

Ing. Stanislav V e j v o d a, CSc., Vítkovice - Ústav aplikované
mechaniky Brno

TEORIE VZNIKU ÚNAVOVÝCH TRHLIN A VÝPOČET ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI OCELOVÝCH
KONSTRUKCÍ

1. Úvod

Vývoj strojů a zařízení se vyznačuje neustálou snahou po dosažení vyšších výkonů a lepších vlastností. Jejich dosažení má však za následek neustálý růst složitosti zařízení a nároků na jejich dokonalost a produktivitu. Stále více se proto blížíme mezním stavům ocelových konstrukcí. Roste počet vážných poruch a havárií. V této souvislosti vzrůstá význam stanovení spolehlivosti zařízení.

K posouzení mezních stavů pevnosti konstrukcí nevystačíme pouze s výpočtem napětí pro maximální zatížení. Je třeba znát co nejpřesněji změnu zatěžování v čase. Informace získáme z měření na obdobném zařízení. Výsledky zpracujeme metodami matematické statistiky. Při nedostatku informací lze vytvořit hypotetické zátěžné bloky.

Musí být také známa technologie výroby zařízení, která často poškozuje materiál. Způsobí např. lokální zkřehnutí, vyvolá zbytková napětí v oblasti svarů a nespojitosti materiálu včetně trhlin. Je třeba znát počáteční stav defektů v materiálu a jejich velikost.

Během provozu se materiál konstrukce postupně poškozuje. Dochází ke změně vlastností materiálu a k následnému vzniku únavových trhlin. Jejich růst může být zakončen křehkým lomem. Konstrukce proto musí být celou dobu technického života pod dohledem.

2. Zatížení konstrukcí

Po rozboru všech možných zatížení zjistíme, že při většině z nich musí konstrukce spolehlivě pracovat po celou dobu svého života. Zvláštní hledisko můžeme mít pouze k zatížením, která nenáleží k běžnému provozu, vyskytují se zřídka, ale mohou konstrukci značně namáhat (např. zemětřesení). Samostatnou skupinu tvoří zatížení, která vzniknou při porušení (prasknutí) některé části technologického celku.

Při návrhu konstrukce se musí uvažovat způsob zatěžování. Rozlišujeme statické, dynamické a rázové zatěžování. Rozhoduje také velikost teploty, za které bude konstrukce pracovat, ale také se montovat a zkoušet. Ovlivní to výběr vhodného materiálu. Rozlišujeme, zda konstrukce pracuje při vysoké, střední nebo nízké teplotě.

Při řešení problému životnosti existují dvě zásadní koncepce:

- koncepce konstrukce o bezpečné životnosti ("safe-life") (obr. 1a),
- koncepce konstrukce bezpečné i po poruše ("fail-safe") (obr. 1b). Při prasknutí středního prutu konstrukce nese dále. Uplatní se u vnitřně staticky neurčitých konstrukcí.
- zvláštním případem druhé koncepce je "tečení před roztažením" ("leak before break"). Uplatní se zejména u potrubí z austenistických ocelí.



obr. 1

3. Porušení křehkým lomem

3.1. Základní pojmy

Křehké porušení je jedním z nejnebezpečnějších porušení konstrukce. Způsobuje značné materiální ztráty, často spojené se ztrátou lidských životů. Křehké porušení totiž může také vzniknout při nízké úrovni namáhání. Křehká trhлина roste velkou rychlostí a často se rozšíří do velkých rozměrů. Známí jsou křehká porušení svařovaných konstrukcí mostů, letadel, zásobníků ropy a zkapalněných plynů, tlakových nádob, plynovodů, turbín apod.

Náhly křehký lom lze pozorovat u:

- ocelí nízké a střední pevnosti, majících tranzitní charakter,
- ocelí vysokých pevností v celém rozsahu teplot,
- ocelí, u nichž se oslabily hranice zrn zkřehnutím (bez zřetele k pevnostním vlastnostem),
- velmi tenkých plechů (bez ohledu na pevnost).

V etapě zpracování projektu konstrukce se k jejímu posouzení proti porušení křehkým lomem používá:

- koncepce tranzitních teplot
- koncepce lomové mechaniky.

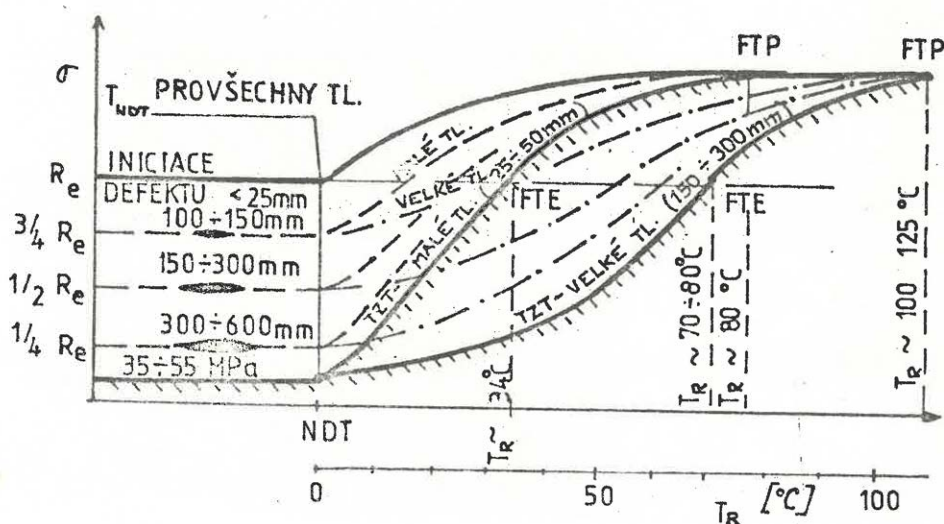
3.2. Koncepce tranzitních teplot

Tato koncepce byla rozvíjena ve čtyřicátých letech a v celé řadě případů úspěšně používána. Konstrukce může být podle ní provozována při jistém zatížení za teploty, která je vyšší než tranzitní teplota o jistou rezervu. Tato teplotní rezerva byla stanovena na základě provozních zkušeností, modelových zkoušek a jejich rozboru.

Konkretizací tohoto přístupu je lomový diagram Pelliniho a Puzaka (diagram FAD - Fracture Analysis Diagram) /1/, obr. 2.

Byl navržen kolem roku 1960 pro nízkolegované konstrukční oceli na základě analýzy provozních lomů a zkoušek na rozměrných deskách s trhlinami, bez využití lomové mechaniky. Diagram určuje vztah mezi napětím vztaženým k mezi kluzu, ve-

likostí defektu a teplotou vztaženou k T_{NDT} .



obr. 2

V tomto diagramu je možné definovat čtyři kritické tranzitní teploty:

- teplotu T_{NDT} ; je-li provozní teplota poněkud vyšší než T_{NDT} , nedojde k iniciaci lomů z malých defektů ani při napětí kolem meze kluzu,
- teplotu uprostřed intervalu $T_{NDT} - T_{FTE}$, což je přibližně $T_{NDT} + 17^{\circ}\text{C}$; je-li provozní teplota vyšší než tato teplota, dojde k zastavení růstu trhliny, je-li nominální napětí menší než polovina meze kluzu,
- teplotu T_{FTE} ; je-li provozní teplota vyšší jak T_{FTE} , dojde k zastavení růstu trhliny, jestliže nominální napětí nepřekročí meze kluzu,
- teplotu T_{FTP} ; nad touto teplotou může nastat porušení pouze tvárným lomem.

V intervalu $T_{NDT} - T_{FTE}$ výrazně vzrůstá odolnost vůči lomu. Toho je třeba využít k zajištění bezpečnosti konstrukce.

Využití koncepce tranzitních teplot je pro konstrukce jednoduché. Může doporučit bezpečný provoz konstrukce nad teplotou T_{TZT} se zvolenou bezpečností $T = 5$ až 15°C . V některých případech je však toto omezení provozně nemožné. Potom se bez použití lomové mechaniky neobejde.

3.3 Koncepce lomové mechaniky

Metody založené na koncepci lomové mechaniky umožňují pro známý materiál a geometrii tělesa určit velikost kritického defektu, z něhož může vzniknout nestabilní lom. Umožňují také určit subkritický růst defektu (trhliny) během cyklického zatěžování, který může být zakončen křehkým lomem.

3.3.1 Lineární lomová mechanika

Koncepce lomové mechaniky byla intenzivně rozvíjena od počátku šedesátých let. Nejprve lineární elastická lomová mechanika (LELM) k hodnocení odolnosti proti křehkému porušení vysokopevných ocelí.

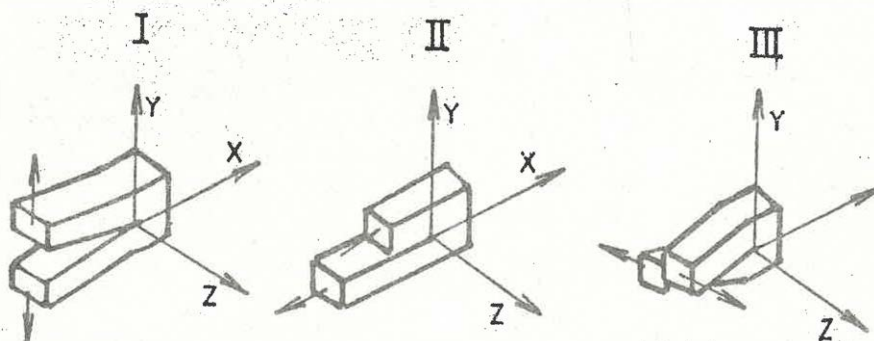
V okolí kořene trhliny vzniká vždy zplastizovaná oblast. Plasticke deformace v této oblasti podmiňují především porušování spojitosti v kořeni trhliny a tím její růst. LELM však předpokládá, že zplastizovaná oblast je malá vzhledem k rozměrům tělesa a trhliny. Předpokládá platnost Hookova zákona mezi složkami

napětí a deformací.

Pokud při zatěžování trhlina zvětšuje svůj rozměr, vzroste její plocha o dA . Je možné dokázat, že energie napjatosti W

tělesa poklesne, $dW = \frac{\delta W}{\delta A} dA = -G dA \ll 0$. Veličina G ($N \cdot m^{-1}$) se nazývá hnací

síla trhliny. Určuje rychlost uvolňování elastické energie napjatosti tělesa. Lze ji však fyzikálně chápat jako sílu, působící na čelo trhliny a konající při posuvu čela práci. Podmínka labilit trhliny má tvar $G = G_c = R$, kde odpor R proti růstu trhliny je roven kritické hodnotě hnací síly trhliny G_c . Místo G_c používáme lomovou houževnatost K_c , kdy $K_c^2 = EG_c$ pro rovinnou napjatost v kořeni trhliny a $K_c = EC_c / (1 - \mu^2)$ pro rovinnou deformaci v kořeni trhliny, kde E je modul pružnosti a μ Poissonovo číslo.



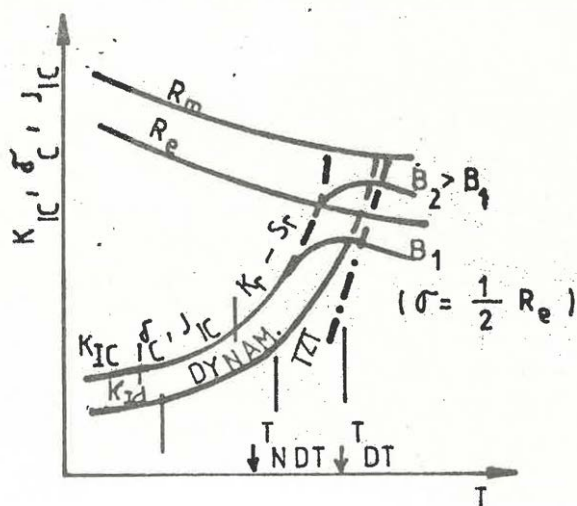
obr.3

Hnací síla G je určena tvarem tělesa, tvarem, velikostí a polohou trhliny v tělese, charakterem zatížení tělesa a typem nespojitosti, která nastává při růstu trhlín. V zásadě existují tři typy (mody) růstu trhliny, obr. 3 I - odtržení, II - podélný smyk, III - příčný smyk. Z praktických důvodů se namísto G používá součinitel intenzity napětí K . $K^2 = EG$ pro rovinnou napjatost v kořeni trhliny a $K^2 = EG / (1 - \mu^2)$ pro rovinnou deformaci v kořeni trhliny. Nejčastěji se uplatňuje Mod I.

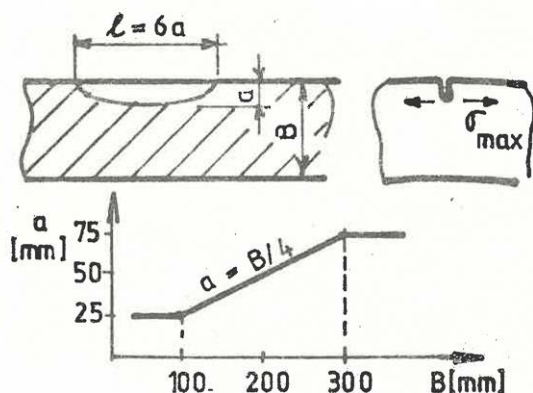
Materiálovou veličinu charakterizující odolnost proti iniciaci nestabilního lomu za podmínky rovinné deformace je lomová houževnatost při statickém zatížení K_{IC} a při dynamickém zatížení K_{ID} . Při cyklickém zatěžování defekt nestojí, roste. Jeho subkritický růst se může změnit v kritický. Proto nás zajímá, zda mohou nastat podmínky pro zastavení růstu běžící trhliny. V daném případě je materiálovou veličinou K_{IA} pro statické zatížení a K_{ID} pro dynamické zatížení.

3.3.2 Elastoplastická lomová mechanika

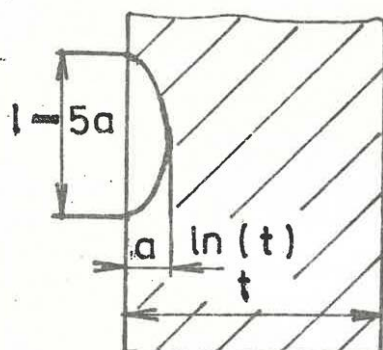
EPLM je dosud otevřena dalšímu teoretickému i experimentálnímu výzkumu. Užívají se v ní nejčastěji koncepce rozevření trhliny (COD) s kritickou hodnotou δ_c , J - integrálu (J_{IC}), ekvivalentní energie (K_{CE}) nebo metoda dvou kritérií $R6$. Tyto metody formulují podmínky pro iniciaci nestabilního růstu trhliny. Oblast jejich využití je schématicky znázorněna na obr. 4.



obr. 4



obr. 5



obr. 6

Rozsáhlý subkritický růst u materiálů s vysokou lomovou houževnatostí respektují metoda R - křivek, užívaná především u tenkých plechů a metoda T - modul (plastického modulu nestability).

3.4 Posouzení na křehký lom v etapě návrhu nádoby

Při projektování tlakové nádoby nejsou známy defekty, které vzniknou během výroby. Proto se předpokládá hypotetický povrchový defekt, kolmý na max. napětí $\sigma_{\max}$. Americký standard ASME Code III, příloha G /3/ bere rozměr defektu ve shodě s obr. 5.

Standard /3/ patří k nejvíce uznávaným. Jeho příloha G využívá LELM. Předpokládá, že referenční povrchový defekt je situován kolmo na směr největšího hlavního napětí, obr. 5. Jeho velikost závisí na tloušťce stěny. V roce 1972 byl /3/ doplněn přílohou R, která umožňuje posouzení menších tlouštěk srovnatelných s tloušťkami prvků ocelových konstrukcí.

3.5 Eurocode No. 3 - příloha 3, výpočet pro křehký lom

Křehký lom je charakterizován jako porušení konstrukčního elementu bez plastické deformace. Porušení závisí zejména na pevnosti oceli, tloušťce materiálu, rychlosti zatěžování, nejmenší provozní teplotě, houževnatosti materiálu a typu konstrukčního elementu.

Při zkušební teplotě musí energie Charpy V dosahovat minimálně hodnoty 27 J. Nejnižší provozní teplota závisí na tloušťce stěny, provozních podmínkách, rychlosti zatěžování a následcích porušení. Materiál musí být ve shodě s EN 10025.

Eurocode 3 určuje požadovanou lomovou houževnatost K_{IC} a nejnižší provozní teplotu $T_{\min}$. Hloubka defektu $a = \ln(t)$, délka defektu $l = 5a$, obr. 6.

4. Únava materiálu při opakovaném zatěžování

4.1 Stadia únavového procesu

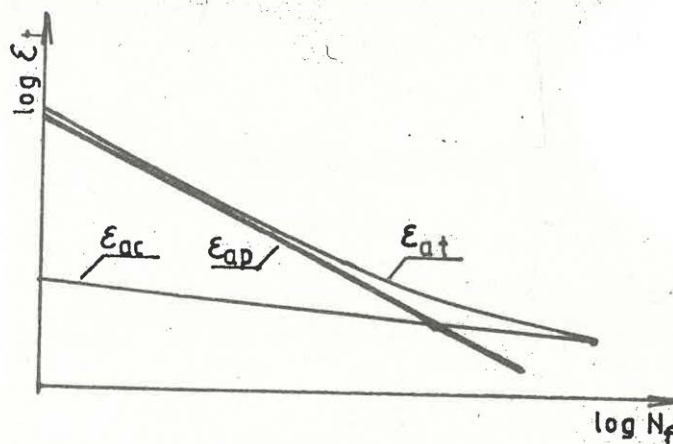
Při opakovaném zatěžování dochází k únavě materiálu konstrukce. Celý proces lze rozdělit do tří stádií, která nejsou od sebe ostře ohraničena:

- stádium změn mechanických vlastností materiálu
- stádium nukleace mikrotrhlin
- stádium růstu únavových trhlin, které může být zakončeno náhlým křehkým lomem.

Samostatným případem je dvoufrekvenční zatěžování, kdy na nosném kmitu o malé frekvenci a velké amplitudě je superponován kmit o velké frekvenci, ale malé amplitudě.

4.2. Oblast nízkokmitové únavy

V oblasti nízkokmitové únavy se dnes používá experimentálně určená křivka životnosti Manson - Coffinova typu /4,5/ ve tvaru (obr. 7).



obr. 7

$$\epsilon_{at} = \epsilon_{ap} + \epsilon_{ae} = \epsilon_f (2 N_f)^c + \frac{\sigma_{f'}}{E} (2 N_f)^b \quad (1)$$

kde: $\sigma_{f'}$ - součinitel únavové pevnosti,

b - exponent únavové pevnosti,

ϵ_f - součinitel únavové tažnosti,

c - exponent únavové tažnosti,

ϵ_{ae} , ϵ_{ap} - elastická a plastická složka amplitudy celkové deformace ϵ_{at} .

Při nedostupnosti hodnot σ_f , ϵ_f , b , c lze použít křivku životnosti typu Langerova, která vystačí s charakteristikami změřenými při statické zkoušce tahem. Dává většinou výsledky na straně větší bezpečnosti. Je uváděna ve tvaru

$$\sigma_{aF} = E \epsilon_{at} = \frac{E}{2 (4 N_0)} m \ln \frac{100}{100 - Z} + \frac{R_m}{(4 N_0)^{m_e}} \quad (2)$$

kde Z je kontrakce, E modul pružnosti. Pro $R_m \leq 700$ MPa lze vzít $m = 0,5$ a $m_e = 0,05$.

Po doplnění rovnic /1/ a /2/ součiniteli bezpečnosti, vlivem asymetrie kmity napětí r_σ a jednosměrně kumulovanou plastickou deformací obdržíme konstrukční křivky životnosti. /6/

4.3. Oblast vysokokmitové únavy

Při namáhání pod mezi kluzu (resp. cyklickou mezi kluzu) v oblasti vysokokmitové únavy se používají křivky životnosti typu Wöhlera. Jejich použití vyžaduje znalost časového průběhu nominálních napětí, součinitele vrubu β a dalších součinitelů, vyjadřujících např. vliv velikosti součástí β_σ a jakosti a stavu povrchu β_n .

Podle ČSN 42 0368 se experimentálně určují materiálové charakteristiky pro následující tvary Wöhlerovy křivky životnosti v oblasti časované pevnosti (obr. 8)

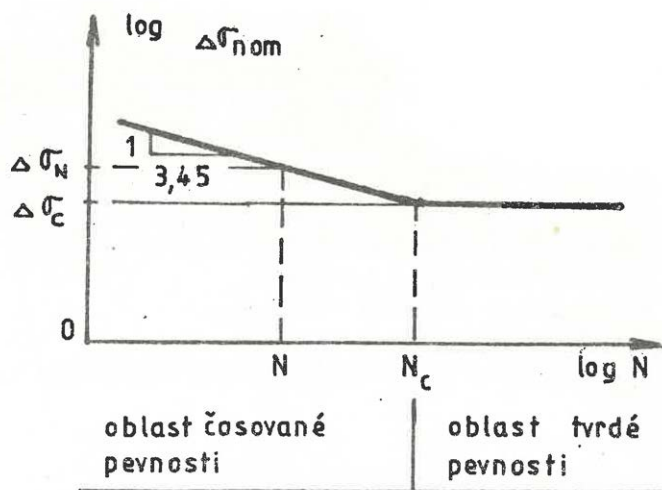
$$a) N = A \cdot 10^b \sigma_{a,nom}^m \quad (3)$$

$$b) N = A (\sigma_{a,nom} - K)^b \quad (4)$$

Wöhlerova křivka se také vyjadřuje ve tvaru

$$N \cdot \sigma_{a,nom}^m = C = N_C \cdot \sigma_C^m \quad (5)$$

Materiálové charakteristiky $a = \log A$, b , K , σ_C , N_C se určují experimentálně, nejčastěji pro souměrně střídavý kmit zatížení $r_\sigma = -1$ a míjivý kmit zatížení $r_\sigma = 0$.



obr. 8

4.4 Normativní výpočty na vysokokmitovou únavu

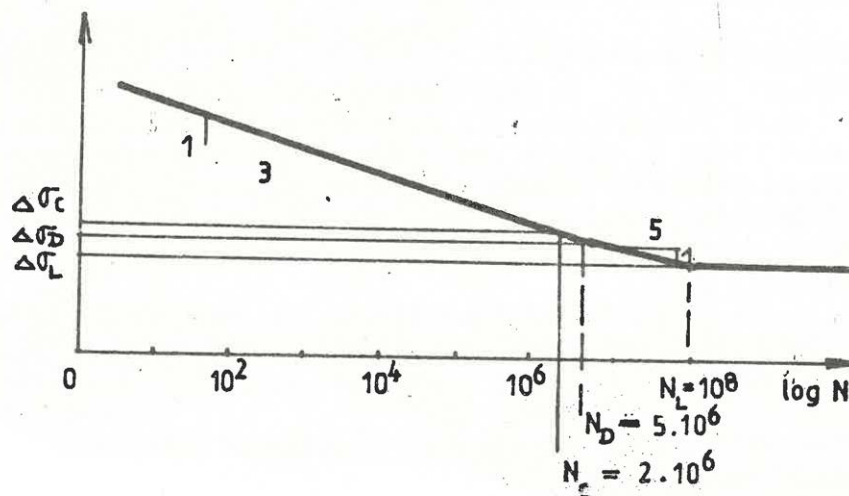
Speciální přístupy výpočtu konstrukcí na vysokokmitovou únavu obsahují ČSN 73 1401 "Navrhování ocelových konstrukcí" a ČSN 73 6205 "Navrhování ocelových mostních konstrukcí".

Eudocore 3 /8/ určuje dovolený počet kmitů z Wöhlerovy křivky životnosti, graficky znázorněné na obr. 9 a 10.

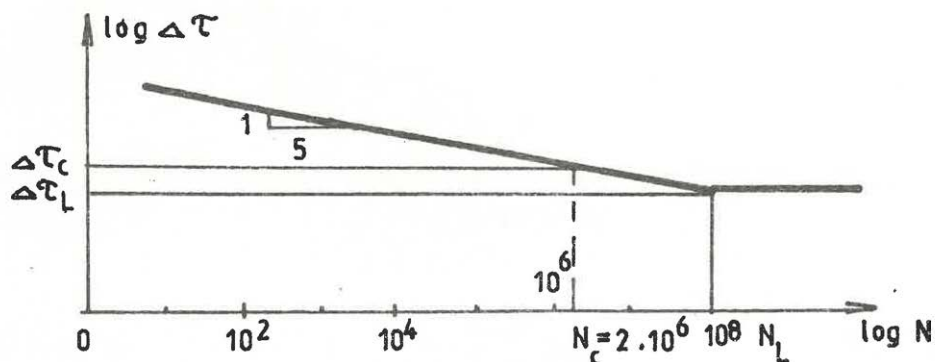
Únavové poškození normálním a smykovým napětím musí vyhovět podmínce poškození

$$D_{\sigma'} + D_{\tau} \leq 1, \quad (6)$$

kde $D_{\sigma'}$ je kumulace poškození od normálních a D_{τ} od smykových napětí. K jejich výpočtu je použito Palmgren-Minerova hypotéza.



obr. 9



obr. 10

5. Výpočet zbytkové životnosti tělesa s defektem

Při opakovaném zatěžování vady (trhlíny) postupně rostou. Mluvíme o subkritickém místu vady. Do určité velikosti jsou vady přípustné pro daný provoz a nemusíme je odstraňovat.

Přípustná vada je taková, která nemůže způsobit porušení konstrukce za jejího provozu, včetně režimu spouštění a odstavení a nezkrátí její životnost pod plánovanou dobu. V některých případech je vhodné předepsat u přípustných vad periodické prohlídky.

Vada nepřipustná při původních provozních podmínkách může být přípustná za změněných provozních podmínek (změna namáhání, pracovní teploty apod.). Takové období je obvykle krátké. V jeho průběhu se rozhoduje o osudu vady, případně se připravuje její oprava.

Pro opravu vady musí být zpracován zvláštní předpis. Musí být vykonána pod dohledem svářečského technika a podrobena pečlivé nedestruktivní kontrole. Opravené místo musí být periodicky kontrolováno.

Dle obr. 11 rozlišujeme vady:

1. Přípustná velikost vady ap. je dána příslušnými předpisy a pravidly pro daný výrobek, ale též na základě provozní kontroly a aplikace lomové mechaniky.
2. Limitní velikost vady a_L určuje mez, pod kterou není nutno vadu opravovat. Stanoví se pomocí zákonosti lomové mechaniky. Smyslem jejího určení je zabránit neúčelným opravám nebo dokonce zmetkování výrobku.
3. Velikost vady a_0 na počátku cyklického zatěžování. Může být též ztotožňována s limitní velikostí vady.
4. Velikost vady a_f na konci technického života (za normálních provozních podmínek), resp. po ukončení cyklického zatěžování.
5. Vada a_i při iniciaci nestabilního růstu při narušení normálních provozních podmínek a havarijní situace, obr. 13.
6. Vada a_a při zastavení růstu při narušení normálních provozních podmínek a havarijní situace, obr. 13.
7. Vada a_c při zastavení růstu za normálních provozních podmínek při omezení hodnotou K_{IA} , resp. kritická vada při omezení K_{IC} . Podle důležitosti konstrukce se požaduje:
 - $a_c/a_f = 2 \div 4$ (10 pro zařízení jaderných elektráren),
 - $a_i/a_f = 2$ pro zařízení jaderných elektráren,
 - $a_c/a_L = 3 \div 6$.

Velikost vady na konci požadované životnosti se určí ze vztahu

$$a_f = a_0 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{da}{dN} \right)_i, \quad (7)$$

kde pro namáhání v oblasti vysokokmitové únavy určíme z Paris - Erdoganova vztahu

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_I)^m \quad (8)$$

a v oblasti nízkokmitové únavy

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_{I3})^m \quad (9)$$

V grafickém tvaru je růst defektu zobrazen na obr. 12. Příruba je pro vzduchové prostředí a lomené časy pro vodní prostředí s uvažováním vlivu asymetrie limitu součinitele intenzity napětí $r = K_{Imin}/K_{Imax}$.

Podle /7/ se hodnoty a_i , a_a , a_c , určí ze vztahů:

- pro narušení normálních provozních podmínek a havarijní situaci

$$K_I = (M_m \sigma_m + M_b \sigma_b) \frac{\pi a_i}{Q} = K_{Ic} \quad (10)$$

$$K_I = (M_m \sigma_m + M_b \sigma_b) \frac{\pi a_c}{Q} = K_{Ia} \quad (11)$$

- pro normální provozní podmínky:

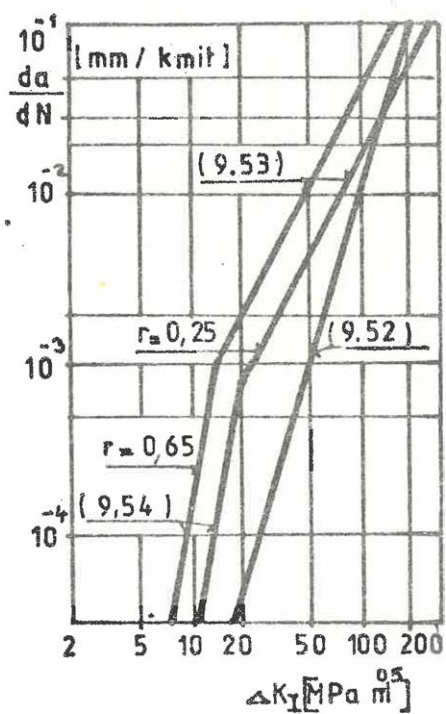
$$K_I = (M_m \sigma_m + M_b \sigma_b) \frac{\pi a_c}{Q} = K_{Ia} \quad (12)$$

Součinitele M_m , M_b , Q se určí z diagramu v předpisu /7/. Smluvní membránové napětí je označeno σ_m a ohybové napětí σ_b .

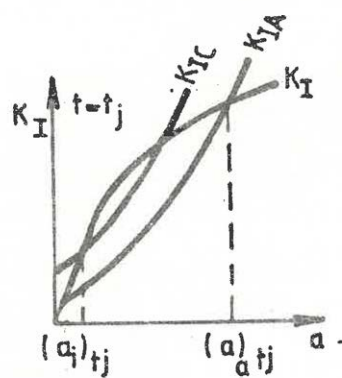
S h r n u t í

Pro výpočet mezních stavů a zbytkové životnosti bylo vykonáno mnoho prací a experimentů, ale přesto mnohé jevy nejsou dosud zcela zodpovězeny. Zájem odborníků se více soustřeďoval na tlakové nádoby, zejména pro jaderné elektrárny. Předpisy pro posouzení ocelových konstrukcí na křehký lom a přípustnost defektů jsou v současné době intenzivně zpracovávány. Jedním z nich je Eurocode 3.

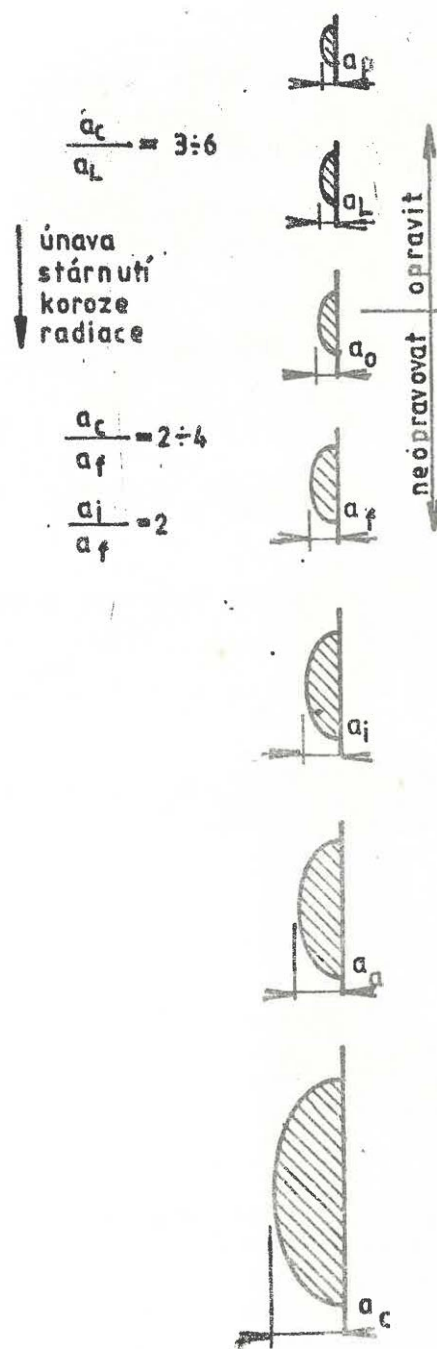
Komplexní posouzení přípustnosti defektů (trhlin) s ohledem na provozní podmínky včetně experimentálního trvalého záznamu časového průběhu napětí v oblasti defektu, jeho statického vyhodnocení a výpočtu napjatosti v okolí defektu, zabezpečuje Ústav aplikované mechaniky s.p. Vítkovice v Brně. S touto problematikou má již dlouhodobé zkušenosti.



obr. 12



obr. 13



obr. 11