

ŠÍŘENÍ TRHLIN PŘI KOMBINOVANÉM NAMÁHÁNÍ S JEDNOU STATICKY A DRUHOU DYNAMICKY PŮSOBÍCÍ SLOŽKOU

Jaroslav Svoboda, Miroslav Balda, Vladislav Fröhlich¹

Abstract: *One of the partial aims of fatigue experiments made on tube form steel specimens armed with a lateral hole was to obtain the influence of a static load on fatigue life and a direction of a fatigue crack propagation under combined stress. The results of tests performed with constant stress of one of the components of the normal and shear stresses have revealed that the static stress influences final fatigue life while does not influence the crack direction.*

Keywords: *fatigue, combined stress, constant component, fatigue life, crack propagation*

1. ÚVOD

V technické praxi se často vyskytují případy, kdy konstrukční celek je zatěžován kombinovaným namáháním s jednou staticky a jednou dynamicky působící složkou. Příkladem tohoto způsobu zatížení mohou být turbinové lopatky namáhané staticky působící odstředivou silou a dynamicky ohybovou složkou. Dílčí práce provedené v rámci probíhajícího grantu byly zaměřeny na objasnění, jak tyto složky statického zatížení ovlivní celkovou únavovou životnost a směr šíření únavových trhlin. Experimenty byly provedeny na trubkových vzorcích s příčným otvorem, které byly namáhané kombinací tah-tlak – krut, přičemž v prvním případě byla statická složka volena tahová, v druhém krutová.

2. ROZBOR PROBLEMATIKY

Cílem provedených experimentů bylo zjistit:

- jakým způsobem ovlivní staticky působící složky kombinovaného zatížení výslednou životnost a jak lze poškozuující efekt těchto složek zahrnout do výpočtu;
- způsob ovlivnění směru šíření vzniklých únavových trhlin velikostí těchto statických složek.

Průběh dynamické složky zatížení byl zvolen harmonický, aby bylo možné získané životnosti vztáhnout přímo k počtu cyklů N příslušných experimentálně stanovených únavových křivek. Zkoušky byly provedeny na trubkových vzorcích s vrubem ve tvaru příčného otvoru o průměru 3 mm. Materiálem vzorků byla nízkouhlíková ocel ČSN 411523.1 se střední hodnotou pevností $R_m = 550$ MPa. Způsob zatěžování zkušebních vzorků je zřejmý z tab.1. V této tabulce jsou uvedeny rovněž získané životnosti. U prvních tří vzorků probíhaly zkoušky při konstantní amplitudě krutového napětí $\tau_a = \pm 100$ MPa a tahovém předpětí $\sigma_m = 0$; 100 a 200 MPa. U dalších tří vzorků byla zvolena konstantní amplituda střídavého tahu-tlaku $\sigma_a = \pm 140$ MPa a staticky působící krutové předpětí $\tau_m = 0$; 70 a 140 MPa. U všech zkušebních

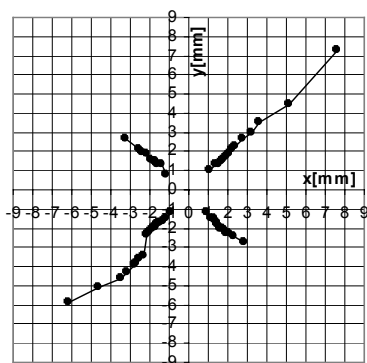
¹ Ing. Jaroslav Svoboda., Prof. Ing. Miroslav Balda, DrSc., Feng., Ing. Vladislav Fröhlich, Ústav termomechaniky AVČR, Centrum diagnostiky materiálů, Veleslavínova 11, 301 14 Plzeň, tel. 377236415, e-mail: svoboda@cdm.it.cas.cz, balda@cdm.it.cas.cz, frohlich@cdm.it.cas.cz

vzorků se sledovalo šíření trhlin s cílem zjistit, jak se projeví statická složka kombinovaného zatížení na směr šíření těchto únavových trhlin. Výsledky jsou uvedeny na obr.1 ÷ 6.

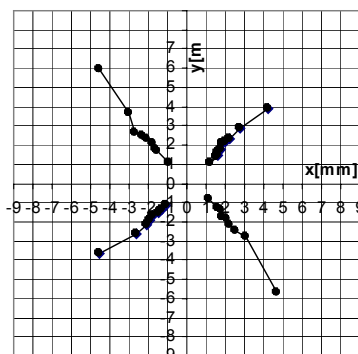
Tab.1 Parametry zatěžování a životnosti N_a zkoušených vzorků

Číslo vzorku	Stat. složka napětí [MPa]	Dyn. složka napětí [MPa]	Životnost v počtu cyklů N_a	
			do počátku trhliny	do lomu
1	$\sigma_m = 0$	$\tau_a = \pm 100$	150000	355032
2	$\sigma_m = 100$	$\tau_a = \pm 100$	135214	222042
3	$\sigma_m = 200$	$\tau_a = \pm 100$	70500	75555
4	$\tau_m = 0$	$\sigma_a = \pm 140$	300000	589824
5	$\tau_m = 70$	$\sigma_a = \pm 140$	110000	482885
6	$\tau_m = 140$	$\sigma_a = \pm 140$	73000	171062

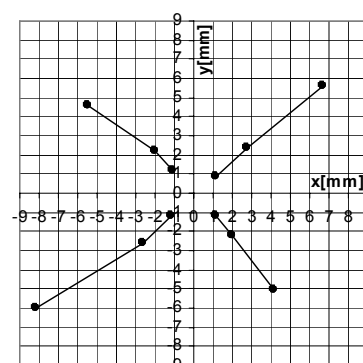
2.1 Šíření trhlin při konstantní amplitudě napětí $\tau_a = 100$ MPa :



Obr.1 $\sigma_m = 0$ MPa



Obr.2 $\sigma_m = 100$ MPa

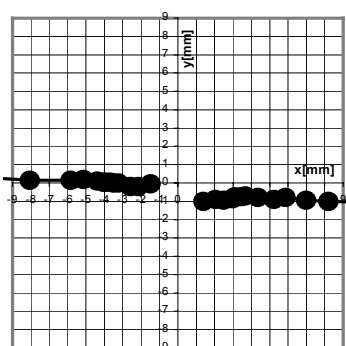


Obr. 3: $\sigma_m = 200$ MPa

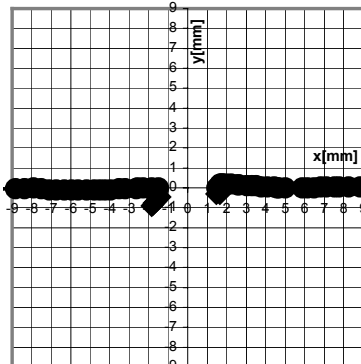
Z obrázků je zřejmé, že úroveň tahové statické složky namáhání neovlivňuje směr šíření únavových trhlin. Tento směr určuje ve všech případech pouze charakter dynamicky působící složky zatížení. Protože v daném případě tuto dynamickou složku tvořil harmonicky působící krut, šířily se tyto únavové trhliny pod úhlem 45° . Z tab. 1 však vyplývá, že úroveň staticky působícího tahového namáhání ovlivňuje rychlost šíření únavových trhlin, což je způsobeno rozevíráním těchto trhlin a tím ovlivněním velikosti plastických deformací na jejich čelech. Zvýšení rychlosti šíření únavových trhlin se pak projeví snížením výsledné únavové životnosti v závislosti na úrovni statické složky kombinovaného namáhání, jak to dokumentuje tab.1. Čím je tato statická složka vyšší, tím je menší rozdíl mezi počtem cyklů od počátku vzniku trhliny do lomu.

Experimentálně nebyl ověřen případ, zatěžování se zápornými složkami statického napětí σ_m , to znamená s tlakovým předpětím. Na základě uvedeného lze ale předpokládat, že tlakové namáhání bude vzniklé únavové trhliny uzavírat, což by ve svém důsledku mělo vést ke snížení rychlosti šíření vzniklých únavových trhlin a tím k získání vyšších únavových životností. Směr šíření trhlin by však ani v tomto případě tlaková složka statického předpětí ovlivnit neměla.

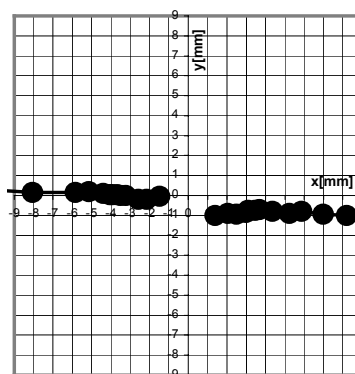
2.2 Šíření trhlin při konstantní amplitudě napětí $\sigma_a = \pm 140$ MPa :



Obr. 4: $\tau_m = 0$ MPa



Obr. 5: $\tau_m = 70$ MPa



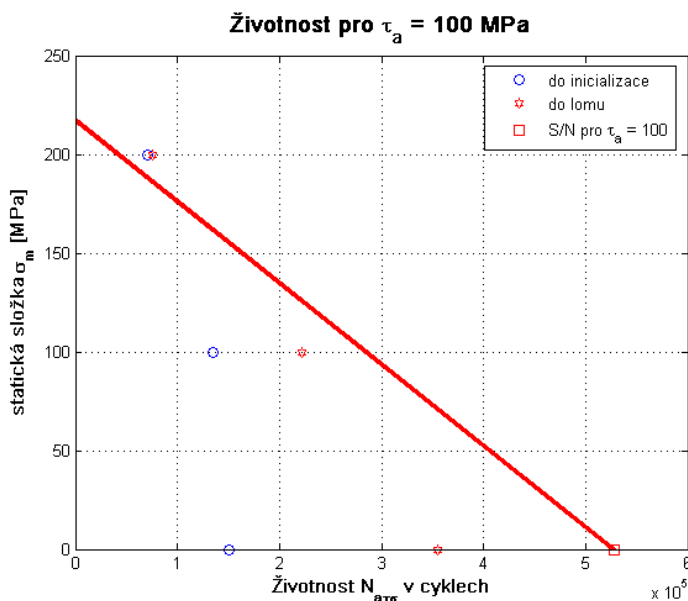
Obr. 6: $\tau_m = 140$ MPa

Z obr. 4, 5 a 6 je zřejmé, že rovněž v tomto případě, kdy statickou složku kombinovaného namáhání tvořil krut a dynamickou složku konstantní amplituda střídavého tahu-tlaku, se neprojevil vliv statické složky (krutu) na směr šíření trhlin u příčného otvoru. O směru šíření zde rozhodovala pouze dynamická složka zatěžování a trhliny se šířily kolmo na směr jí generovaného normálového napětí od tahu-tlaku. Staticky působící složka namáhání však opět významně ovlivnila výslednou únavovou životnost, jak lze zjistit z tab.1. Statický krut ovlivňuje rychlost šíření trhlin rozeviráním těchto trhlin podle 2. módu na rozdíl od prvního případu, kdy statickou složku tvořil tah.

3. HODNOCENÍ ŽIVOTNOSTI

3.1 Životnost vzorků při kombinaci napětí $\tau_a = \pm 100$ MPa , $\sigma_m = 0$; 100 a 200 MPa

Pro naše aplikované úrovně zatížení a pro amplitudu krutového napětí $\tau_a = \pm 100$ MPa je závislost životnosti uvedena na obr.7. Z obrázku je zřejmé, že staticky působící složka



Obr.7 Závislost životnosti na velikosti statické složky tahového napětí pro konstantní dynamickou amplitudu krutu $\tau_a = \pm 100$ [MPa]

normálového napětí od tahu snižuje v kombinaci s dynamicky působící složkou krutového napětí τ_a výslednou životnost poměrně značně. Čím vyšší je úroveň této statické složky, tím nižší bude výsledná životnost a rovněž menší rozdíl mezi počtem cyklů do vzniku trhliny a do lomu.

V kapitole 2.1 jsme uvedli, že úroveň statických složek tahového napětí σ_m neovlivňuje směr šíření únavových trhlin, který závisí pouze na dynamické složce - krutu (úhel 45° od osy vzorku). Lze proto předpokládat, že o únavové životnosti vzorku rozhoduje pouze smykové napětí. Staticky působící složka tahového napětí rozevívá vzniklou trhlínu podle 1. módu, čímž urychluje proces únavového porušování, který probíhá smykovým napětím podle 2. módu. Jak zahrnout tento mechanismus únavového porušování do výpočtu životnosti při sledovaném způsobu kombinovaného zatížení?

Kdyby zkušební vzorky byly zatěžovány pouze dynamickou složkou harmonického krutového napětí τ_a , mohli bychom jejich životnost stanovit z rovnice regresní čáry šikmé větve únavové křivky pro krut, jejíž body odpovídají 50% pravděpodobnosti lomu. Pro zkoušené trubkové vzorky s příčným otvorem byla již dříve stanovena rovnice této křivky ve tvaru

$$\log N_{a\tau} = 14,7679 - 4,5226 \log \tau_a . \quad (1)$$

Současně staticky působící složka tahového napětí σ_m nám sníží životnost $N_{a\tau}$ vypočtenou z rovnice (1) na hodnotu $N_{a\tau\sigma}$. Předpokládejme, že mezi nimi platí vztah

$$N_{a\tau\sigma} = k_\sigma N_{a\tau} , \quad (2)$$

kde k_σ je korekční součinitel, který je funkcí velikosti tahového napětí σ_m .

Na obr.7 je pro aplikovanou amplitudu dynamické složky krutového napětí τ_a vynesena závislost skutečných experimentálně stanovených životností $N_{a\tau\sigma}$ na úrovních statické složky tahového napětí σ_m . Rovnice přímky procházející v uvedeném obrázku bodem $N_{a\tau}$ stanoveným z regresní čáry únavové křivky má tvar

$$N_{a\tau\sigma} = -2422,178 \sigma_m + N_{a\tau} \quad (3)$$

kde $N_{a\tau} = 528080,3$ je počet cyklů na únavové křivce pro smykové napětí $\tau_a = 100$ MPa při $\sigma_m = 0$. Po dosazení tohoto výrazu do rovnice (2) získáme vztah pro výpočet korekčního koeficientu k_σ ve tvaru

$$k_\sigma = \frac{-2422,178 \sigma_m + N_{a\tau}}{N_{a\tau\sigma}} . \quad (4)$$

Pro případ nulového normálového napětí, tedy že $\sigma_m = 0$, je $N_{a\tau\sigma} = N_{a\tau}$, takže

$$k_\sigma = 1 - 2422,178 \frac{\sigma_m}{N_{a\tau}} . \quad (5)$$

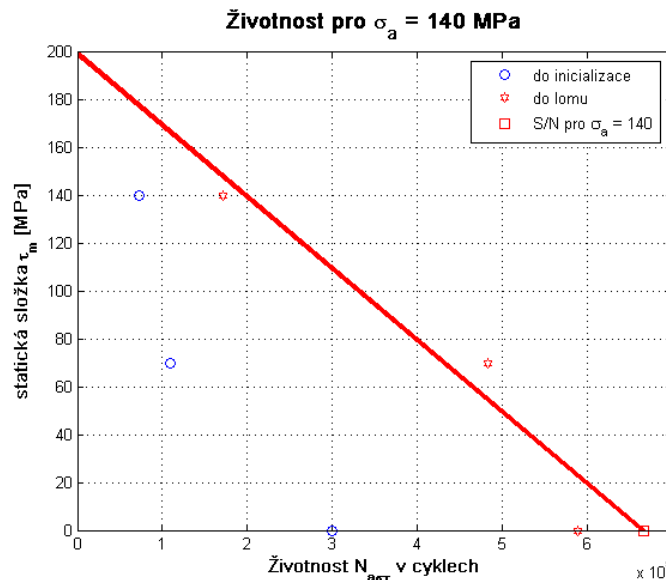
Z této rovnice je zřejmé, že $k_\sigma < 1$.

Tento vztah vycházející z rovnice přímky procházející bodem z únavové křivky na obr. 7 odpovídá amplitudě dynamického krutového napětí $\tau_a = \pm 100$ MPa. Pro jiné úrovně τ_a bude směrnice regresní přímky patrně odlišná. Pokud by však směrnice těchto regresních čar byly shodné (tj. regresní čáry byly rovnoběžné) s přímkou na obr.7, měla by rovnice (5) obecně využití, což však bude nutné ověřit další sadou experimentů.

3.2 Životnost vzorků při kombinaci napětí $\sigma_a = \pm 140$ MPa, $\tau_m = 0$; 70 a 140 MPa

Podívejme se nyní na druhý případ kombinovaného zatížení, kdy zkušební vzorky byly zatěžovány dynamickou složkou konstantní amplitudy normálového napětí $\sigma_a = \pm 140$ MPa a

staticky působícími složkami krutu τ_m . Životnosti jsou pro zvolené úrovně namáhání uvedeny rovněž v tab.1. Z tabulky vyplývá, že se zvyšující se hodnotou statické složky krutového napětí τ_m klesá životnost podobně jako v předešlém případě. O směru šíření únavových trhlin rozhoduje dynamická složka σ_a normálového napětí od tahu-tlaku jak je zřejmé z obr. 4 ÷ 6. Statická složka (v daném případě krutové napětí τ_m) se na směru šíření trhlin opět neuplatnila, zatímco na výsledné životnosti významně, jak to dokumentuje obr.8.



Obr. 8 Závislost životnosti na velikosti statické složky krutového napětí pro konstantní dynamickou amplitudu tahu-tlaku $\sigma_a = \pm 140$ [MPa]

Odlíšný způsob zatěžování se projevil na tvaru rovnice regresní přímky v obr. 8, která má tvar

$$N_{a\sigma\tau} = -3363,36\tau_m + N_{a\sigma}, \quad (6)$$

kde $N_{a\sigma} = 667395$ je počet cyklů na únavové křivce zkoušeného objektu při $\tau_m = 0$, který se vypočítal z rovnice pro její šikmou větev pro trubkové vzorky s příčným otvorem namáhané harmonickým tahem-tlakem, která se získala zpracováním experimentálních dat regresí podle ČSN 420368. Rovnice regresní čáry má tvar

$$\log N_{a\sigma} = 23,5323 - 8,2511 \log \sigma_a. \quad (8)$$

Korekční součinitel k_τ pro respektování vlivu konstantního smykového napětí τ_m na životnost zkušebního tělesa má tvar

$$k_\tau = 1 - 3363,36 \frac{\tau_m}{N_{a\sigma}}. \quad (7)$$

S jeho pomocí se vypočte životnost $N_{a\sigma\tau}$ z formule

$$N_{a\sigma\tau} = k_\tau N_{a\sigma} \quad (8)$$

Vypočítané životnosti $N_{a\sigma\tau}$ však budou opět platné jen pro úroveň amplitudy dynamického normálového napětí $\sigma_a = \pm 140$ MPa a jejich přesnost bude závislá na šířce rozptylového pásma únavové křivky. Z obr. 8 je zřejmé, že při statickém předpětí $\tau_m = 70$ MPa činí snížení životnosti vůči čistému harmonickému tahu-tlakem cca 35% a při předpětí $\tau_m = 140$ MPa již 71%. Toto snížení životnosti je způsobeno statickým rozevřením trhliny tentokrát podle 2. módu, zatímco únavové porušování při dynamickém zatěžování tahem-tlakem probíhalo podle 1. módu.

V obou obrázcích jsou vyneseny počty cyklů do počátku vzniku trhlin kroužky a počty cyklů do lomu hvězdičkami jimiž je proložena regresní přímka vycházející z bodu únavové křivky odpovídajícímu amplitudě dynamické složky.

4. ZÁVĚR

Hlavní poznatky z uvedené práce sledující vliv statického předpětí při kombinovaném zatěžování lze stručně shrnout do následujících bodů:

- Statické složky zatížení neovlivňují směr šíření únavových trhlin. Směr šíření určuje výhradně charakter dynamické složky zatížení.
- Úroveň statických složek ovlivňuje způsob a velikost rozevírání čela únavových trhlin. Tím ovlivňují rychlost jejich šíření a významně i celkovou životnost.
- S růstem normálového statického předpětí klesá z výše uvedených důvodů únavová životnost. To platí v případě rozevírání trhlin. V případě, že bude statické předpětí čelo trhliny svírat, lze očekávat naopak snížení rychlosti zatěžování a tím ovlivnění životnosti v opačném směru.
- V případě harmonického zatěžování lze pro hrubý odhad výsledné životnosti provést korekci počtu cyklů příslušné únavové křivky zavedením tzv. korekčních součinitelů k_σ resp. k_τ odvozených z regresních křivek uvedených na obr. 7 a 8. Tyto regresní křivky je však nutné stanovit experimentálně. Nebylo dosud prokázáno, že uvedené hodnoty korekčních koeficientů lze použít obecně pro různé úrovně dynamických složek napětí.

Poděkování:

Práce byla podpořena Grantovou agenturou ČR grantovým projektem č. 101/05/0199 a výzkumným záměrem Ústavu termomechaniky AV ČR č. AV0Z 20760514.

LITERATURA

- [1] Svoboda J., Balda M., Fröhlich V.: *Šíření trhlin u konstrukčních dílů namáhaných náhodným víceosým neproporcionálním zatížením*, In: Sborník konference Výpočtová mechanika 2003, Nečtiny 2003, s.429-436, ISBN 80-7082-999-0.
- [2] Wei – Ren Chen – Keer L. M.: *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.113, 1991, pp.222 – 227.
- [3] Radaj D.: *Ermüdungsfestigkeit – Grundlagen für Leichtbau, Maschinen – und Stahlbau*, In: Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 1995.