

PARAMETRY WÖHLEROVY KŘIVKY JINAK

M. Balda ¹

Úvod

Únava materiálů se vyšetřuje již 150 let. Vyznačuje se tím, že součást vystavená proměnlivému zatížení za jistých podmínek po určité době praská. Ukázalo se, že při harmonickém namáhání o amplitudě σ_a větší než mezní napětí σ_c praskne zkoušený vzorek po N_a cyklech. Závislost N_a na σ_a je nazývána po jednom ze zakladatelů nauky o únavě materiálů Wöhlerovou křivkou (S-N). Ta se zjišťuje experimentálně postupným zatěžováním (a zničením) řady vzorků. Doporučuje se, aby počet vzorků pro stanovení Wöhlerovy křivky a meze únavy σ_c byl roven alespoň dvaceti. S ohledem na nákladnost takového experimentu bývá často počet vzorků poloviční. I tak se může cena zkoušky blížit 10^5 Kč.

Hypotézy poškozování

Wöhlerova křivka je popsána následující jednoduchou exponenciální funkcí:

$$N_a \sigma_a^w = \text{konst} , \quad (1)$$

v níž exponent w závisí na materiálu a konstrukčním a technologickém provedení vzorku. Logaritmováním této rovnice dostáváme

$$\log N_a = a - w \log \sigma_a . \quad (2)$$

U ocelí existuje na Wöhlerově křivce bod zlomu, jemuž odpovídá kritická amplituda napětí – mez únavy σ_c – a jí odpovídající počet cyklů na mezi únavy N_c . Protože jde o bod Wöhlerovy křivky, musí i pro něj platit rovnice (1). To má za následek, že rovnici (1) lze psát i ve tvaru

$$N_a = N_c \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_a} \right)^w = 10^a / \sigma_a^w = A / \sigma_a^w . \quad (3)$$

Podobná rovnice platí i pro případ zatěžování při nenulových středních hodnotách σ_m cyklů:

$$N_{am} = N_{cm} \left(\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_a} \right)^w , \quad (4)$$

¹Prof. Ing. Miroslav Balda, DrSc., Nové technologie – Výzkumné centrum západočeského regionu, Velešlavínova 11, 301 14 Plzeň, e-mail: balda@cdm.it.cas.cz

v níž $N_{am} = N_a(\sigma_m)$ je počet cyklů o amplitudě σ_a a střední hodnotě σ_m a $N_{cm} = N_c(\sigma_m)$ počet cyklů do porušení při kritické amplitudě $\sigma_{cm} = \sigma_c(\sigma_m)$. Pro veličiny N_{cm} a σ_{cm} přijmeme vztahy z literatury [4] a [3], totiž

$$N_{cm} = N_c \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 \right] = N_c g_m, \quad \sigma_{cm} = \sigma_c \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_F} \right)^{k_H} = \sigma_c h_m. \quad (5)$$

První formule je parabolická a říká, že při $\sigma_m = 0$ je $N_c(0) = N_c$, kdežto pro $\sigma_m = R_m$ je počet cyklů nulový, protože již σ_m dosáhlo meze pevnosti. Druhá formule, popisující tzv. Haighův diagram, udává jak se mění kritická amplituda napětí σ_{cm} se středním napětím cyklu. Dosadíme-li tyto vztahy do rovnice (4), dotaneme

$$N_{am} = N_c \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_a} \right)^w g_m h_m^w. \quad (6)$$

Tento vztah je funkcí dvou proměnných, a to σ_a a σ_m . Jde tedy o plochu nad oběma proměnnými, která udává počet harmonických cyklů do porušení, tedy jakousi Wöhlerovu plochu. Při konstantnosti obou proměnných během zatěžování je možné určit i životnost zkoušeného objektu.

Pokud zatěžování nemá konstantní amplitudy a střední hodnoty cyklů je určení životnosti problematické. Typickými představiteli takového zatěžování jsou náhodné procesy, se kterými se setkáváme v provozu strojů a zařízení. Většina používaných postupů je založena na lineární kombinaci poškození. Postupy jsou založeny na myšlence, že relativní poškození d_{am} vyvolané jedním napětovým cyklem o amplitudě σ_a na střední hodnotě σ_m je nepřímo úměrné počtu cyklů do porušení N_{am} . Celkové relativní poškození D je potom sumou všech dílčích relativních poškození. Tato základní myšlenka je rozvíjena různými autory do různých hypotéz výpočtu relativního poškození. Uvedeme alespoň základní z nich:

Palmgren-Miner

Tato hypotéza využívá beze změn formulí (6) jen s tím omezením, že cykly $\sigma_{am} = \sigma_a(\sigma_m)$ nepoškozují objekt. Potom relativní poškození se stanoví jako

$$D_{PM} = \frac{1}{N_c \sigma_c^w} \sum_{am} \frac{\sigma_{am}^w}{g_m h_m^w} \Big|_{\sigma_{am} > \sigma_{cm}}. \quad (7)$$

Jde o nejstarší hypotézu, která dává nejmenší odhad poškození a není tedy na bezpečné straně. Větší poškození lze odhadovat pomocí jiných hypotéz.

Haibach

Podle této hypotézy poškozují všechny cykly, avšak ty, které leží pod mezí únavy, se na celkovém poškození podílejí méně. Únavová křivka pod mezí únavy má jiný sklon daný exponentem $2w - 1$. Relativní poškození se potom vypočte jako

$$D_H = D_{PM} + \frac{1}{N_c \sigma_c^{2w-1}} \sum_{am} \frac{\sigma_{am}^{2w-1}}{g_m h_m^{2w-1}} \Big|_{\sigma_{am} \leq \sigma_{cm}}. \quad (8)$$

Doplňkovým druhým členem se respektuje skutečnost, že cykly, které u harmonického zatěžování ležely pod mezí únavy a nemohly proto vyvolat trhlinu, která by se dále šířila až do lomu, mohou při změněných podmínkách vzniklých dílčím porušením objektu mohutnějšími cykly přispívat k porušování v kořeni trhliny při jejím šíření.

Corten-Dolan

Tato hypotéza je široce využívána v průmyslové praxi, protože, jak se uvádí v literatuře, dává nejlepší odhady doby života součástí [2]. Využívá modifikovaný předpis pro počet cyklů do porušení:

$$N_{ac} = N_{cm} \left(\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{a,\max}} \right)^w \left(\frac{\sigma_{a,\max}}{\sigma_a} \right)^{k_{CD}w}. \quad (9)$$

Po dosazení za N_{cm} a σ_{cm} podle formulí z (5) dostaneme

$$N_{am} = \frac{N_c \sigma_c^w}{\sigma_{a,\max}^{k_{CD}w}} g_m h_m^w \sigma_{a,\max}^{(k_{CD}-1)w}. \quad (10)$$

Sumací všech dílčích relativních poškození jako převratných hodnot k N_{am} dostaneme celkové relativní poškození ve tvaru

$$D_{CD} = \frac{1}{N_c \sigma_c^w \sigma_{a,\max}^{(k_{CD}-1)w}} \sum_{am} \frac{\sigma_a^{k_{CD}w}}{g_m h_m^w}, \quad (11)$$

kde sčítání probíhá přes všechny cykly procesu namáhání bez ohledu na mez únavy.

Nové přístupy ke zjišťování únavové křivky

Základním problémem klasických zkoušek na určení Wöhlerovy křivky je délka trvání všech zkoušek a z ní vyplývající vysoká cena zakázky. Pokud by se měl celý experiment zlevnit, bylo by zapotřebí výrazně zmenšit počet zkoušek. To lze zajistit jedinečně tím, že se změní koncepce zkoušení, např. tím, že za buzení nepoužijeme procesy harmonické, ale náhodné. Ty, jsou-li vhodně vybrány, obsahují celou paletu cyklů o různých amplitudách a mohly by teoreticky nahradit zatěžování harmonickým signálem. Náhodné procesy σ_k jsou obvykle organizovány v blocích, které se po delší době opakují. Jistá potíž je však s ohodnocením poškození vyvolaného zatěžovacími cykly o různé mohutnosti. K tomu je nutné použít některou z výše uvedených hypotéz, což může být zdrojem jistých potíží.

Parametry Wöhlerovy křivky jsou, jak již bylo naznačeno, mez únavy σ_c , počet cyklů N_c na mezi únavy a exponent w šikmé větve. K danému problému lze přistupovat jako k identifikační úloze s výše uvedenými parametry k identifikaci.

Přístup A

Na danou úlohu lze pohlížet jako na problém nejmenších čtverců vyplývajících z řešení $k \geq 3$ nelineárních algebraických rovnic, které lze postavit z výsledků k únavových zkoušek, k nimž byly použity zatěžovací procesy $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$, které se navzájem lišily alespoň měřítkem. Při realizaci všech zkoušek do lomu známe relativní poškození všech použitých vzorků, která dosahují hodnot $D(\sigma_k) = 1$. Úloha nejmenších čtverců je potom definována jako nalezení

$$\min \sum_{\forall k} r_k^2, \quad \text{kde} \quad r_k = D(\sigma_k, \sigma_c, N_c, w) - 1. \quad (12)$$

Pro řešení (přeuročeného) systému nelineárních algebraických rovnic je v Optimization Toolboxu programu MATLAB funkce `lsqnonlin` s propracovaným postupem výběru nejvhodnějších algoritmů řešení.

Rovnice (2) ukazuje, že šikmá větev Wöhlerovy křivky je určena pouze dvěma parametry a to konstantou $A = N_c \sigma_c^w$ a exponentem w . Z toho plyne, že snaha po určení všech třech parametrů (σ_c, N_c, w) nepovede k cíli. Mohla by však vyústit v nalezení již zmíněných parametrů $a = \log A$ a w žádaných i normou ČSN 42 0368 [5].

Přístup B

Jen v případě, že by se ke zkouškám použil identický zatěžovací proces σ , ale při jednotlivých zkouškách s různými intenzitami (měřítka) s_k , potom za předpokladu platnosti Palmgrenovy-Minerovy hypotézy existuje jistá šance i na identifikaci meze únavy σ_c , která bude sloužit jako hranice oddělující části procesů o amplitudách menších, než je mez únavy. Potom by šlo o problém nalezení

$$\min \sum_{\forall k} \left[D_{\text{PM}}(s_k \sigma \mid_{\sigma_{am} > \sigma_{cm}}, \sigma_c, N_c, w) - 1 \right]^2. \quad (13)$$

Metodu pro řešení úloh tohoto druhu, při nichž hledaná neznámá (zde σ_c) odděluje část dat, se nepodařilo najít. Patrně není dosud úloha tohoto typu řešena.

Dále je popsán pokus o použití tohoto přístupu při kombinaci výše uvedené metody `lsqnonlin` s vlastní procedurou `goldsec` jednosměrného hledání pomocí zlatého řezu.

Přístup C

Pro minimalizaci funkce definované rovnicí (12) lze použít i metod obecné optimalizace. K tomuto účelu se využila matlabovská funkce `fminunc` ze stejného balíku pro optimalizaci, Optimization Toolbox. Identifikovanými neznámými byly A a w z rovnice (3). Cílová funkce měla tvar

$$S = \sum_{k=1}^n \left(\frac{D_k}{D_o} - 1 \right)^2, \quad \text{kde} \quad D_o = 1/N_b \quad (14)$$

s N_b rovným počtu bloků do porušení. V programu `NswFitN`, je sice požadováno zadat všechny parametry reálné Wöhlerovy křivky, ale to jen pro nakreslení zadání a pro eventuální použití Palmgrenovy-Minerovy hypotézy.

Numerický experiment

Přístup A

Pro zkoušky se použil simulovaný model materiálu i procesů. Materiálový model měl vlastnosti uvedené v tabulce

| Materiál | | | Proces G1 | | |
|------------|-------|-----|-----------|-------|-------|
| σ_c | N_c | w | s_1 | s_2 | s_3 |
| 225 | 1e7 | 8 | 850 | 750 | 680 |

Proces G1 o 8192 vzorcích byl před řadou let navzorkován při zatěžování zkušební tělesa náhodným procesem na únavovém zkušebním stroji Instron v tehdejší Ústavu technologie a spolehlivosti, dnes Ústavu termomechaniky-CDM AVČR. Veličiny s_k jsou použita měřítka pro vytvoření tří procesů lišících se pouze mohutností. Byla volena tak, aby ve všech případech část cyklů zatěžovacích procesů byla pod mezí únavy a část poškozovala.

Za pomoci metody stékání deště (viz např. [1]) a hypotézy Palmgrena a Minera se pro každý z procesů vypočítalo teoretické poškození. Poté se z počátečních odhadů volených uživatelem řešila identifikační úloha. Jak se očekávalo, nepodařilo se procedurou `lsqnonlin` najít dobré řešení pro σ_c a N_c na rozdíl od exponentu w , který vycházel dobře. Vysvětlení bylo nalezeno v malé citlivosti kriteriální funkce v prostoru parametrů na veličině $A = N_c \sigma_c^w$. Proto se další pokusy zaměřily na přístup B.

Přístup B

Při běžích programu zpracovaného pro případ A se zjistilo, že funkční hodnota kriteriální funkce – sumy kvadrátů reziduí – se mění, i když v nepatrných hodnotách, se vzdáleností řešení od hodnot generujících parametrů. Proto byl program z přístupu A přepracován na verzi B, ve které se původní identifikace parametrů N_c , σ_c , w vnořila do optimalizační procedury `goldsec` pro minimalizaci hodnoty kriteriální funkce získané ve vnitřní identifikaci změnou jediného parametru N_c při druhých nezměněných.

```
s_c = 225.0000 =>
N_c = 10000000.0000 =>
w = 8.0000 =>
nsig = 1.0000 =>
N = 8192.0000 =>
file = G1 =>
Scale x = [800, 750, 680] =>
^Nc = 9000000.0000 => 8e6
^sc = 230.0000 => 190
^w = 7.0000 => 5
tol = 10000.0000 =>
ipr = 1.0000 => 0
```

Ukázalo se, že tento postup konvergoval dokonale v dosti širokých mezích volby počátečních hodnot parametrů pro simulovanou úlohu. Tento výsledek se však dal očekávat, protože i pro zpracování byla použita kombinace metody stékání deště s hypotézou Palmgrena- Minera, takže výchozí data byla bez měřicích chyb.

| | | | | |
|-----------|-------|-------|-----------|----|
| 8.000e+06 | 231.8 | 8.026 | 5.258e-07 | 53 |
| 8.400e+06 | 230.2 | 8.013 | 2.825e-07 | 53 |
| 8.800e+06 | 228.7 | 8.006 | 1.387e-07 | 57 |
| 9.400e+06 | 226.7 | 7.999 | 2.774e-08 | 53 |
| 1.030e+07 | 224.1 | 7.999 | 3.592e-09 | 53 |
| 1.165e+07 | 220.7 | 8.000 | 8.868e-08 | 61 |
| 1.025e+07 | 224.3 | 7.999 | 5.428e-09 | 53 |
| 1.079e+07 | 222.8 | 7.999 | 9.614e-08 | 53 |
| 9.931e+06 | 225.2 | 8.000 | 2.905e-09 | 53 |
| 9.728e+06 | 225.8 | 8.000 | 1.248e-08 | 53 |
| 1.005e+07 | 224.8 | 7.999 | 1.821e-08 | 53 |
| 9.853e+06 | 225.4 | 8.000 | 6.435e-09 | 53 |
| 9.979e+06 | 225.1 | 8.000 | 8.509e-10 | 53 |
| 1.000e+07 | 225.0 | 8.000 | 3.631e-10 | 53 |
| 1.002e+07 | 224.9 | 8.000 | 1.083e-09 | 53 |
| 9.997e+06 | 225.0 | 8.000 | 1.089e-10 | 53 |
| 9.990e+06 | 225.0 | 8.000 | 3.852e-10 | 53 |
| 1.000e+07 | 225.0 | 8.000 | 9.353e-11 | 53 |
| 1.000e+07 | 225.0 | 8.000 | 1.930e-10 | 53 |
| 1.000e+07 | 225.0 | 8.000 | 5.207e-11 | 53 |

Z výstupu běhu programu je patrné, že úloha konvergovala ze zadaných odhadů parametrů (předcházených znakem ^), které byly zadány dosti vzdáleně od skutečnosti, k přesným hodnotám simulovaného materiálu. V tabulce pod vstupními daty jsou postupně v jednotlivých řádkách výsledky řešení pomocí funkce `lsqnonlin` vyvolávané procedurou `goldsec`. Informace ve sloupcích jsou postupně: N_c , σ_c , w , $\sum r_i^2$ a nakonec počet výpočtů kriteriální funkce v `lsqnonlin`. Zde r_i je reziduum v i -té iteraci. Je definováno jako

$$r_i = D_{PMi} - D_{PM0}. \quad (15)$$

```
Nc = 1.000e+07 sc = 225.0 w = 8.000
fun = 5.207e-11 it = 20
```

Vyzkoušení metody na reálném experimentu nebylo možné, protože nebyla k dispozici data

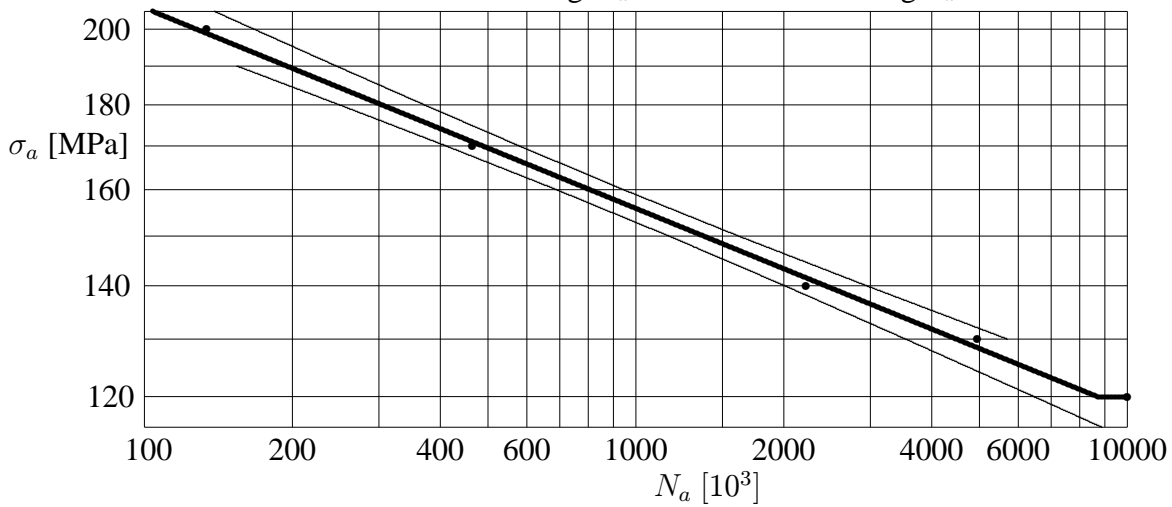
z alespoň tří nezávislých měření při různých úrovních namáhání. Toto je podstatná podmínka, protože pro nalezení tří neznámých musí soustava obsahovat alespoň tři algebraické rovnice.

Přístup C

Protože k dispozici byla pouze měření se zatěžovacím procesem σ o dvou různých měřících s_k , nebylo možno použít přístup B. Zatěžovací proces se jménem `rostouci.mat` a počty bloků do lomu se získaly z měření provedených v Centru diagnostiky materiálů Ústavu termomechaniky AVČR v rámci již dříve ukončeného výzkumu [6]. Zkoušeny byly ploché vzorky s otvorem uprostřed vyrobené z materiálu ČSN 41 1523.1. Na těchto vzorcích byla rovněž v

minulosti odměřena Wöhlerova křivka z poměrně malého počtu (5) zkoušek. Je uvedena na obrázku ?? i s 90% pásmem spolehlivosti, vše vyhodnoceno podle již zmíněné normy ČSN.

$$\text{ČSN 41 1523.1: } \log N_a = 24.1300 - 8.2678 \log \sigma_a$$

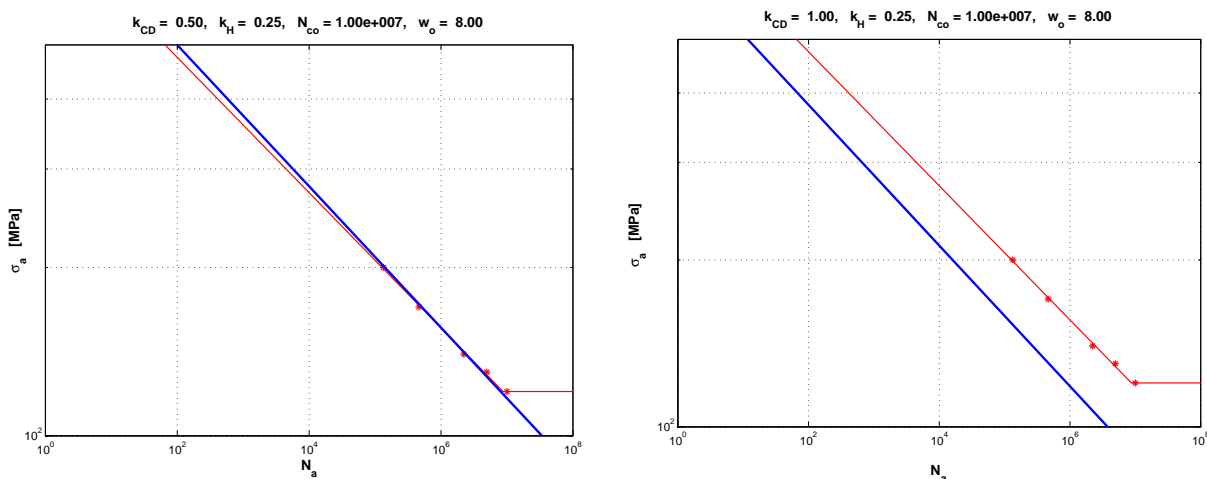


Wöhlerova křivka zkušebních těles

Přehled dat o použitých zkouškách při zatěžování náhodnými procesy je uveden v tabulce

| $\sigma_{a, \max}$ [MPa] | Počet bloků do lomu | | |
|--------------------------|---------------------|-------|----|
| 270 | 140 | (100) | |
| 300 | 57 | 65 | 62 |

Údaj v závorce nebyl do zpracování zahrnut, protože silně vybočuje z mezí (outlier). Výsledky zpracování jsou uvedeny v obrázcích ??-.



Corten-Dolan:

a) $k_{CD} = 0,5$

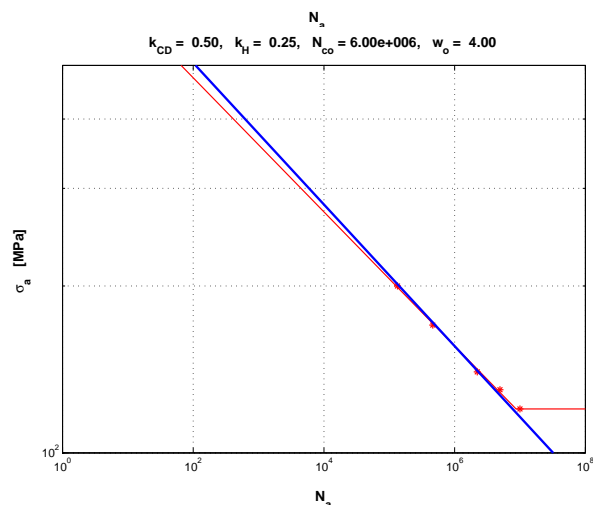
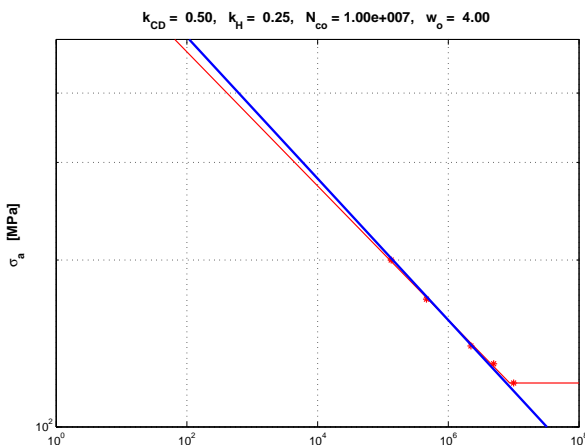
b) $k_{CD} = 1,0$

Z obrázku ??a je patrné, že zidentifikované parametry A a w dobře nahrazují Wöhlerovu křivku získanou klasickým způsobem. V obrázku ??b je vyneseno výsledky identifikace pro $k_{CD} = 1$, což odpovídá stavu, kdy všechny cykly poškozují, tedy jako by šikmá větev Wöhlerovy křivky stále pokračovala pod mezí únavy. Protože podobný výsledek se dostane i při

použití hypotézy Palmgrenova a Minera, nelze ani jednu z obou posledních alternativ doporučit k používání, protože dávají takřka o řád rozdílné výsledky než klasická zkouška.

Pro ilustraci běhu programu NswFitN je ve vedlejším sloupci otisk protokolu, který vystupuje i na obrazovce. V prvním odstavci je zadání vstupních dat. Intenzivně se v celém programu využívá funkce `inp.m`, která umožňuje operativní zadávání dat s implicitní nápovědou [7]. Za ní vystupuje dvojice znaků `=>`. Pokud se odpoví klávesou `Enter`, přijme se implicitní hodnota. Jinak lze zadat jinou hodnotu.

Další odstavce tvoří zadání dat a výsledky optimalizace v parametrické studii, v níž byly pouze minimální odchylky od implicitního zadání. Parametrická studie běží v cyklu, který se ukončuje zadáním `-1` za k_{CD} .



Výsledky běhů s rozdílným zadáním vzdáleným od optimálního

Pro informaci uživatele ve výsledcích vystupuje ještě čas spotřebovaný dekompozicí signálu do amplitud a středních hodnot plných cyklů a časy pro optimalizaci. Dále tam najdeme

```
*****
FATIGUE PARAMETERS                                03-Sep-2002

sigma_c = 120.0000 =>
N_c      = 8700000 =>
exp. w   = 8.2678 =>
nsig     = 2 =>
N        = 1200000 =>
file     = rostouci =>
Scale x  = [300, 270]/32767 =>
N blocks = [184/3, 140] =>
R_m      = 550.00 =>
s_F      = 550.00 =>

Signal decomposition - wait => 18.35 [s]

*****
k_CD     = 0.5000 =>
k_Haigh  = 0.2500 =>
^N_c     = 10000000 =>
^w       = 8.0000 =>

Optimization - wait => 43.66 [s]

fun = 4.1230e-005 cnt = 1290 flg = 0
A   = 2.3081e+023 (N_c = 8.0319e+006)
w   = 7.9158      Figure # = 0 => 1
                        file = Fig001.fig

*****
k_CD     = 0.5000 => 1
k_Haigh  = 0.2500 =>
^N_c     = 10000000 =>
^w       = 8.0000 =>

Optimization - wait => 39.95 [s]

fun = 1.5384e-005 cnt = 1429 flg = 0
A   = 2.1926e+022 (N_c = 8.9956e+005)
w   = 7.8814      Figure # = 2 =>
                        file = Fig002.fig

*****
k_CD     = 1.0000 => .5
k_Haigh  = 0.2500 =>
^N_c     = 10000000 =>
^w       = 8.0000 => 4

Optimization - wait => 81.38 [s]

fun = 2.0297e-013 cnt = 2369 flg = 0
A   = 1.4713e+023 (N_c = 7.7322e+006)
w   = 7.8297      Figure # = 3 =>
                        file = Fig003.fig

*****
k_CD     = 0.5000 =>
k_Haigh  = 0.2500 =>
^N_c     = 10000000 => 6e6
^w       = 8.0000 => 4

Optimization - wait => 83.84 [s]

fun = 6.1701e-013 cnt = 2450 flg = 0
A   = 1.4713e+023 (N_c = 7.7321e+006)
w   = 7.8297      Figure # = 4 =>
                        file = Fig004.fig

*****
k_CD     = 0.5000 => -1
```

konečnou hodnotu kritériální funkce jako fun, počet jejích výpočtů a návěští, zda je řešení v rámci žadáných tolerancí $f_{lg}=0$. K zásadním výsledkům patří identifikované veličiny, tj. konstanta $A = N_c s_c^w$ z rovnice (3), a exponent Wöhlerovy křivky w . Vpravo od nich vystupují podružné informace, jako jsou počet cyklů na zadané mezi únavy mezi únavy N_c a pod ním nabídka čísla obrázku, ze které se, v případě potvrzení nebo zadání nenulové hodnoty vygeneruje, a jméno souboru, kam bude uložen.

Závěr

Předložený příspěvek naznačil možné nové přístupy k řešení zrychleného nalezení parametrů únavové křivky. Nelze říci, že je problém beze zbytku vyřešen, protože se stále ještě naráží na překážky technické i formální. Technickými překážkami jsou zatím jisté slabiny použité metodiky spočívající v nedokonalosti identifikace meze únavy a s tím spojené nutnosti zdokonalení a ověření vhodného identifikačního postupu na reálných datech. Formálními překážkami jsou bariéry postavené normami ČSN o zkoušení kovů na únavu [5].

Úvodní zkoušky ukázaly, že nejlepší výsledky poskytuje zatím metoda optimalizace popsaná v přístupu C s využitím hypotézy Cortenovy-Dolanovy s koeficientem $k_{CD} = 0,5$. Jakmile budou k dispozici vhodná data, bude učiněn pokus o realizaci plné identifikace parametrů Wöhlerovy křivky včetně meze únavy.

Literatura

- [1] Balda M.: Softwarové zabezpečení analýzy měření provozních zatížení. IN: Sb. konf. ÚMS SAV Bratislava „Prevádzkove zaťaženie strojních a stavebných konstrukcií“, Vysoké Tatry, 1976
- [2] Vojtíšek J., Proškovec J.: Výpočet únavové životnosti strojních součástí při náhodných stacionárních zatíženích. IN: Sb. konf. ÚMS SAV Bratislava „Dynamické a pevnostné problémy strojníckych konstrukcií“, Pezinok, 1978
- [3] Růžička M., Hanke M., Rost M.: Dynamická pevnost a životnost. Skriptum ČVUT v Praze, 1989
- [4] Balda M.: Optimalizace konstrukcí z hlediska únavové životnosti. IN: Sb. konf. ZČU FAV KMM Plzeň „Výpočtová mechanika 95“, Pernink, pp. 22-29, 1995
- [5] ČSN 42 0368 Zkoušky únavy kovů. Statistické vyhodnocování výsledků zkoušek únavy kovů. Úřad pro normalizaci a měření, Praha, 1973
- [6] Svoboda J., Balda M.: Návrh metodiky výpočtu náhodně zatěžovaných konstrukcí. Výzk. zpráva ÚT-CDM AVČR Z1308/01, Plzeň, 2001
- [7] Balda M.: Užitečné funkce pro MATLAB. IN: Sb. konf. „MATLAB 2000“, Humusoft, Praha, 2000, ISBN 80-7080-401-7

PARAMETERS OF S-N CURVES ANEW

New approaches to finding the parameters of S-N curves are studied. They are based on the processing of random loading fatigue tests. The obtained results are in a good agreement with those obtained by the classical way.

Poděkování: Příspěvek vznikl za podpory grantu č. LN00BO84 MŠMT České republiky s využitím výsledků zkoušek provedených v ÚT-CDM AVČR.