

## INFLUENCE OF SPECTRAL PROPERTIES OF COMBINED RANDOM LOADING ON FATIGUE LIFE

J. Svoboda, M. Balda\*

**Summary:** *The contribution deals with an influence of power spectral densities of random loading processes on fatigue lives of structures. Experimental results of uniaxial loading are presented. A philosophy of multiaxial tests, which will be carried out in the new grant project, is also discussed. It is expected that a new numerical method for prediction of fatigue lives of structures loaded by random processes with known spectral densities will be developed.*

### 1. Úvod

S rozvojem počítačové techniky a počítačem řízených zkušebních strojů se vytvořily podmínky pro nový přístup v hodnocení životnosti konstrukcí namáhaných náhodným způsobem zatížení. Nové metody vycházející z aplikace korelační analýzy umožňují dnes objektivněji zpracovat dlouhé záznamy z provozních měření a získávat jejich statistické charakteristiky, informace o středních hodnotách, frekvencích a množství dodané energie. Jejich nevýhodou je, že dosud existuje pouze málo experimentálních údajů, které by jejich možnou aplikaci pro výpočet únavové životnosti podpořily.

Jednou z nejdůležitějších vlastností charakterizujících náhodný proces z hlediska frekvencí a přiváděného výkonu je výkonová spektrální hustota (VSH). Vyjdeme-li z teorie lomové mechaniky, pak únavové porušování materiálu je spojeno se vznikem plastické deformace na čele trhliny. Protože v plastické oblasti již není závislost mezi napětím a deformací lineární, nabývá zde na významu pojem amplituda plastické deformace a při průběhu plastického přetvoření rovněž rychlost, která je závislá na množství energie dodané zatěžované součásti v daném časovém okamžiku. Informaci o dodaném množství energie poskytuje právě VSH, udávající u širokopásmového procesu výkon, příslušející jednotlivým frekvencím ve sledovaném frekvenčním pásmu. Za předpokladu, že dodané množství energie je úměrné velikosti poškození materiálu této součásti a souvisí zároveň s tvarem křivky VSH, lze očekávat, že pro různé tvary této křivky bude charakteristická různá agresivita zatěžovacího procesu a jí odpovídající životnost.

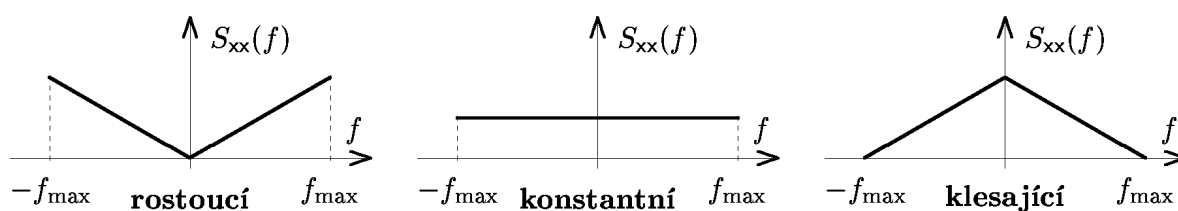
Sledováním závislosti mezi tvarem VSH a životností plochých vzorků s otvorem průměru 2 mm vyrobených z materiálů E 460 a 11523, zatěžovaných jednoosým náhodným tahem-tlakem s různým tvarem VSH jsme se zabývali již v rámci pilotního projektu, který byl řešen v roce 2000 – viz Svoboda a kol. Na tyto práce navazuje nový grantový projekt, který je zaměřen na řešení této problematiky v případě víceosého náhodného zatěžování. Experimenty

\* Ing. Jaroslav Svoboda, Prof. Ing. Miroslav Balda, DrSc., Feng., Institute of Thermomechanics, Academy of Sciences of the CR, Centre of Diagnostics of Materials, Veleslavínova 11, 301 14 Plzeň, svoboda@cdm.it.cas.cz, balda@cdm.it.cas.cz.

předpokládáme realizovat na trubkových vzorcích z materiálu 11523, při kombinovaném zatížení tah-tlak – krut.

## 2. Poznatky ze zkoušek vzorků zatěžovaných jednoosým náhodným tahem-tlakem

Zkoušky byly prováděny na výše zmíněných plochých vzorcích vyrobených z materiálu E 460, později byly pro porovnání doplněny rovněž o materiál 11523. Při zatěžování vzorků tahem-tlakem byl aplikován širokopásmový náhodný proces s normálním rozdělením ve frekvenčním rozsahu  $0 \div 10$  Hz. Počet vzorků v jedné sekvenci byl zvolen  $1,2 \cdot 10^6$ , což odpovídalo době 20 minut. Vzorkovací frekvence zvolená v závislosti na možnostech řídicího programu zkušebního zařízení INOVA (ZUZ 200) činila 1000 Hz. Pro porovnání byly zvoleny 3 tvary VSH podle obr.1.



Obr.1 Zvolené tvary výkonové spektrální hustoty  $S_{xx}(f)$

U všech vygenerovaných procesů byl zajištěn stejný přívod energie úměrný konstantní hodnotě rozptylu  $s^2$ . Výsledky zkoušek vzorků z materiálu E 460 jsou uvedeny v tab.1.

Tvar $S_{xx}(f)$		Počty zatěžovacích cyklů pro tvar			Směrodatná odchylka
		rostoucí	konstantní	klesající	
nerovnoměrnost $i$ crest-faktor $c_f$		0,8631	0,7413	0,6559	$s_x$ [MPa]
		4,8363	4,6596	4,6945	
E 460	$\sigma_{max}$	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>	

Tab.1 Výsledky zkoušek provedených na vzorcích z materiálu E 460

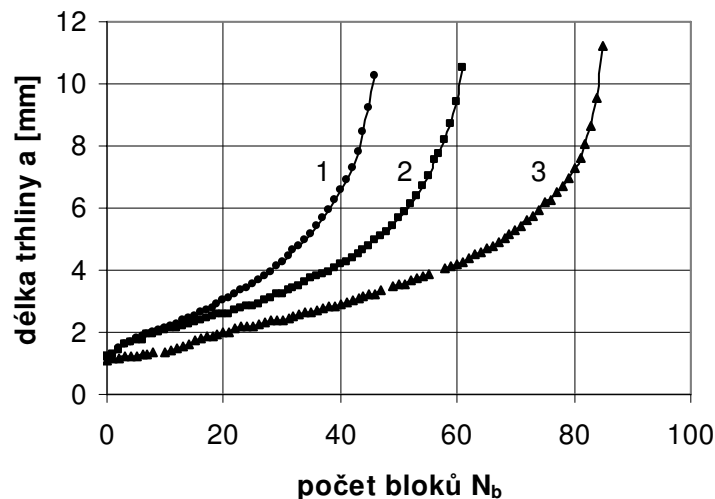
Z tabulky je zřejmé, že existuje závislost mezi tvarem VSH a životností zkoušených vzorků a to v celém rozsahu jejich únavového porušování. Každý tvar VSH lze spojit s jistou „agresivitou“ zatěžovacího procesu závislou na rozdělení energie po frekvenční oblasti a celkové poškození od jednoho zatěžovacího bloku pak bude úměrné veličině

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

na jejímž základě lze porovnávat agresivitu různých zatěžovacích procesů při znalosti jejich VSH. Veličina  $|X(f)|^2$  ve vzorci (1) je pro signály s konečnou energií rovna  $S_{xx}(f)$  charakterizující rozložení energie po frekvenční oblasti.

V tab.1 jsou uvedeny experimentálně stanovené životnosti v počtu zatěžovacích bloků  $N_b$  pro sledované 3 náhodné procesy. Počet zatěžovacích bloků v oblasti „mikro“ odpovídá v tab.1 délce trhliny  $a = 0,2$  mm, v oblasti šíření „krátkých trhlin“ délce trhliny  $a \cong 2$  mm, zbytek tvoří počet bloků odpovídajících šíření dlouhých trhlin do lomu.

Zajímavé výsledky byly získány sledováním šíření únavových trhlin v případě uvedených 3 druhů náhodného zatěžování. Na obr.2 jsou vyneseny závislosti délky trhlin  $a$  na počtu zatěžovacích bloků  $N_b$  pro tyto procesy zatěžování.



Obr. 2 Závislost  $a - N_b$  pro sledované procesy  $S_{xx}(f)$

Čísla 1,2 a 3 odpovídají rostoucímu, konstantnímu a klesajícímu tvaru VSH. Z obrázku je zřejmý rozdíl v agresivitách uvedených tvarů VSH. Průběh šíření trhlin byl sledován od délky cca 0,2 mm, kdy je bylo možné již mikroskopem zaregistrovat. Tím se získal počet bloků  $N_b$ , odpovídající jak mikrostrukturálnímu šíření, tak i odděleně šíření krátkých a dlouhých trhlin, jak je uvedeno v tab.1. Na obr.2 je k délce trhlin připočtena polovina průměru otvoru (1 mm), z jehož hrany se trhliny šířily.

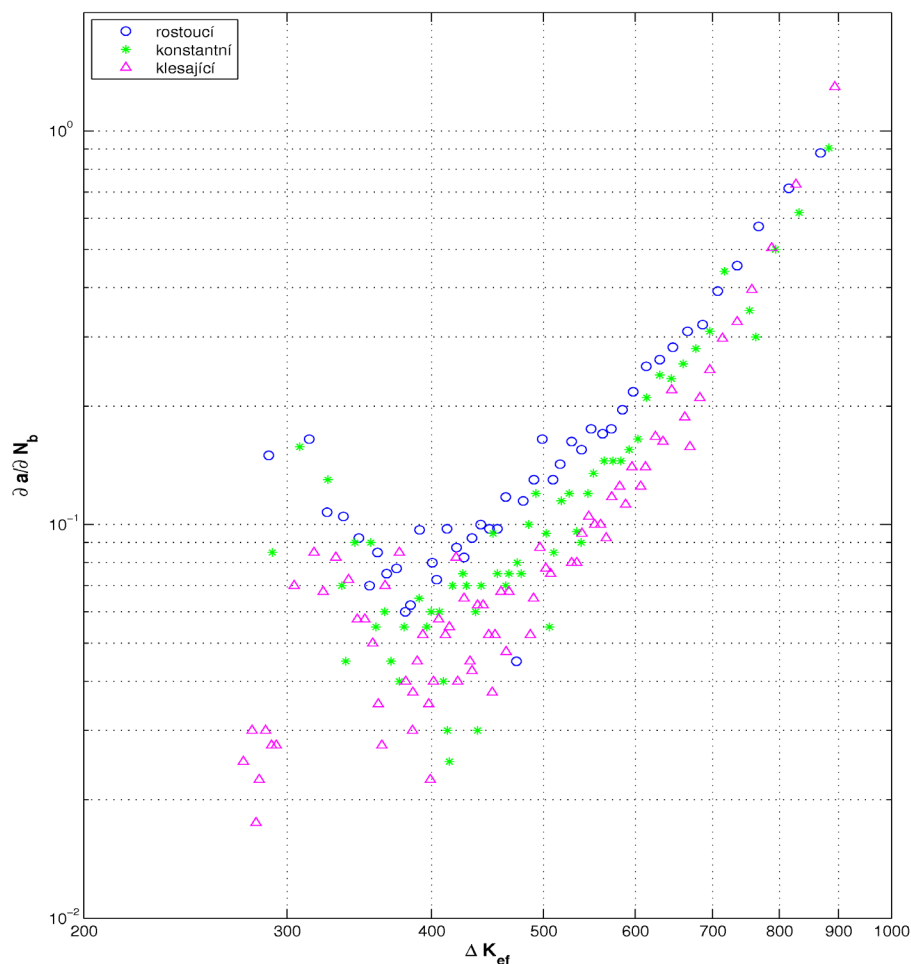
Při znalosti závislosti délky trhliny  $a$  na počtu zatěžovacích bloků  $N_b$  jsme vypočítali pro body křivek na obr.2 jejich diferenciály  $da/dN_b$  a vynesli v logaritmických souřadnicích závislost  $da/dN_b$  na  $\Delta K_{ef}$ . Pro výpočet této hodnoty rozkmitu efektivní hodnoty faktoru intenzity napětí jsme použili vztah

$$\Delta K_{ef} = \Delta s_{\sigma} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y . \quad (2)$$

V uvedeném vztahu je  $\Delta s_{\sigma}$  rozkmit směrodatné odchylky sledovaných náhodných procesů a hodnota  $Y$  tzv. geometrický faktor, který souvisí s hodnotou nominálního napětí v místě vrubu a s tvarem zkušební vzorku. Pro případ taženého pásu s otvorem uvádí Newman závislost  $Y$  na poměru  $a/b$  (kde  $a$  je délka trhliny zahrnující rovněž poloměr otvoru a  $b$  je polovina šířky pásu). Tuto závislost lze pro parametr  $R/b \rightarrow 0$  (kde  $R$  je poloměr otvoru) vyjádřit přibližně polynomem 3. stupně ve tvaru

$$Y = 1,0067 - 0,0211 \cdot \frac{a}{b} + 0,1452 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 1,3429 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^3 . \quad (3)$$

Závislost rychlosti šíření únavových trhlin  $da/dN_b$  na efektivní hodnotě rozkmitu faktoru intenzity napětí  $\Delta K_{ef}$  v logaritmických souřadnicích je pro sledované 3 náhodné procesy uvedena na obr.3.



Obr. 3 Závislost  $da/dN_b - \Delta K_{ef}$  pro sledované 3 tvary  $S_{xx}(f)$

Porovnáním zobrazených závislostí lze zjistit, že rychlosti šíření trhlin vyjádřené poměrem  $da/dN_b$  se u sledovaných křivek, reprezentujících 3 různé tvary VSH významně liší především v oblasti šíření krátkých trhlin do délky cca 3 mm. Trhliny se začaly šířit u všech tvarů prakticky při stejné hodnotě  $\Delta K_{ef} = 300 \text{ N/mm}^{3/2}$ . Jejich další rozvoj však v počátečním stadiu ovlivňuje rozložení přiváděného výkonu na jednotlivých frekvencích zatěžovacího spektra, což je spojeno s tvarem VSH. Z obrázků vyplývá, že přivádíme-li větší část výkonu při vyšších frekvencích, trhlina snáze překoná bariery vytvářející se před jejím čelem a rychleji překoná přechodovou oblast ve které se formuje směr jejího magistrálního šíření, které probíhá již v souladu s Parisovým zákonem lomové mechaniky. Z obrázků vyplývá, že zatímco v případě rostoucího tvaru VSH potřebovala trhlina pro překonání výše zmíněné přechodové oblasti kolem 20 zatěžovacích bloků, u konstantního tvaru VSH to již bylo 27 a u klesajícího tvaru 43. Z obr.3 je zřejmé, že rychlost šíření má ve sledované přechodové oblasti náhodný charakter. Teprve po dosažení délky trhliny  $a = 3 \text{ mm}$  (včetně poloměru otvoru), odpovídající hodnotě  $\Delta K_{ef} \div 450 \text{ N/mm}^{3/2}$  nastává šíření dlouhých trhlin a rychlost šíření

v log souřadnicích je pro sledované 3 tvary VSH již prakticky lineární. Pro všechny 3 náhodné procesy platí stejný Parisův vztah

$$\frac{da}{dN_b} = C \Delta K_{ef}^m, \quad (4)$$

kde  $C$  a  $m$  jsou materiálové konstanty, jejichž velikost se pohybuje kolem hodnot  $C \cong 1,9011 \cdot 10^{-9}$  a  $m \cong 2,9083977$ . Rychlost šíření je zde závislá pouze na hodnotě rozkmitu faktoru intenzity napětí  $\Delta K_{ef}$  pro všechny tvary VSH. Vliv tvaru VSH aplikovaného zatěžovacího procesu na rychlost šíření dlouhých trhlin se již nijak výrazně neuplatňuje.

### 3. Koncepce řešení dané problematiky pro víceosé zatěžování.

Řešení je v současné etapě teprve ve stavu zrodu, protože experimentální práce byly teprve zahájeny. Zmíníme se zde proto stručně pouze o našem přístupu k této problematice, z něhož vyplyne postup i složitost jejího řešení.

Rada poznatků které jsme získali při studiu vazby mezi životností konstrukčního celku namáhaného jednoosým zatížením náhodného charakteru se známými statistickými charakteristikami bude zřejmě platná rovněž v případě víceosého zatěžování. Lze předpokládat, že bude možné i v tomto případě prokázat souvislost mezi tvarem VSH aplikovaných procesů zatížení a životností dané konstrukce. Řešení dané problematiky však bude mnohem složitější, protože v daném případě nelze vyjádřit velikost hysterezní energie na základě ploch hysterezních smyček. Při dekompozici průběhu namáhání metodou rainflow uzavřené hysterezní smyčky zřejmě vůbec nevzniknou a proto bude nutné najít jiný způsob, jak kontinuální změny energie do výpočtu životnosti vůbec zahrnout.

V uplynulém období 2005 – 2007 byl ve spolupráci s pracovištěm prof. Růžičky z ČVÚT Praha řešen grant GAČR 101/05/0199, zaměřený na výzkum únavového poškození v podmínkách víceosého zatěžování pro kombinované zatěžovací cesty. Byla diskutována aplikovatelnost různých dosud vyvinutých multiaxiálních kritérií výpočtu poškození na kritických rovinách, tak kritérií integrálních. Výsledky těchto prací byly testovány jak na publikovaných výsledcích pro harmonická zatěžování s různým fázovým posunem, tak na vlastních datech ze zkoušek s různým tvarem zatěžovacích cest pro materiál ČSN 4211523 – viz Papuga - Růžička. Hledání nového přístupu k predikci životnosti při kombinovaném zatěžování vycházejícím z korelační analýzy aplikovaných procesů zatížení je proto jen logickým pokračováním výzkumu předchozího.

Pro nalezení vazby mezi tvarem VSH a životností bude nutno realizovat rozsáhlý experimentální program při němž budou aplikovány různé kombinace náhodného zatížení. Zkoušky budou prováděny na trubkových vzorcích  $\phi$  30 mm hladkých a vrubovaných (příčný otvor  $\phi$  3 mm), vyrobených z materiálu 11523 při zatěžování náhodným tahem-tlakem a krutem. Pro zatěžování bude použit únavový stroj ZUZ 200-1 od fy. INOVA Praha pro kombinované zatěžování, s počítačovým řízením a softwarem umožňujícím aplikaci ITFC pro řízení zkoušky. Bude vyvinuta metodika pro generování obou náhodných procesů (pro sílu  $F$  i moment  $M_k$ ) s možností volby tvaru VSH. V první fázi předpokládáme aplikovat VSH ve tvaru klesajícím a pyramidy, přičemž snahou bude zajistit, aby při různých kombinacích měly tyto procesy stejně veliký přiváděný výkon. Protože lze očekávat, že regulace zadávaných náhodných procesů nebude tak dokonalá, aby se zejména v oblasti špiček nevyskytly mírné rozdíly mezi zadávaným a skutečným průběhem zatěžování v jednotlivých zatěžovacích blocích, bude využito metody ITFC pro kompenzaci chyb v regulaci řízení zatěžovacího

stroje. Skutečné průběhy sil a momentů budou ukládány a dále zpracovávány předem připravenými programy na počítači.

Nové zajímavé poznatky lze očekávat rovněž ze sledování šíření únavových trhlin při víceosém kombinovaném zatěžování. Vzhledem k náročnosti bude toto optické sledování omezeno na vrubované vzorky a vybrané kombinace zatížení, které budou mít největší vypovídající schopnost z hlediska jejich únavového porušování a budou tak moci přispět k formulaci nové metodiky pro odhad životnosti.

#### 4. Závěr

Řešením problematiky únavového porušování při kombinovaném náhodném zatěžování bychom chtěli hlouběji proniknout do podstaty únavového porušování při tomto složitém způsobu namáhání konstrukčního celku a objasnit všechny podstatné jevy, které se na tomto procesu uplatní. Předpokládáme, že provedené práce přispějí k zvýšení úrovně především v následujících oblastech:

- rozšíření poznatků spojených s mechanismem únavového porušování materiálu při kombinovaném způsobu namáhání
- ověření vazeb mezi VSH jednotlivých zatěžovacích procesů při kombinovaném způsobu namáhání
- generování zatěžovacích procesů s různými VSH
- vyvinutí numerické metody pro predikci životnosti s využitím znalosti VSH nebo hustoty pravděpodobnosti jednotlivých napěťových procesů
- ověření přesnosti navržené výpočtové metody porovnáním s výsledky experimentů prováděných na hladkých a vrubovaných trubkových vzorcích.

#### 5. Poděkování

Práce byla podpořena Grantovou agenturou ČR grantovým projektem č. 101/09/0904 a výzkumným záměrem Ústavu termomechaniky AV ČR, v.v.i. AV0Z 20760514.

#### 6. Literatura

Newman J.C. (1971). An improved method of collocation for stress analysis of cracked plates with various shaped boundaries. *NASA TND – 6376*, 1971.

Papuga J. & Růžička M. (2008) The new multiaxial criteria for high cycle fatigue computation *International Journal of Fatigue*, 30, 2008, pp. 58 – 66.

Svoboda, J., Václavík, M. & Balda, M. (2000). Vliv výkonové spektrální hustoty na životnost náhodně zatěžovaných konstrukcí. *Kolokvium Diagnostika a aktivní řízení*, Třešť 2000, pp 41-42, ISBN 80-214-1665-3