou kubickou prostorově centrovanou bcc dochází k nukleaci štěpné trhliny při nakupení dislokací (b = a/2[111] na rovinách kluzu (101)) při napětí

$$\sigma_f = \frac{2G\gamma_{ef}}{k_y\sqrt{d}}, \tag{6.1}$$

kde d je velikost zrna, a γ_{ef} – efektivní povrchová energie, k_y- konstanta v Hall-Petchově vztahu pro smykové napětí ($\tau_y = \tau_o + k_y\sqrt{d}$).

Lokální štěpná pevnost v případě kulovitých částic (karbidů, vměstků) o průměru 2r, které blokují dislokace je dána vztahem

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{\pi\, E.\gamma_{ef}}{2(1-\nu^2)r}} \tag{6.2}$$

Podle uvedených vztahů (a podobných dalších) plyne, že lokální štěpná pevnost klesá s rostoucí velikostí strukturních součástí, hlavně zrn a částic. K poklesu σ_f může dále docházet vlivem segregací povrchově aktivních prvků po hranicích zrn a snížení hodnoty γ_{ef}.
V případě křehkého materiálu nastává zpravidla štěpné porušení, narušením meziatomových vazeb, obr. 6.3a. Iniciovaná štěpná mikrotrhlina trhlina se začne nestabilně šířit podle energetické bilance (podle Griffithova kritéria).

6.2 Tvárné dutinové porušení

V materiálu s možností plastické deformace nastává iniciace mikrodutin, jejich růst a propojování. Přitom se spotřebuje značné množství energie, vzniká obvykle vysokoenergetický lom. Pro kritickou hodnotu plastické deformace při nukleaci dutiny na částici o poloměru ***r*** lze odvodit vztah

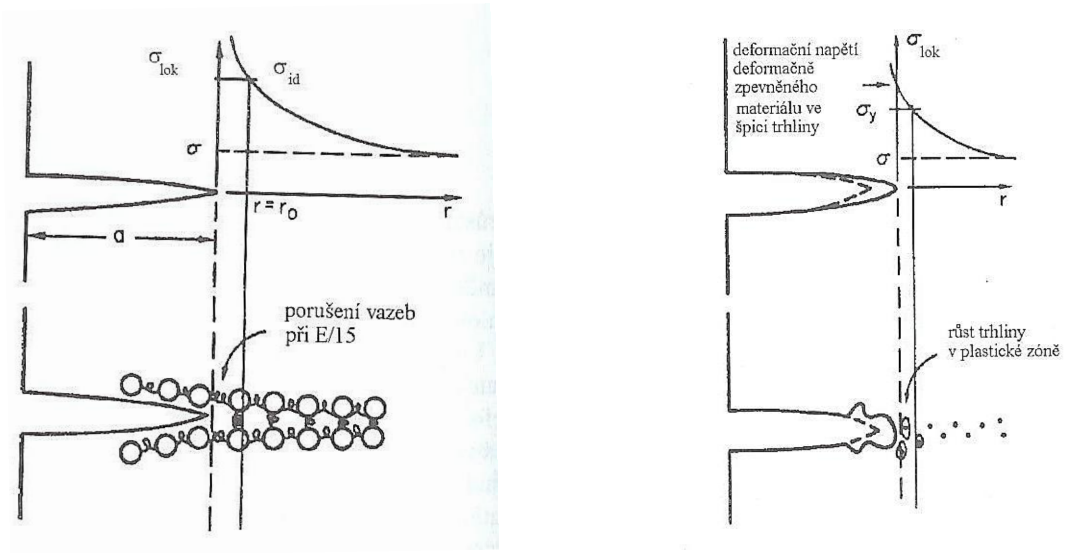
$$\varepsilon_n = \sqrt{\frac{4\gamma_s}{E'r}}\,, \qquad (6.3)$$

kde γ_s je povrchová energie **dekoheze** matrice a částice, E´ je modul pružnosti částice.

V okamžiku, kdy velikost dutiny během zatěžování dosáhne mezičásticové vzdálenosti l_p, dochází ke koalescenci (tj. vzájemnému propojování) dutin. Přitom lze vypočítat lomovou deformaci

$$\varepsilon_f = \frac{\ln(\frac{l_p}{2r})}{0{,}28.\exp(\frac{1{,}5\sigma_m}{\sigma_{ef}})}\,, \qquad (6.4)$$

kde střední napětí $\sigma_m = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, σ_{ef} - efektivní napětí (pro počátek plastické deformace podle Von Misesova kritéria plasticity)



a) *Obr. 6.3 Růst trhlin štěpným mechanismem, Porušení vazeb mezi atomy při překročení teoretické pevnosti u čela trhliny*

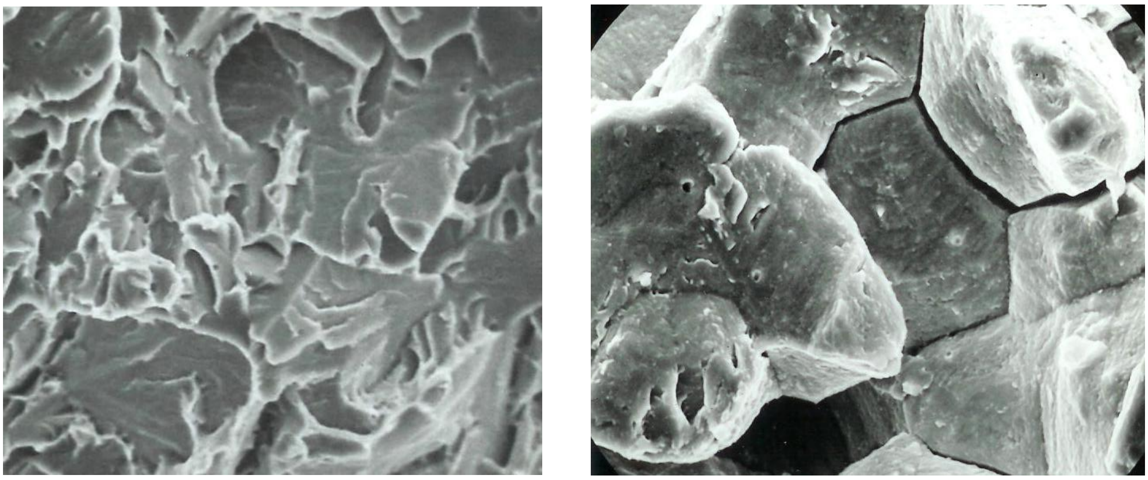
b) *Iniciace a růst trhlin tvárným dutinovým mechanismem, iniciace a propojení mikro-dutin před čelem trhliny v procesní zóně*

Před magistrální trhlinou je je procesní zóna, ve které jsou iniciovány a propojovány mikroskopické trhliny nebo dutiny. **Procesní zóna** se nachází uvnitř plastické zóny.
Další rozvoj trhliny je závislý na možnosti plastické deformace a výskytu plastické zóny.

Křehké trankrystalické štěpné porušení a interkrystalické křehké porušení jsou porovnány na obr. 6.4. Na štěpných transkrystalických fazetách, které sledují roviny štěpení {100}, jsou

jsou malé (říčkovité) stupně, které vznikají při protnutí čela trhliny se šroubovými dislokacemi. Mezi fazetami, které odrážejí velikosti zrna, se za určitých podmínek mohly vytvořit malé plastické můstky. Na některých fazetách je možno také zjistit místa iniciace lokálních mikrotrhlin. Podle nízké spotřebované energie na vznik a šíření těchto lomů (řádově 10-10^2 J/m^2), mluvíme o nízkoenergetických lomech.

Při interkrystalickém křehkém lomu, kdy trhliny se šíří podél oslabených hranic zrn, může docházet ke vzniku sekundárních mikrotrhlin mezi zrny, obr. 6.4 b. Na lomových plochách můžeme také pozorovat pomocí řádkovacích elektronového mikroskopu různé nečistoty, vměstky, precipitáty a další částice.

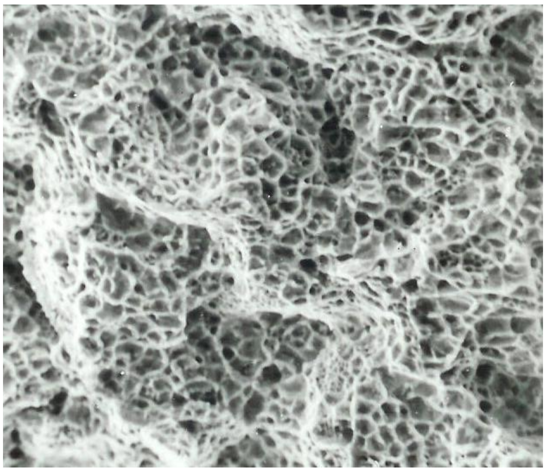


a) b)

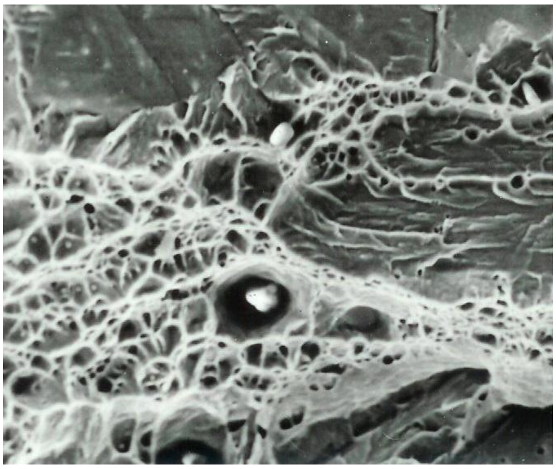
Obr. 6.4 Typické transkrystalické (a) a interkrystalické (b) křehké porušení (zv. 1000x)

Transkrystalické porušení vzniká u kovů s mřížkou kubickou prostorově centrovanou za nižších teplot (pod tranzitní teplotou) anebo za vysokých rychlosti deformace, kdy je omezen pohyb dislokací a možnosti vytvoření plastické zóny.

Příklad mikrodutinového porušení materiálu je dokumentován na obr. 6.5a V mnoha dutinách jsou vidět menší částice. Na některých místech lomového povrchu se projevují nevýrazně interkrystalické fazety. Obecně je možno konstatovat, čím menší jsou **mikroskopické dutiny**, tím byla spotřebovaná menší energie na jejich vytvoření a tedy povrchová energie je menší. Na obr. 6.5 je dokumentována lokální oblast se smíšeným lomem (tvarný dutinový cca 70%, a křehké oblasti, nahoře interkrystalické, vpravo uprostřed transkrystalické).



a)



b)

Obr. 6.5 Oblast dutinového tvárného porušení oceli REM, zv. 800x (a) . Detail lomového povrchu se více mechanismy porušení (místně smíšený lom), 1000 x.

Shrnutí pojmů

Po prostudování této kapitoly měly by Vám být jasné tyto pojmy:
Mechanismy porušení kovových materiálů, Štěpné transkrystalické porušení, dislokační modely iniciace mikrotrhlin. Dekoheze. Dutinové transkrystalické nebo interkrystalické porušení. Iniciace, růst, propojování mikroskopických dutin. Nízkoenergetické a vysokoenergetické lomy, fraktografické pozorování a hodnocení, rozbory porušení.

Otázky ke kapitole 6

6.1 Za jakých podmínek vznikají transkrystalické křehké lomy?
6.2 Jakým způsobem se šíří transkrystalické štěpné trhliny a lomy.
6.3 Kdy dochází ke vzniku a šíření křehkého interkrystalického lomu?
6.4 Jaké jsou podmínky pro rozvoj transkrystalického tvárného porušení?
6.5 Kdy může vzniknout interkrystalické tvárné dutinové poškození?
6.6 Jak souvisí mikromechanismy porušení se spotřebou energie na šíření trhliny?
6.7 Jak se dislokace mohou podílet na iniciaci křehkého porušení?
6.8 Jak velikost zrna ovlivňuje lokální štěpnou pevnost?
6.9 Jaký vliv má velikost částic na hodnotu plastické deformace pro iniciaci dutin?
6.10 Máte hodnotit lomový povrch kovu, který byl porušen koalescencí mikrodutin a skelný polymer, který projevil štěpný typ morfologie. Z hlediska vašich znalostí těchto lomových mechanismů, jak by zmíněné lomové povrchy vypadaly?

Příklady ke kapitole

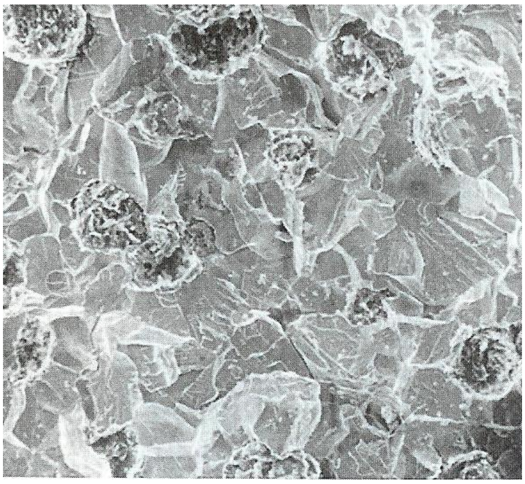
6.1. Jaká je hodnota lokální štěpné pevnosti feritické oceli s velikosti zrna 30 μm, když povrchová energie pro tvorbu mikrotrhliny je 14 J/m^2 a smyková konstanta v Hall-Petchově vztahu $k_y = 0{,}3$ $MPam^{-3/2}$. Modul pružnosti ve smyku G = 85 GPa.

6.2. Vypočtěte kritickou tloušťku (c) karbidického filmu na hranicích zrn nedeutektoidní oceli, která vede k iniciaci mikrotrhliny, když napští, kterým je ocel zatěžována je 1000 MPa. Povrchová energie oceli ji 14 J/m^2 a modul pružnosti $2{,}1.10^5$ MPa.

6.3. Vypočtěte lokální lomovou deformaci při tvárném porušení kalené a popuštěné uhlíkové oceli, v jejíž struktuře jsou vyloučeny karbidické částice kulovitého tvaru, v místě před otupenou a tahem namáhanou trhlinu, kde je stav napjatosti $\sigma_m/\sigma_{ef} = 1{,}5$. Střední vzdálenost mezi karbidy je 6,0 μm a jejich střední velikost 1,2 μm.

6.4. Vypočítejte deformaci nutnou pro nukleaci dutiny na vměstku kulovitého tvaru v oceli s feriticko perlitickou strukturou, když povrchová energie dekoheze vměstku a matrice je 6,0 J/m^2, modul pružnosti vměstku 270 GPa a jeho průměr 2r = 10 μm.

6.5. Na snímku detailu lomového povrchu jmenujte mikromechanismy porušení materiálu, stanovte orientačně velikosti strukturních součástí materiálu (zrna, částice) anebo rozměry fraktografických znaků (fazety, dutiny). Rastrovací elektronový mikroskop. Zvětšení 1000x.



6.6. Jmenujte a nakreslete schematicky mikro-mechanismy poškození uvedeného na fotografii z příkladu 6.1.

6.7. Ukažte, že průsečík štěpné trhliny se šroubovou dislokací vytváří stupeň (schod) na lomové ploše a že žádný stupeň se nebude tvořit při interakci této trhliny s hranovou dislokací.

Literatura

[10] Strnadel, B. Nauka o mateiálu II. Degradační procesy a design konstrukčních materialů. ES VŠB-TU Ostrava, 2008, 280 s.
[2] Kučera, J. Stručný úvod do mechaniky lomu, Část 1. Vruby a trhliny. Nestabilní lom. FS VŠB Ostrava, 1993, 106 s.
[3] Kučera, J. Stručný úvod do mechaniky lomu, Část II. Únava materiálu. FS VŠB Ostrava, 1994, 75 s.
[4] ČSN EN ISO 12737 Kovové materiály - Stanovení lomové houževnatosti při rovinné deformaci (2010)
[5] Callister D. W., Materials Science and Engineering. An Introduction. University Iowa, John Wiley& Sons, 2007,721 p.
[6] Felbeck, D. K., Atkins A.G.: Strength and Fracture of Engineering Materials. Prentice Hall, Englewood, 1984, 542 p.
[7] Pokluda J. aj. Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek. PC-DIR, Brno, 1994, 385 s.
[8] Anderson T.L: Fracture Mechanics. Fundamentals and applications, BAE, 2005, 621 p.
[9] Strnadel, B., Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství. Ostravské tiskárny, 1998, 334 s.
[11] Strnadel, B. et.al. New methods of damage and failure analysis of structural parts. Workshop, VŠB-TU Ostrava, 495 s. 2012.
[1] Kunz J., Aplikovaná lomová mechanika, ČVUT FJFI Praha, Česká technika, 2005, 272 s.

Odpovědi na otázky

6.1 Při relativně nízkých teplotách do 0,1-0,2 T_m [K] u kovů smřížkou KPC (bcc) a HTU (hcp), při velkých rychlostech deformace se tato oblast rozšiřuje.

6.2 Šíření transkrystalických trhlin je obvykle podél štěpných rovin (min γ(100)) při vysoké koncentraci napětí, téměř bez plastické deformace.

6.3 Křehké interkrystalické lomy vznikají hlavně při oslabení hranic zrn (segregace škodlivých prvků, vylučování křehkých fází).

6.4 Toto porušení vzniká v matrici se schopností plastické deformace, s výskytem částic.

6.5 Intrekrystalické dutinové porušení vzniká, když na hranicích zrn jsou vyloučeny částice a okolní matrice je schopna plastické deformace.

6.6 Transkrystalické štěpení a interkrystalické oddělení (štěpení) patří mezi nízkoenergetické lomy. Dutinové houževnaté porušení je zpravidla vysokoenergetické. Pro velmi malé mělké interkrystalické mikroskopické dutinky může být lom nízkoenergetický.

6.7 Nahromadění řady dislokací před překážkou způsobí lokální koncentrace napětí (kumulaci elastické energie) a vznik mikrotrhliny, viz. obr. 6.2

6.8 Podle Cottrelova modelu lokální štěpná pevnost stoupá při zjemnění zrna.

6.9 Na větších částicích vzniká nukleace dutiny snadněji, při menší deformace, vztah (6.3)

6.10 Schéma koalescence dutin je např. na obr. 6.3b (povrch se jeví matný), na skelném polymeru lomový povrch bude hladký, případně mírně zvlněný (interakce čela trhliny s odraženými elastickými vlnami)

Pokyny a výsledky k příkladům:

6.1. Pokyny k řešení: Pro řešení použijeme vztah (6.1), výsledek σ_f = 1450 MPa.

6.2. Řešení: Podle vztahu $\sigma_f = \sqrt{\frac{4\,E.\gamma_{ef}}{\pi(1-\nu^2)c}}$ (podobného k 6.2) vypočteme c = 4,2 μm.

6.3. Řešení: Po dosazení do vztahu (6.4) a numerickém výpočtu ε_f = 0,60.

6.4. Řešení: Dosazením do vztahu (6.3) dostaneme ε_n = 0,42%

6.5. Křehké štěpné porušení, fazety převážně interkrystalické (≈70% plochy), méně % transkrystalické fazety a několik oblastí (ostrůvků) pravděpodobně s mikro-dutinami. Velikosti fazet 5-10 μm, velikosti zrn 10-20 μm, částice 1-3 μm.

7. TRANZITNÍ LOMOVÉ CHOVÁNÍ OCELÍ A PŘECHODOVÉ TEPLOTY

Čas věnovaný studiu této kapitoly je cca 3 hod.

Některé materiály při změně podmínek zatížení (zejména teploty, stavu napjatosti a rychlosti zatížení) přecházejí náhle z houževnatého do křehkého stavu. Tuto tendenci mají kovy s prostorově centrovanou kubickou mřížkou, hlavně nízkouhlíkové a nízkolegované oceli. Naproti tomu kovy s kubickou plošně centrovanou mřížkou a některé kovy s hexagonální mřížkou takový přechod z houževnatého do křehkého stavu nevykazují.

Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

1. Jmenovat a popsat hlavní rázové lomové zkoušky.
2. Použít metody pro stanovení přechodových teploty u rázových zkoušek
3. Vysvětlit postup při stanovení teploty NDT (teploty nulové houževnatosti)
4. Posoudit praktický význam výsledků zkoušky DWTT
5. Popsat zkoušky TZT (teploty zastavení trhliny) a vlivy hlavních parametrů.

Výklad

Teplota, při které nastává prudký pokles houževnatosti (meze pevnosti) a při které se začne měnit způsob porušení z tvárného na štěpný, je **přechodová, resp. tranzitní teplota**. Mechanismus přechodu houževnatý - křehký stav se snaží vysvětlit několik modelů pomocí možnosti pohybu dislokací. Značnou úlohu má přitom také velikost zrna.

Z praktického hlediska je přechodový jev velmi nepříznivá vlastnost nejvíce rozšířených nelegovaných ocelí. Jelikož provozní teploty dílců a konstrukcí mohou zasahovat až do velmi nízkých teplot (-60 až -80°C), potřebné je najít vhodná kritéria pro posouzení odolnosti těchto materiálu proti křehkému porušení při nízkých teplotách. Podobně jako při snižování teploty je možno u těchto materiálů dosáhnout křehký stav zvýšením rychlosti deformace a koncentrace napětí. Proto se podmínky zkoušek pro zjištění přechodové teploty modifikují dynamickým zatížením a zkušební tělesa jsou opatřena vruby nebo obsahují trhliny.

7.1 Zkouška vrubové houževnatosti

Je nejstarší a nejjednodušší zkouškou houževnatosti, na kterou později navazují další rázové či dynamické zkoušky materiálů. Zkoušku navrhnul Charpy (v r. 1901) pro zkoušení konstrukčních ocelí proti lomu při vysokých rychlostech deformace, resp. zatěžování.

Doplňuje základní mechanické vlastnosti zjištěné tahovou zkouškou a zohledňuje odolnost materiálu proti křehkému porušení vlivem vrubů a rázového zatížení. Jejím cílem je zjistit hodnotu vrubové houževnatosti, která je definovaná jako práce spotřebovaná na ulomení zkušebního vzorku při stanovených podmínkách, které zahrnují:

a) Způsob namáhání (tříbodový symetrický ohyb),
b) Rychlost zatížení (rychlost nárazu 4,5-7 m/s),
c) teplota zkušebního vzorku,
d) Rozměry a tvar zkušebního vzorku (obvykle 10 x 10 x55 mm)
e) hloubka, tvar a ostrost vrubu

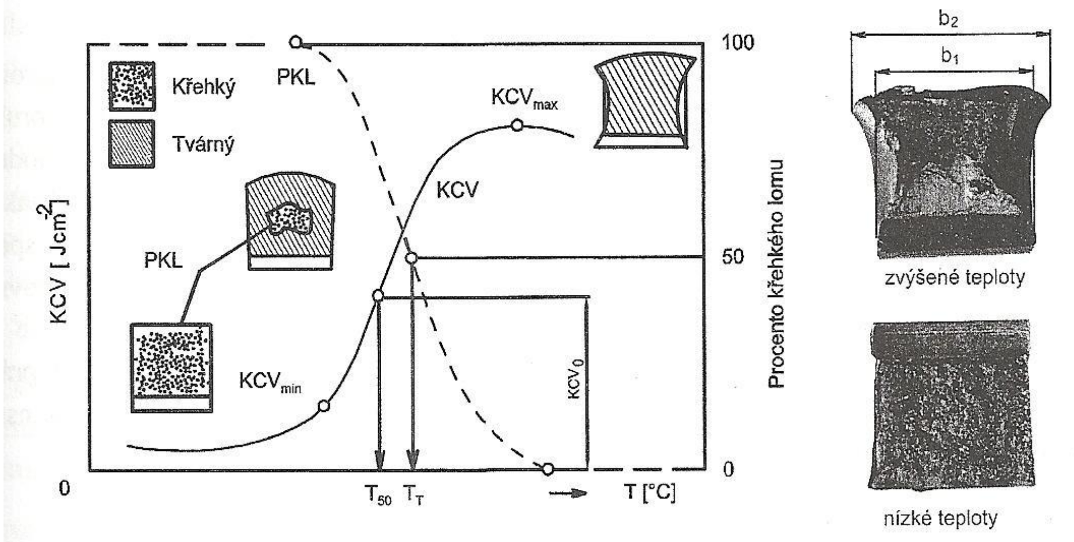
Účelem zkoušky houževnatosti na Charpyho kladivu je zjistit energii (nárazovou práci), která se spotřebovala na deformaci a porušení vzorku. Práce spotřebovaná na zlomení vzorkuje dána rozdílem potenciálních energii kladiva mezi počáteční a konečnou polohou kladiva. $K = W_o - W_p = mg(H-h)$, kde m je hmotnost kladiva, H – počáteční výšky těžiště kladiva, h – jeho krajní výška po přeražení vzorku a překmitu na druhou stranu. Hodnotu nárazové práce můžeme odečítat přímo na stupnici kladiva pomocí vlečné ručky. **Norma ČSN EN 10045** pro zkoušku vrubové houževnatosti stanoví základní vzorek s průřezem 10 x 10 mm opatřený vrubem **V** o hloubce 2 mm nebo vrubem **U**, hlubokým 5 mm. Hodnoty vrubové houževnatosti se vyjadřují velikostí nárazové práce, označované podle tvaru vrubu KV nebo KU [J]. Hodnoty vrubové houževnatosti bylo možno také uvádět jako podíl nárazové práce (K) a počátečního průřezu vzorku pod vrubem (S_v), tj. $KC = K/S_v$. [J/cm^2] a podle tvaru vrubu KCV nebo KCU.

Vrubová houževnatost jako kritérium odolnosti proti křehkému lomu má praktický význam v podobě tranzitní (přechodové, Vidalovy) křivky. Snižováním zkušební teploty v určitém teplotním intervalu prudce poklesne houževnatost z maximální hodnoty K_{max} na minimální K_{min}. Tento interval je nazýván jako **přechodová oblast**, a odpovídající křivka s výrazným poklesem houževnatosti – **přechodová** anebo **tranzitní křivka**. Strmá část této křivky v přechodové oblasti tvoří rozhraní mezi teplotami, při kterých dochází k houževnatému nebo křehkému porušení. Podle této části křivky je stanovena také přechodová (tranzitní) teplota, jako teplota při které:

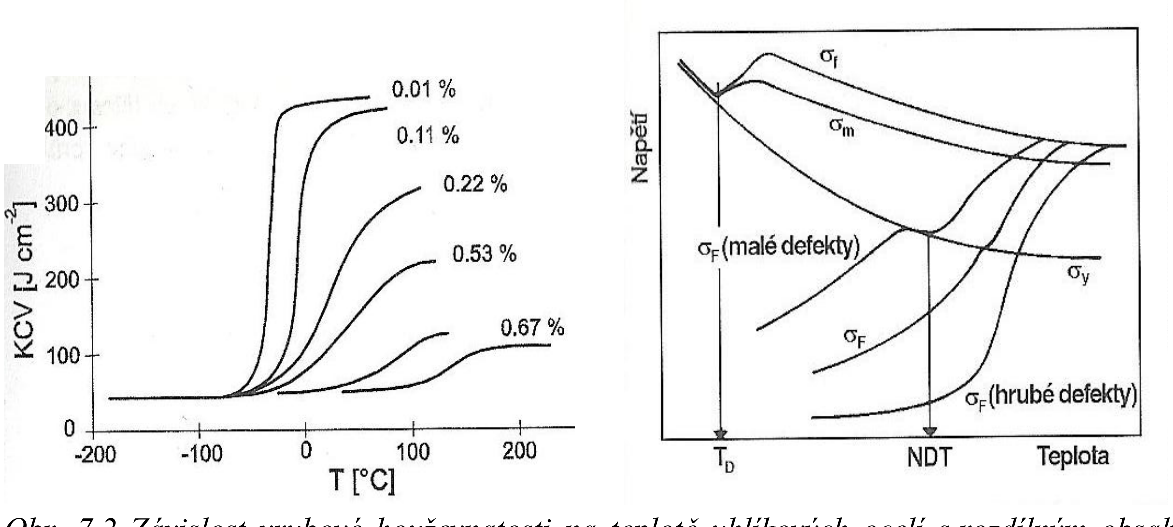
a) Hodnota vrubové houževnatosti odpovídá její střední hodnotě (z maxima a minima na křivce, proložené řadou naměřených hodnot houževnatosti při několika teplotách),
$$KV_s = \frac{KVmax + KVmin}{2} \qquad (7.1)$$
b) KV má dohodnutou hodnotu pro určité typy konstrukcí nebo zařízení anebo se vymezuje podle meze kluzu, např. KV = 28 J (klasická energetika).

Kromě energetického přístupu se pro stanovení přechodové teploty může použít i fraktografické (morfologické) vyhodnocení lomové plochy zkušební tyče. Na obr. 7.1 jsou zakresleny tři charakteristické lomové plochy vzorků, porušených při rozdílných hodnotách vrubové houževnatosti. Z obrázku je vidět, že na lomové ploše mohou být dvě oblasti:
1) oblast tvárného (houževnatého) lomu, 2) oblast křehkého (krystalického) lomu.

Na obr. 7.2 jsou porovnány křivky vrubové houževnatosti v závislosti na teplotě pro uhlíkové oceli. S rostoucím obsahem uhlíku dochází ke zvyšování přechodové teploty a poklesu maximální hodnoty vrubové houževnatosti. Podobný negativní účinek jako uhlík vykazují škodlivé prvky (P, S, H), povrchově aktivní prvky (Sn, Sb, Bi) i některé legující prvky (Cr u vysokolegovaných feritických ocelí). Negativně působí různé nečistoty, segregace i nadměrné zpevnění. Záporný vliv defektů (vrubů, trhlin) se projeví rovněž na poklesu hodnot pevnostních vlastností materiálu, stanovených pomocí tahové zkoušky (obr. 3.5).



Obr. 7.1 Přechodová křivka vrubové houževnatosti konstrukční uhlíkové oceli a makrofraktografické snímky lomových ploch za nízkých a zvýšených teplot. Příčné rozšíření $\Delta b = b_2 - b_1$.



Obr. 7.2 Závislost vrubové houževnatosti na teplotě uhlíkových ocelí s rozdílným obsahem uhlíku. Vliv teploty na mez kluzu σ_y, mez pevnosti σ_m a lomové napětí σ_f (bez defektu) nebo σ_F s defekty u tahové zkoušky nízkouhlíkové oceli

S klesající teplotou se úměrně zvyšuje plocha (podíl, procento) křehkého lomu PKL. Průběh hodnot PKL (jiné označení je k) je v diagramu znázorněn přerušovanou čárou. V přechodové oblasti se vyskytují smíšené lomy, tvořené křehkou oblasti lomu ve střední části a tvárným lomem u povrchu.

Přechodová teplota, stanovená podle vzhledu lomu, je zpravidla definovaná jako teplota, při které má PKL určitou hodnotu, např. 50%.
Spotřebovanou práci lze měřit také nepřímo pomocí deformace u lomu. Bylo prokázáno, že hodnota deformační práce je úměrná deformaci příčného průřezu $\Delta b = (b_2-b_1)/2$, viz. obr. 7.1.

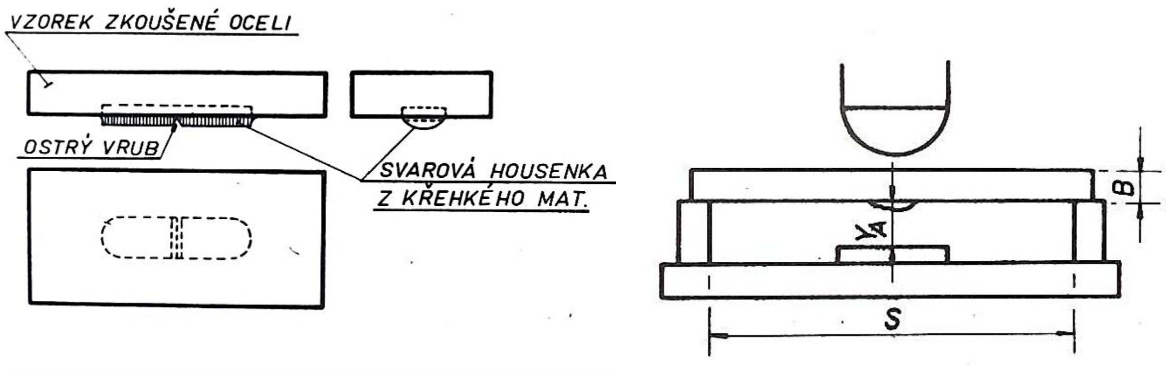
Výhodou zkoušky vrubové houževnatosti je její jednoduchost, rychlost a poměrně nízké náklady. Hlavní oblast použití je v porovnávání různých stavů a zpracování dané oceli, anebo různých ocelí navzájem. Obvykle se vyhodnocují celé přechodové křivky, ze kterých se stanoví přechodové teploty a též maximální hodnoty vrubové houževnatosti. Na druhé straně, zkouška vrubové houževnatosti má tyto nedostatky:

a) Hodnota tranzitní teploty T_T udává jen mezní (nejmenší) teplotu, při které může být materiál v provozu namáhán. Neudává však napětí, které při dané teplotě způsobí porušení.
b) Zjištěný údaj T_T se vztahuje na laboratorní normovaný zkušební vzorek a neplatí pro větší tloušťky materiálu,
c) Lomová plocha je malá na přesnější posouzení a vyhodnocení lomu,
d) Výsledky této zkoušky nelze použít pro konstrukční výpočty.

Proto se tato zkouška doplňuje či nahrazuje novějšími a fyzikálně vhodnějšími zkouškami křehkolomových charakteristik.

7.2 Zkouška teploty nulové houževnatosti

Princip zkoušky (obr. 7.3) spočívá v namáhání plochých (prizmatických) ocelových zkušebních těles trojbodovým ohybem dynamickou silou (nárazem) s omezeným průhybem. Zkušební těleso má na straně tahových napětí zhotovený křehký návar. V návaru je vyfrézovaný vrub, který slouží jako iniciátor lomu. Maximální průhyb tělesa (Y_A) je podložkou omezen tak, aby na tahové straně se tahové napětí rovnalo hodnotě meze kluzu v tahu (R_p) materiálu tělesa. Zkouška se provádí při různých teplotách. Cílem této zkoušky je zjistit teplotu nulové houževnatosti, která vyjadřuje odolnost materiálu proti nestabilnímu šíření křehké trhliny.

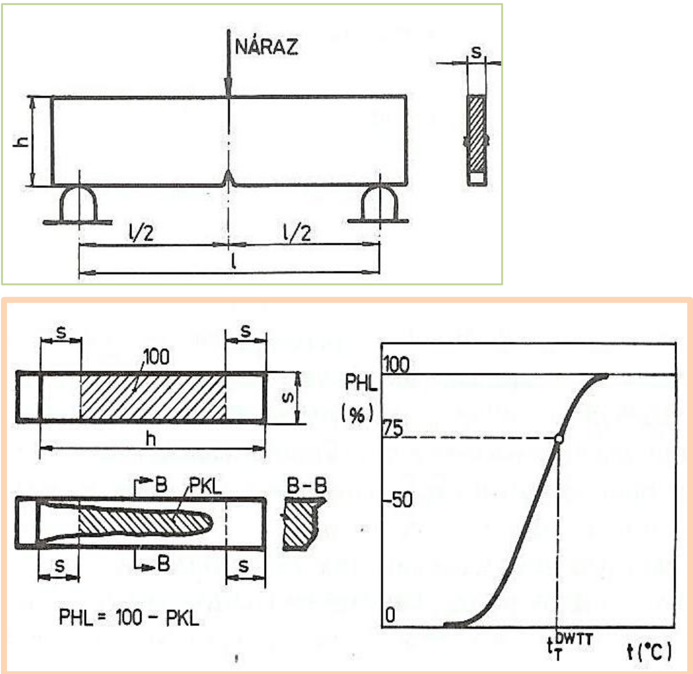


Obr. 7.3 Schéma zkoušky teploty nulové houževnatosti NDT

Nejvyšší teplota, při které ještě lom přechází z návaru do základního materiálu, se nazývá **teplota nulové houževnatosti NDT** (z angl. nil ductility temperature). Teplota NDT je v určité korelaci s přechodovou teplotou. Nachází se v dolní části přechodové křivky a její hodnota nezávisí na tloušťce zkoušeného materiálu. Zkouška je též vhodná pro svařované konstrukce.

7.3 Zkouška velkých těles na rázový ohyb – DWTT

Zkratka DWTT je z angl. drop weight tear test (rázová zkouška padajícím závažím). Cílem zkoušky je zjistit přechodovou teplotu ocelových plechů na tlakové potrubí (plynovody). Při této zkoušce, na rozdíl od zkoušky vrubové houževnatosti, se plechy zkoušejí na velkých zkušebních tělesech **se skutečnou tloušťkou plechu**. Princip zkoušky je na obr. 7.4. Zkušební desky (tyče) jsou opatřeny ostrým vylisovaným vrubem V a zatěžují se rázovým trojbodovým ohybem do úplného zlomení. Zkoušky se provádějí na padostroji anebo velkokapacitním kyvadlovém kladivu při různých zkušebních teplotách. Energie nárazu musí být taková, aby nastalo porušení jedním úderem.



Obr. 7.4 Zkušební těleso pro zkoušku DWTT. Způsob vyhodnocení výsledků zkoušky DWTT

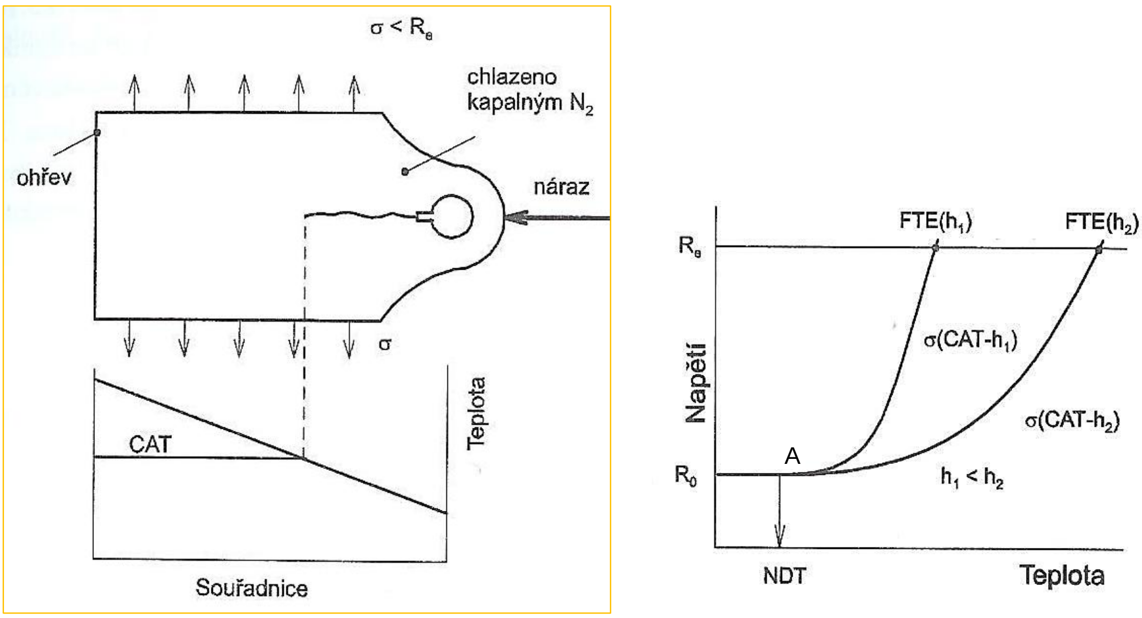
Po zlomení se na zkušebních tyčích vyhodnocuje **podíl houževnatého lomu (PHL)** na lomové ploše, obr. 7.4. Přechodové křivky se vyhodnocují v souřadnicích PHL – teplota.
Výsledky zkoušky DWTT mají značný význam a byly prověřený pomocí destrukčních zkoušek na plynových potrubích skutečné velikosti. Těmito korelačními zkouškami bylo prokázáno, že je možno zabránit vzniku a šíření křehkého lomu na potrubí, když provozní teplota potrubí je vyšší než přechodová teplota plechů, zjištěná zkouškou DWTT. Kritickým místem porušení na svařovaných konstrukcích jsou svarové spoje a tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu. Svarové spoje mohou obsahovat defekty jako neprůvary, trhliny,

bubliny apod. Na uhlíkové mikrolegované oceli byla zjištěna experimentálně hodnota DWTT = -30°C, na kvalitním svaru 0°C a na vadném svaru +30°C.
Z uvedeného příkladu vyplývá, že odolnost proti křehkému porušení je pro svařované konstrukce určena přednostně kvalitou a vlastnostmi svarových spojů. Se zřetelem na ostrý vylisovaný vrub a zpevnění materiálu bude energie na vznik lomu nízká. Hlavní část spotřebované energie se použije na šíření trhliny. Proto je možno tuto zkoušku považovat za zkoušku odolnosti proti šíření trhliny.

Zkouška rázem v ohybu velkých těles DT (450x120x25 mm, s ostrou trhlinou) je také normovaná a při jejím provádění je měřena spotřebovanou energii pomocí velkokapacitního kladiva (s max. energii 10 kJ).

7.4 Zkouška teploty zastavení trhliny

Cílem této zkoušky je zjistit podmínky, při kterých se uměle vytvořena křehká trhlina zastaví. Zjištěné podmínky se vyjadřují závislostí mezi napětím a teplotou zastavení trhliny.
Princip zkoušky, navrhnuté Robertsonem, je na obr. 7.5. Ploché zkušební těleso skutečné tloušťky, opatřené na jedné straně vrubem, je namáhané tahovým napětím. Přitom je na jednom konci ochlazované (v oblasti vrubu) a na druhém konci je ohřívané. Tím vznikne v tělese průběh teploty, naznačený v dolní části obrázku. Trhlina se vyvolá úderem na místo, kde je umístěný vrub, a šíří se kolmo na směr tahového napětí. V oblasti materiálu, kde je nízká teplota (podtranzitní) má trhlina křehký charakter a šíří se velkou rychlostí (≈1000 m/s). V oblastech s vyšší teplotou nejsou vhodné podmínky pro křehké šíření trhliny, proto se její rychlost postupně snižuje, až se úplně zastaví v určitém místě. Teplota v tomto místě je **teplota zastavení trhliny** TZT (anebo CAT – crack arrest temperature), která při daném nominálním napětí charakterizuje schopnost materiálu zastavit šířící se křehkou trhlinu.



Obr. 7.5 Schéma Robertsonovy zkoušky zastavení trhliny. Závislost teploty zastavení trhliny na působícím napětí a tloušťce tělesa.

Teplota zastavení trhliny závisí na působícím tahovém napětí σ, na tloušťce zkoušeného materiálu. Na obr. 7.5 je uvedena závislost TZT na působícím tahovém napětí pro dvě tloušťky h_1 a h_2. **Závislost σ - TZT má přechodový charakter** a podle autora se nazývá Robertsonova přechodová křivka teploty zastavení trhliny. Křivka má dva charakteristické body. Bod A leží na spodním ohybu obou křivek a má souřadnice (R_o, NDT).

Napětí $\mathbf{R_o}$ představuje **prahové (mezní) napětí**, pod kterým ani při teplotách nižších než NDT nemůže nastat křehké porušení, protože energie elastické deformace při napětí R_o nestačí na splnění podmínky pro šíření trhliny, ani při její maximální velikosti. Proto pod vodorovným úsekem křivky (Ro-A) nemohou vznikat křehké lomy ani při nejnižších teplotách a maximálních defektech.
Druhým charakteristickým bodem Robertsonovy křivky je její průsečík s úrovní napětí na mezi kluzu (R_p). Tento bod představuje nejvyšší tranzitní teplotu lomu v elastické oblasti deformace. Označuje se zkratkou **FTE (fracture transition elastic**). Nad teplotou FTE_{h1} se při dané tloušťce materiálu h_1 nemůže šířit křehká (nestabilní) trhlina v elastické oblasti diagramu, tj. pod mezí kluzu. Sklon křivky v úseku A-FTE svědčí o tom, že v tomto úseku TZT roste se stoupajícím napětím σ.

Druhá křivka přísluší tloušťce h_2 a odkloňuje se od levé křivky za bodem A doprava. Přitom obě křivky mají stejnou teplotu NDT. Z polohy obou křivek plyne, že při vyšších tloušťkách se při daných podmínkách (σ, c) zastavují křehké trhliny při vyšších teplotách. Tento rozdíl je nejvyšší při napětí na mezi kluzu, přitom platí $\mathbf{FTE_{h1}<FTE_{h2}}$. Vysvětluje se to tím, že při větších tloušťkách je rozsáhlejší stav rovinné deformace, příznivý pro křehké porušení při daných teplotách.

Na základě zkoušek bylo zjištěno, že zvyšováním tloušťky tělesa se **Robertsonova křivka** posunuje doprava, tedy směrem k vyšším teplotám, jen do určité mezní tloušťky, která pro konstrukční oceli je asi 75 mm. Větší tloušťky už teploty TZT dále nezvyšují. Pokud je tloušťka h_2 >75 mm, lze křivku TZT_{h2} považovat za hranici rozsahu tranzitních teplot zastavení trhliny LTTR (*limiting transition temperature range*). Při teplotách a napětích ležících napravo od této **limitní křivky (LTTR)** nejsou splněny podmínky pro nestabilní šíření trhliny.

Význam kritérii založených na přechodové teplotě
Základním cílem koncepce přechodové teploty je stanovení teploty, nad kterou v namáhané součásti nemůže nastat nestabilní růst přípustné velikosti trhliny. Základem pro stanovení této teploty jsou přechodové teploty podle příslušných zkoušek (norem), které byly popsány v předchozích kapitolách.
Z hlediska korelace mezi parametry zkoušky a skutečnými podmínkami, je při aplikaci nejvhodnější pro ocelové plechy použít teplotu DWTT a pro tlustostěnné dílce teplotu TZT. Materiál pro konstrukci musí vyhovovat podmínce $\mathbf{TZT_{\sigma pr} \leq T_{pr} - \Delta T_B}$, kde $TZT_{\sigma pr}$ je

teplota zastavení trhliny při provozním napětí σ_{pr}, ΔT_B - přídavek teploty na bezpečnost, T_{pr} – provozní teplota.

Shrnutí pojmů

Po prostudování této kapitoly měly by Vám být jasné tyto pojmy:
Vrubová houževnatost. Přechodová, tranzitní teplota. Teplota nulové houževnatosti, (NDT), Zkouška velkých těles na rázový ohyb, teplota DWTT, Zkouška zastavení trhliny, Robertsonova zkouška, teplota TZT (CAT). Bod FTE (fracture transition elastic). Limitní křivka LTTR

Otázky ke kapitole 7

7.1 Vysvětlete, proč některé materiály ukazují ostrý tvárný-křehký přechod při tranzitní teplotě, zatímco jiné nikoli.
7.2 Jakými metodami lze stanovit tranzitní teplotu u zkoušky vrubové houževnatosti ?
7.3 Které vlivy (činitelé) snižují hodnotu vrubovou houževnatosti ?
7.4 Které metalurgická opatření zlepšují houževnatost a tranzitní teplotu ?
7.5 Jak se mění lomové (kritické) napětí s teplotou a velikostí defektu u tahové zkoušky.
7.6 Jak se stanoví teplota nulové houževnatosti NDT ?
7.7 Proč se používá zkouška velkých těles na rázový ohyb (DWTT)?
7.8 Na čem je hlavně závislá teplota zastavení trhliny TZT (CAD)?
7.9 Jaký má platit vztah mezi tranzitní a provozní teplotou pro zamezení křehkých lomů ?
7.10 Jakým způsobem je stanoena teplota DWTT?

Příklady ke kapitole 7

7.1. Při poklesu teploty z 20°C pod teplotu NDT poklesla hodnota lomové houževnatosti 3 x. Jak se změní kritická délka trhliny a_c při stejném zatížení (napětí)?

7.2. Jak se změní kritické napětí, když při snížení teploty poklesla hodnota lomové houževnatosti trojnásobně. Délka trhliny je nezávislá na teplotě.

7.3. Sumarizujte relativní výhody a nevýhody přístupu tranzitní teploty při analýze lomů materiálů.

7.4. Pro ocel na mosty bylo zjištěno, že korelace K_{Ic} –KV v tranzitní oblasti je ve tvaru: $\frac{K_{Ic}^2}{E}$ = 655.KV, kde K_{Ic}, E a KV jsou v jednotkách Pa$\sqrt{m}$, Pa resp. v J. Vypočtěte lomovou houževnatost takové oceli, když byla zaznamenána tranzitní hodnota KV = 30 J.

7.5. Co by se mohlo přihodit pro relativní polohu křivky Charpyho nárazové práce (Vidalovy křivky) oceli s mezí kluzu 275 MPa a 1380 MPa, kdyby vzorky byly zkoušeny pomalu v ohybu ?

7.5. Zkoušky houževnatosti mají být provedeny pro hodnocení jakosti plechu oceli tloušťky 6,0 mm. Normovaný vzorek na Charpyho kladivo má rozměry 10 x 10 x 55 mm. Jaký rozdíl v nárazové práci je možno očekávat, když výsledky pro uvedený plech jsou porovnány s jiným plechem ze stejné oceli o tloušťce 12,5 mm s identickou strukturou?

7.6.Znázorněte graficky vliv napětí na CAT (teplota zastavení trhliny) pro vzorek v rámci Robertsonovy zkoušky.

Literatura k dalšímu studiu

[1] Strnadel, B. Nauka o mateiálu II. Degradační procesy a design konstrukčních materialů. ES VŠB-TU Ostrava, 2008, 280 s.
[2] Anderson T.L: Fracture Mechanics. Fundamentals and applications, BAE, 2005, 621 p.
[3] Strnadel, B., Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství. Ostravské tiskárny, 1998, 334 s.
[4] Kučera J. Stručný úvod do mechaniky lomu. Část 1. Vruby a trhliny. Nestabilní lom. Část 2 Únava materiálu. FS VŠB Ostrava. 1993, 180 s.
[5] ČSN EN 10045 – Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho – Část 1: Zkušební metody (V a U vruby), ČNI, 1997, 11s.
[6] Engineering fracture mechanics – časopis, soudobé poznatky z lomové mechaniky
[7] ASTM E604 - 83(2008) Standard Test Method for Dynamic Tear Testing of Metallic Materials , Dynamic tear (DT) testing, Fracture testing ofmetals/alloys

Odpovědi na otázky

7.1 Kovy s menším počtem skluzových systémů a s vyšším třecím napětím za nižších teplot vykazují tranzitní chování.

7.2 Na základě části Vidalovy křivky v tranzitní oblasti, podle střední hodnoty houževnatosti, podle předepsané hodnoty KVp, podle podílu křehkého lomu (50%).

7.3 Hodnoty houževnatosti snižují nečistoty (segregace, vměstky, prvky C, S, P, H, Sn, Cr), nadměrné zpevnění, radiační záření, vysoké rychlosti nárazu.

7.4 Ke zvýšení hodnot houževnatosti a snížení tranzitní teploty přispívá zvýšení čistoty oceli, snížení obsahu C, P, S apod. legovaní Ni a Mn, vhodné tepelné zpracování.

7.5 Obecně podle obr. 7.2 (vpravo), s klesající teplotou se snižuje lomové napětí.

7.6 Teplota nulové houževnatosti NDT - nejvyšší teplota, při které ještě lom přechází z návaru do základního materiálu, uspořádání zkoušky je na obr. 7.3

7.7 Cílem je zjistit přechodovou teplotu (DWTT) ocelových plechů se skutečnou tloušťkou, hlavně na tlaková potrubí (plynovody), zpravidla se svarovými spoji.

7.8 Pro daný materiál je TZT závislá na tahovém napětí (nad prahovou hodnotou) a tloušťce tělesa (do maximální tloušťky cca 75 mm), viz. obr. 7.5.

7.9 Mezi tranzitní teplotou T_{tr} a provozní teplotou T_{prov} má platit vztah $T_{tr} \leq T_{prov} - \Delta T_B$, kde ΔT_B je přídavek na bezpečnost, rozptyl výsledků.

7.10 Podle podílu houževnatého lomu 75%.

Výsledky příkladů, návody na řešení

7.1. Kritická délka trhliny se sníží 9x (při stejném zatížení a konfiguraci trhliny, předpokládáme, že tvarová funkce a napětí jsou nezávislé na teplotě).
7.2. Podle vztahu $K_{Ic} = \sigma_c(\pi a)^{1/2}.Y$ a zadané podmínky $K_{Ic}(T_1) = 1/3\ K_{Ic}(T_2)$, kde $T_1 < T_2$, dostaneme po úpravě $\sigma_c(T_1) = 1/3\sigma_c(T_2)$, a, Y – nezávislé na teplotě,
7.3. Výhodou je zjištění, při jaké tranzitní teplotě materiál ztrácí houževnatost a neměl by se používat pod touto teplotou. Zkoumání a hodnocení vlivu technologie. Nevýhoda – tranzitní teplotu nelze použít pro konstrukční výpočty, výsledky některých zkoušek se mohou výrazně odlišovat od reálných těles.
7.4. Po dosazení do uvedeného vztahu a výpočtu $K_{Ic} = 64{,}2\ MPam^{1/2}$
7.5. Na oceli s nižší mezi kluzu by při pomalém zatížení ke značnému posuvu Vidalovy křivky k nízkým teplotám. Na oceli s vysokou mezí kluzy by posun byl menší.

8. APLIKACE LOMOVÉ MECHANIKY V OBLASTI ÚNAVY

Čas věnovaný studiu této kapitoly je cca 2 hod.

Při studiu této kapitoly se předpokládá, že studenti byli obeznámení se základními poznatky z oblasti únavy materiálu v jiném předmětu, např. v Nauce o materiálu.

Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

Aplikovat faktor intenzity napětí v oblasti šíření únavových trhlin
Porovnat iniciaci a šíření krátkých trhlin.
Posoudit šíření krátkých únavových trhlin.
Popsat vlivy korozního prostředí na mezní hodnoty (rozkmitu) faktoru intenzity napětí

Výklad

Únavový proces se uskutečňuje postupně při cyklickém zatěžování a zahrnuje tyto etapy.

1. Změny mechanických vlastností

2. Iniciace (nukleace) mikrotrhlin

3. Šíření mikrotrhlin a krátkých trhlin

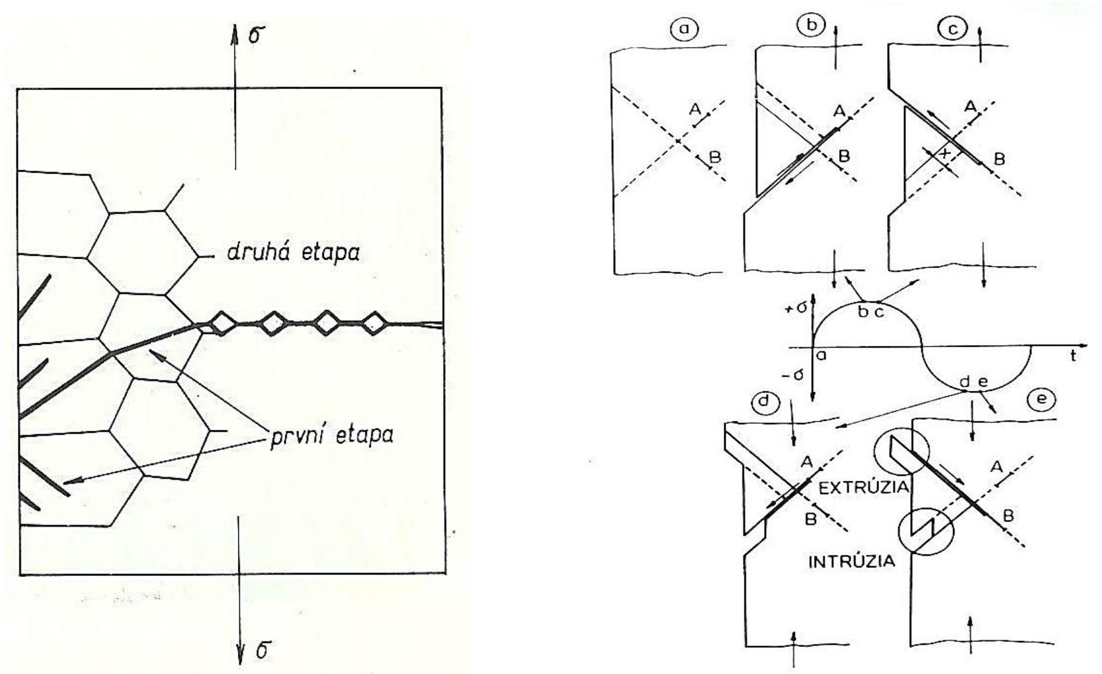
4. Šíření (makro)trhlin – stabilní růst

5. Statický dolom – nestabilní růst

V rámci této krátké kapitoly a opory se omezíme jen na některé problémy, související s možnostmi aplikace parametrů lomové mechaniky, zejména rozkmitu faktoru intenzity napětí. Poznatky lomové mechaniky se uplatňuje hlavně při šíření únavových trhlin a dolomení.

8.1 Problematika krátkých únavových trhlin

V naprosté většině případů iniciace nastává skluzovým procesem na povrchu materiálu, vlivem smykové složky napětí, jejíž maximální velikost je zhruba 45° vzhledem k tahovému napětí, obr. 8.1. Během cyklického zatěžování dochází k pokluzu části materiálů a tvoří se vedle sebe prohlubně do materiálu (intruze) a výstupky na (extruze). Intruze představují koncentrátory napětí a jejich prohlubováním se tvoří únavové mikrotrhliny, šířící se podél kluzových rovin. Určitou překážkou pro jejich další šíření představují hranice zrn.



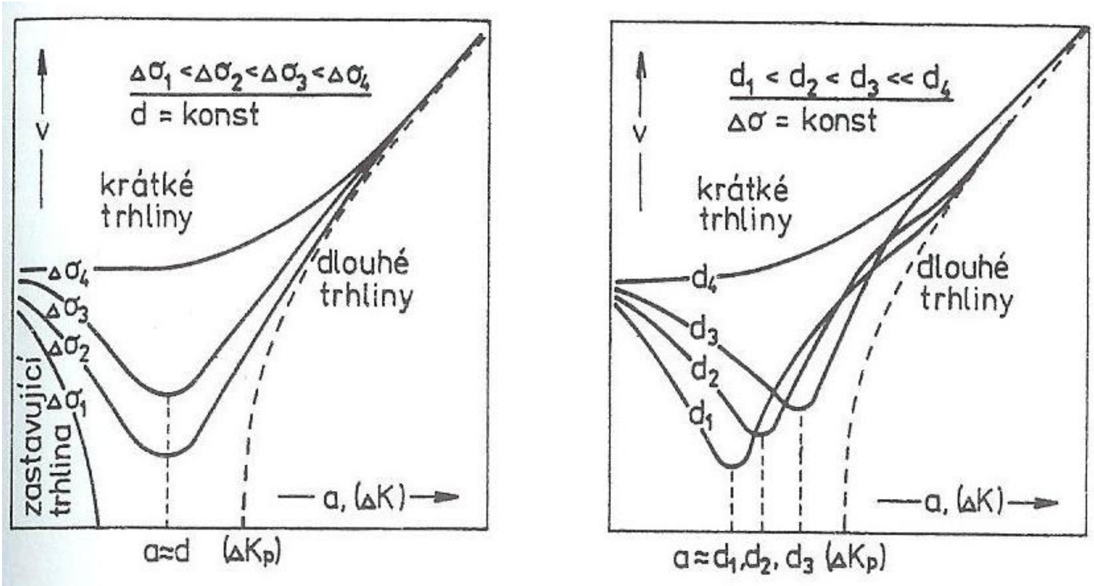
a) b)

Obr. 8.1 Schéma etap šíření mikroskopických a krátkých únavových trhlin (a). Schéma vzniku intruzí a extruzí na povrchu při cyklickém namáhání a únavě (b)

V první etapě na povrchu vzniká obvykle řada mikrotrhlin, z nichž největší nebo nejaktivnější procházejí přes hranice zrn a vlivem spolupůsobení smykových a tahových cyklických napětí se postupně stáčejí do roviny kolmé na hlavní napětí. Ve druhé etapě je šíření únavových trhlin kolmo na tahové napětí, a je řízeno cyklickou plastickou deformací, způsobenou smykovými složkami napětí sdruženými s tahovým napětím. První etapa šíření bývá v rozmezí 5-10 zrn, podle úrovně a charakteru zatížení. Iniciace a šíření mikrotrhlin může nastat i pod mezí únavy, přitom trhliny makroskopických rozměrů zde nevznikají.

Pro **krátké trhliny**, jejichž velikost je srovnatelná s velikostí zrna, lze formálně aplikovat rozkmit (amplitudu) faktoru intenzity napětí při vyjádření rychlosti šíření. Takový přístup není ovšem korektní. Ve vztazích pro rychlost šíření krátkých únavových trhlin se vyskytují přímo délky těchto trhlin a velikosti zrna, jejichž hranice brzdí nebo zpomalují šíření krátkých trhlin, obr. 8.2.

Pro krátké trhliny, jejichž délka je srovnatelná s velikostí zrna můžeme formálně psát $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$, nebo pro rozkmit napětí v oblasti prahových hodnot $\Delta K_I = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}$, avšak hodnota horního napětí σ_h může překročit mez kluzu materiálu a dojde klastické deformaci průřezu. Pro aplikaci lineární lomové mechaniky má být splněna podmínka pro napětí $\sigma_h < 2/3\ R_p$, přitom vzniká velmi malá plastická zóna. Krátké únavové trhliny jsou brzděny hranicemi zrn, a také jejich rychlost šíření je minimální při dálce trhliny rovné velikosti zrna. Pro popi rychlosti je třeba opustit faktor K a použít přímo délku trhliny nebo parametry lomové mechaniky použitelné pro plastické deformace (J-integrál).



Obr. 8.2 Vliv velikosti zrna d na rychlost šíření krátkých trhlin v závislosti na a resp. ΔK_I.

V první klesající větvi závislosti rychlosti trhliny v = da/dN na její délce (a) nebo ΔK_I je rozhodují plastická deformace povrchových zrn a vliv trhliny jako vrubu je zanedbatelný. Vztahy lineární lomové mechaniky zde neplatí, rychlost šíření trhliny je možno zde vyjádřit ve tvaru

$$\mathbf{da/dN = Ca^{\alpha}(d-a)^{1-\alpha}}, \tag{8.1}$$

kde d je velikost zrna, a exponent α je empirický parametr, který může nabývat hodnoty -0,27 $<\alpha<$ 0,08.

Ve druhé stoupající větvi (a > d) začíná vrubový účinek trhliny hrát významnou roli, obr. 8.2. Podobně jako u dlouhých trhlin je zde rozhodují plastická zóna na čele trhliny. Šíření únavové trhliny přestává být ovlivněno lokálními podmínkami na povrchu tělesa a začíná se řídit zákonitostmi lomové mechaniky. Pro rychlost trhliny je možno psát (vztah Klesnila a Lukáše)

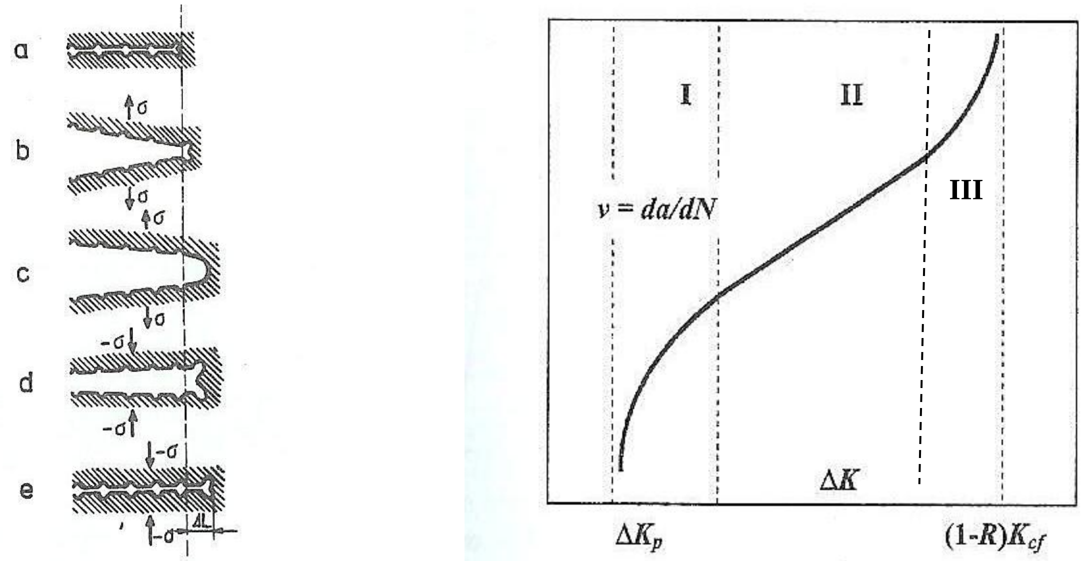
$$\mathbf{v = da/dN = C(\Delta K_I^{\,n} - \Delta K_{Ip}^{\,n})}, \tag{8.2}$$

kde ΔK_{Ip} je prahová hodnota rozkmitu faktoru intenzity napětí, n – exponent (n = 2-5) v Parisově vztahu (8.3) $da/dN = C(\Delta K_I)^n$.

8.2 Šíření únavové trhliny

Typický mechanismus šíření únavoví trhliny prostřednictvím lokální cyklické plastické deformace je představen na obr. 8.3. Při šíření únavové trhliny dochází ke střídavému uzavírání a otevírání trhliny, přitom na povrchu se tvoří žlábky, zvané striace. Jednomu zátěžnému cyklu odpovídá zpravidla posuv čela trhliny o vzdálenost sousedních žlábků. Pomocí měření rozteče striací (žlábků) můžeme tedy zjistit rychlost šíření trhliny v daném lokálním místě.

Z makroskopického hlediska a podle lomové mechaniky je rychlost šíření únavové trhliny závislá na rozkmitu faktoru intenzity napětí $\Delta K = \Delta\sigma(\pi a)^{1/2}Y$ anebo amplitudě faktoru intenzity napětí K_a ($\Delta K = 2.K_a$). Na obr. 8.3 je představena obecná závislost rychlost šíření únavoví trhliny $v = dA/dN$ na rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK. Podle velikosti ΔK a průběhu křivky se rozlišují tři etapy (stadia) rozvoje trhliny. Při velmi nízkých hodnotách ΔK pod prahovou hodnotou ΔK_p trhliny se nešíří. K šíření únavové (makroskopické) trhliny dochází nad prahovou hodnotou v prvním stadiu (I).



*Obr. 8.3 Mechanismus vytváření žlábků ve II. etapě šíření únavové trhliny. Obecná závislost rychlosti šíření únavové trhliny v = dA/dN na rozkmitu ΔK. K_{cf} - lomová houževnatost při cyklickém zatížení. Závislost je zobrazena v logaritmických stupnicích log**ΔK**- log **v**.*

Pro popis II. etapy stabilního šíření trhliny je používán Parisův vztah:

$$\mathbf{v = da/dN} = \boldsymbol{C}(\Delta \boldsymbol{K})^{\boldsymbol{n}}, \qquad (8.3)$$

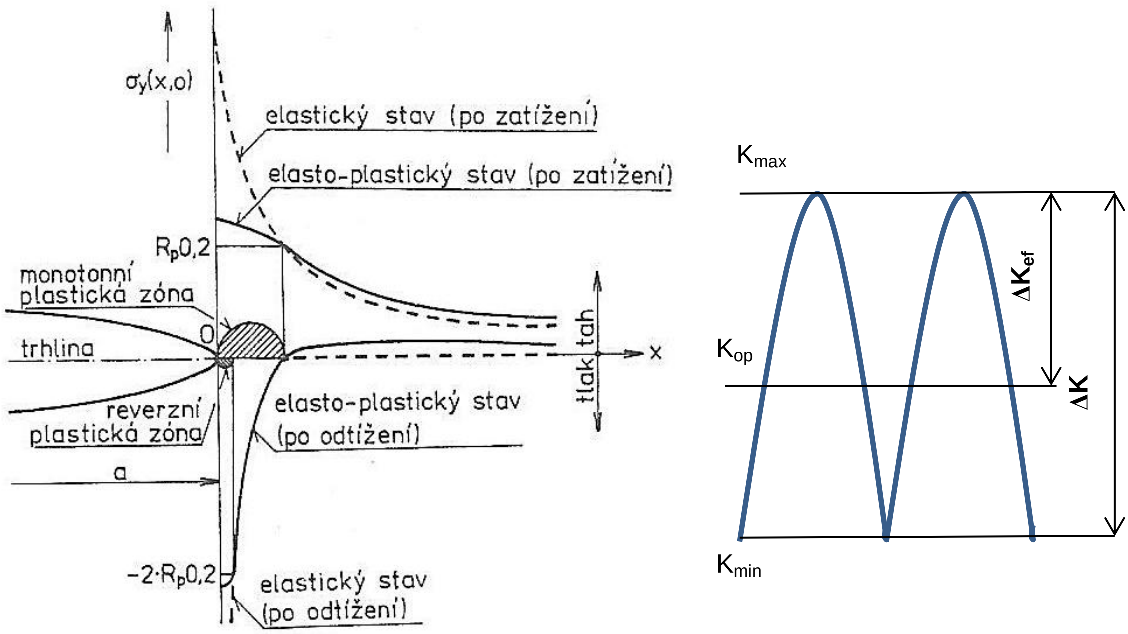
kde C – materiálová konstanta, parametr n = 2-5, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ rozkmit faktoru intenzity napětí. Přesněji je nutno uvažovat místo ΔK efektivní hodnotu rozkmitu ΔK_{ef}, vymezenou tahovou části napětí a působením tlakových pnutí od plastické cyklické zóny. Použití daného vztahu podle lomové mechaniky je možné když plastická zóna na čele trhliny je malá v porovnání s délkou trhliny ($r_p \leq a/50$) a odtud dále plyne $\sigma_h \leq R_p/3$.

V oblasti III. stadia dochází ke zrychlení rozvoje šíření únavové trhliny, v souvislosti s přetížením materiálu při snížení zbylého nosného průřezu. Vedle žlábků zde dochází ke vzniku tvárných dutin nebo štěpných fazet, které přispívají ke zrychlenému šíření trhliny ke kritické velikosti. Při dosažení hodnoty lomové houževnatosti, ovlivněné cyklickým zatížením (v důsledku cyklického zpevnění nebo změkčení materiálu) dochází k nestabilnímu, zpravidla křehkému, lomu.

V první etapě šíření únavových trhlin má velký vliv mikrostruktura, střední napětí a prostředí, které v této etapě pomalého růstu působí delší dobu. Ve druhé etapě se projevuje relativně malý vliv mikrostruktury, středního napětí, prostředí a tloušťky. Ve třetí etapě zrychleného rozvoje trhlin má značný vliv mikrostruktura, střední napětí a tloušťka, přitom prostředí má malý vliv. Vliv teploty není jednoznačný, zpravidla v I. stadiu při zvýšení teploty (vzhledem normální pokojové teplotě) dochází ke snížení prahové hodnoty a zvýšení rychlosti trhliny, naopak ve III. stadiu se zvyšuje hodnota lomová houževnatosti s teplotou a zároveň klesá rychlost šíření trhliny.

Na rozdíl od staticky namáhaných materiálů je plastická zóna únavových trhlin složena z části odpovídající maximálním hodnotám tahového napětí σ_h a z části cyklické, jejíž rozměry jsou asi 4-5 x menší než zóny statické, obr. 8.4. Účinek těchto zón se projevuje na změnách rychlosti šíření trhlin při změnách amplitudy napětí.

Na rychlost šířená únavové trhliny má vliv střídání amplitudy nebo střední hodnoty při cyklickém zatížení. Pokud při stejné střední hodnotě dojde ke snížení amplitudy napětí v blocích velkého počtu cyklů, nastane nejprve výrazné snížení rychlosti šíření trhliny a pak její pozvolný nárůst na hodnotu odpovídající menší amplitudě napětí. Naopak při zvýšení amplitudy napětí dochází k výraznému přechodnému zvýšení rychlosti růstu únavové trhliny, následované poklesem na hodnotu odpovídající stacionárnímu zatížení vyšší amplitudou. Tyto přechodové změny rychlosti se vysvětluje pomocí cyklické plastické zóny, kterou musí procházet trhlina při změnách úrovně napětí.



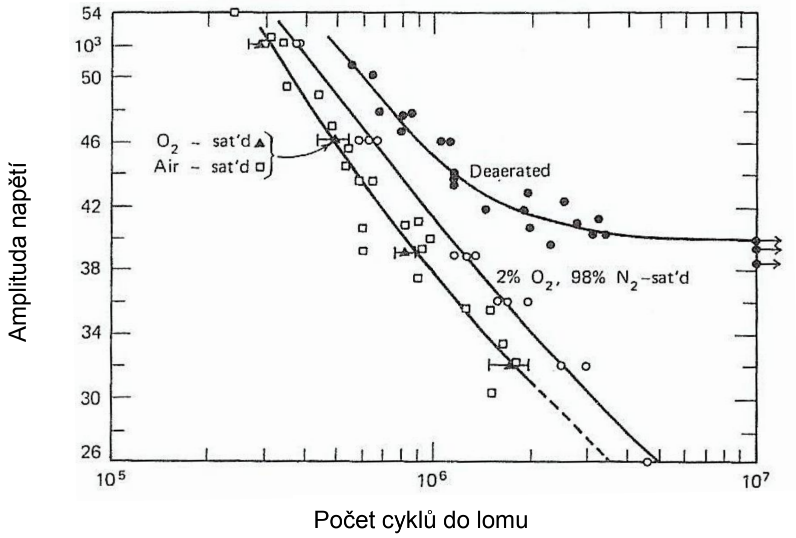
Obr. 8.4 Porovnání monotónní a reverzní (cyklické) plastické zóny na čele trhliny. Uzavírání čela trhliny z důvodu reverzní plastické zóny vede k zavedení efektivního rozkmitu faktoru intenzity napětí (ΔK_{ef}) při popisu rychlosti šíření únavových trhlin.

Vlivem plastické zóny dochází také k uzavírání trhliny (při tlakové části cyklu) a jejímu pozdějšímu otevírání, což se projeví na snížení účinného rozkmitu napětí. Namísto původního rozkmitu ΔK_I je třeba uvažovat **efektivní rozkmit ΔK_{ef}** $< \Delta K_I$.

Větší plastická zóna při cyklickém zatížení znamená větší otevření trhliny a tím vyšší rychlost šíření trhliny ve tvárném kovovém materiálu.

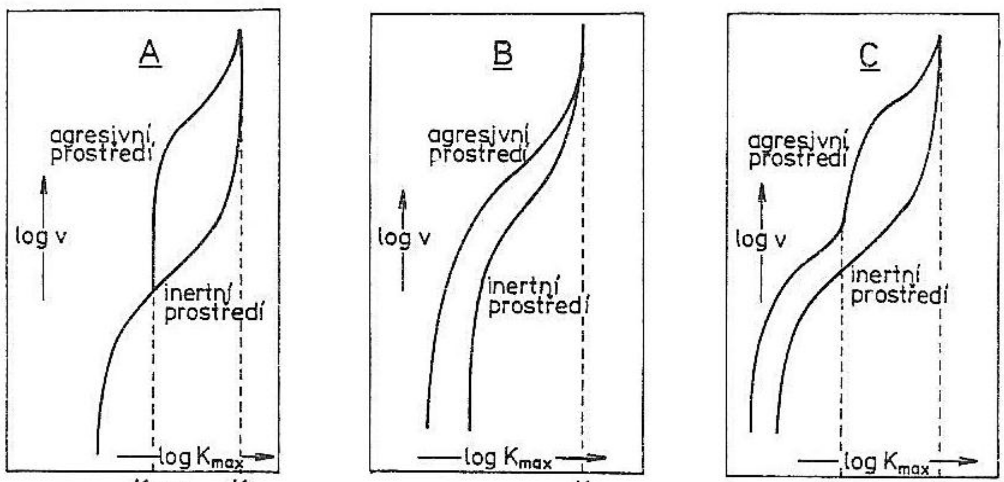
8.2 Vlivy prostředí a frekvence na šíření trhlin

Kombinovaným účinkem mechanické únavy a korozního prostředí dochází ke snížení únavové cyklické životnosti při daném cyklickém zatížení anebo ke snížení meze únavy, resp. časované meze únavy (pro zvolený počet cyklů), viz. **Wöhlerovy křivky** na obr. 8.5.
Vlivy vybraných prostředí (odvzdušněná voda, voda nasycená 98% N_2 + 2% O_2, voda nasycená vzduchem a kyslíkem) na křivky únavové životnosti jsou znázorněny na obr. 8.5.



Obr. 8.5 Vliv rozpuštěného kyslíku v roztoku 3% NaCl při 25°C, na únavové chování oceli (0,18%C).

Základní možnosti zvýšení rychlosti šíření únavových trhlin v korozním prostředí jsou znázorněny na obr. 8.6.
V prvním případě (A) rychlost šíření únavové trhliny je ovlivněna prostředím až nad prahovou hodnotou K_{ISCC} pro **korozní praskání za napětí**. Ve druhém případě agresivní prostředí snižuje prahovou hodnotu amplitudy faktoru intenzity napětí K_{ap} (pro čistě mechanickou únavu) a zvyšuje rychlost šíření trhliny v celém rozsahu K_a, resp. K_{max} (obr. 8.13 b), představuje vlastní korozní únavu. Třetí případ je určitou superpozicí dvou předchozích.



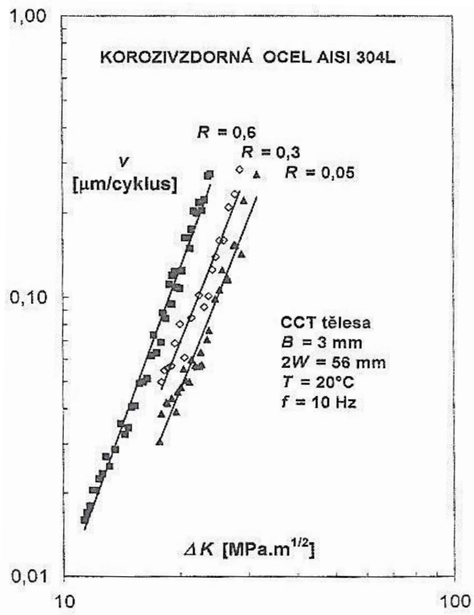
Obr. 8.6 Kombinace mechanické únavy s korozním prostředím na zvýšení rychlosti trhlin
A – Vliv korozního praskání, resp. vodíkového zkřehnutí na šíření únavových trhlin
B – Vlastní korozní únava materiálu (interakce vlivů),C – Kombinace uvedených mechanismů.

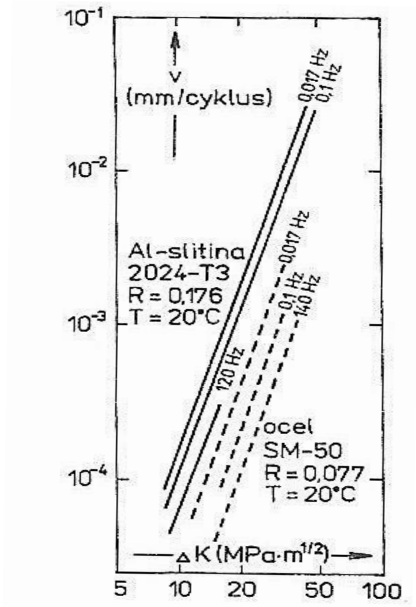
V tab. 8.1 jsou pro srovnání uvedeny lomové houževnatosti K_{Ic} konstrukčních materiálů, a prahových hodnot pro stabilní rozvoj trhlin za asistence korozního prostředí K_{IEAC} (EAC – environmental assisted cracking). Zobecněné označení K_{IEAC} zahrnuje korozní praskání (K_{ISCC}) nebo vodíkové (K_{IHIC}, anebo K_{ISH}) praskání.

Tab. 8.1 Příklady kritických hodnot K_{IEAC} pro vybrané materiály a některá prostředí

Materiál	Prostředí	$R_p0,2$ [MPa]	K_{Ic} [MPa.m$^{1/2}$]	K_{IEAC} [MPa.m$^{1/2}$]
Al-slitina 2024-T351	3,5% NaCl	325	55	11
Al-slitina 2024-T852	mořská voda	370	19	15
Al-slitina 7075-T6	3,5% NaCl	505	25	21
Al-slitina 7075-T7351	3,5% NaCl	360	26	23
Ocel 18Ni(300)-maraging	roztok NaCl	1 960	80	8
CrNiMo ocel 4340	roztok NaCl	1 335	79	9
Korozivdorná ocel 300M	3,5% NaCl	1 735	70	22
Ti-slitina Ti-6Al-4V	3,5% NaCl	890	99	45
Ti-slitina Ti-8Al-1Mo-1V	3,5% NaCl	745	123	31
Ti-slitina Ti-8Al-1Mo-1V	voda	855	105	29

Významné jsou také vlivy asymetrie cyklu (R= σ_d/σ_h) frekvence zatížení (f) na šíření únavových trhlin, obr. 8.7, zejména v korozních prostředích. S rostoucím součinitelem asymetrie cyklu stoupá střední hodnota napětí (σ_m) při daném rozkmitu napětí ($\Delta\sigma=2.\sigma_a$, $\Delta K=\Delta\sigma\sqrt{\pi a}Y$). S rostoucí frekvencí rychlost únavové trhliny v = da/dN (v jednotce μm/cyklus) obecně klesá, naopak rychlost v = da/dt (μm/s) stoupá.





Obr. 8.7 Příklady vlivu asymetrie cyklu R a frekvence f [Hz] na rychlosti šíření trhliny.

Vliv frekvence (f) na rychlost šíření trhliny je možno popsat vztahem v = $Cf^{-\lambda}(\Delta K_{ef})^n$, kde materiálová konstanta λ= 0,08-0,09 pro slitiny Al, pro ocel λ= 0,12-0,14.

Shrnutí pojmů

Na základě stručného výkladu z poměrně rozsáhlé problematiky únavy materiálu je nutné znát tyto základní pojmy:

- **Wöhlerova křivka, únavová pevnost, mez únavy, cyklická životnost, korozní únava**
- **Stadium iniciace trhliny, intruze, extruze, krátké trhliny, šíření trhlin, striace,**
- **Parisův vztah, prahové hodnoty rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK_p (ΔK_{Ip}) efektivní rozkmit ΔK_{ef}.**
- **Prahové (mezní) hodnoty pro korozní praskání za napětí (K_{ISCC}, K_{IHIC}, K_{IEAC}) a korozní únavu**

Otázky ke kapitole č. 8

8.1 Jak vznikají intruze a extruze při střídavém namáhání kovových materiálů?
8.2 Proč šíření krátkých trhlin nelze popsat pomocí rozkmitu faktoru intenzity napětí?
8.3 Jaké znáte způsoby omezení anebo potlačení iniciace únavového porušení?
8.4 Jak vznikají únavové striace a jak souvicí s rychlosti šíření trhliny.
8.5 Na čem závisí rychlost šíření únavových trhlin v kovových materiálech?
8.6. Uveďte hlavní činitelé, které mohou způsobit rozptyl hodnot únavové životnosti.
8.7 Pro jaké výpočty se používá Parisův vztah? Uveďte možnosti použití a omezení tohoto vztahu.
8.8. Jak korozní prostředí ovlivňuje únavové charakteristiky materiálu?
8.9. Jak lze využít faktor intenzity napětí při popisu vlivu korozního prostředí na šíření trhlin?
8.10. Jak se mění rychlost šíření únavové trhliny s frekvencí zatěžování?

Úlohy ke kapitole

8.1. Spíše tenčí listová pružina je vystavena jednoduchému ohybu v jednom směru a na tahové straně vzniká semieliptická vada (a/2c = 0,15). Jak je možno očekávat, rovina vady je orientována kolmo na ohybové napětí. Opakované zatížení způsobuje šíření trhliny. Diskutujte, zda poměr elipticity (a/2c) bude stoupat nebo klesat.

8.2. Stanovte dobu do lomu ocelové desky o šířce 200 mm a tloušťce 3,0 mm, ve které je centrální trhlina o délce 10 mm. Lomová houževnatost oceli je K_{Ic} = 48 MPam$^{1/2}$ a mez kluzu Re = 1400 MPa. Deska je zatěžována mijívou silou F_{max} = 80 kN s frekvencí 3,0Hz. Předpokládáme, že únavová trhlina se šíří z výchozí centrální trhliny podle Parisova vztahu s konstantami C = 10^{-10} MPa^{-3}m$^{-1/2}$ a n = 3,0.

Řešení:

Počáteční trhlina je relativně krátká ve srovnání se šířkou vzorku (2a/W=10/200 =0,05), takže geometrický faktor Y=1. Maximální, horní napětí je $\sigma_h = F_{max}/S = 80.10^3/200.3$ = 133 MPa = 0,095.Re. Minimální, dolní napětí je $\sigma_d = 0$. Únavová trhlina se bude šířit stabilně od počáteční délky a_o = 5,0 mm (na obě strany) do kritické délky a_c, kterou vypočteme z rovnice pro K_{Ic} : $K_{Ic} = \sigma_h\sqrt{\pi a_c}.Y$, pro zjednodušení výpočtu předpokládáme Y = 1 (jinak Y = f(a/W) a výpočet je složitější). Pak kritická délka trhliny a_c = 41,3 mm.

Podle Parisova vztahu: $da/dN = C.\Delta K^n$ je formálně $dN = \frac{da}{C.\Delta K^n}$ a životnost vypočteme pomocí integrálů z obou stran. Integrační meze zvolíme tak, aby počáteční délce trhliny a_o odpovídal nulový počet cyklů $N_o = 0$, a kritické konečné délce únavové trhliny a_c odpovídal počet cyklů N_c, tj. cyklická životnost.

$N_c = \int_0^{N_c} dN = \int_{a_o}^{a_c} \frac{da}{C.\Delta K^n}$, kde rozkmit $\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}.Y = \sigma_h.\sqrt{\pi a}Y$, po úpravě dostaneme

$N_c = \frac{1}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi})^n}\int_{a_o}^{a_c}\frac{da}{(\sqrt{a}Y)^n}$, Pro zjednodušení výpočtu Y = 1 (nebo Y = konst.> 1), a pro

zadané n = 3,0 dostaneme $N_c = \frac{1}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi})^3}\int_{a_o}^{a_c}\frac{da}{(\sqrt{a})^3} = \frac{1}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi})^3}[\frac{1}{\sqrt{a_o}} - \frac{1}{\sqrt{a_c}}]$.

Po dosazení a numerickém výpočtu N_c = 13970 cyklů. Doba do lomu $t_f = N_c/f$ = 77,6 min.

Poznámka: Přesnější výpočet kritické délky trhliny s přihlédnutím k funkci Y= f(a) vede k výsledku a_c = 34,9 mm a pro střední hodnotu $Y = 0,5.(Y(a_o) + Y(a_c)) > 1$ dostaneme přibližně N_c = 12500 cyklů. Tvarovou funkci (tvarový faktor) je možno zde v podobě: $Y = Y(\frac{a}{W}) = 1+0,128(\frac{a}{W}) - 0,288(\frac{a}{W})^2 + 1,525(\frac{a}{W})^3$, platí pro $a/W \leq 0,7$ s přesností 0,5 %.

8.3. V 1CrMoV oceli pro výrobu rotorů energetických zařízení byla experimentálně zjištěna rychlost šíření únavové trhliny podle vztahu: $\frac{dc}{dN} = 7,7.10^{-12}.\Delta K_I^3$.
Vypočtěte přibližně cyklickou zbytkovou životnost dílce, když pomocí defektoskopie byla zjištěna na povrchu válcovitého rotoru polo-eliptická trhlina o hloubce 5 mm a šířce 20 mm, ležící v rovině procházející osou rotoru. Prahová hodnota rozkmitu faktoru intenzity napětí je ΔK_{Ith} = 5,0 MPa $m^{1/2}$ a lomová houževnatost této oceli je 115 $MPam^{1/2}$, nominální střídavé ohybové napětí je 90 MPa.

8.4. Prahová hodnota ΔK_p klesá s rostoucím R podle vztahu $\Delta K_p = (1-R)^\gamma \Delta K_{po}$, kde γ je parametr závislý na materiálu a na prostředí ($0 < \gamma < 1$, např. pro perlitické oceli $\gamma = 0,93$, pro oceli s vysokou pevností $\gamma = 0,71$, pro martenzitické oceli $\gamma = 0,53$, v suchém vzduchu).
Pro perlitickou ocel vypočtěte prahovou hodnotu rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK_p pro asymetrii cyklu R = 0,9 a hodnotu ΔK_{po}, když $\Delta K_p = 4,0$ MPa$\sqrt{m}$ pro R = 0,7. Jaký je význam parametru ΔK_{po}.

8.5. Komponenta energetického zařízení z oceli o lomové houževnatosti K_{Ic}= 54 MPa.$m^{1/2}$ byla podrobena nedestruktivnímu ultrazvukovému zkoušení a bylo zjištěno, že obsahuje trhlinu o hloubce 2,0 mm a šířce 5,5 mm a vadu o hloubce 1,5 mm a šířce 10,2 mm, obě téměř semieliptického tvaru, orientované kolmo na obvodové napětí. Zkoušky prokázaly, že rychlost šíření trhlin při cyklickém zatěžování se řídí Parisovým zákonem s konstantami $C = 4{,}0.10^{-13}\ MPa^{-4}m^{-1}$ a $n = 4$ (pro R=0). Vypočítejte počet cyklů do lomu, když při míjivém zatěžování je rozkmit napětí $\Delta\sigma = 150$ MPa.

8.6. Stanovte, jak se změní kritická délka trhliny oceli CrNiMo (4340) podle tab. 8.1 ve vodném roztoku NaCl v důsledku korozního praskání. Uvažuje stejné tahové napětí v inertním prostředí a v roztoku.

Literatura

[1] Kunz J., Aplikovaná lomová mechanika. ČVUT Praha, Česká technika, 2005, 272 s.

[2] Anderson T.L: Fracture Mechanics. Fundamentals and applications, BAE, 2005, 621 p.

[3] Strnadel, B., Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství. Ostravské tiskárny, 1998, 334 s.

[4] Kučera J. Stručný úvod do mechaniky lomu. Část 1. Vruby a trhliny. Nestabilní lom. Část 2 Únava materiálu. FS VŠB Ostrava. 1993, 180 s.

[5] Lomová mechanika – internetové výukové programy a informace

[6] Engineering fracture mechanics – časopis, soudobé poznatky z lomové mechaniky

[7] Strnadel, B. Nauka o mateiálu II. Degradační procesy a design konstrukčních materialů. ES VŠB-TU Ostrava, 2008, 280 s.

[8] Koutský J., Degradační procesy a predikce životnosti. ZU Plzeň (skripta), 1995, 167 s.

[9] Callister D. W., Materials Science and Engineering. An Introduction. University Iowa, John Wiley& Sons, 2007,721 p.

[10] Felbeck, D. K., Atkins A.G.: Strength and Fracture of Engineering Materials. Prentice Hall, Englewood, 1984, 542 p.

[11] Pokluda J. aj. Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek. PC-DIR, Brno, 1994, 385 s.

[12] ASTM E647-91. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, 1991. In Annual Book of ASTM Standards, pp. 654-681.

[13] Němec J., Sedláček J., Statistické základy pevnosti konstrukcí 1, Academia Praha, 1982, 316 s.

[14] Němec J., Sedláček J., Statistické základy pevnosti konstrukcí 2, Academia Praha 1982, 420 s.

[15] Sojka, J. Odolnost ocelí vůči vodíkové křehkosti. VŠB-TU Ostrava, 2007, 108 s.

[16] Klesnil, M., Lukáš, P.. Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání. Academia, Praha, 1976, 222s.

Odpovědi na otázky

8.1 Intruze (mikroskopické prohlubně) vznikají při cyklických pokluzech dislokací a úzkých pásem vlivem smykových napětí. Extruze vystupují nad povrch vedle intruzí, vznikají podobným kluzovým mechanismem jako intruze (obr. 8.1).

8.2 Při rozkmitu $\Delta K = \Delta\sigma(\pi a)^{1/2}Y$ a pro velmi krátké trhliny $\Delta\sigma$, resp. σ_h překročí mez kluzu a pak nelze aplikovat vztahy lineární lomové mechaniky.

8.3 Iniciaci únavového poškození kovů obecně omezíme pohybem dislokací. Prováděná opatření: snížení koncentrace napětí, zvýšení jakosti povrchu (leštění, jemné broušení), vnesení tlakových pnutí na povrchu a zpevnění povrchu (cementování, nitridování, povrchové kalení, kuličkování, válečkování apod.)

8.4 Únavové striace vznikají cyklickou plastickou deformací jako mikroskopické žlábky (jeden žlábek vznikne za jeden cyklus), vyznačují lokální polohy čela rostoucí trhliny. Umožňují stanovit lokální rychlost šíření trhliny.

8.5 Hlavně na rozkmitu (amlitudě) faktoru intenzity napětí, tj. na velikosti cyklické plastické deformace, dále teplotě, frekvenci, stavu napjatosti, korozním prostředí.

8.6 Rozptyl únavové životnosti je způsoben hlavně v etapě iniciace a šíření mikrotrhlin. Při iniciaci jsou významné náhodné lokální koncentrace napětí na povrchu a náhodný výskyt vad v materiálu, při růstu a rozptylu mikrotrhlin se uplatní zejména různé velikosti zrn. Rozptyl únavové životnosti dále zvyšuje náhodný průběh zatížení, náhodné změny prostředí a teploty.

8.7 Parisův vztah (zákon) se používá pro odhady nebo výpočty únavové životnosti, zbytkové cyklické životnosti, dále pro porovnání rychlosti šíření trhlin v rozdílných materiálech anebo v určitém materiálu po různých variantách zpracování.

8.8 Korozní prostředí zpravidla snižuje únavovou pevnost a životnost, zvyšuje rychlost šíření trhlin hlavně v I. a II. etapě růstu, snižuje prahové hodnoty (ΔK_{Ip}) – korozní únava.

8.9 Faktor intenzity napětí lze využít pro vyjádření prahových hodnot při statickém nebo cyklickém zatěžování (K_{ISCC}, K_{IHIC}, ΔK_{Ipc}), pro popis a porovnání zvýšení rychlosti šíření trhlin v korozním prostředí.

8.10 Rychlost šíření únavové trhliny (da/dN) v μm/cykl obecně s rostoucí frekvencí klesá. Naopak rychlost v = da/dt = f.(da/dN) v μm/s frekvencí stoupá.

Výsledky některých příkladů, pokyny pro řešení:

8.1. Poměr elipticity bude stoupat při ohybu.
8.3. Životnost $N_f = 1{,}7.10^7$ cyklů, podle zjednodušeného výpočtu.
8.4. $\Delta K_{po} = 12{,}3$ MPa$\sqrt{m}$ a $\Delta K_p = 1{,}45$ MPa$\sqrt{m}$ pro R = 0,9, kde ΔK_{po} označuje prahovou hodnotu rozkmitu faktoru intenzity napětí při parametru asymetrie cyklu R = 0.
8.6. Kritická délka trhliny se zmenší ≈77 x.