

## NĚKTERÉ TEORETICKO-EXPERIMENTÁLNÍ ASPEKTY PRO POSOUZENÍ KOROZNÍ ÚNAVY KOVŮ

Doc. Ing. Jaroslav V a l e n t a , DrSc., člen  
korespondent ČSAV  
SVŮSS PRAHA

Velmi vážným současným úkolem z hlediska teoreticko-experimentální a diagnostické analýzy je posouzení provozní spolehlivosti technických zařízení a jejich komponent v důsledku mechanického zatížení a korozního napadení použitých materiálů. Například v jaderné energetice došlo v roce 1981 (celosvětový průzkum) k více než 270 poruchám potrubních systémů zejména v místech svarového spoje, způsobených korozním napadením. Počet výskytu těchto poruch je vyznačen na obr. 1 v závislosti na světlosti potrubí. Identifikace těchto poruch, jako malých netěsností, byla provedena pomocí ultrazvukové aparatury a barevnou penetrační metodou. Ukázalo se, že výraznější vzrůst poruch se vyskytuje u potrubí menších světlostí. Bylo prokázáno, že u těchto světlostí (0,1 m) vznikají max. tahová osová napětí po svaření a zasahují 50% až 70% tloušťky stěny. Na druhé straně osová vnitřní pnutí po svaření u potrubí o světlosti 0,66 m jsou nižší a zasahují pouze 25% tloušťky. Max. napětí dosahují meze kluzu materiálu a tvoří hlavní příspěvek ke vzniku korozního praskání za napětí /2/.

Z rozboru literatury a praktických zkušeností vyplývá, že proces korozního napadení materiálu je závislý na celé řadě faktorů a to chemickém složení materiálu, stavu jeho struktury a povrchu, tepelného zpracování, chemickém složení a teplotě provozního media, galvanickém účinku,

historii zatížení, rázových účinků media, konstrukčních vrubů, době expozice aj.. Z klasických typů korozního napadení lze uvést : koroze bodová, koroze mezikystalová, koroze nožová a štěrbinová, korozní praskání za napětí, korozní únava, erozní a kavitační koroze aj.

V podstatě lze kinetiku koroze rozčlenit podle tří odlišných typů korozního napadení. Je to tzv. aktivní koroze, kde únavová životnost materiálu je řízena rychlostí koroze a rozsahem napětí. V případě lokální koroze, závisí únavová životnost na inkubační době pro vznik póru, jeho kinetice a kritické hloubce, která je mimo jiné funkcí mechanické napjatosti povrchové vrstvy. Třetím typem je tzv. pasivní koroze. Je založena na existenci velmi tenké vrstvy na povrchu materiálu, která podstatně snižuje rychlost koroze. Iniciace korozní únavové trhliny je v tomto případě řízena zejména repasivační kinetikou materiálu po porušení této vrstvy. Pojetí mechanismu korozního napadení materiálu musí nutně vycházet z elektrochemické a adsorbční hypotézy /3/. Zajímavá je též úvaha o významu mobilních dislokací /4/.

Rychlost šíření korozní únavové trhliny je tedy vyvolána přítomností agresivního prostředí a synergetickým působením cyklického zatížení. Rozeznáváme tzv. klasickou korozní únavu a korozní únavu za napětí. Klasická korozní únava je cyklicky závislá a přichází v úvahu u materiálů, které nekorodují za napětí, tj. u nichž  $K_{Isc} \geq K_{Ic}$ , nebo při vyšších frekvencích zatížení /5/. Korozní únava za napětí je charakterizována korozním praskáním za statického napětí v únavových podmínkách, jestliže faktor intenzity napětí  $K$  v cyklu je vyšší než  $K_{Isc}$ . Ve vodním prostředí a v prostředí s vodíkem je mechanismus zvýšené rychlosti šíření trhliny připisován vodíkovému zkřehnutí. Pro  $pH < 12$  je aktivní složkou atomární vodík, pro  $pH > 12$  jsou aktivními hydroxylové ionty.

Prakticky šíření únavové trhliny v korozním prostředí se modeluje změnou konstant v Parisově vztahu. Na obr. 2 jsou schematicky uvedeny závislosti rychlosti šíření

trhliny na amplitudě  $\Delta K$ . Obr. 2a uprostřed representuje korozní únavu za napětí, která je charakterizována prodlevou a je časově závislá. Na obr. 2a vpravo je uvedena kombinace obou typů korozní únavy. Se vzrůstající frekvencí a konstantní asymetrií cyklu dochází k potlačení korozní únavy pod napětím a prodlevy a nastává v podstatě klasická korozní únava (obr. 2b). Proces růstu únavových trhlin je pak proces pouze cyklicky závislý. Na druhé straně vliv klesající asymetrie cyklu při konstantní frekvenci způsobuje pouze horizontální posuv prodlevy (obr. 2b). Na topologii prodlevy má vliv i struktura materiálu.

Pro hodnocení „zranitelnosti“ materiálu k mezikrystalickému koroznímu praskání za napětí (IGSCC), předložila firma General Electric toto empirické pravidlo /6/ :

$$\frac{\sigma_m + \sigma_b}{R_p} + \frac{\sigma_a + \sigma_s + \sigma_z}{R_p + 2 \cdot 10^{-3} E} < 1 ,$$

kde  $\sigma_m$  a  $\sigma_b$  jsou primární membránová a ohybová napětí,  $\sigma_a$  jsou druhotná napětí včetně tepelných napětí,  $\sigma_s$  značí špičková napětí,  $\sigma_z$  jsou výsledná vnitřní pnutí po svařování nebo technologickém zpracování,  $R_p$  je mez kluzu materiálu při provozní teplotě a  $E$  je modul pružnosti v tahu při provozní teplotě. Hodnota vyšší než jedna indikuje napěťové podmínky, které mohou být dostatečné k vyvolání IGSCC.

Je známo, že korozní praskání za napětí je výsledkem synergetického působení tří fyzikálních parametrů jmenovitě citlivosti materiálu k tomuto jevu, kritického tahového napětí v povrchové vrstvě a specifického korozního prostředí. U austenitických ocelí typu 18-8 experimenty prokázaly /3/, že existuje prahová teplota 130°C vysoce čisté vody (0,2 ppm rozpuštěného kyslíku) za které se IGSCC nevyskytuje. IGSCC byla rovněž identifikována při teplotě 288°C (< 0,06 ppm kyslíku), ale nikoliv při nižších teplotách. Při jmenovitém cyklickém zatížení vzorků nad mezí kluzu s výraznou prodlevou (voda obsahovala 8

ppm  $C_2$ ) byla indikována prahová hodnota  $190^\circ\text{C}$  pro vznik IGSCC. IGSCC byla rovněž indikována i v případě, že max. napětí v cyklu je pod mezí kluzu, jestliže teplota vody byla  $288^\circ\text{C}$ . Velkou obezřetnost je nutno věnovat i tepelnému zpracování těchto ocelí.

Problematikou rychlosti růstu únavové trhliny v korozním prostředí u feriticko-perlitické oceli používané pro tlakové nádoby reaktoru se zabýval Jones /7/. Byl studován vliv frekvence zatížení ( $0,017\text{ Hz}$  a  $0,0017\text{ Hz}$ ), asymetrie cyklu, vliv obsahu síry v materiálu a účinek chemického složení vody  $288^\circ\text{C}$  teplé. Rychlost růstu korozní trhliny ve vysoce čisté vodě je asi o 1,5 řádu vyšší než při pokojové teplotě a na vzduchu. Zvýšení gradace růstu defektu při simulaci chemického složení vody používané v JE je poměrně nízké. Obr. 3 shrnuje dosažené výsledky. Vliv asymetrie cyklu není rovněž příliš výrazný.

Významným faktorem ovšem zůstává odhad vzniku korozních únavových trhlin. Například Müller /8/ uvádí klasický přístup, který vychází ze znalosti počtu cyklů  $N_i^* = C_i \Delta\sigma^{-\alpha}$  do vzniku makrotrhliny v inertním prostředí. Zde  $\Delta\sigma$  značí rozsah napětí. Pro cyklicky závislý proces a lineární kumulaci poškození platí

$$N_i = \beta^{-1} \left[ 1 - \left( 1 - C_i \Delta\sigma_0^{-\alpha} \beta (1 + 2\alpha) \right)^{\frac{1}{2\alpha+1}} \right], \Delta\sigma_0 > \Delta\sigma_a$$

kde  $N_i$  je počet cyklů do vzniku makrotrhliny v korozním prostředí,  $\beta = v_F / F_0 f$  je součinitel, charakterizující účinek korozního media a frekvence zatížení  $f$ .  $\Delta\sigma_a$  je rozsah napětí na mezi únavy materiálu v inertním prostředí,  $v_F$  udává rychlost změny průřezu v důsledku koroze.  $F_0$  je výchozí průřez. Experimentální ověření potvrzují předloženou aproximaci. Matematický popis korozního praskání a korozní únavy předložil Stouffer /4/.

SVÚSS vypracoval v posledních letech, na základě stochastické analýzy, původní algoritmy pro stanovení životnosti trubek PG pro rychlé reaktory. Trubky jsou podrobeny náhodným teplotním fluktuacím. Výsledky tvoří normativ-

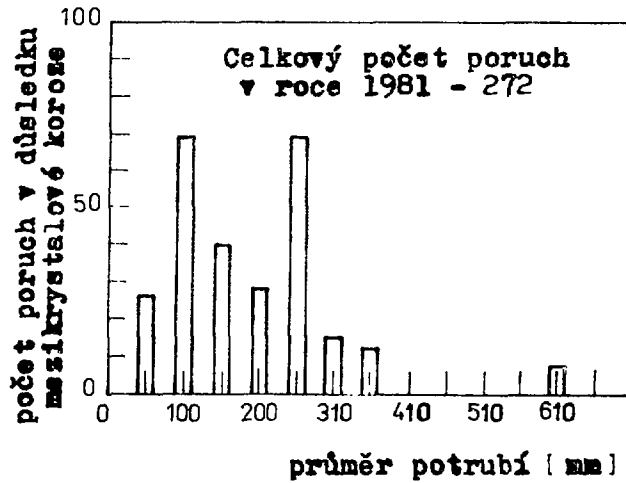
ní podklad pro SSSR. K upřesnění výsledků je bezpodmínečně nutno zajistit potřebné experimentální charakteristiky materiálu. Zařízení, která toto umožňují jsou mimořádně technicky i finančně náročná. Například na obr.4 je schematicky uvedena zkušební smyčka, ve které cirkuluje demineralizovaná voda dvěma autoklávy. Hladina rozpuštěného kyslíku a vodivost vody je plynule monitorována a řízena v rozsahu, který je typický pro provoz primárního okruhu lehkovodních reaktorů /9/. Oba autoklávy slouží k zatěžování vzorků typu WOL a jsou vybaveny hydraulickým systémem s řízeným namáháním (amplituda zatížení, frekvence).

Závěrem je nutno konstatovat, že predikce korozního napadení a predikce odpovídající provozní spolehlivosti komponent nutně vyžaduje sofistikované a komplexní řešení celé problematiky.

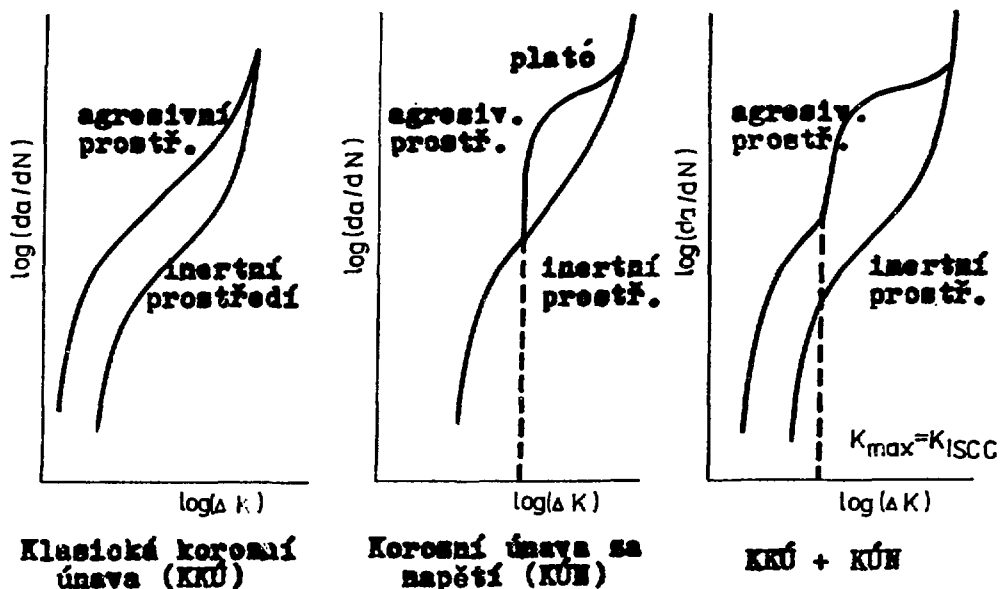
#### Literatura

- /1/ Valenta J. aj.: Návrh matematických modelů pro výpočet životnosti trubek průtlačného parního generátoru. Zpráva SVÚSS-77-02005.
- /2/ Danko J.C.: Effect of weld residual stresses on intergranular stress corrosion cracking of type 304 stainless steel boiling water reactor piping. Electric Power Res. Inst., Palo Alto, Cal. 94303, 1982.
- /3/ White E.L., Berry W.E.: The influence of cyclic load and environmental effects on stress-corrosion cracking of sensitized stainless steel. NP-1991, Research Project 311-3, Battelle Columbus Lab., 1981.
- /4/ Stouffer D.C., Strauss A.M.: A continuum theory of degrading elastic solids with application to stress corrosion. Int. J. Engn. Sci., 14, 1976, s. 915-924.
- /5/ The influence of environment on fatigue. I Mech E Conf. Publ., London, str.57, 1977.
- /6/ Fox M.: An overview of intergranular stress corrosion cracking in BWRs. Electrical power research inst., Palo Alto CA 93304, 1981.

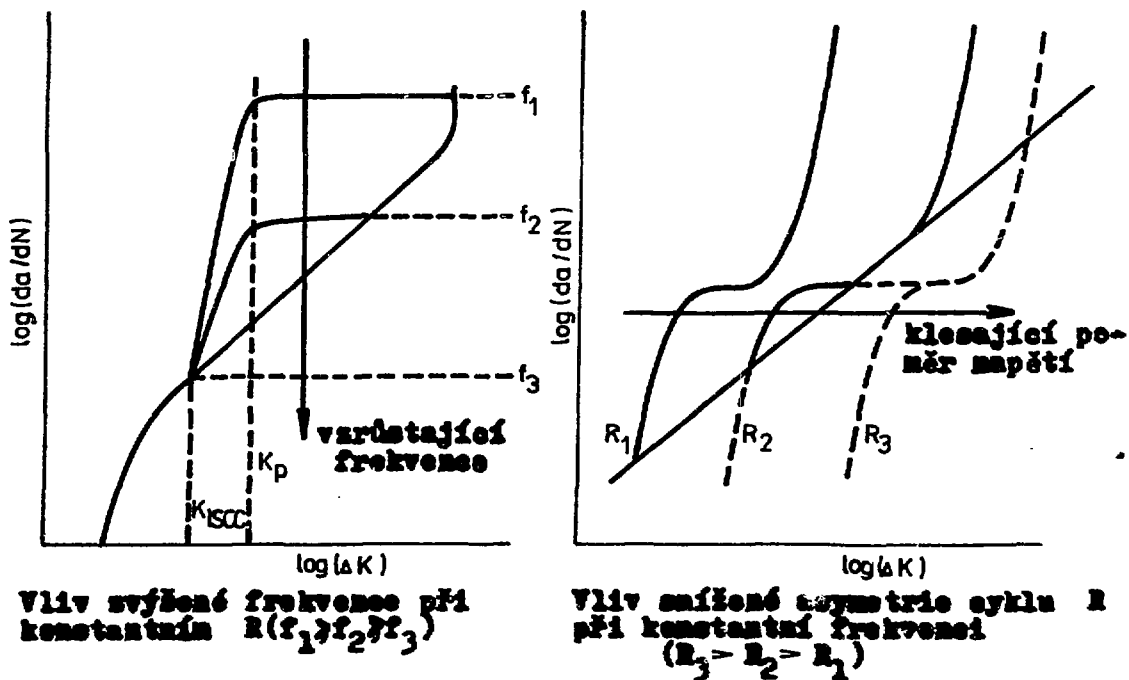
- /7/ Jones R.L.: Corrosion fatigue characterization of reactor pressure vessel steels. NP-2775, Research Project 1325-1, The Babcock a. Wilcoc Comp., Ohio 1982.
- /8/ Müller M.: Theoretical consideration on corrosion fatigue crack initiation. Met. Trans. A13, 1982,č. 1, s.649-655.
- /9/ Annual report of contract research for the metallurgy and materials research branch. Division of reactor safety research. U.S. Nuclear Reg. Commision, 1977.
- /10/ Beavers J.H., Agrawai A.K., Berry W.E.: Corrosion-related failures in power plant condensers. NP-1468, Technical Planning Study TPS 78-730, Battelle Columbus Lab., 1980.



Obr. 1 Počet poruch potrubních systémů JR  
v závislosti na průměru potrubí

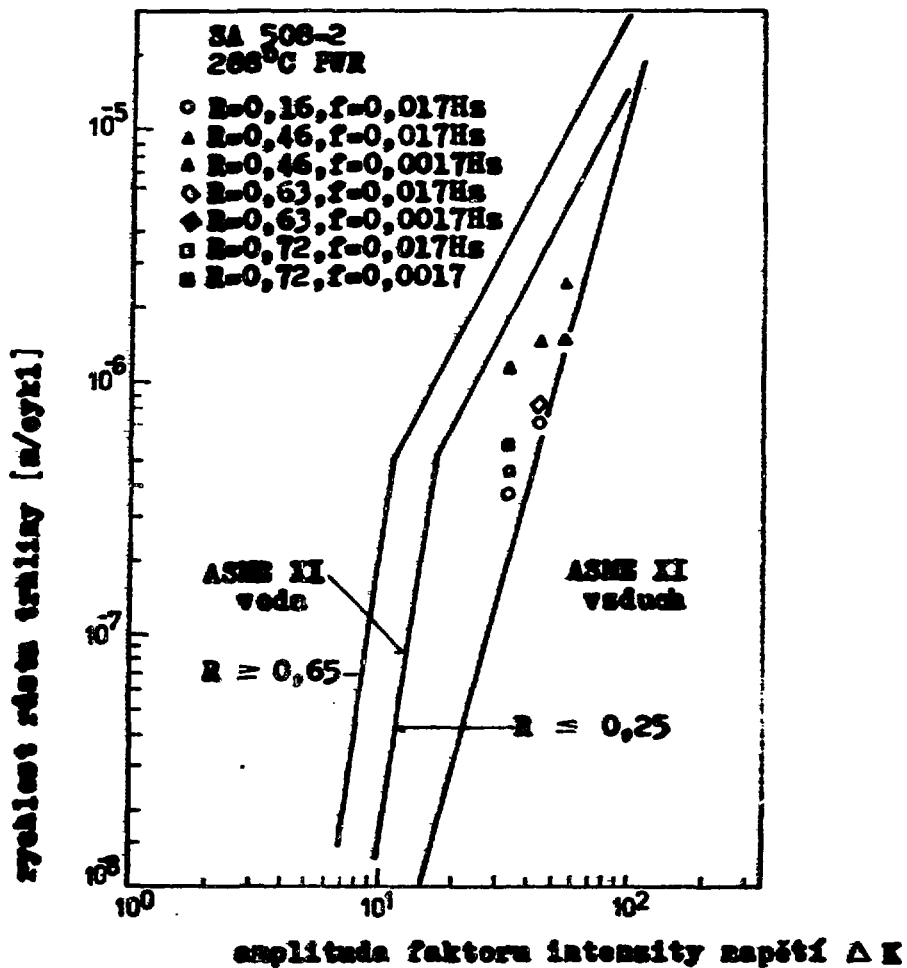


Obr. 2 a) Schematické ilustrace základních typů růstu únavové trhliny v korozním prostředí

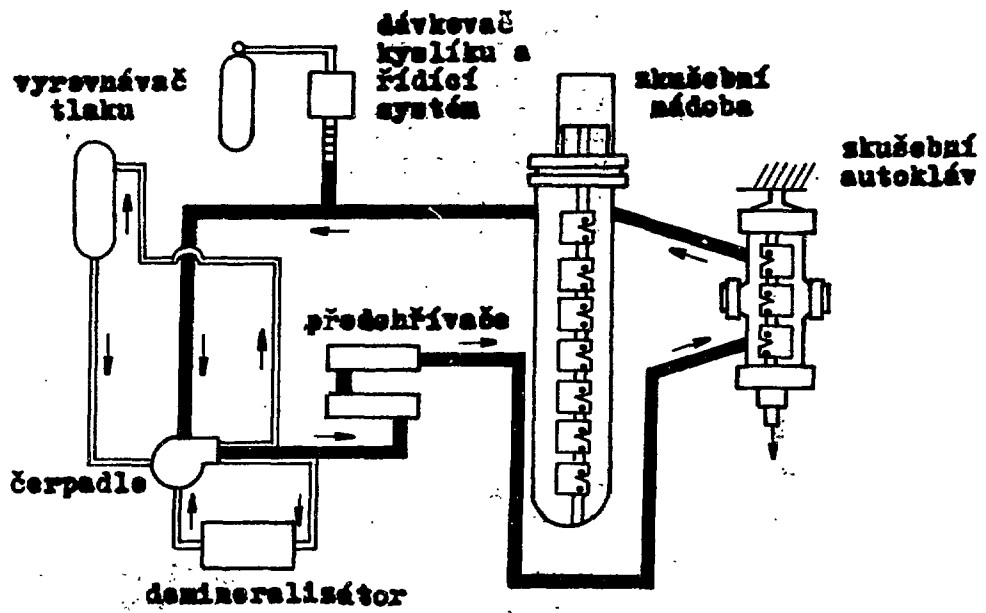


Obr. 2 b) Vliv mechanických parametrů na růst únavové trhliny v korozním prostředí





Obr. 3 Rychlost růstu trhliny jako funkce  $\Delta K$  a asymetrie cyklu  $R$  při nízkých frekvencích zatížení



Obr. 4 Schematické uspořádání skúšební soustavy