



## NÁVRH METODIKY VÝPOČTU ŽIVOTNOSTI NÁHODNĚ ZATĚŽOVANÝCH KONSTRUKCÍ

Jaroslav Svoboda, Miroslav Balda\*

### **Abstract:**

*A PROPOSAL OF METHODOLOGY FOR THE ESTIMATION OF DURABILITY OF STRUCTURES EXPOSED TO RANDOM LOADING.*

*The paper describes results of fatigue tests, which have been carried out, on flat specimens with the notch in form of a hole in the middle. Specimens were loaded with three types of random blocks of 20 minutes duration. They mutually differed in a form of the power spectral density (PSD). All the PSDs were of linear form e.g. constant (white noise), linearly increasing and linearly decreasing in the frequency range 0 – 10 Hz. Damage was measured and the method for estimation of live for arbitrary form of PSD has been proposed.*

**Key words:** power spectral density, random loading, crack propagation, durability, Paris formula

## 1. ÚVOD

Sledováním vlivu tvaru výkonové spektrální hustoty na životnost vzorků vyrobených z materiálů E460 a 11523.1 bylo experimentálně zjištěno (viz [1] a [2]), že o životnosti konstrukcí namáhaných jednoose náhodnými procesy rozhoduje kromě úrovně napětí a faktorů materiálových rovněž rozložení energie přiváděné na jednotlivých frekvencích těchto zatěžovacích procesů. Tento efekt se projevil jak v oblasti šíření krátkých trhlin (oblast mikrostrukturální do délky trhlin 2 – 3 mm), tak i v oblasti trhlin dlouhých s plastickou zónou soustředěnou pouze na čele trhliny.

V rámci řešení pilotního projektu PP51009 Ústavu termomechaniky jsme se pokusili tyto poznatky zúročit tím, že budou zahrnuty do metodiky výpočtu, která by vedla k zpřesnění a zároveň i k zjednodušení dosud používaných metod charakteristických parametrů.

## 2. ROZBOR PROBLEMATIKY

U širokopásmového náhodného procesu, který je charakterizován součinitelem nerovnoměrnosti  $i$  a crest-faktorem  $c_f$ , a který lze popsat základními statistickými charakteristikami (hustotou pravděpodobnosti, střední hodnotou, směrodatnou odchylkou,

---

\* Ing. Jaroslav Svoboda, Prof. Ing. Miroslav Balda, DrSc., Ústav termomechaniky AVČR, Centrum diagnostiky materiálu, Veveřská 11, 301 14 Plzeň, tel.: 019/7236415, fax: 019/7220787, e-mail: [svoboda@cdm.it.cas.cz](mailto:svoboda@cdm.it.cas.cz), [balda@cdm.it.cas.cz](mailto:balda@cdm.it.cas.cz)

rozptylem a výkonovou spektrální hustotou), je nutné při výpočtu životnosti postupovat odlišně než v případě harmonického zatěžování, s nímž je spojena většina informací uvedených v literatuře. Výhodné je v tomto případě použít metody korelační analýzy, která umožňuje daný proces nejen lépe definovat, ale rovněž zahrnout do výpočtů odlišnost mechanismů únavového porušování v různých etapách jeho rozvoje. Poněvadž žádné výsledky zabývající se danou problematikou dosud v literatuře uvedeny nebyly, pokusili jsme se navrhnout nový přístup, který vychází z vlastních experimentálních podkladů získaných studiem této problematiky na výše zmíněných materiálech.

Základní zkoušky se prováděly na plochých leštěných vzorcích tloušťky  $h = 6\text{ mm}$  s otvorem o průměru 2mm uprostřed, vyrobených z konstrukční oceli E460. V tomto provedení má teoretický koeficient koncentrace napětí u vrubu hodnotu  $\alpha = 2,86$ . Pro zobecnění se ověřovaly na vzorcích stejného tvaru, tloušťky 8mm, vyrobených z oceli 11523.1. Pevnostní hodnoty uvedených ocelí a součinitele vrubu  $\beta = \sigma_c / \sigma_c^*$  jsou uvedeny v tabulce 1.

Materiál	$R_m$ [MPa]	$R_e$ [MPa]	$\sigma_c$ [Mpa]	$\sigma_c^*$ [MPa]	$\beta$
E460	580	510	230	160	1,438
11523.1	502	341	240	120	2

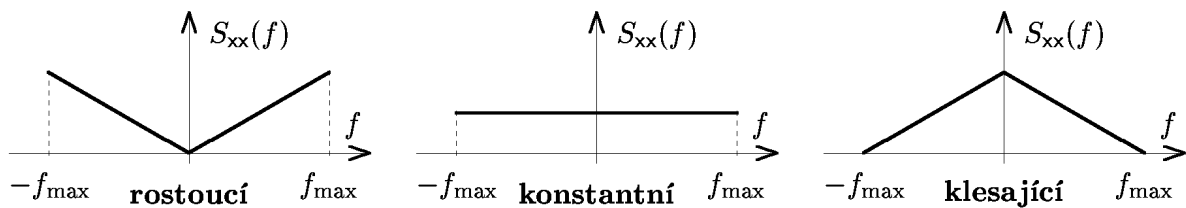
Tabulka 1: Pevnostní hodnoty sledovaných ocelí

Z literatury je známo, že celou oblast únavového porušování jakékoliv dynamicky namáhané konstrukce lze rozdělit na oblasti vzniku trhliny, šíření krátkých trhlin a šíření dlouhých trhlin. Informaci o prahových hodnotách napětí v jednotlivých oblastech podává Kitagawův diagram [3]. Z tohoto diagramu, který byl sestaven na základě výsledků zkoušek při harmonickém zatěžování, vyplývá, že oblast krátkých trhlin lze rozdělit na oblast mikrostrukturálního porušování do délky trhlin cca 0,1 – 0,2 mm, na kterou navazuje oblast kontinuomechanického šíření, které je ukončeno délkou trhliny cca 2–3 mm. Obě tyto oblasti spadají do oblasti krátkých trhlin, po nichž pokračuje šíření dlouhých trhlin. Za prahovou hodnotu pro šíření mikrotrhlin lze považovat maximální rozkmit napětí na mezi únavy  $\Delta\sigma_c$ . Prahovou hodnotou napětí v oblasti dlouhých trhlin je rozkmit napětí, při němž rozkmit faktoru intenzity napětí  $\Delta K$  dosahuje prahové hodnoty  $\Delta K_0$  pro šíření trhlin.

Vyjdeme-li z Kitagawova diagramu a budeme-li ho chtít aplikovat na náš případ širokopásmového procesu zatížení s gaussovským rozdělením amplitud a s rozsahem frekvencí 0 – 10 Hz, je nutno zavést oproti harmonickému způsobu zatěžování, který probíhá při jedné frekvenci a amplitudě, určité předpoklady. Především předpokládáme, že proces je ergodický, který nahraďujeme periodickou posloupností dosti dlouhých pseudonáhodných bloků o žádané výkonové spektrální hustotě  $S_{xx}(f)$  v daném frekvenčním intervalu. Životnost vzorku je daná počtem těchto bloků náhodného zatížení  $N_b$  do lomu. V provedených zkouškách byly použity bloky pseudonáhodných procesů sestávající z  $1,2 \cdot 10^6$  vzorků odebraných s periodou  $T = 1$  [ms]. Doba trvání jednoho zatěžovacího bloku byla 20 minut. Byly vygenerovány tak, že jejich rozdělení bylo přibližně normální a jejich frekvenční spektrum odpovídalo požadovaným tvarům výkonové spektrální hustoty  $S_{xx}$ .

Celkem byly sledovány životnosti a šíření trhlin při třech tvarech  $S_{xx}(f)$  – lineárně rostoucím, konstantním (bílým šumem) a lineárně klesajícím. Uvedené tvary jsou zobrazeny

na obr. 1. U všech vygenerovaných procesů byl zajištěn stejný přívod energie úměrný konstantní hodnotě rozptýlu  $s^2$ .



Obrázek 1: Tvary použitých výkonových spektrálních hustot zatěžovacích procesů

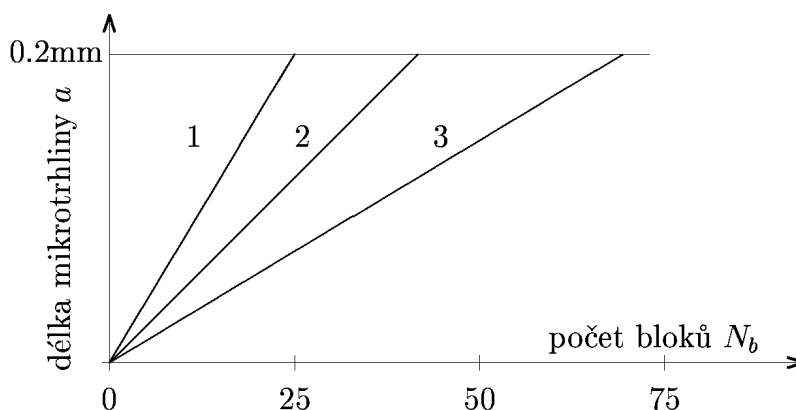
Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce 2. Sledováním výsledných životností lze zjistit, že zhruba 2/3 z celkové životnosti zaujímají obě uvedené oblasti šíření krátkých trhlin a pouze cca 1/3 oblast šíření dlouhých trhlin, kterou lze popsat známým Parisovým vztahem z lomové mechaniky. Ze zkoušek však vyplynul mnohem důležitější poznatek, že životnost souvisí s tvarem výkonové spektrální hustoty zatěžovacího procesu, a že tudíž existuje jistá souvislost mezi rozložením energie po frekvenční oblasti a výslednou životností. To znamená, že toto rozložení energie ovlivňuje významně agresivitu daného procesu. Naskytla se proto otázka, zda by bylo možné znalosti tvaru výkonové spektrální hustoty, který charakterizuje daný širokopásmový proces namáhání, využít pro zpřesnění stávajících odhadů a výpočtů životnosti.

Tvar $S_{xx}(f)$	rostoucí ◁	konstantní =	klesající ▷	směrodatná odchylka	
nerovnoměrnost $i$	0,8631	0,7413	0,6559	$s_x$	
crest-factor $c_f$	4,8363	4,6596	4,6945	[MPa]	
<b>E460</b>	$\sigma_{max}$	350	337,2	339,7	72,37
	mikro	25	38	64	
	krátké	20	27	43	
	dlouhé	27	35	42	
	<b>celkem</b>	<b>72 (77.5)</b>	<b>100</b>	<b>149</b>	
<b>11523.1</b>	$\sigma_{max}$	300	289	291,2	62,03
	mikro	37	38	59	
	krátké	14	14	19	
	dlouhé	10	16	27	
	<b>celkem</b>	<b>61</b>	<b>68</b>	<b>105 (102)</b>	
	$\sigma_{max}$	270	260,1	262,1	55,83
	mikro	60	61	112	
	krátké	21	26	48	
	dlouhé	19	42	50	
	<b>celkem</b>	<b>100</b>	<b>129 (126)</b>	<b>210</b>	

Tabulka 2: Porovnání životností vzorků v počtech zatěžovacích bloků  $N_b$

### 3. HODNOCENÍ ŽIVOTNOSTI V OBLASTI MIKROSTRUKTURÁLNÍHO PORUŠOVÁNÍ

V oblasti mikrostrukturální probíhá rychlost šíření nelineárně podle toho, jakou překážku trhlina překonává. Překážkami na kterých se trhlina zastaví jsou převážně hranice zrn, nebo vměstky. Úroveň napětí však zůstává stejná. Pro inženýrskou praxi můžeme při výpočtu životnosti uvažovat podle Hobsona [4] rychlost šíření v oblasti mikrostrukturální jako lineární. Budeme-li tedy aplikovat výsledky uvedené v tabulce 2 pro vzorky z materiálu E460, dostaneme pro sledované tři náhodné procesy zatížení pro šíření trhlin v této oblasti závislosti uvedené na obr.2.



**Obrázek 2:** Šíření trhlin v mikrostrukturální oblasti vzorků z materiálu E 460

- tvar  $S_{xx}(f)$  rostoucí
- tvar  $S_{xx}(f)$  konstantní
- tvar  $S_{xx}(f)$  klesající

Z obrázku jednoznačně vyplývá, že tvar výkonové spektrální hustoty ovlivňuje rychlost šíření únavových trhlin již v mikrostrukturální oblasti, tedy v etapě počátečního poškozování materiálu daného konstrukčního uzlu. Podobnou závislost bychom obdrželi rovněž pro druhý sledovaný materiál 11523.1 u něhož sice nebyl zjištěn významný rozdíl v případě rostoucího a konstantního tvaru  $S_{xx}(f)$ , avšak rozdíl v případě klesajícího tvaru se projevil nezávisle na úrovni nastaveného zatížení.

Jak vyplynulo z experimentálních prací, existuje jistá souvislost mezi tzv. „agresivitou“ zatěžovacího procesu ovlivňující výslednou životnost a rozdělením energie po frekvenční oblasti. Experimentálně bylo ověřeno, že elementární poškození vyvolané frekvenční složkou  $X(f)$  je úměrné energii  $X(f)X^C(f)df$  a frekvenci  $f$ . Celkové poškození od jednoho zatěžovacího bloku je pak úměrné veličině

$$d = \int_{-f_{\max}}^{+f_{\max}} |X(f)|^2 f df. \quad (1)$$

Veličina  $|X(f)|^2$  je pro signály s konečnou energií rovna  $S_{xx}(f)$ , jako hodnotě hustoty rozložení energie po frekvenční oblasti na frekvenci  $f$ . Aplikujeme-li vztah (1) pro naše tři tvary výkonové spektrální hustoty  $S_{xx}(f)$  pro frekvenční rozsah  $\pm 10\text{Hz}$ , dostaneme následující hodnoty  $d$ :

- pro proces s rostoucím tvarem  $S_{xx}(f)$   $d = 66,67S_h$
- pro proces s konstantním tvarem  $S_{xx}(f)$   $d = 50,00S_h$
- pro proces s klesajícím tvarem  $S_{xx}(f)$   $d = 33,33S_h$

$S_h$  je maximální hodnota  $S_{xx}(f)$  u procesů s klesajícím nebo rostoucím tvarem. Poměry těchto hodnot poškození  $d$  lze považovat za měřítka agresivity jednotlivých procesů. Zvolíme-li nyní za referenční proces bílý šum (s konstantní  $S_{xx}(f)$ ), pak jeho součinitel agresivity bude 1, a pro zbývající dva sledované procesy dostaneme hodnoty součinitelů agresivity o následující velikosti:

- pro proces s rostoucím tvarem  $S_{xx}(f)$  bude  $A_{\triangleleft} = \frac{66,67S_h}{50S_h} = 1,33$
- pro proces s klesajícím tvarem  $S_{xx}(f)$   $A_{\triangleright} = \frac{33,33S_h}{50S_h} = 0,67$ .

Lze předpokládat, že tímto způsobem bude možné ohodnotit agresivitu procesů s libovolným tvarem  $S_{xx}(f)$  v daném frekvenčním rozsahu a vypočítat životnosti libovolného širokopásmového procesu za předpokladu, že známe počet bloků  $N_b$  (tedy životnost) procesu s konstantním tvarem  $S_{xx}(f)$ . Při porovnání životností jednotlivých procesů totiž odpadnou všechny další faktory (materiálový, technologický apod.), které ovlivňují životnost zkušební vzorku, a zůstává pouze efekt rozložení energie v daném frekvenčním pásmu širokopásmového náhodného procesu.

Výpočet jsme aplikovali na mikrostrukturální oblast vzorků z obou sledovaných materiálů a zejména u vzorků z materiálu E460 dával uvedený přepočtení životností poměrně dobré výsledky:

- pro proces s rostoucím tvarem  $S_{xx}(f)$  obdržíme  $N_{b\triangleleft} = \frac{N_{b=}}{A_{\triangleleft}} = 28,5$
- pro proces s klesajícím tvarem  $S_{xx}(f)$   $N_{b\triangleright} = \frac{N_{b=}}{A_{\triangleright}} = 56,7$ .

Porovnáme-li tyto hodnoty s hodnotami v tab.2, dostaneme v prvním případě rozdíl v životnostech +12,3%, v druhém pak -11,5%, což nejsou velké chyby, uvědomíme-li si, že se jedná o oblast počátečního porušování materiálu, která je dosud pro výpočtáře „černou skříňkou“.

Vznik mikrotrhlin v této první etapě únavového porušování je spojen s dostatečnou úrovní smykového napětí ve skluzových pásmech mezi sousedními krystaly. Z Kitagawova diagramu vyplývá, že tyto mikrotrhliny vznikají při prahové hodnotě  $\Delta\sigma_c = 2\sigma_c$  ve zplastizované oblasti, překračují postupně hranice zrn, na nichž se jejich rychlost šíření zbrzdí a případně i zastaví, pokud faktor intenzity napětí nedosahuje za touto zplastizovanou oblastí (obvykle poblíž vrubu) své prahové hodnoty.

Jak aplikovat tento mikrostrukturální mechanismus na případ náhodného procesu zatížení? V případě náhodného zatížení dochází k náhodnému střídání nízkých a vysokých amplitud napětí. Jedinou stálou a tudíž reprezentativní hodnotou podávající informaci o úrovni namáhání je z hlediska korelační analýzy směrodatná odchylka  $s$  procesu (nebo špiček), která zahrnuje všechny úrovně namáhání daného procesu. Představme si, že budeme snižovat intenzitu náhodného procesu a tím i jeho směrodatnou odchylku  $s$  až do úrovně, kdy

počet zatěžovacích bloků  $N_b \rightarrow \infty$ . Tuto úroveň bude reprezentovat směrodatná odchylka  $s_x$  procesu  $x(t)$ . Její mezní hodnota  $s_{xc}$  bude paralelou k hodnotě meze únavy  $\sigma_c$  u harmonického zatěžování. Rozkmit  $\Delta s_c$  bude korespondovat rozkmitu  $\Delta \sigma_c$  u harmonického zatěžování. Podobně jako prahová hodnota nominálního napětí  $\Delta \sigma_n$  je prahovou hodnotou pro vznik mikrotrhlin při harmonickém zatěžování, bude rozkmit  $\Delta s_n$  prahovou hodnotou našeho náhodného procesu. Rozdíl je pouze v definici životnosti. V případě harmonického zatěžování je životnost vztažena k počtu cyklů do lomu, v případě náhodného zatížení ergodického charakteru k počtu zatěžovacích bloků náhodného namáhání.

Hodnotu  $s_c$  (případně  $\Delta s_c$ ) je možné stanovit experimentálně, zkoušky by však byly příliš zdlouhavé, uvědomíme-li si, že doba na projetí 1 bloku zatížení trvala u našich zkoušek 20 minut. Proto bude lépe hledat jiný způsob, vycházející z podkladů dostupných z harmonického zatěžování.

Dowling [5] zjistil, že již při malých přetíženiích nad mez kluzu v kořeni vrubu se zóna v této oblasti plně zplastizuje, takže výpočet pro šíření trhlin založený na principu lineárně elastické lomové mechaniky nelze pro tuto oblast použít. Vyjděme z poznatků Dowlinga a stanovme si jako kritérium pro prahové napětí ve vrubu podmínku, aby maximální špička napětí náhodného procesu (maximální špička napětí v opakované sekvenci) dosáhla hodnoty meze kluzu (meze pro vznik plastických deformací v kořeni vrubu). Jestliže si tedy dáme podmínku  $\sigma_{\max}^* = R_e = 510 \text{MPa}$  pro vznik plastických deformací u otvoru vzorků z materiálu E460, dostaneme, že k tomu, aby ještě u otvorů nevznikly trhliny, mohou mít špičky napětí procesu maximální úroveň

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_{\max}^*}{\alpha_k} = \frac{R_e}{\alpha_k} = 178,3 \text{MPa} . \quad (2)$$

Odpovídající mezní hodnoty směrodatných odchylek  $s_x$  vypočítáme za použití crest faktorů  $c_f$  uvedených pro sledované tři procesy namáhání v tab.2 ze vztahu

$$s_x = \frac{\sigma_{\max}}{c_f} \quad (3)$$

Po dosazení příslušných hodnot pro vzorky z materiálu E460 obdržíme:

- pro proces s rostoucím tvarem  $S_{xx}(f)$   $s_x = 36,87 \text{MPa}$
- pro proces s konstantním tvarem  $S_{xx}(f)$   $s_x = 38,27 \text{MPa}$
- pro proces s klesajícím tvarem  $S_{xx}(f)$   $s_x = 37,98 \text{MPa}$ .

Rozkmity těchto hodnot lze pak považovat za prahové hodnoty nominálního napětí  $\Delta s_n$  pro tyto zatěžovací procesy.

#### 4. ŽIVOTNOST V OBLASTI KONTINUOMECHANICKÉHO ŠÍŘENÍ

Jedná se o šíření krátkých trhlin od délky  $a = 0,2 \text{ mm}$ , do délky  $a \cong 2 \text{ mm}$  od kořene vrubu. V případě vzorku s otvorem se v literatuře často uvádí délka trhliny od středu otvoru. V našem případě vzorku s otvorem  $\varnothing 2 \text{ mm}$  by se pak hodnota  $a$  zvýšila na  $3 \text{ mm}$ . Šíření v této druhé oblasti krátkých trhlin lze popsat na základě závislosti na elasto-plastických parametrech na čele trhliny. Přitom se zavádějí efektivní hodnoty, které zohlední rovněž

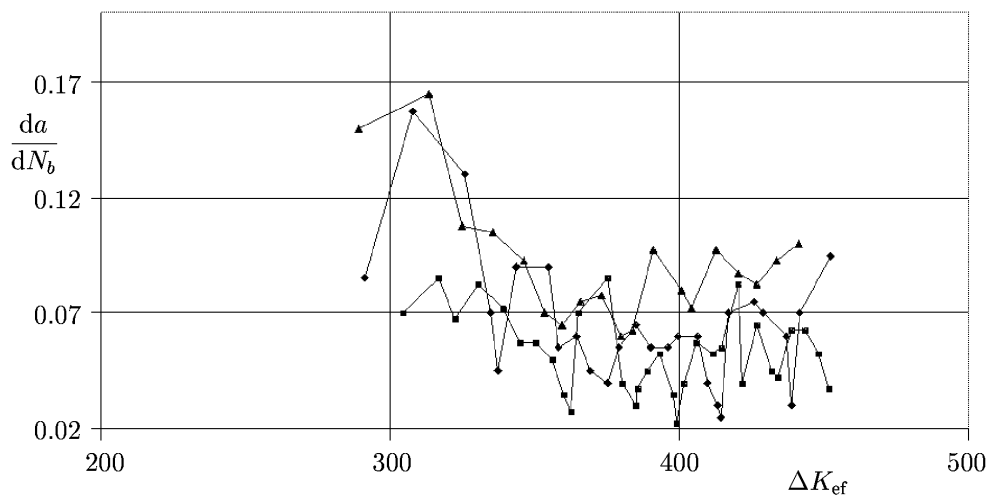
zavírání trhlin. Jsou to efektivní rozměry posuvů při rozvírání trhliny [6], faktoru intenzity napětí založeného na deformaci  $\Delta K_{ef}$  [7] a J-integrálu  $\Delta J_{ef}$  podle [8].

V literatuře jsou uvedeny práce celé řady autorů např. Lukáše a Kunze [9], Söhna [10], El. Haddada, Smithe a Toppera [11], Smithe a Millera [12] a Dowlinga [5], kteří odvodili řadu vztahů pro stanovení prahové hodnoty faktoru intenzity napětí v závislosti na délce krátké trhliny, a hledali její souvislost s prahovou hodnotou  $\Delta K_0$  platnou pro oblast šíření dlouhých trhlin, pro níž platí zákony lineární lomové mechaniky. Práce těchto autorů prokázaly, že mechanismus šíření krátkých trhlin v této oblasti probíhá jinak než u dlouhých trhlin. Zatímco u dlouhých trhlin rozhoduje o šíření poměrně malá oblast plastické deformace na čele trhliny, v případě krátkých trhlin obaluje plastická deformace větší část této trhliny. Komplikované je rovněž zahrnutí efektu zavírání a otevírání krátkých trhlin do výpočtu. Proto většina autorů vliv tohoto efektu neuvažuje. Vzhledem k složitosti dané problematiky zejména při aplikaci u vrubovaných částí s nehomogenním polem napětí, jsou veškeré výzkumné práce v dané oblasti zaměřeny především na jednoduchý způsob harmonického zatěžování.

Při sledování vlivu tvaru výkonové spektrální hustoty  $S_{xx}(f)$  na životnost u našich tří širokopásmových procesů byla získána rovněž informace o šíření krátkých trhlin pro II. oblast Kitagawova diagramu. Na obr.3 je vynesena závislost  $da/dN_b$  na rozměru faktoru intenzity napětí  $\Delta K_{ef}$  který byl vypočítán ze vztahu (4)

$$\Delta K_{ef} = \Delta s \sqrt{\pi a} Y, \quad (4)$$

kde kromě již známých veličin je  $Y$  korekční faktor na změnu geometrického tvaru. Za hodnotu  $\Delta s$  jsme dosadili rozměr směrodatné odchylky procesů, která byla v daném případě pro všechny procesy stejná. Délka trhliny  $a$  byla odečítána od středu otvoru  $\varnothing 2\text{mm}$ .



Obrázek 3: Šíření krátkých trhlin v oblasti II. u vzorků z materiálu E460

$$\frac{da}{dN_b} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{blok}} \right], \quad \Delta K_{ef} \left[ \frac{\text{MPa}}{\text{mm}^{3/2}} \right]$$

- △ .....rostoucí  $S_{xx}(f)$
- ◇ .....konstantní  $S_{xx}(f)$
- .....klesající  $S_{xx}(f)$

Z obrázku je opět jasně patrný rozdíl v šíření trhlin v případě sledovaných náhodných procesů lišících se tvarem výkonové spektrální hustoty. Je zřejmé, že nejmenší počet zatěžovacích bloků vykazuje proces rostoucí s největší agresivitou a největší počet těchto bloků proces klesající, který se opět projevil jako nejméně agresivní. Konkrétní údaje jsou uvedeny v tab.2.

Jestliže přijmeme rovněž pro tuto oblast únavového porušování naši teorii o souvislosti agresivity zatěžovacího procesu s rozdělením energie po frekvenční oblasti podobně jako v kapitole 3 pro mikrostrukturální oblast šíření a vztáhneme životnosti k bílému šumu, dostaneme následující výsledky:

- pro proces s rostoucím tvarem  $S_{xx}(f)$   $N_{b<} = \frac{N_{b=}}{A_{<}} = 20,3$  bloků
- pro proces s klesajícím tvarem  $S_{xx}(f)$   $N_{b>} = \frac{N_{b=}}{A_{>}} = 40,3$  bloků.

Porovnáme-li tyto výsledky s výsledky experimentálními v tab. 2, zjistíme rozdíly +1,5% a -6,3%, což je opět velmi dobrá shoda.

## 5. ŽIVOTNOST V OBLASTI ŠÍŘENÍ DLOUHÝCH TRHLIN

Šíření dlouhých trhlin je poměrně dobře popsáno Parisovým vztahem zde upraveným pro náhodné zatěžování

$$\frac{dl}{dN_b} = C(\Delta K_{ef})^m, \quad (5)$$

kde  $l$  je celková délka trhliny,  $\Delta K_{ef}$  efektivní hodnota rozkmitu faktoru intenzity napětí a  $m$  exponent platný pro střední oblast šíření těchto trhlin. Pro případ širokopásmového náhodného procesu lze podle [8] vztáhnout rozkmit efektivního součinitele intenzity napětí  $\Delta K_{ef}$  k rozkmitu směrodatné odchylky zatěžovacího procesu. Přestože, jak prokázaly zkoušky, tvar výkonové spektrální hustoty v této oblasti nijak významně neovlivňuje sklon funkce v diagramu s osami  $\log(dl/dN)$  a  $\log \Delta K_{ef}$ , má vliv na výslednou životnost, jak je zřejmé z tab.2.

Rovněž pro tuto oblast lze aplikovat přístup uvedený v kapitolách 3 a 4. Vypočítáme-li opět četnost bloků  $N_{b<}$  a  $N_{b>}$  pro oba tvary  $S_{xx}(f)$ , dostaneme:

- pro proces s rostoucím tvarem  $S_{xx}(f)$   $N_{b<} = \frac{N_{b=}}{A_{<}} = 26,3$  bloků
- pro proces s klesajícím tvarem  $S_{xx}(f)$   $N_{b>} = \frac{N_{b=}}{A_{>}} = 52,2$  bloků.

Procentuální rozdíly od experimentálních hodnot jsou -2,6% a +19,6%.

## 6. ZÁVĚR

Výsledky experimentálních prací provedených na zkušebních vzorcích z materiálu E460 prokázaly, že existuje jistá souvislost mezi životnostmi konstrukcí namáhaných v provozu



náhodným způsobem zatížení širokopásmového charakteru a tvarem výkonové spektrální hustoty, která z hlediska frekvenčního rozložení daný proces zatížení charakterizuje, a že tedy existuje souvislost mezi životností a způsobem, jakým je celkový přiváděný výkon na jednotlivých frekvencích daného procesu zatížení rozložen. Závislost byla prokázána dosud pouze pro tři různé tvary  $S_{xx}(f)$ . Dále v rámci pilotního projektu se dosáhly podobné výsledky i na vzorcích z materiálu 11523.1, které byly zatěžovány při dvou rozdílných úrovních zatížení, se stejným efektem, a to nezávisle na úrovních zatížení. Poněkud zvýšený rozptyl ve výsledcích byl u tohoto materiálu způsoben jeho hrubší zrnitostí, která v oblasti otvoru ovlivnila kvalitu jeho kontury což zřejmě ovlivnilo rozvoj trhliny v její počáteční fázi.

O tom, že stejných součinitelů agresivity  $A$ , závislých pouze na tvaru výkonové spektrální hustoty lze použít rovněž pro přepočet výsledných životností daných zatěžovacích procesů, podává důkaz tab.3, která uvádí porovnání životností  $N_b$  v počtu bloků stanovených experimentálně a výpočtem pomocí těchto součinitelů pro sledované materiály a všechny varianty sledovaného zatížení.

Tvar $S_{xx}(f)$		rostoucí $\triangleleft$	konstantní $=$	klesající $\triangleright$	směrodatná odchylka
Materiál	agres. $A$	1,333	1	0,667	$s_x$ [MPa]
<b>E460</b>	měření $N_b$	72; 83	100; 102	148; 151	72,37
	průměr	77,5	100	149	
	výpočet	75,2		149,3	
	chyba %	-3		-0,2	
<b>11523.1</b>	měření $N_b$	57; 65; 62	78; 64; 62	104; 100	62,03
	průměr	61	68	102	
	výpočet	51,1		101,5	
	chyba %	-16,2		-0,5	
	měření $N_b$	100	129; 123	210	55,83
	průměr	100	126	210	
	výpočet	94,7		188,1	
	chyba %	-5,3		-10,5	

Tabulka 3: Porovnání životnosti  $N_b$  v počtu bloků stanovených experimentálně a výpočtem pomocí součinitelů  $A$

Velikosti chyb uvedené v tabulce jsou velmi přijatelné a lze proto konstatovat, že aplikace součinitelů agresivity  $A$  při odhadu životnosti má své opodstatnění a této metody korelační analýzy bude možné v praxi v řadě případů výhodně využít. Metoda byla navržena pro případ gaussovského rozdělení amplitud. Bylo by proto třeba zjistit, jak dalece vyhovuje rovněž pro jiná rozdělení. Metodu chceme ověřit ještě pro další tvary  $S_{xx}(f)$  a pro další druhy materiálů. Její výhodou je, že má platnost v celé oblasti únavové životnosti. Lze ji proto aplikovat jak v oblasti krátkých tak dlouhých trhlín, jak je vidět z kapitol 3, 4 a 5. Jedinou její nevýhodou je, že vyžaduje experimentálně stanovit životnost konstrukčního uzlu při konstantním tvaru  $S_{xx}(f)$  - bílý šum, protože vůči němu je vždy agresivita sledovaného procesu zatížení v dané

frekvenční oblasti vztažena. Na druhé straně je výhodou, že odpovídá hodnocení vlastnosti materiálu, technologie apod.

### Poděkování

Příspěvek byl zpracován na základě finanční podpory z výsledků dosažených v pilotních projektech PP 10/7U a PP 51009 Ústavu termomechaniky AVČR v letech 2000 a 2001.

### REFERENCE

- [1] Svoboda J., Václavík M., Balda M.: „The influence of power spectral density on durability of the constructions under random loading“. Sborník kolokvia „Diagnostika a aktivní řízení 2000“, Třešť, 2000
- [2] Svoboda J., Mazanec J.: „Vliv výkonové spektrální hustoty na šíření trhlin při náhodném zatěžování“. Sborník kolokvia „Dynamika strojů 2001“, Praha, 2001
- [3] Radaj D.: „Ermüdungsfestigkeit“. Springer – Verlag Berlin, Heidelberg, 1995
- [4] Hobson P. D.: „Two phases of short crack growth in a medium carbon steel“. In: The behaviour of short fatigue cracks, Mech. Engng. Publ., London, 1986, pp 441-459
- [5] Dowling N. E.: „Notched member fatigue life predictions combining crack initiation and propagation“. Fatigue Fract. Mater. Struct. 2, (1979), pp 129 – 138
- [6] Wohlfahrt H.: „Gezielte Warmbehandlungen zur Steigerung der Wechselfestigkeit von  $C_k 45$  unter berücksichtigung des Eigenspannungszustandes“. Diss., Univ. Karlsruhe, 1970
- [7] Kloss K. H., Fuchsbauer B.: „Fertigungsverfahren, Oberflächeneigenschaften und Bauteilfestigkeit“. VDI-Berichte 214, (1974), pp 85 – 95
- [8] Kloss K. H., Braisch P.: „Über die Wirkung einer Randschichtverfestigung auf die Schwingfestigkeit von Proben und Bauteilen“. Harterei – Techn. Mitt. 37, (1982), str.82 a dále
- [9] Lukáš P., Kunz L.: „Effect of mean stress on short crack threshold“. In: Short Fatigue cracks, Mech. Engng. Publ., London, 1992, pp 351 - 368
- [10] Sähn S.: „Festigkeitsverhalten von Bauteilen mit kleinen Rissen und Kerben bei zyklischer Belastung“. Konstruktion 43, (1991), pp 9 – 16
- [11] El Haddad M. H., Smith K. H., Topper T. H.: „Fatigue crack propagation of short cracks“. Trans. ASME, J. Engng. Mater. Technol. 101, (1979), Nr. 1, pp 42 –46
- [12] Smith R. A., Miller K. J.: „Fatigue cracks at notches“. Int. J. Mech. Sci 19, (1997), pp 11 – 22