

# ZÁKLADY DEGRADAČNÍCH PROCESŮ MATERIÁLŮ

Ing. Vladimír Kudělka, Ph.D., Ing. Petr Kovář, Ing. Zbyněk Smetana – TESSYDO, s.r.o.

## Úvod k degradačním procesům materiálů

Mnohé součásti a zařízení jsou během provozu vystaveny různým zatížením, teplotám a prostředím, které vedou k nežádoucím změnám jejich vlastností a použitelnosti, to znamená k jejich **degradaci**. Při požadavku na zvyšování účinnosti energetických strojů a zařízení, snižování hmotnosti dopravních prostředků a spotřebního zboží dochází ke stále vyššímu namáhání materiálu s možností jeho poškození anebo porušení.

## Výklad

Se znalostí typů a porozumění mechanismů a příčin degradačních procesů je možno činit opatření pro zabránění jejich výskytu. Můžeme vybrat vhodný odolný materiál, nebo změnit konstrukční řešení, nebo chránit materiál povlakem před poškozením.

**Degradace materiálu** zahrnuje procesy postupného, trvalého a nevratného znehodnocení či zhoršení požadované úrovně vlastností materiálu, které mohou snížit životnost a spolehlivost součástí, konstrukcí nebo zařízení. V mezním případě může degradace materiálu způsobit úplné selhání jejich funkce anebo havárii.

## Výrobní a provozní degradace

Již v procesu výroby může docházet ke zhoršení některých vlastností materiálu, vzniku defektů, vad a podobně, vzhledem k technicky požadovanému, dosažitelnému anebo předepsanému stavu. V daném případě se používá pojem **výrobní degradace**. Problémy technologie, snahy po úsporách nebo nedodržení parametrů výroby se v případě ocelí mohou projevit snížením čistoty, výskytem segregací škodlivých prvků (P, S, Sn) a vznikem nežádoucích fází. Dalším příkladem této degradace je vznik méně kvalitních svarových spojů z důvodu nevhodně zvolených parametrů a podmínek při svařování, zejména zhrubnutí a zkřehnutí struktury v tepelně ovlivněné oblasti. Podobně montážní nedostatky přispívají k výrobní degradaci.

Spolupůsobení podmínek (napětí, teplota, prostředí) během provozu vede k **degradaci provozní**. Mezi často se vyskytující degradační procesy patří zkřehnutí materiálu, únavové poškození, nežádoucí tečení, nadměrné opotřebení anebo napadení korozí. V řadě případů dochází ke kombinovanému (synergickému) působení degradačních mechanismů. Například lopatky plynových turbín jsou poškozovány tečením, korozí a také únavou materiálu. Časový vývoj míry degradace je možno obecně znázornit **křivkou degradace**.

Je zřejmé, že výrobní vady podmiňují a zpravidla urychlují další provozní degradaci. Z druhé strany, bezvadný výchozí materiál by obecně zpomalil degradaci, avšak neúměrně by zvyšoval cenu výrobku. Předkládaná studijní opora je zaměřena na základní procesy provozní degradace (dále zkráceně **degradace**).

Pojem degradace materiálu úzce souvisí s pojmy **stárnutí, destrukce, poškození, mezní stav, porušení materiálu**. Úvodní poznatky o degradačních procesech jsou probírány v rámci předmětu nauka o materiálu anebo nauka o kovech.

V oblasti odolnosti plastů a pryží mají pojmy degradace, stárnutí a koroze své specifické obsahy:

**Stárnutí** – souhrn nevratných, zpravidla dlouhodobých změn materiálu při daných podmínkách, hlavně vlivem teploty, světla, kyslíku. Stárnutí může mít záporný i kladný vliv na materiál (zpevnění).

**Degradace** (odbourávání) – souhrn rozkladných reakcí polymerů. Zahrnuje *depolymerizaci*, *chemodegradaci* (rozklad, destrukci plastu, odštěpení z makromolekul vlivem chemických látek a prostředí), *fotoodegradaci* (porušení vazeb fotony), *termodegradaci* (rozklad vlivem nadměrné teploty), *biodegradaci* (působení mikroorganismů, rostlin a živočichů) a podobně. Nezahrnuje bobtnání, korozní praskání za napětí, změny krystalinity.

Procesy degradace mají obecně záporný vliv na vlastnosti materiálu, ve srovnání s požadovanými anebo normovanými vlastnostmi daného materiálu.

**Koroze** – znehodnocování materiálu chemickým nebo fyzikálně chemickým působením okolního prostředí, které vede k nežádoucím změnám užitných vlastností. Zahrnuje korozi, podmíněnou biologickými vlivy, bobtnání (zvětšení objemu při pronikání některých molekul z prostředí do polymeru) a korozní praskání.

### Mezní stavy materiálů

**Mezní stav** je obecně takový stav, který je z hlediska funkce soustavy pro předepsanou povahu a délku služby nepřipustný. Mezní stavy součástí nebo konstrukcí se mohou vymezovat podle různých požadavků (technické, ekonomické, funkční, bezpečnostní).

Podle časového hlediska lze rozlišit:

- a) **mezní stavy okamžité** - vznik mezního stavu závisí pouze na okamžitých hodnotách určujících parametrů soustavy, zatěžování a provozních podmínkách, které se mohou měnit s časem, a jsou navzájem na sobě nezávislé; typickým příkladem jsou *náhlé křehké lomy*;
- b) **mezní stavy kumulativní** – jejich vznik závisí na průběhu zatěžování a podmínkách od počátku provozu až do poškození nebo zničení součásti; vhodnými příklady zde jsou únava, tečení, koroze a opotřebení materiálu.

Mezní stav můžeme posuzovat jako vyústění procesu degradace, probíhajícího během určitého časového období. Mezní stavy jsou vratné nebo nevratné, skutečné nebo modelové, výpočtové.

Mezní stavy, související s materiálem:

- 1) **Mezní stav pružnosti** - po překročení meze pružnosti nebo meze kluzu vznikají nežádoucí trvalé plastické deformace, dochází ke změně rozměrů a tolerancí, narušení funkce součástí.
- 2) **Mezní stav pevnosti** - při překročení meze pevnosti se poruší soudržnost materiálu; porušení může mít rozsah mikroskopický nebo makroskopický, lokální anebo celkový; poškození může nastat jako lom křehký, tvárný, únavový, korozní, a podobně.
- 3) **Mezní stav únosnosti** - vztahuje se k celé konstrukci, kdy tvarově určitá soustava se mění na neurčitou následkem uvolnění vazeb a nečekaných podmínek (které mohou způsobit rovněž zhroucení konstrukce).
- 4) **Mezní stav přetvoření** - nepřipustné přetvoření součásti, elastické nebo plastické (včetně otláčení).
- 5) **Mezní stav stability** - narušení stability tvaru dílce, například při vzpěru tyče, zmáčknutí tenké trubky.

Návrhy strojů, vozidel a konstrukcí, které jsou ekonomické a bezpečné, vyžadují jednak efektivní využití materiálu a jednak záruku, že nedojde k havárii konstrukce z důvodu degradace materiálu. Poškození konstrukce nebo havárie zařízení bývají způsobené selháním materiálu, když je dosažen **mezní stav materiálu**.

V mnoha případech se pojmy degradační procesy materiálu a mezní stavy materiálů nerozlišují, protože mají podobný obsah. Pojem mezní stavy je u nás v republice pravděpodobně staršího data.

## Lomové vlastnosti materiálů

Navrhování součástí nebo konstrukcí je obvykle spojeno s minimalizací možného porušení a snižování spotřeby materiálu a nákladů. Proto je důležité pochopit rozdílné procesy porušení, například lomy z přetížení, únavu a tečení. Přitom je nutné respektovat pravidla, která mají být používána pro zabránění porušení v provozu.

### Výklad

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

K dalším problémům (katastrofám 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 nebo 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, s menšími příčnými rozměry. Nevýhodou těchto ocelí je relativně nižší houževnatost, což znamená menší odpor proti nestabilnímu šíření trhlin a tedy náchylnost ke křehkému lomu.

Následující kapitola 2.1 je vhodná pro zopakování základních pojmů z oblasti pružnosti a pevnosti, potřebných pro studium dalších kapitol z oblasti porušení materiálů a lomové mechaniky.

### Hlavní napět'ové deformační charakteristiky

Při popisu napět'ově deformačního a možného lomového chování materiálů se zpravidla vychází z tahových zkoušek a diagramů. Tahová zkouška spočívá v pomalém zatěžování zkušební tyče (vzorku, dílce, výrobku), zpravidla až do lomu, za účelem stanovení základních mechanických vlastností materiálu.

Základní mechanické vlastnosti jsou stanoveny na základě smluvního **diagramu napětí  $\sigma$  – deformace  $\epsilon$** , a s využitím naměřených hodnot předepsaných rozměrů vzorku:

#### Mez kluzu

$$R_p = \frac{F_p}{S_0} \quad [\text{MPa}]$$

kde  $S_0$  je počáteční nosný průřez,  $F_p$  je síla na mezi kluzu (bod K);

#### Mez pevnosti

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}]$$

kde  $F_m$  je síla na smluvní mezi pevnosti (bod M);

#### Tažnost

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} \cdot 100 \quad [\%]$$

kde  $L_o$  je počáteční měřená délka tyče,  $L_u$  po ulomení;

#### Kontrakce

$$Z = \frac{S_o - S_u}{S_o} \cdot 100 \quad [\%]$$

kde počáteční průřez  $S_o \perp F$ , plocha průřezu  $S_u$  v místě lomu.

Smluvní mez pevnosti ( $R_m$ ) je užitečná pro klasifikaci a porovnání materiálů, pro konstrukční výpočty nosnosti nebo dimenzování (navrhování rozměrů) některých součástí a výrobků.

Pro přesnější popis lomového chování materiálu je nutno uvažovat **skutečná napětí**  $\sigma' = \frac{F}{S}$ ,

kde  $S$  je skutečný průřez, kolmý na působící sílu  $F$  a **skutečné deformace**  $\varepsilon' = \ln \frac{L}{L_0}$ , kde  $L$  je

délka tyče při zatížení silou  $F$  a  $L_0$  je počáteční délka tyče (při  $F = 0$ ).

Mezi smluvními a skutečnými parametry lze odvodit vztahy:

$$\sigma' = \sigma(1 + \varepsilon) \quad \text{a} \quad \varepsilon' = \ln(1 + \varepsilon)$$

Smluvní diagram lze pak transformovat na skutečný nebo naopak.

**Skutečná pevnost** neboli **lomové napětí** je dáno vztahem:

$$\sigma'_u = \frac{F_u}{S_{u'}}$$

kde  $F_u$  je síla v okamžiku před lomem.

Skutečná deformace v místě lomu (ve středu krčku), což je tak zvaná **lomová deformace**:

$$\varepsilon'_u = \ln \frac{1}{1 - z}$$

Do meze kluzu (přesněji úměrnosti) platí **Hookův zákon**:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \text{ respektive } \sigma' = E \cdot \varepsilon'$$

kde  $E$  je modul pružnosti v tahu.

S rostoucí deformací se zvyšuje napětí, nutné pro pokračování další deformace, tedy 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:

$$\sigma' = K \cdot \varepsilon'^n$$

Tento vztah 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 zpevňování**, který charakterizuje intenzitu zpevňování plastickou deformací.

Obecně platí  $n = 0 - 1$ , u kovů a slitin zpravidla  $n = 0,1 - 0,5$ .

Pro nerovnoměrnou deformaci po vzniku krčku ( $K'-U'$ ) je možno použít přibližný aproximativní vztah mezi přírůstky napětí a deformace:

$$\Delta\sigma' \approx D \cdot \Delta\varepsilon',$$

kde  $D$  je modul zpevňování.

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

Pro srovnání, při smluvní pevnosti oceli  $R_m = 500$  MPa může být skutečná pevnost (lomové napětí)  $\sigma'_u = 1000$  MPa, přičemž teoretická pevnost železa je  $\sigma'_t \approx 15000$  MPa.

### **Koncentrace napětí**

Při zatěžování součástí dochází k obtékání a koncentraci (zahuštění) silového toku kolem vrubů a otvorů, kde vznikají maximální napětí, která mohou způsobit porušení materiálu. Pro vyjádření nejvyššího napětí u vrubu byl zaveden součinitel **koncentrace napětí** ( $\alpha$ ), definovaný jako **podíl maximálního napětí** ( $\sigma_{\max}$ ) ke střednímu nebo nominálnímu napětí.

**Poznámka:** Řešení elastické napjatosti v okolí kruhového otvoru podal B. 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 (1930-40), zakladatel učení o koncentracích napětí u vrubů. Nominální napětí se vztahuje ke skutečnému průřezu součásti v rovině defektu.

Součinitel koncentrace napětí  $\alpha$  platí jak pro elastické, tak také pro elasticko - plastické pole napětí. V případě lineárně elastického chování materiálu se pro rozlišení označuje jako **teoretický součinitel koncentrace napětí**  $\alpha_t$ , v případě elasto - plastického chování materiálu se značí  $\alpha_\sigma$ .

Podobně pro maximální deformace  $\varepsilon_{\max}$  byl zaveden součinitel koncentrace deformace ve tvaru:

$$\alpha_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon},$$

kde  $\varepsilon$  je střední nominální deformace.

Mezi uvedenými součiniteli platí rovněž **Neuberův vztah**:

$$\alpha_t^2 = \alpha_\sigma \cdot \alpha_\varepsilon$$

Podle daného vztahu zvýšení plastické deformace vede ke snížení špiček napětí. Příklady rozložení napětí u konstrukčního vrubu jsou uvedeny na obrázcích 2.3 a 2.4.

V oblasti vrubů (drážek, přechodů, zaoblení) dochází ke vzniku **trojosé napjatosti**. Pro podrobnější popis koncentrace napětí jsou zavedeny parciální součinitelé koncentrace napětí ( $\alpha_{ijk}$ ). Uvedený symbol znamená, že v bodě anebo místě (i) je hodnota napětí ve směru (j) způsobena hodnotou vnějšího napětí ve směru (k):  $\alpha_{ijk} = \sigma_{ij}/\sigma_{ik}$  (j, k = 1, 2, 3).

Místa 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;
- vady materiálu - působí obdobným vrubovým účinkem;
- vměstky, precipitáty;
- póry, bubliny;
- trhliny (mohou vzniknout například při výrobě nebo při cyklickém namáhání a únavě);
- vlivy povrchu (prohlubně po obrábění, drsný povrch, nerovnosti a důlky po korozi).

Pro ostré defekty nebo trhliny platí  $\rho \ll c$  a koncentrace napětí  $\alpha$  i maximální napětí  $\sigma_{\max}$  dosahují v čele defektu vysoké hodnoty. Pokud  $\sigma_{\max}$  přesáhne teoretickou pevnost, nastane šíření trhliny anebo lom.

**Trhliny** jsou jedním z nejčastějších poškození především u odlitků, u svařenců a u tepelně zpracovávaných součástí. Trhliny snižují pevnost součástí, působí netěsnosti a u dynamicky namáhaných součástí vedou ke vzniku únavových lomů.

Pro velmi ostré trhliny by teoreticky  $\rho \rightarrow 0$ , potom by  $\sigma_{\max}$  stoupalo k nekonečnu ( $\sigma_{\max} \rightarrow \infty$ ) podle následujícího vztahu:

$$\sigma_{\max} = \sigma \left( 1 + 2 \left( \frac{c}{\rho} \right)^{1/2} \right)$$

### **Lomové chování materiálů**

Historicky je v oblasti lomových procesů možno 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. Obě poskytují přibližně stejné výsledky.

Lomy a mezní stavy je možno klasifikovat podle několika hledisek:

- podle velikosti plastické deformace: tvárný (houževnatý), křehký (štěpný), smíšený;
- trhliny a lomy: stabilní nebo nestabilní;
- podle podmínek degradačních procesů:
- únavové lomy, korozní praskání, vodíkové praskání, lomy při tečení;
- podle šíření vzhledem k hranicím zrn: interkrystalické, transkrystalické, smíšené.

Zkoumáním trhlin a lomových ploch s ohledem na příčiny a mechanismy porušení, jakost materiálu a výskyt necelistvostí se zabývá technický 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-krát.

**Mikrofraktografie** studuje lomovou plochu při vysokém zvětšení a získává informace o mechanismu porušování materiálu na základě mikroskopických znaků (tak zvaných *stop*), jako jsou krystalografické fazety, mikroskopické dutiny, únavové žlábký (proužky, striace) a podobně.

### **Faktor intenzity napětí a lomová houževnatost**

Na základě poměrně složitých výpočtů polí napětí a posuvů kolem čela ostré trhliny a popis úrovně koncentrace napětí u ostré trhliny byl zaveden **faktor intenzity napětí**  $K_I$  (pro tahové zatížení), jeden z hlavních parametrů lomové mechaniky. Podobně byly zavedeny faktory intenzity napětí  $K_{II}$  a  $K_{III}$  pro namáhání ve smyku nebo stříhu.

**Faktor intenzity napětí  $K_I$**  – je závislý na vnějším zatížení, napětí ( $\sigma$ ), na délce trhliny ( $a$ ), její orientaci a geometrii, na tvaru a způsobu zatížení tělesa. Charakterizuje také úroveň napětí před čelem trhliny, složky tenzoru napětí v závislosti na vzdálenosti  $r$  od čela trhliny a úhlu  $\varphi$ . Například pro složku napětí  $\sigma_{yy} = \sigma_y$ , důležitou pro vznik a šíření lomu při tahu, byl odvozen následující vztah:

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

**Kritická hodnota faktoru intenzity napětí  $K_I$**  pro vznik nestabilního lomu se jmenuje **lomová houževnatost  $K_{Ic}$** . Používá se také pro kvantitativní porovnání křehkosti materiálů. Čím je materiál křehčí, tím má nižší hodnotu lomové houževnatosti. Pomocí lomové houževnatosti můžeme také vypočítat další parametry lomového procesu.

Hodnoty lomové houževnatosti jsou závislé na složení a struktuře materiálu a jsou snižovány vlivem škodlivých prvků (P, S), a rovněž působením vodíku. Z druhé strany  $K_{Ic}$  je také závislá na teplotě, rychlosti zatěžování a příčném rozměru tělesa ( $K_c$ ).

Lomová houževnatost  $K_{Ic}$  umožňuje posoudit odolnost tělesa ke křehkému lomu. Materiál s trhlinou se neporuší, když  $K_I < K_{Ic}$ , nebo naopak lom nastane, když  $K_I \geq K_{Ic}$ . Znalost lomové houževnatosti umožňuje řešit řadu úloh a problémů z oblasti křehkého porušení materiálů.

Pro naměřenou délku ( $a$ ) spočteme kritické napětí  $\sigma_c$  podle vztahu:

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \cdot Y$$

To znamená, že materiál (dílec, součást) se neporuší nestabilním křehkým lomem, když reálné napětí  $\sigma < \sigma_c$ .

Nebo pro dané napětí  $\sigma$  spočteme kritickou délku defektu  $a_c$  podle  $K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a_c} \cdot Y$  a materiál odolá křehkému nestabilnímu lomu, když  $a < a_c$ . Skutečnou délku trhliny ( $a$ ) můžeme zjistit defektoskopickou metodou, zpravidla ultrazvukem.

**Lomovou houževnatost  $K_{Ic}$**  stanovíme na základě vzorců dle norem, například ČSN EN ISO 12737 Kovové materiály - Stanovení lomové houževnatosti při rovinné deformaci (2010).

Základní postup při provádění zkoušky lomové houževnatosti:

- 1) Změříme potřebné rozměry zkušebních těles typu A nebo B, (tloušťka  $a = 10 - 100$  mm).
- 2) Vzorky opatříme vrubem a vytvoříme ostrou únavovou trhlinu, o celkové délce  $c$ .
- 3) Na trhacím stroji provedeme zatížení vzorku až do lomu. Způsob určení síly při různém tvaru závislosti.
- 4) Vypočteme předběžnou (provizorní) hodnotu, například  $K_Q = \sigma_Q \sqrt{\pi c} \cdot Y$ , kde  $\sigma_Q = M_{oQ}/W_o$  (A, pro ohyb).
- 5) Prověříme podmínky pro rovinnou deformaci (RD):

$$a, c \geq 2,5 \left( \frac{K_Q}{Re} \right)^2, \quad b - c \geq 2,5 \left( \frac{K_Q}{Re} \right)^2$$

- 6) Pokud jsou splněny tyto podmínky pro RD, potom  $K_Q = K_{Ic}$ , tj. platná hodnota  $K_{Ic}$ .

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 nebo tahové zkoušky za vymezených podmínek.

Lomová mechanika popisuje pomocí jednoho nebo více parametrů stabilitu trhliny. Umožňuje přenos naměřených dat  $K_{Ic}$  ze zkušebních vzorků na reálné konstrukce.

Obecně, s rostoucími hodnotami pevnosti nebo meze kluzu hodnoty houževnatosti v rámci dané skupiny materiálů nebo vybraného materiálu vykazují klesající trend. S tím také souvisí poměrně široké rozmezí hodnot  $K_{Ic}$  různých skupin materiálu.

**Tabulka 2.1 Rozmezí hodnot lomové houževnatosti  $K_{Ic}$  vybraných materiálů**

| Materiál   | $K_{Ic}$<br>[MPa $\sqrt{m}$ ] |  | Materiál           | $K_{Ic}$<br>[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                    |  |

Omezení - lineární lomovou mechaniku nelze použít pro:

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

### Plastické zóny

Oblast s plastickou deformací u čela trhliny, kde některá složka napětí překročí mez kluzu  $\sigma_{ij} \geq R_p$ . Pro přesnější analýzu tvaru zóny je nutno uvažovat smykové složky napětí a kritéria vzniku plastické deformace.

Na vytvoření plastické zóny se spotřebuje část elastické energie. Plastická zóna zvyšuje povrchovou energii lomu a tím tedy houževnatost materiálu. Plastická zóna vede ke snížení koncentrace napětí, k otupení špiček napětí před čelem trhliny, a tím omezuje vznik křehkého lomu.

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

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K}{R_p} \right)^2$$

Podobně, pro stav rovinné deformace RD (uvnitř silné stěny):

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K}{R_p} \right)^2$$

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

Experimentální metody výzkumu plastické zóny:

- metoda leptání,
- rentgenografické metody,
- tenzometrické metody,
- rekrytalizační metody,
- sledování na elektronovém mikroskopu,
- pruhy moiré,
- interferenční mikroskopie (holografická interferometrie)
- fotoelasticimetrie,
- stereometrie,
- infračervená termografie,
- měření mikrotvrdosti.

### **Iniciace a růst mikrotrhlin**

V kovových materiálech je možno iniciaci mikrotrhlin vysvětlit pomocí nahromadění dislokací podle několika modelů. Další růst mikrotrhlin v křehkém materiálu je podmíněn výskytem lokálních tahových napětí, respektive dosažením kritické velikosti mikrotrhliny podle energetické bilance.

Další rozvoj trhliny je závislý na možnosti plastické deformace a výskytu plastické zóny. V případě křehkého materiálu nastává zpravidla tak zvané **štěpné porušení**, a sice narušením meziatomových vazeb.

V materiálu s možností plastické deformace nastává iniciace mikrotrhlin, jejich růst a propojování. Přitom se spotřebuje značné množství energie a vzniká obvykle tak zvaný **vysokoenergetický lom**.

### **Použitá literatura:**

Konferenční sborníky z Konferencí TESIYO r. 2015 až 2023

J. Purmenský, V. Kudělka: Materiály pro energetiku, Publikace TESIYO, r. 2023

B. Míšek: Konstrukční materiály I a II, Publikace TESIYO, r. 2018 a r. 2019