

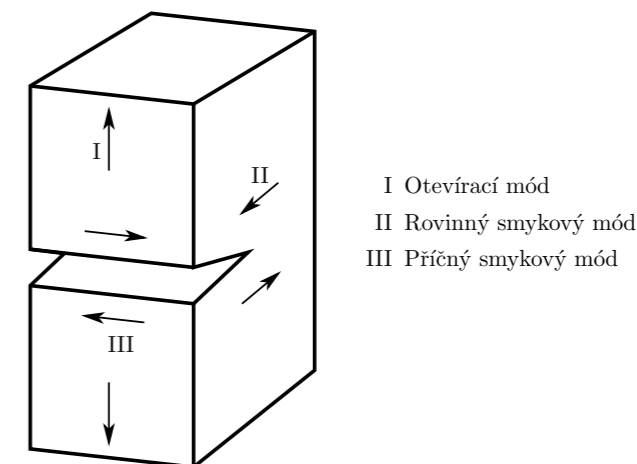
trhliny při korozi pod napětím, případně jejich různé kombinace. Tato kniha se zaměřuje na případy křehkého lomu a růstu únavové trhliny v kovových materiálech za teploty okolí. Odolnost materiálu vůči křehkému lomu se nazývá lomová houževnatost.

Použití lomové mechaniky při řešení praktických inženýrských problémů umožňuje odpovědět na otázky typu: „Jak závažná je tato trhlina nalezená nedestruktivní defektoskopií?“, „Jaká je s ohledem na tuto trhlinu zbytková životnost součástí?“, nebo „Jaká je největší přípustná délka trhliny?“ Jde o dobře etablovaný obor s množstvím literatury, viz např. [4–10]. Zprvu někteří autoři ve svých pracích o lomové mechanice doufali, že analytický přístup [4] založený na aplikované mechanice bude s pomocí znalosti provozního zatížení a materiálových vlastností použitelný pro řešení obecných inženýrských problémů. Toto přání se však nenaplnilo. Nicméně stále jsou často zapotřebí jen jednoduché analytické výpočty, které lze provést pomocí vědeckého kalkulátoru, a takovéto výpočty jsou při analýze porušení obzvláště užitečné [1].

Nedestruktivní zkoušení je doplňujícím vědním oborem [3], který odpovídá na otázky typu: „Je možné detekovat trhlinu dané délky?“ a „Jestliže ano, s jakou spolehlivostí a za jakou cenu?“. Kombinací těchto dvou vědních oborů jsme schopni odpovědět na otázky jako: „Je nejmenší velikost trhliny detekovatelná postupy nedestruktivní defektoskopie přípustná?“, „Je zapotřebí použít dokonalejší (a dražší) nedestruktivní zkušební metody?“ a „Je třeba změnit návrh součástí (možná i za cenu zhoršení konstrukční efektivity) tak, aby byla akceptovatelná větší trhlina?“ Lomová mechanika a nedestruktivní zkoušení se tak vzájemně ovlivňují [3]. Obou oborů se využívá při měření materiálových vlastností v případě výskytu trhliny a během inženýrského posuzování součástí či konstrukcí v případě skutečných nebo jen předpokládaných trhlín.

Základní myšlenky lineární elastické lomové mechaniky jsou jednoduché, avšak použité matematické postupy jsou často velice komplikované. Přítomnost trhliny vede ke koncentraci napětí ve vrcholu trhliny, takže některé výsledky nemusí být úplně zřejmé. Nicméně právě matematické postupy vedou k nadmíru užitečným a snadno využitelným výsledkům. Dnes již s mnohými výsledky a postupy umíme lépe pracovat, a to díky jejich začlenění do norem různých formálních úrovní a do počítačových programů.

Základní lomově mechanický přístup je založen na posuvech povrchů trhliny. Při zatížení tělesa s trhlinou se povrchy trhliny pohybují vzájemně vůči sobě, přičemž existují tři možné způsoby (módy) posuvů povrchů trhliny (obrázek 1.1). Jsou to: mód I – otevírací mód, při němž se protější povrchy trhliny pohybují přímo od sebe, mód II – rovinný smykový mód, při němž se povrchy trhliny pohybují nad sebou ve směru kolmém k čelu trhliny, a mód III – příčný smykový mód, při němž se povrchy trhliny vzájemně posouvají ve směru rovnoběžném s čelem trhliny.



Obrázek 1.1 Módy posunutí povrchů (líců) trhliny.

Lomová mechanika se zabývá tím, co se děje v okolí vrcholu trhliny, nebo přesněji řečeno, jaké jsou posuvy povrchů trhliny vzhledem k jejímu čelu. Superpozicí zmíněných tří módů je možné popsat obecný případ posuvů líců trhliny. Protože ve skutečnosti [4, 10] má většina trhlín snahu růst při módu I, je pozornost věnována převážně tomuto módu. Pro označení módů se používají indexy I, II a III. Pokud není index uveden, předpokládá se mód I.

Současná lomová mechanika obvykle předpokládá jistá zjednodušení. Pokud není uvedeno jinak, jsou v této knize použity následující předpoklady:

- (a) Materiál je homogenní, izotropní kontinuum, jehož chování je lineárně elastické, deformace a posuvy jsou malé.

Lomová mechanika vycházející z těchto předpokladů je známa jako lineární elastická lomová mechanika. Tam, kde je to nutné, je základní teorie lineární elastické lomové mechaniky modifikována tak, aby brala v úvahu skutečné chování reálných materiálů.

- (b) Materiál není zatížen zbytkovými vnitřními napětími velkého rozsahu, ani objemovými silami způsobenými např. gravitací.
- (c) Počáteční trhlina je rovinná, těleso je zatěžováno tak, že trhlina je v módu I, další růst trhliny rovněž probíhá v módu I a v rovině počáteční trhliny.
- (d) Uvažované těleso má konstantní tloušťku.

řítku jsou obecně velmi nepravidelné. Z pozorování vyplývá [3, 4], že v makroskopickém měřítku a v podstatě při elastických podmínkách mají všechny typy trhlin tendenci šířit se v módu I (obrázek 1.1). Tato kapitola tedy pojednává především o trhlínách v módu I. V menších měřítkách mohou být na čele trhliny pozorovány deformace různých módů.

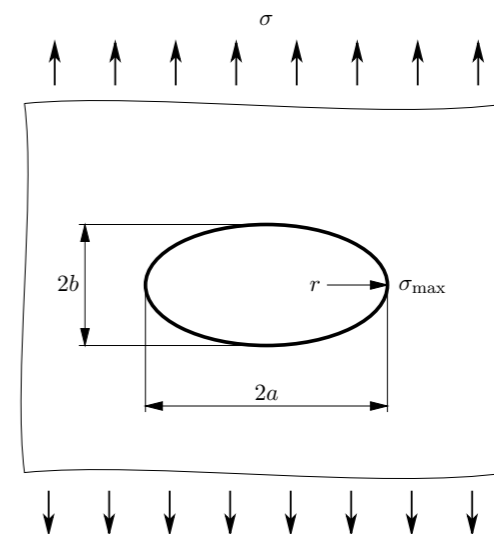
Lomová mechanika neříká nic o mechanismech porušování probíhajících při křehkém lomu, ale poskytuje analytický rámec nutný pro jejich studium. Také zavádí parametry, které mohou být použity k popisu lomové houževnatosti materiálů neboli jejich odolnosti vůči křehkému lomu. Zejména lze využít důležitého lomové mechanického konceptu, kterým je faktor intenzity napětí, pro popis materiálových vlastností těles s trhlinou naprosto stejným způsobem, jako se využívá napětí k popisu mechanických vlastností těles bez trhliny.

Měřítko [mm]	Charakteristika
10^{-6}	Ionty, elektronový oblak
10^{-5}	Dislokace
10^{-4}	Precipitáty na hranicích zrn
10^{-3}	Skluzové pásy zrn
10^{-2}	Zrna, vměstky (inkluze), dutiny
10^{-1}	Velké plastické deformace
1	Pružně-plastické oblasti
10	Faktor intenzity napětí
100	Součást nebo zkušební těleso

Tabulka 2.1 Měřítka charakteristik čela trhliny při elastických podmínkách.

2.2 Energetický přístup ke křehkému lomu

Lineární elastická lomová mechanika vzešla z úvah o křehkém lomu. Již dlouhou dobu se tušilo, že velká trhlina v daném poli napětí je nebezpečnější než malá trhlina. Hlavním úkolem lomové mechaniky bylo vyjádřit tento fakt kvantitativně. Zdá se, že první pokus analyzovat napětí v okolí vrcholu trhliny učinil Wieghardt v roce 1907 [5]. Zjistil, že vrchol trhliny způsobuje singularitu napětí a že ji lze využít k popisu závažnosti trhliny (viz další kapitola), význam jeho článku byl ale doceněn až v poslední době [6].



Obrázek 2.1 Eliptická díra v nekonečné desce.

Jiný raný přístup k problému zohledňoval napětí ve vrcholu ostrého vrubu. Jak poznamenal Parton [7], problém eliptické díry v nekonečné desce při jednoosém tahovém zatížení (obrázek 2.1) poprvé vyřešil G. V. Kolosov v roce 1909, nicméně řešení se obvykle přičítá Inglisovi [8]. Oba zjistili, že maximální tahové napětí σ_{\max} je na koncích hlavní osy elipsy a je dáno vztahem:

$$\sigma_{\max} = \sigma(1 + 2a/b), \quad (2.1)$$

Po úpravě:

$$K = \left[\frac{GE}{(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad (\text{pro rovinnou deformaci}). \quad (2.34)$$

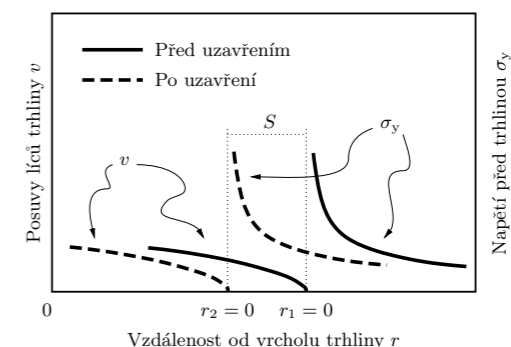
Podobně:

$$K = (GE)^{1/2} \quad (\text{pro rovinnou napjatost}). \quad (2.35)$$

Idea faktoru intenzity napětí je klíčovým konceptem lomové mechaniky. Její význam tkví v tom, že vlastnosti materiálů v případě přítomnosti trhliny mohou být vyjádřeny pomocí faktoru intenzity napětí K , stejně jako vlastnosti materiálů měřené na hladkých tělesech (bez vrubu/trhliny) se popisují pomocí napětí. Vlastnosti materiálů pro převážně elastické podmínky se nyní obvykle vyjadřují spíše pomocí K než pomocí rychlosti uvolňování deformační energie G . Lomová houževnatost pro případ rovinné deformace se označuje jako K_{Ic} , zatímco pro případ rovinné napjatosti se lomová houževnatost označuje K_c . Tyto veličiny odpovídají G_{Ic} a G_c a jejich vztahy jsou dány rovnicemi (2.34) a (2.35). Označení K_c se stejně jako G_c někdy používá, pokud je stav napjatosti neznámý.

Faktory intenzity napětí stejného módu způsobené různým zatížením mohou být sloučeny algebraickým součtem. Mód I může být pouze kladný, protože tlakové zatížení trhlinu uzavírá. Módy II a III mohou mít kladné i záporné znaménko, přičemž znaménko je věcí konvence. Obvykle je bráno jako kladné.

Některé materiály často využívané v inženýrské praxi nemůžeme považovat za izotropní ani při rozumné aproximaci. Pole elastických napětí v okolí vrcholu trhliny v anizotropních materiálech se liší od polí napětí v materiálech izotropních. Přesto je možné definovat faktory intenzity napětí, a ty použít pro některé zvláštní aplikace jako např. zkoušky lomové houževnatosti dřeva [15].



Obrázek 2.8 Zavírání trhliny v oblasti délky S .

2.4 Vybraná řešení faktoru intenzity napětí pro mód I

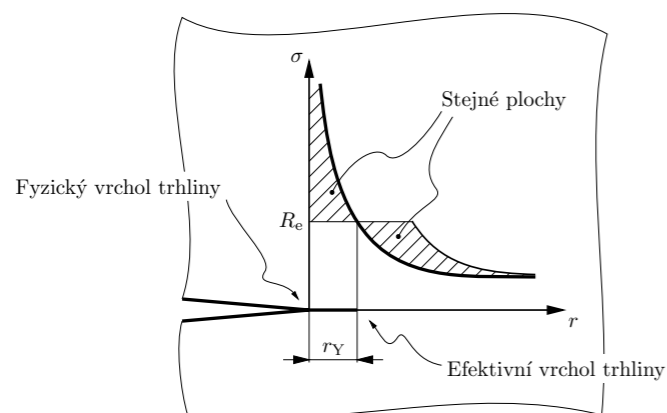
Řešení faktoru intenzity napětí jsou v literatuře dostupná pro velké množství konfigurací [16]. To umožňuje použít materiálová data na širokou oblast praktických problémů. Vybrané příklady pro mód I jsou uvedeny níže. Řešení je zde ve formě rovnice prokládající numerické výsledky, viz např. rovnice (2.44) níže, s tím, že je třeba se vyhnout jejímu použití mimo uvedený rozsah. Řešení konkrétní konfigurace se někdy nazývá K-kalibrace nebo funkce poddajnosti.

2.4.1 Centrální trhlina v nekonečné desce [16]

Pro rovnoměrný jednoosý tah (obrázek 2.9a) platí:

$$K = \sigma (\pi a)^{1/2} \quad (2.36)$$

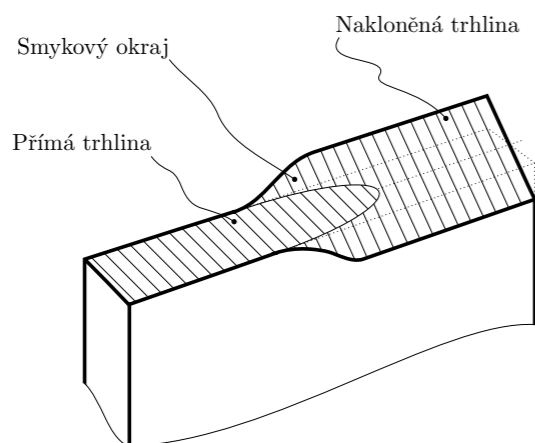
Protože napětí rovnoběžné s trhlinou nemá žádný vliv na faktor intenzity napětí, je vztah použitelný i pro rovnoměrný dvouosý tah (obrázek 2.7)



Obrázek 2.17: Plastická zóna před vrcholem trhliny.

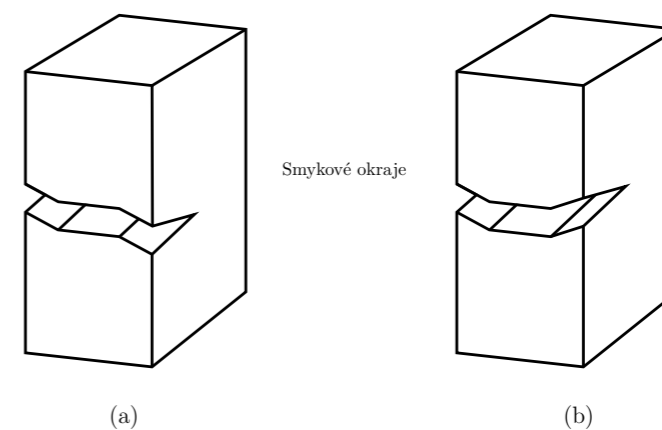
2.7 Růst nakloněné trhliny v tenkých deskách

V tenkých deskách lze občas pozorovat přechod z růstu přímé (mód I) do nakloněné trhliny. To naprosto odporuje [3] běžným pozorováním, kdy při převážně elastických podmínkách má trhlina snahu růst módem I. Hlavní znaky tohoto přechodu ukazuje obrázek 2.18.



Obrázek 2.18: Přechod k růstu nakloněné trhliny.

Po přechodu je sklon povrchu trhliny k povrchu desky přibližně 45° . Přechod vzniká rozvojem smykových okrajů, které narůstají do šířky, dokud se (uprostřed tělesa) nepotkají. Smykové okraje se na každé straně tenké desky obvykle objeví v přibližně rovnoběžných rovinách (obrázek 2.19), zjevně jako důsledek nerovinných deformací [4]. V tlustých deskách se objevují náhodně v rovnoběžných a kolmých rovinách. Obvykle přistupujeme k růstu nakloněných trhlín v tenkých deskách, jako by se jednalo o růst trhliny při módu I, a faktor intenzity napětí počítáme za použití dvojdimenzionálního řešení. Ačkoli je tuto konvenci těžké ospravedlnit argumentem o „oblasti malého rozsahu“ (viz předchozí kapitola), je v praxi dostačující [28]. Mechanismus zodpovědný za přechod k růstu nakloněné trhliny není jasný (kapitola 6.7).



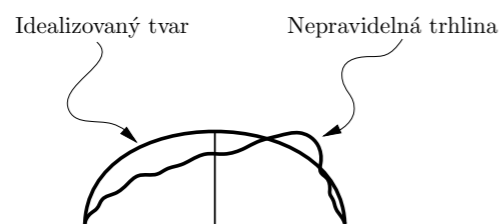
Obrázek 2.19: Smykové okraje v (a) rovnoběžných a (b) kolmých rovinách.

2.8 Vliv tloušťky na měření lomové houževnatosti

Většina zkoušek lomové houževnatosti kovových materiálů se provádí na kvazi dvojdimenzionálních vzorcích s konstantní tloušťkou, jak ukazují obrázky 2.12 a 2.13. Obecně kritická hodnota faktoru intenzity napětí K_c závisí na tloušťce zkušebního tělesa. To ilustrují vybraná data [29] pro Ti6Al4V2.5Sn , $R_e = 1200 \text{ MPa}$, viz obrázek 2.20.

elipsou a v případě okrajové trhliny poloelipsou. Pro následnou analýzu určíme faktory intenzity napětí pro mód I za předpokladu dalšího růstu trhliny v módu I v rovině idealizované trhliny.

Při současném stavu vědění není lehké rozšířit dosud omezenou oblast použitelnosti pravidel daných v PD 6493. Je obtížné zajistit, aby postupy tohoto typu byly konzervativní. Například při tvorbě pravidel posuzujících interakce trhlín je asi nemožné vyhnout se nejednoznačností [12]. K problémům zahrnujícím smíšené módy zatěžování se musí v praxi často přistupovat případ od případu [15], [16].



Obrázek 7.2 Idealizace nepravidelné trhliny částečně procházející tělesem.

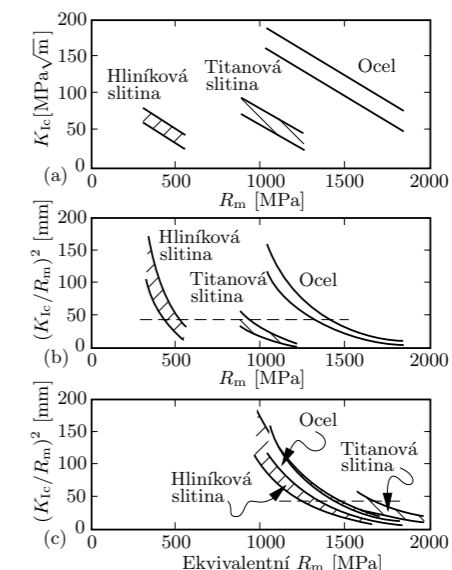
7.3 Statické porušení

Při návrhu tělesa zatíženého tahem někdy místo a velikost trhliny (skutečné nebo předpokládané) známe. V tom případě posuzujeme, jestli jsou takové trhliny přijatelné či nikoli.

7.3.1 Počáteční volba materiálu

Jako příklad uvažujme počáteční výběr materiálu pro konstrukci o nízké hmotnosti [6]. Vykreslíme-li závislost K_{Ic} na pevnosti v tahu R_m , vidíme (obrázek 7.3a), že pro každou skupinu materiálů (slitiny hliníku, slitiny titanu a ocel) K_{Ic} jak známo klesá se zvyšující se pevností v tahu.

Předpokládáme-li, že Y v rovnici (2.37) i poměr provozního napětí vzhledem k tahové pevnosti jsou konstantní, pak je kritická velikost trhliny přímo úměrná $(K_{Ic}/R_m)^2$. Závislost $(K_{Ic}/R_m)^2$ na pevnosti v tahu (obrázek 7.3b) proto umožňuje srovnání z hlediska kritické velikosti trhliny. Přerušovaná čára na tomto obrázku ukazuje, že 1400 MPa pro ocel, 935 MPa pro slitiny titanu a 490 MPa pro slitiny hliníku jsou z hlediska kritické velikosti trhliny ekvivalentní.



Obrázek 7.3 Srovnání materiálů. (a) K_{Ic} v závislosti na tahové pevnosti R_m . (b) $(K_{Ic}/R_m)^2$ v závislosti na tahové pevnosti R_m . (c) $(K_{Ic}/R_m)^2$ v závislosti na ekvivalentní tahové pevnosti normalizované vzhledem k oceli.

Abychom zahrnuli i vliv hmotnosti konstrukce, můžeme pevnost v tahu normalizovat vzhledem k oceli pomocí hustoty materiálu, a tak získat ekvivalentní velikosti R_m . Na obrázku 7.3(c) je $(K_{Ic}/R_m)^2$ vykresleno v závislosti na této ekvivalentní velikosti R_m . Je zřejmé, že konstrukci s nejnižší hmotností by bylo možno vytvořit z titanové slitiny. Za předpokladu, že pracovní napětí je poloviční vzhledem k mezi pevnosti v tahu a že $K = \sigma(\pi a)^{1/2}$ (rovnice 2.36), kritickou velikost trhliny a_c vypočteme:

$$a_c = \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{R_m} \right)^2 \quad (7.1)$$

Je-li například $(K_{Ic}/R_m)^2 = 0,009$ mm, potom $a_c = 0,009 \times 4/\pi = 0,0115$ m (11,5 mm, přerušovaná čára na obrázku 7.3c).

Toto srovnání může sloužit pro dobrý prvotní výběr materiálu. Pro konkrétní konstrukci je však často nutno počítat s dalšími zvláštními požadavky, např. s odolností proti šíření únavové trhliny.