

PROJEKT FITNET – EVROPSKÁ FFS METODIKA PRO POSUZOVÁNÍ PROVOZUSCHOPNOSTI KOVOVÝCH KONSTRUKCÍ

Jan Korouš,

BiSAFE, s.r.o., Malebná 1049, 149 00 Praha 4, e-mail: korous@bisafe.cz

Cílem příspěvku je představit metodiku FITNET, která patří mezi FFS (Fitness-For-Service) postupy pro hodnocení provozní způsobilosti defektních komponent. Postup FITNET se zabývá posouzením integrity kovových konstrukcí obsahujících defekty a je použitelný pro svařované i nesvařované konstrukce. Metodika je rozdělena do několika modulů, zahrnujících hlavní mechanismy poškozování. Jednotlivé moduly jsou zaměřeny na lom, únavu, creep a korozi materiálů. Každá část obsahuje podrobný postup, jak posoudit nalezený defekt, tak aby bylo možno vyhodnotit zda je či není vyhovující, popř. po jak dlouhou dobu je možno defektní komponentu bezpečně provozovat.

Klíčová slova: *FFS, spolehlivost, únava, creep, lom, koroze*

1. Úvod

Defekty, které se nacházejí v konstrukcích, mohou značně ovlivnit jejich životnost a provozuschopnost. Vady mohou mít různý charakter (trhliny, korozní poškození, vady ve svarech atd.) a mají buď výrobní původ, nebo vznikají během provozu vlivem degradačních mechanismů, jimž je konstrukce vystavena. Sama přítomnost vady však nemusí vždy představovat faktor omezující pracovní parametry zařízení. Z praxe je známo mnoho případů, kdy konstrukce spolehlivě pracovala po celou dobu své návrhové životnosti, i když se v ní vyskytovaly četné vady. Existují ovšem na druhou stranu případy, kdy i malý defekt může vést ke katastrofě, která způsobí značné materiální škody popř. ohrozí lidské životy.

K tomu, abychom mohli posoudit, zda přítomnost defektů v provozovaném zařízení omezí jeho provozuschopnost, potřebujeme vhodné výpočetní postupy, které umožní ohodnotit přípustnost defektu, popř. stanovit bezpečnou dobu provozu konstrukce. V anglosaské literatuře se pro tyto postupy vžil termín „Fitness-For-Service“ (ve zkratce FFS), který lze do češtiny přeložit jako „použitelnost pro provoz“. Dnes již existuje několik metodik, které se touto problematikou zabývají, jsou však obvykle zaměřeny na jistou oblast použití. Existují např. postupy pro petrochemii, letectví, energetiku atd. Jako příklad lze uvést metodiky BEGL R5 a R6 [1,2], API RP 579 [3]. Za účelem vytvořit obecný a komplexní postup pro posuzování kovových konstrukcí s defekty vznikl projekt FITNET [4] financovaný Evropskou unií. Jednotlivé části byly připraveny předními odborníky v dané oblasti. Celkem se do přípravy metodiky zapojilo 50 organizací nejen z Evropy, ale i z USA a Japonska. Po skončení projektu bude metodika připravena ke standardizaci v rámci CEN (Comité Européen de Normalisation – Evropský výbor pro normalizaci).

Metodika FITNET není zaměřena pouze na posouzení defektů nalezených při kontrolách již provozovaných zařízení, ale je využitelná i při návrhu a výrobě nových konstrukcí, kdy lze např. posoudit odolnost konstrukce proti růstu trhlin a lomu a konstrukci upravit tak, aby byla vůči defektům méně citlivá (např. změnou tvaru a vhodnou volbou materiálů). V neposlední řadě lze metodiku použít při vyšetřování příčin vzniku havárií.

FITNET má modulární strukturu, přičemž každý modul je zaměřen na různý mechanismus porušování konstrukce. Jde o následující 4 moduly:

- Lom
- Únava
- Creep
- Koroze

Každý modul obsahuje jednak normativní část, kde jsou přesně definovány podmínky a postupy výpočtu, a část informativní, která shrnuje návody a doporučení, jenž představují databázi praktických znalostí dodaných jednotlivými účastníky projektu.

Pro posouzení přípustnosti defektů v konstrukci vyžadují jednotlivé moduly vstupní informace, které lze rozdělit do následujících kategorií:

- Identifikace a popis mechanismu poškození
Pro spolehlivou predikci chování konstrukce s trhlinou je nutno určit dominantní způsob poškození, popř. stanovit zda dochází k interakci jednotlivých mechanismů, např. únavy a creepu.
- Stanovení provozních podmínek a analýza napjatosti konstrukce
Je třeba stanovit odpovídající hodnoty provozních parametrů, v případě tlakových zařízení především tlaku a teploty. U provozovaných zařízení by se mělo vycházet z dlouhodobých měření provozních parametrů, zaznamenaných řídicím systémem posuzovaného zařízení. Vhodným zpracováním těchto dat se získá spektrum zatížení, které je základem pro výpočet poškození konstrukce.
Údaje o skutečném zatížení konstrukce potom vstupují do výpočtu napjatosti, který stanoví složky tenzoru napjatosti a deformace v nejvíce exponovaných místech, popř. v místech výskytu defektu.
- Popis defektu
Nalezený defekt má zpravidla velmi komplikovaný tvar a pro potřeby výpočtu je ho třeba idealizovat. Jedná se např. o náhradu povrchového defektu trhlinou eliptického tvaru. FITNET obsahuje pravidla, jak při stanovení náhradní vady postupovat a jak posoudit, zda se sousední trhliny mohou navzájem ovlivňovat. V takovém případě se trhliny nahrazují jedním velkým defektem s rozměry, které závisejí na velikosti jednotlivých trhlín a jejich vzájemné vzdálenosti.
- Vlastnosti materiálu
Zcela zásadní je přiřazení odpovídajících materiálových vlastností. Ty by měly být stanoveny pro provozní teplotu. Kromě základních mechanických vlastností, jako je např. mez kluzu a mez pevnosti, je třeba stanovit i řadu specifických charakteristik pro jednotlivé typy výpočtu. Jde např. o únavové křivky, závislost rychlosti růstu trhlíny na součiniteli intenzity napětí, křivky tečení a řadu dalších údajů. Ne vždy jsou tyto informace k dispozici, a proto obsahuje FITNET základní databázi referenčních hodnot a odkazy na literární zdroje, kde lze potřebná data nalézt.

V další části příspěvku nalezne čtenář stručný popis jednotlivých modulů.

Lom

Modul, obsahující postupy pro stanovení mezních podmínek lomu, je založen na postupech lomové mechaniky (viz např. [5]) a je použitelný pro kovové konstrukce, svařované i nesvařované. Cílem je výpočet kritických parametrů, které ovlivňují lom konstrukce. Jde o:

- Odolnost konstrukce proti lomu, tj. stanovení minimálních požadavků na materiálové vlastnosti, které odolnost proti lomu charakterizují
- Kritické rozměry trhlíny
- Kritickou úroveň zatížení

Obvykle jsou dva z výše vyjmenovaných parametrů známy a je třeba dopočítat třetí parametr.

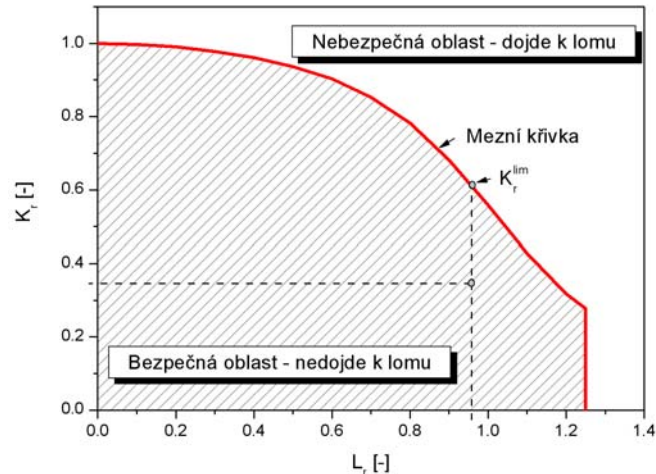
Pro výpočet kritických parametrů jsou v metodice FITNET doporučeny dva přístupy, které jsou navzájem rovnocenné:

1. Přístup FAD

FAD je zkratka anglického termínu Failure Assessment Diagram, což lze volně přeložit jako „diagram mezního poškození“. Těleso s trhlinou se popíše pomocí dvou parametrů K_r a L_r , které jsou definovány následovně:

- K_r ... poměr mezi součinitelem intenzity napětí a lomovou houževnatostí materiálu
- L_r ... poměr mezi zatížením tělesa a zatížením, které odpovídá plastickému kolapsu tělesa s trhlinou

FITNET obsahuje podklady k tomu, jak parametry K_r a L_r pro posuzovaný případ vyhodnotit. Vlastní posouzení potom probíhá pomocí mezní křivky $K_r^{lim} = f(L_r)$, která v souřadném systému K_r a L_r odděluje oblast přípustných a nepřípustných stavů, jak je znázorněno na obr. 1. Popis mezní křivky $K_r^{lim} = f(L_r)$ je rozlišen na několik kategorií (Options) v závislosti na tom, jak podrobné podklady o materiálových vlastnostech jsou k dispozici. Celkem je definováno 6 úrovní (Option 0 až Option 5), přičemž postup podle nižší úrovně je vždy konzervativnější. Znamená to, že pokud je trhlina podle úrovně 0 nepřípustná, pak např. podle úrovně 1 může být trhlina přípustná. Provedení hodnocení s vyšším stupněm však vyžaduje zpřesnění podkladů, což nebývá vždy možné.



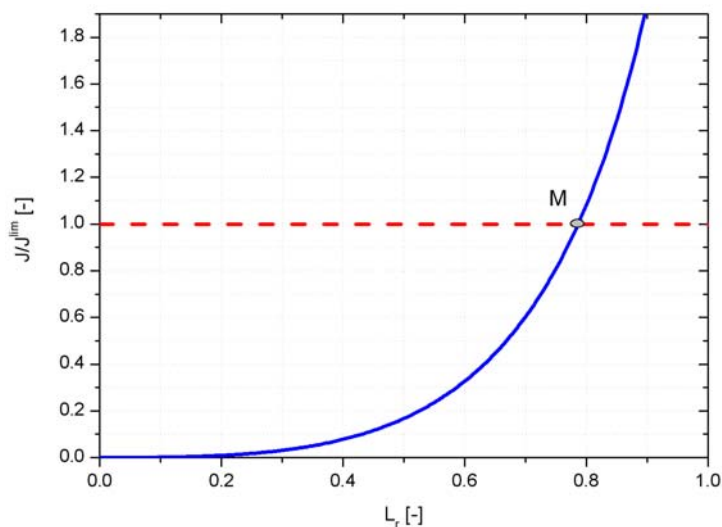
Obr. 1 Posouzení kritického stavu tělesa s trhlinou pomocí FAD přístupu

2. Přístup CDF

CDF znamená Crack Driving Force a tento termín je možno přeložit jako „hnací síla trhliny“. Tento parametr je obvykle vyjádřen pomocí tzv. J -integrálu, eventuálně pomocí rozevření trhliny δ . Pokud se pro hodnocení použije J -integrál, lze ho vyjádřit vztahem:

$$J = J_{el}[f(L_r)]^{-2}, \quad (1)$$

kde $J_{el} = K^2/E'$, přičemž K je součinitel intenzity napětí a E' je modul pružnosti zohledňující stav rovinné deformace nebo rovinné napjatosti. Podobně jako v přístupu FAD, existuje několik úrovní hodnocení. Pro základní úroveň hodnocení se postupuje podle obr. 2. Hodnota J je porovnána s mezní hodnotou J^{lim} a průsečík, označený na obr. 2 jako M, odpovídá mezním podmínkám, např. kritickému rozměru trhliny. Pro podrobnější posouzení s použitím vyšších úrovní hodnocení je opět nutno zpřesnit materiálové podklady, jak je uvedeno v metodice FITNET.



Obr. 2 Nalezení mezního stavu (bod M) pomocí CDF přístupu

Pro výše uvedené přístupy metodika FITNET uvádí, jak při posuzování lomu zahrnout do výpočtů vliv zbytkových napětí, rozdílné vlastnosti svarového kovu a základního materiálu a v neposlední řadě jak postihnout efekt stísnění (constraint).

Únava

Modul únavy v metodice FITNET zahrnuje několik postupů jak posoudit vliv proměnného zatížení na konstrukci. Řešení lze rozdělit do dvou skupin:

- V konstrukci se nenachází žádná trhlina a cílem je výpočet kumulace poškození v kritickém místě. Je nutno určit fluktuaci napětí v posuzovaném místě a porovnat počty cyklů pro jednotlivé hladiny zatížení s odpovídajícími únavovými křivkami. V metodice FITNET jsou v závislosti na složitosti zatížení uvedeny pro tuto problematiku tři přístupy řešení:

- Použití nominálních napětí

Při výpočtu kumulace únavového poškození se použijí nominální elastická napětí v posuzovaném místě konstrukce. Pro svařované konstrukce se mezní počet cyklů vypočte z únavových křivek klasifikovaných podle stupně únavové odolnosti, zahrnující vliv lokální geometrie svaru, jeho mikrostruktury, efekt zbytkových napětí apod. Celkové poškození je vypočteno podle Palmgren-Minerova pravidla:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i}, \quad (2)$$

kde D je celkové únavové poškození, n_i je počet cyklů pro i -tou hladinu zatížení a N_i je mezní počet cyklů pro i -tou hladinu zatížení.

Pro nesvařované konstrukce je mez únavy konstrukce korigována zahrnutím vlivu geometrie konstrukce, velikosti, kvality povrchu a středního napětí. Tato hodnota definuje přípustnou fluktuaci nominálního napětí.

- Použití napětí ve vrubu

V tomto postupu se použijí hodnoty lokálního napětí v exponovaném místě konstrukce a příslušný mezní počet cyklů se vypočte z odpovídající únavové křivky. Kumulované únavové poškození se stanoví opět použitím Palmgren-Minerova pravidla. Lokální napětí se obvykle vypočte numericky metodou konečných prvků, v některých případech lze použít tabelovaných součinitelů koncentrace napětí.

- Použití elasticko-plastické odezvy materiálu a deformačních únavových křivek

Tento přístup je zaměřen především na nesvařované konstrukce a používá k výpočtu únavového poškození rozkmit deformace, která se stanoví z elasticko-plastické odezvy v kritickém místě konstrukce. Rozkmit deformace se porovnává s deformačními únavovými křivkami (Manson – Coffinovy křivky) a výpočet kumulace poškození se provádí cyklus po cyklu.

- Pokud se v konstrukci nachází defekt typu trhliny, pro výpočet doby jejího růstu se použije Parisova rovnice ve tvaru:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n, \quad (3)$$

kde A , n jsou materiálové konstanty zahrnující vliv prostředí a ΔK je rozkmit součinitele intenzity napětí. Použít lze i komplikovanější vztahy, které zohledňují vliv dalších parametrů na rychlost růstu trhliny, jako je např. nesouměrnost cyklu, prahová hodnota rozkmitu součinitele intenzity napětí atd.

FITNET obsahuje také postup, jak posoudit vliv nerovinných defektů (např. objemové vady ve svarech) na odolnost konstrukce proti únavě.

Creep

Tento modul se zabývá posouzením defektů v konstrukcích, které pracují za vysokých teplot a dominantním poškozujícím účinkem je tečení materiálu, popř. interakce tečení a únavy. Z hlediska energetického průmyslu je tato část metodiky FITNET nejspíš nejzajímavější.

Postup je zaměřen na iniciaci růstu a vlastní růst trhliny vlivem procesů tečení. Iniciací růstu trhliny se rozumí doba, po kterou zůstává trhlina nehybná. Pokud se však jedná o trhlínu, která byla nalezena po určité době provozu, obvykle se tato etapa zanedbává a předpokládá se, že trhlina roste.

Růst trhliny je popsán rovnicí:

$$\frac{da}{dt} = A_c (C^*)^{n_c}, \quad (4)$$

kde A_c , n_c jsou materiálové konstanty a C^* je parametr analogický k J-integrálu. Lze ho stanovit numerickou analýzou pomocí metody konečných prvků, ovšem použitelné je i přibližné vyjádření ve tvaru:

$$C^* = \frac{K^2}{\sigma_{ref}} \frac{d\varepsilon_c}{dt}, \quad (5)$$

kde K je součinitel intenzity napětí, $\sigma_{ref} = L_r \sigma_k$ je referenční napětí (σ_k je mez kluzu) a $d\varepsilon_c/dt$ je rychlost creepové deformace. Před vlastním posouzením růstu trhliny je třeba určit, zda již nebylo dosaženo její kritické velikosti. Podobně je nutno postupovat po každém vypočteném přírůstku délky trhliny.

Koroze

Modul koroze je zaměřen na oblasti, ve kterých může tento poškozující mechanismus negativně ovlivnit integritu konstrukce. Řešeny jsou tyto problémy:

- Koroze pod napětím

Jde o popis růstu trhliny vlivem koroze při konstantním zatížení. Trhlina roste, pokud zatížení, reprezentované součinitelem intenzity napětí, přesáhne prahovou hodnotu K_{ISCC} , která je silně závislá na prostředí, teplotě a typu zatížení. Rychlost růstu trhliny lze potom vyjádřit rovnicí:

$$\frac{da}{dt} = A_{cor} (K)^{n_{cor}} \quad \text{pro} \quad K_{ISCC} \leq K \leq K_C, \quad (6)$$

kde A_{cor} , n_{cor} jsou konstanty závislé na prostředí a typu materiálu, K je lomová houževnatost.

- Únavový růst trhliny v korozním prostředí

Růst trhliny vlivem únavy je zpravidla silně ovlivněn působením korozního prostředí a rychlost trhliny může být výrazně vyšší než v inertním prostředí. Pro popis rychlosti růstu je možno použít rovnici (3), ovšem konstanty A, n musí zohledňovat faktory, které mají vliv na růst trhliny v korozním prostředí.

- Lokální zeslabení stěny korozi

Postup je zaměřen na válcové a kulové nádoby, u kterých vlivem vnějších faktorů (koroze, eroze apod.) došlo k lokálnímu zeslabení stěny. Vada se může nacházet na vnitřním nebo vnějším povrchu, v základním materiálu, eventuálně ve svarech. V metodice FITNET jsou specifikovány podmínky, za kterých lze postup pro posouzení plošných vad použít a jak řešit situaci, kdy jsou vady blízko u sebe a navzájem se ovlivňují.

Doplňující informace a přílohy

Kromě výše uvedených modulů obsahuje metodika FITNET další informace. V dokumentu je přehledně uvedeno, co by měla každá zpráva o posudku provozuschopnosti tělesa s trhlínou obsahovat. Jednak je třeba uvést všechny vstupy do výpočtu a dále je doporučeno provést citlivostní analýzu výsledků, která napomůže odhalit faktory, které mají na přesnost a hodnověrnost výsledků největší vliv.

Nedílnou součástí je i kapitola, která na praktických příkladech dokládá použití jednotlivých modulů. Pro uživatele je to názorný návod, jak postupovat při posuzování konstrukce s trhlínou. Některé uvedené příklady jsou navíc doplněny i experimentální verifikací výpočetního postupu.

Velmi rozsáhlou a užitečnou částí metodiky FITNET jsou přílohy. Z výpočtového hlediska jsou velmi důležité přílohy, které obsahují kompendia pro výpočet součinitele intenzity napětí a mezního zatížení při plastickém kolapsu. Uživatel metodiky nalezne pro řadu konfigurací trhlín v tělesech vzorce, pomocí kterých lze potřebné parametry stanovit. Pro zahrnutí vlivu zbytkových napětí je užitečná příloha, která obsahuje průběhy zbytkových napětí skrz stěnu pro různé typy svarů.

Podrobná příloha pojednávající o metodách nedestruktivního zkoušení podává popis principů, na kterých jednotlivé metody pracují a je zde možno nalézt informace o tom, jakou metodu je vhodné použít pro detekci různých typů poškození. Dokument též pojednává o spolehlivosti detekce vad v konstrukci.

Následující přílohy se zabývají klasifikací nalezených vad a jejich idealizací pomocí trhlin s jednoduše definovaným tvarem. Současně jsou uvedena pravidla, podle kterých lze posoudit možnost interakce jednotlivých sousedních trhlin.

Pro posouzení únavového poškození obsahuje další příloha klasifikaci jednotlivých typů svarů z hlediska jejich odolnosti vůči únavovému poškození. S touto problematikou souvisí i příloha, která pojednává o koncentraci napětí ve svarech vlivem tvarových imperfekcí (např. vlivem střechovitosti potrubí apod.).

V přílohách je možno najít též popis principů pravděpodobnostních výpočtů životnosti a pojednání o tom, jak zahrnout vliv stísnění (constraint) do posouzení přípustné velikosti trhliny.

Poslední příloha obsahuje již zmíněné referenční materiálové hodnoty a databázi odkazů, kde lze některá další data nalézt.

Závěr

FITNET představuje ucelenou metodiku pro posuzování provozuschopnosti konstrukcí s trhlínami a umožňuje vzít v úvahu řadu mechanismů poškozování. Finální verze dokumentu by měla být k dispozici během roku 2006 a pokud úspěšně proběhne normalizační řízení v rámci CEN, stane se FITNET pravděpodobně běžně používanou metodikou pro posuzování přípustného poškození konstrukcí a kritických podmínek pro provoz zařízení s trhlínami. Jelikož se mechanismy poškozování, o kterých FITNET pojednává, vyskytují i u zařízení v energetickém průmyslu, neleznou popsané postupy jistě uplatnění i v této oblasti.

Literatura

- [1] An Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures, Issue 3, British Energy Generation Ltd. 2003
- [2] Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, R6 – Revision 4, British Energy Generation Ltd. 2001
- [3] Fitness-for-Service, API Recommended Practice 579, American Petroleum Institute, 2000
- [4] Fitnet Fitness For Service Procedure – Draft: Mk 5, Editors: M. Kocak, S. Webster, J. J. Janosch, R. A. Ainsworth, R. Koers, FITNET TN Consortium, Project FITNET FFS – GIRT – CT – 2001 – 05071, 2005
- [5] Anderson T.L.: Fracture Mechanics – Fundamentals and Application. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1995

Kontaktní adresa autora

<i>Jméno</i>	Ing. Jan Korouš, Ph.D.
<i>Pracoviště</i>	BiSAFE, s.r.o.
<i>Adresa pro korespondenci:</i>	Malebná 2/1049, 149 00 Praha 4
<i>E-mail:</i>	korous@bisafe.cz
<i>Fax:</i>	267 913 334
<i>Telefon:</i>	267 913 337