



ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF PIPING SYSTEMS USING COMPUTER CODE PRAISE

L. Pečínka*

Summary: *Pipe break probabilities calculated in nuclear industry for purposes of PSA studies are based either on the insights from the operating experience or on the fracture mechanics. For the application of the last one the PRAISE computed code (Pipe Reliability Assessment Including Seismic Effects) was developed. The key stones of this code are as follows: stress history of the piping (cyclic stress, mean stress, N^o of cycles, operating transients, seismic events), initial crack distribution, crack non-detection probability, K-solution, crack grow characteristics, leak detection probability, leak rate calculations, probability of small leak, big leak and LOCA. Numerical example is demonstrated.*

1) Úvod

I když ve většině států je licencování jaderných elektráren deterministické, pro účely jejich řízeného stárnutí se stále více používá pravděpodobnostního ocenění rizika. Jedním ze vstupních údajů jsou i frekvence porušení bezpečnostně významných potrubí. Pro jejich určení se používá buď databáze hlášených poruch nebo lomová mechanika s určitými pravděpodobnostními vstupy.

2) Využití provozních zkušeností

V současné době největší databáze mají US NRC, švédský inspektorát SKI a vyvíjení databáze OECD/NEA (OPDE). Odvozené vztahy mají tvar

- US NRC pro PWR, 3362 reaktorroků
 - o únik předcházejících roztržení $P_L = (1/3362)$
 - o velká LOCA $P_b = (2,5/DN) P_L$kde DN je $\varnothing$ potrubí, ale $P_b = 0,01$ pro $DN \geq 250$
- SKI databáze, Bayes update, roztržení jako následek degradace
$$P_{R/DP} = (2R + 1) / (2DP + 2)$$
kde R počet roztržení dle databáze
DP počet výskytů degradovaného potrubí

* Ing. Ladislav Pečínka, CSc., Ústav jaderného výzkumu Řež a.s.s, Husinec-Řež, čp. 130, 250 68 Řež, tel.: +420 66 172 610, fax: +420 220 940 519, e-mail: pel@ujv.cz

3) Aplikace lomové mechaniky

Typickým představitelem tohoto přístupu je výpočtový program PRAISE (Piping Reliability Assessment Including Seismic Effects) vyvinutý v Lawrence Livermore National Laboratory (USA) [1]. Jeho blokové schéma je patrné z obr. 1. V dalším je uvedena stručná charakteristika jednotlivých bloků.

3.1) Lomově mechanická báze

3.1.1)

Je předpokládána buď semieliptická obvodová či axiální trhlina nebo průchozí trhlina. Jsou-li b , a velká a malá poloosa, pak v [3] jsou uvedeny vztahy pro hodnoty součinitele intenzity napětí ve směrech poloos a i b , tj. K_a , K_b ve tvaru

$$\left. \begin{aligned} \frac{K_a}{\sigma a^{1/2}} &= F_1(\xi, \alpha) \\ \frac{K_b}{\sigma a^{1/2}} &= F_2(\xi, \alpha) \end{aligned} \right\} \quad \xi = a/b, \quad \alpha = a/h \quad (1)$$

a to jak pro membránová, tak i ohybová napětí od mechanických účinků.

V případě obvodové průchozí trhliny délky $2b$ má K součinitel standardní tvar

$$K = \sigma (\pi b)^{1/2} F_0 \quad (2)$$

kde F_0 je tvarový faktor uvedený opět v [3].

Únavový růst trhliny se počítá pomocí vztahu

$$\frac{da}{dN} = C \left[\frac{\Delta K}{(1-R)^{1/2}} \right]^4 \quad (3)$$

kde $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$

$$R = K_{\max} / K_{\min}$$

Rozptyl v datech je charakterizován lognormální hodnotou C s mediánem $9,1 \times 10^{-12}$ a směrodatnou odchylkou $2,2 \times 10^{-11}$.

Uvedený vztah platí pro austenitické ocele a to pro svarový kov, základní materiál i teplotně ovlivněnou zónu a je vhodný pro vzduch i vodu.

Při použití J integrálu pro povrchové semieliptické trhliny a materiály vyhovující Ramberg-Osgoodovu vztahu se vychází z rovnice

$$J = J_e + J_p \quad (4)$$

kde pro plně plastický stav platí

$$J_p = \frac{\sigma^{n+1}}{D^n} a \frac{h_1(\alpha, n, \gamma)}{(1-\alpha)} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2\gamma+1}{2\gamma+1+\alpha} \right]^{n+1} \quad (5)$$

pro J_e se položí $n = 1$.

V případě obvodové průchozí trhliny se používá vztahu

$$J_p = \frac{\alpha^{n+1}}{D} b(1-\beta) \frac{h_1(\alpha, n, \gamma)}{\left[1 - \beta - \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{1}{2 \sin \pi \beta} \right)^{n+1} \right]} \quad (6)$$

$$\beta = b \left(R_i + \frac{h}{2} \right)$$

3.1.2)

K ocenění nestability trhliny v důsledku únavového růstu nebo korozního praskání pod napětím se používá pro velmi houževnaté materiály jako kritérium „net-section“ napětí založené na vztahu

$$\sigma_{LC} A_p > \sigma_f (A_p - A_{crack}) \quad (7)$$

kde σ_{LC} je osově napětí vyvolané vnitřním tlakem a vlastní tíhou, σ_f je tzv. „flow stress“, A_p je příčná plocha potrubí a A_{crack} plocha trhliny. Nutno podotknout, že toto kritérium lze použít pouze pro obvodové trhliny.

Jako druhé kritérium se používá tzv. „tearing“ modul.

3.1.3)

Hustota pravděpodobnosti výskytu povrchové semieliptické vady o malé poloose a je určena exponenciálním rozložením

$$p(a) = \frac{\exp[-a/\mu]}{\mu(1 - \exp[-h/\mu])} \quad (8)$$

$\mu = 6,25$ mm, h je tloušťka stěny,

nebo lze použít lognormální rozložení

$$p(a) = \frac{1}{\lambda a \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \left[\frac{\ln(a/a_{50})}{\lambda \sqrt{2}} \right]^{1/2} \right\} \quad (9)$$

kde a_{50} je mediánová hodnota velikosti trhliny a λ tvarový parametr.

3.1.4) Hustota pravděpodobnosti tvaru povrchové trhliny

Jsou-li b a a velká a malá poloosa, pak hustota pravděpodobnosti tvaru má tvar ($\beta = b/a$)

- buď exponenciální

$$p(\beta) = \begin{cases} 0 & \beta < 1 \\ \lambda \exp[-\lambda(\beta - 1)] & \beta > 1 \end{cases}$$

- nebo lognormální

$$p(a) = \frac{2 \exp \left\{ - \left[\ln(\beta / \beta_m) / \sqrt{2\lambda} \right]^2 \right\}}{\lambda \beta \sqrt{2\pi} \operatorname{erfc} \left\{ \ln(1 / \beta_m) / \sqrt{2\lambda} \right\}}$$

přičemž parametry β_m a λ byly pro program PRAISE speciálně vyvinuty.

3.2) Frekvence výskytu trhliny

V programu se uvažují pouze montážní svary u kterých lze předpokládat horší kvalitu než u svarů dílenských. Pravděpodobnost, že ve svaru bude N trhlín je dána Poissonovým rozdělením

$$P(N) = V(p_v^*) \frac{e^{-V p_v^*}}{N!} \quad (12)$$

kde

- $V = \pi D_i h (2h) = 2\pi D_i h^2$ je objem svarového spoje, přičemž $2h$ reprezentuje šířku svaru včetně teplotně ovlivněné zóny
- p_v^* je počet svarů na jednotku objemu, pro účely PRAISE předpokládána hodnota $10^{-4}/\text{in}^3$.

4) Pravděpodobnost detekce vady

Pravděpodobnost, že semieliptická vada nebude v průběhu buď předprovozní nebo provozní nedestruktivní kontroly je dána vztahem

$$P_{ND}(A) = \epsilon + \frac{1}{2}(1 - \epsilon) \operatorname{erfc}(\nu \ln A / A^*) \quad (13)$$

kde

- $A = \frac{1}{2} \pi a b$ je plocha vady, platí za předpokladu, že a, b jsou menší než průměr UZ sondy D_H
 $= \frac{1}{4} \pi a D_H$ platí za předpokladu, že $2b > D_H$
- $\nu = 1,5$
- $A^* = (\pi/4) D_4 a^*$, $D_H = 1 \text{ inch}$
- $a^* = 1,25 \text{ inch}$ pro lité, silnostěnné austenitické potrubí
 $= 0,25 \text{ inch}$ pro tvářené austenitické potrubí
- $\epsilon = 0$ pro lité, silnostěnné austenitické potrubí
 $= 0,005$ pro tvářené austenitické potrubí

5) Odhad velikosti úniku

Pro případ obvodové průchozí trhliny délky $2b$ je proveden odhad

$$\frac{\dot{Q}}{\sqrt{h}2b} = \begin{cases} 0,25 \delta^2 & \delta \leq 0 \text{ mils} \\ 0,9375 \delta - 0,875 & \delta \leq 0 \text{ mils} \end{cases} \quad (14)$$

kde

$$\delta = \frac{4\sigma b(1-\nu^2)}{E} \quad \text{otevření trhliny v mils}$$

h tloušťka stěny

$\dot{Q}$ únik v gallonech/minuta

Vztah (13) odvozen pro podmínky PWR, tj. $P = 15,5 \text{ MPa}$, $t \doteq 300^\circ\text{C}$.

6) Napětí

6.1) Provozní napětí

U obvodových svarů vstupy tvoří

- membránová napětí od vnitřního přetlaku P

$$\sigma_p = \frac{P D_i}{4h} \quad (15)$$

- ohybová napětí od vlastní tíhy při pokojové teplotě

$$\sigma_{\min} = \sigma_{DW} \quad (16)$$

vstupují do únavového výpočtu jako minimální napětí

- maximální napětí jsou dána vztahem

$$\sigma_{\max} = \sigma_p + \sigma_{DW} + \sigma_{TE} \quad (17)$$

kde σ_{TE} jsou dilatační napětí

- vibrační napětí $\Delta\sigma_v$ jako rozkmit, přičítají se k rovnici (17). Jejich příspěvek k únavovému růstu trhliny, jestli hodnoty ΔK a R vypočtené dle rovnice (3) převyší prahovou hodnotu

$$\Delta K_{tn} = \begin{cases} 4,6\sqrt{1-R} & R < R^* \\ 4,6(1-R^*) & R > R^* \end{cases} \quad (18)$$

$$R^* = 0,9$$

6.2) Zbytková napětí ve svarových spojích

Zbytková napětí hrají významnou roli z hlediska rozvoje a růstu trhlín iniciovaných korozi pod napětím, což nutno respektovat zejména u reaktorů typu BWR. Pokud se týče únavového růstu trhliny, pak hrají pouze druhotnou roli, neboť neovlivňují ΔK , ale pouze parametr $R = K_{\min} / K_{\max}$. Do programu jsou tyto hodnoty zahrnuty formou mediánu a směrodatné odchylky pro malá ($100 < D_0 < 250 \text{ mm}$), střední ($250 < D_0 < 500 \text{ mm}$) a velká ($D > 500 \text{ mm}$) potrubí.

7) Aplikace na reaktor VVER 440/213

Schematický pohled na smyčku je na Obr. 2 a 3. Výpočet pravděpodobnosti úniku se prováděl s krokem 2 roku až dokonce projektové životnosti 30 let [2]. Geometrické parametry potrubí jsou $D_i = 495$ mm, $h = 37$ mm, chladivem je voda s tlakem 12,5 MPa a teplotě 268°C ve studené větvi a 295°C v horké větvi. Výpočet pravděpodobnosti úniku a roztržení se provedl pro každý svar, výslední pravděpodobnost se pak stanovila pomocí vztahu

$$P = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_i)$$

$$p_i \doteq \sum_{i=1}^N p_i$$

kde N je počet svarů.

Výsledky pro jednu smyčku jsou uvedeny v následující Tabulce 1.

Tabulka 1: Pravděpodobnost úniku a roztržení jako funkce doby provozu

T (roky)	$P_{\text{únik}}$	P_{T+2}/P_T	P_{LLOCA}	P_{T+2}/P_T
0	0,8429 E-9	-	0,17557 E-12	-
2	0,31774 E-8	3,77	0,62728 E-12	3,57
4	0,44746 E-8	1,408	0,73923 E-12	1,178
6	0,57456 E-8	1,284	0,80270 E-12	1,086
8	0,67972 E-8	1,183	0,84621 E-12	1,054
10	0,78702 E-8	1,1578	0,87553 E-12	1,0346
12	1,90156 E-8	1,145	0,91360 E-12	1,0435
14	0,99961 E-8	1,109	0,93615 E-12	1,0247
16	0,11214 E-7	1,122	0,95499 E-12	1,02
18	0,12191 E-7	1,087	0,97344 E-12	1,019
20	0,13170 E-7	1,08	0,98883 E-12	1,0158
22	0,14282 E-7	1,084	0,10024 E-11	1,0137
24	0,15289 E-7	1,07	0,10124 E-11	1,01
26	0,16416 E-7	1,074	0,10248 E-11	1,0122
28	0,17544 E-7	1,0687	0,10375 E-11	1,0124
30	0,18618 E-7	1,0612	0,10449 E-11	1,007

Vzhledem k tomu, že reaktor typu VVER 440/213 má šest smyček, výsledné hodnoty pravděpodobnosti z Tabulky 1 se vynásobí šesti.

Z výpočtu plyne zajímavý poznatek: Obě pravděpodobnosti mají maximální přírůstky cca v prvních pěti letech provozu, od devátého roku je tangenta růstové křivky přibližně konstantní. Ve svých důsledcích to znamená, že frekvence nedestruktivních kontrol svarových spojů nemusí být tak častá, jako v počáteční fázi provozu. To je sice příznivé pro provozovatele, ale v rozporu s požadavky dozorných orgánů.

Závěr

První verzi programu PRAISE vyvinuli v letech 1980 – 81 Harris a Lim v Lawrence Livermore National Laboratory pro účely ocenění vlivu seismické události na pravděpodobnost porušení potrubí v reaktorech typu PWR a BWR. Principiálně je to program

deterministický, který počítá životnost svarových spojů potrubí formou pravděpodobnosti porušení, přičemž lomové mechanické vstupy mají rovněž deterministický charakter, ale některé vstupy týkající se např. tvaru a velikosti trhliny mají náhodný charakter.

V současné době již existuje pc PRAISE Version 4.2 [3], který zahrnuje určité modifikace vycházející ze současných poznatků v lomové mechanice.

Z porovnání výsledků PRAISE se závěry vyplývajícími z databází provozních poruch vyplývá následující

- databáze zahrnují pouze určitá časová období, čili pravděpodobnosti výskytu degradace nebo poruše nejsou spojitou funkcí času,
- tomu odpovídající hodnoty vypočtené kódem PRAISE jsou o cca 3 až 4 řády nižší,
- v principu to znamená, že buď databázové přístupy některé vstupy nadhodnocují nebo v PRAISE je něco systematicky podhodnocováno,
- v nejbližší budoucnosti nelze očekávat, že by výsledné hodnoty obou přístupů konvergovaly.

Z hlediska prodlužování doby života existujících jaderných elektráren až na 60 let je nejcennějším přínosem kódu PRAISE zjištění, že pravděpodobnosti úniku a roztržení mají charakter křivky nasycení, tj. po desátém roce provozu činí přírůstky pravděpodobnosti roztržení pouze jednotky procent.

Literatura

- [1] Harris D.O.: Probability of Pipe Fracture in the Primary Coolant Loop of a PWR Plant – Vol. 5: Probabilistic Fracture Mechanics Analysis
NUREG/CR 2189, Vol. 5, US NRC
- [2] Pečínka L.: Výpočet pravděpodobnosti porušení primárního potrubí JE s VVER
Matějková M. 440/213 v podmínkách normálního provozu
Zpráva ÚJV, ev.č. 10 664 T, 1996
- [3] Khaleel F.A.: Fatigue Analysis of Components for 60Year Plant Life
NUREG/CR 6674, US NRC