



Úvod

Součásti strojů, vozidel a konstrukcí jsou často vystaveny opakovanému zatěžování, také nazývanému cyklické zatěžování. Výsledné cyklické napětí může vést k mikroskopickému poškození materiálu. V případě, že toto napětí je menší než mez pevnosti daného materiálu, poškození se kumuluje s pokračujícím cyklováním pokud nedojde k rozvoji trhliny, případně k jinému poškození jež vede k lomu součásti. Takovýto proces kumulace porušení, jež vede k lomu účinkem cyklického zatěžování, se nazývá únava. Použití tohoto termínu má logiku, protože při cyklickém zatěžování dochází k postupným změnám v materiálu a tím ke ztrátě schopnosti odolávat vnějšímu zatěžování.

Havárie způsobené únavou materiálu jsou sledovány již více než 150 let. Jednou z prvních studií je práce W. A. J. Alberta z roku kolem 1828, který se zabýval vlivem cyklického zatěžování na řetězy těžebních věží v dolech. Termín únava poprvé použil Francouz J. V. Poncelet v knize o mechanice v roce 1839. Únava byla studována v polovině minulého století řadou vědců z různých zemí v souvislosti s haváriemi vozidel, os železničních kol, hřídel, ložisek a nosníků mostů.

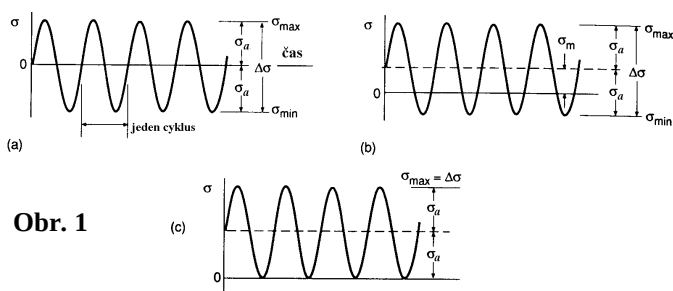
Nejvýznamnější jsou práce německého železničního inženýra Augustina Wöhlera, které začaly v 50-tých letech minulého století. Wöhler položil základ strategie, která umožňuje vyloučit havárie způsobené únavou. Základem této strategie jsou únavové zkoušky litin, ocelí a dalších kovů při ohybovém, torzním i osovém zatěžování. Wöhler také ukázal, že únavové chování materiálu je ovlivněno nejen amplitudou napětí, ale i hodnotou středního napětí. Pokračovatelé Wöhlera, Goodman a Gerber, zpracovali odhad vlivu středního napětí na únavovou životnost součástí. Podrobnější studium únavy, zvláště z hlediska fyzikálně metalurgické podstaty, spadá do období padesátých let tohoto století. V tomto období vzniká z iniciativy prof. F. Piška Ústav fyzikální metalurgie v Brně. Práce skupiny prof. Mirko Klesnila proslavily tento ústav ve světě a to právě na poli studia fyzikálně metalurgické podstaty únavového porušení kovů.

V současné době existují tři hlavní přístupy pro rozbor namáhání a návrh bezpečné konstrukce z hlediska únavového porušení. Tradiční přístup, který je základním přístupem zpracovávaným od roku 1955 do dneška, je založen na rozboru nominálních (středních) napětí v součásti. Nominální napětí, jež vyjadřuje odolnost součástí vůči cyklickému zatěžování, je určeno jednak amplitudou napětí a středním napětím, případně určitým přírůstkem z hlediska vlivu koncentrátorů napětí tj. drážek a otvorů. Tento přístup se označuje napětíový přístup (měkké zatěžování). Druhý přístup je přístup deformační (tvrdé zatěžování), který zahrnuje mnohem podrobnější analýzu porušení součástí s vruby. Oba přístupy vedou ke zjišťování materiálové charakteristiky – křivky únavového života. V konstruktérské praxi se pak využívá těchto křivek k tomu, aby v projektované době provozu konstrukce nebyl naplněn únavový život, tj. nedošlo k únavovému porušení. Tato konstruktérská filozofie se označuje názvem filozofie bezpečného života (save live). Z historického hlediska mladší konstruktérskou filozofií je filozofie bezpečného lomu (failure save). Tato filozofie je založena na lomové mechanice – z pružnosti příp. nauky o materiálu známe historii britských tryskových letadel Comet a z ní

odvozený Parisův zákon šíření únavové trhliny, který se používá pro popis šíření únavové trhliny.

2. Definice a způsob zkoušení

Diskuse o napětíovém přístupu začíná jistým zjednodušením skutečnosti. Praktické aplikace a také řada únavových zkoušek materiálu zavádí cyklování mezi maximálním a minimálním napětím, jejichž úrovně jsou konstantní. Hovoříme o zatěžování konstantní amplitudou napětí.



Obr. 1

Rozkmit napětí $\Delta\sigma$ je rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou napětí. Střední hodnota maximálního a minimálního napětí je střední hodnota napětí σ_m . Hodnota σ_m může být buďto nulová – obr. 1 a, příp. nenulová obr. 1 b; poloviční hodnota rozkmitu je označována jako amplituda napětí σ_a – což je cyklická složka napětí, která je namodulována na statické složce napětí - σ_m . Matematické výrazy definující jednotlivá napětí jsou

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}, \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \quad \sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (1)$$

Místo termínu amplituda napětí se někdy používá termín alternující napětí. Dále je možno říci, že

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a, \quad \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (2)$$

Znaménka hodnot σ_a i $\Delta\sigma$ jsou vždy kladná, dále $\sigma_{\max} > \sigma_{\min}$ v případě, že tahovému napětí přisoudíme kladné znaménko. Hodnoty $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$ a σ_m mohou být kladné nebo záporné.

K popisu zátěžného cyklu se používají i hodnoty poměru výše uvedených proměnných

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, \quad P = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (3)$$



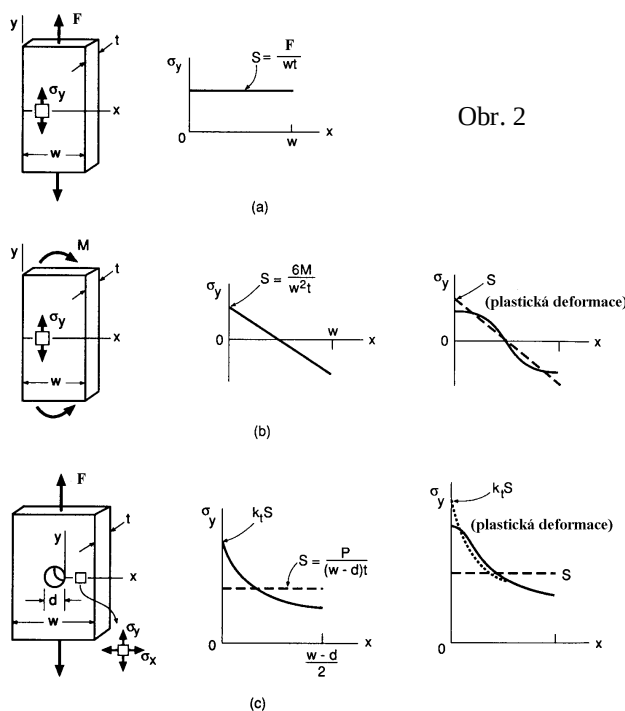
Kde R se označuje jako napětíový poměr, $P(A)$ amplitudový poměr nesymetrie cyklu. Některé další vztahy lze odvodit ze základních vztahů.

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_{\max}(1-R), \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2}(1+R)$$

$$R = \frac{1-P}{1+P}, \quad P = \frac{1-R}{1+R} \quad (4)$$

Cyklické zatěžování s nulovým středním napětím je charakterizováno jedinou hodnotou napětí – amplitudou σ_a , nebo napětím $\sigma_{\max}$. V případě, že střední napětí je nenulové, potom k charakteristice zátěžného cyklu je třeba dvou nezávislých veličin. Příklad některých používaných kombinací: σ_a a σ_m , R a $\Delta\sigma$, $\sigma_{\max}$ a $\sigma_{\min}$ případně σ_a a P (Symetrický cyklus $\Rightarrow \sigma_m = 0$, nebo $R = -1$; Pulzující cyklus $\Rightarrow \sigma_{\min} = 0$, nebo $R = 0$).

Prakticky stejný systém indexace se používá i v případě jiných proměnných jako např. deformace ε , zatížení (síla) F , ohybový moment M a nominální napětí S . Např. $F_{\min}$ a $F_{\max}$ je minimální a maximální zatížení, ΔF je rozkmit zatížení, F_m je střední zatížení. V případě řízené deformace se např. amplitudový poměr nesymetrie



Obr. 2

cyklu označuje jako R_ε .

3. Lokální napětí versus nominální napětí

Stejně jako v předcházejících úvahách i v případě únavy se odlišuje napětí v bodě(σ) a nominální nebo průměrné napětí (S) – proto jsou zde různé symboly. V případě tahové zkoušky jsme měli písmeno S vyhrazeno pro průřez, v úvahách o napětí je S nominální napětí. Nominální napětí je vypočtené ze zatížení nebo momentu síly, případně jejich kombinací podle jisté konvence a pouze v některých případech je napětí S rovno σ . Uvažme tři případy, jak jsou uvedeny na obr. 2

V případě jednoduchého osového zatěžování (a), napětí σ je všude stejné a tak je rovno střední hodnotě S ($=F/A$, kde A je průřez). V případě ohybu je konvence počítat S ze vztahů uvažujících pouze elastickou deformaci, $S = M.a/I$, kde a je vzdálenost povrchu od neutrální osy a I je moment průřezu. Proto, $\sigma = S$ na povrchu ohýbané součásti, kdekoli jinde je ovšem σ menší. V případě, že dochází k plastické deformaci, rozdělení napětí se stává nelineární a σ na povrchu součásti již není

rovno napětí S . Viz ilustrace na obr. 2(b).

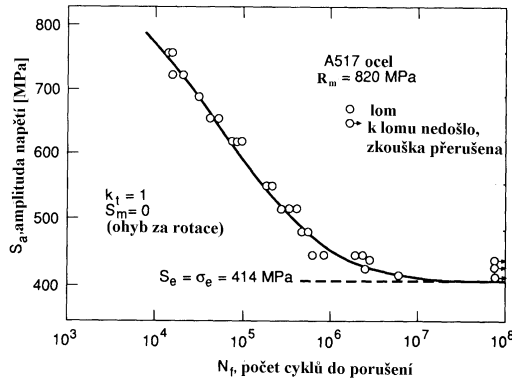
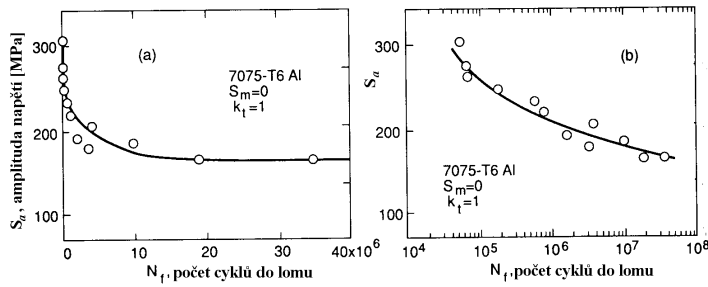
U součásti s vrubem se při výpočtu nominálního napětí uvažuje plocha průřezu součásti zmenšená o plochu vrubu (termín vrub se používá ve významu koncentrátoru napětí, tj. díry, drážky, vybrání apod.). V důsledku vlivu koncentrace napětí hodnotu napětí v kořeni vrubu (v bodě) vypočteme pomocí elastického součinitele koncentrace napětí k_t a tedy $\sigma = k_t.S$. Jelikož k_t vyplývá z lineární elastické analýzy, nelze tuto analýzu použít v případě, kdy dochází k plastické deformaci. V případě vzniku plastické deformace i když pouze lokálně v místě vrubu, pak σ a $k_t.S$ si již nejsou rovny, jak ilustruje obr.2(c).

Proto, abychom zabránili zmatkům, budeme rozlišovat mezi napětím σ v bodě a nominálním napětím S . Pro osově zatíženou součást bez vrubu kde platí $\sigma = S$, budeme používat symbol σ . Také je důležité si ujasnit, jaká plocha je brána pro výpočet nominálního napětí S . V případě plochy, od níž je odečtena plocha vrubů použijeme index $n - S_n$, na rozdíl od výpočtu napětí, při kterém neodečítáme plochu vrubů (jak je tomu např. v lomové mechanice) použijeme index $g - S_g$.

4. Napětí versus únavový život; (S-N) křivky.

Je-li zkušební tyč nebo součást konstrukce podrobena dostatečně velkému cyklicky se měnícímu napětí, pak za určitou dobu dojde ke vzniku únavové trhliny a následně k lomu součásti. V případě, že zkoušku opakujeme při vyšší úrovni napětí, pak počet cyklů do porušení bude menší. Výsledkem takovýchto zkoušek provedených při různých úrovních napětí je křivka napětí-únavový život, také nazývaná S-N křivka. Amplituda napětí nebo nominálního napětí, σ_a nebo S_a , se obecně vynášá na počtu cyklů do porušení N_f jak je uvedeno na obr.3.4.

Skupina takovýchto únavových zkoušek pro vyjádření S-N křivky se zpravidla provádí při nulovém středním napětí, nebo pro některé specifické případy s nenulovým středním napětím σ_m . Též se někdy měří křivky S-N



při konstantní hodnotě součinitele nesymetrie cyklu, R . Přestože napětí je obvykle vynášeno jako amplituda, můžeme se setkat i s veličinami $\Delta\sigma$ nebo $\sigma_{\max}$. K přepočtu křivek $S-N$ se používají rov. 2 až 4.

Počet cyklů do porušení N_f se mění v rozmezí několika řádů s úrovní působícího napětí. Z tohoto důvodu je počet cyklů do porušení obvykle vynášen v logaritmické stupnici.

Problémy s lineární stupnicí jsou zřejmé z obr. 3, kde je stejná závislost $S-N$ vynesena jednou v lineární a podruhé v logaritmické stupnici. Vidíme, že v případě lineární stupnice prakticky není možné odečíst počty cyklů do (**↑Obr.3. ↘Obr.4**) porušení při malém únavovém životě. Logaritmické měřítko se někdy používá i v případě osy napětí.

Pro aproximaci $S-N$ dat v semilogaritmické stupnici používáme vztah

$$\sigma_a = C + D \cdot \log N_f \quad (5)$$

kde C a D jsou konstanty. V případě, že naměřené výsledky chceme proložit log-log závislostí, pak odpovídající funkce má tvar

$$\sigma_a = A \cdot N_f^B \quad (6)$$

$$\sigma_a = \sigma_f' \cdot (2 \cdot N_f)^b \quad (7)$$

$$A = \sigma_f' \cdot (2)^b \text{ a } b = B. \quad (8)$$

Druhá rovnice se často používá v jiném tvaru

konstanty posledních dvou rovnic jsou ve vzájemné relaci

Pro některé konstrukční materiály jsou konstanty použité v předchozích rovnicích uvedeny v následující tabulce.

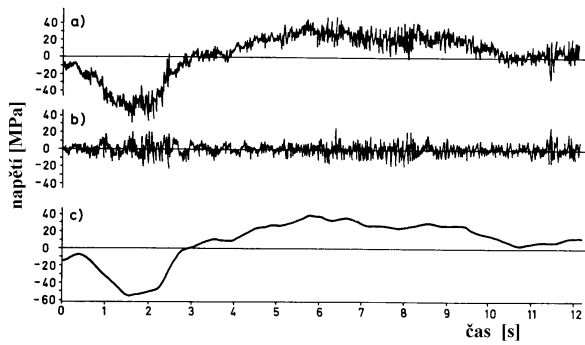
Materiál	Mez kluzu R_e	Mez pevnosti R_m	$\sigma_a = \sigma_f' (2 \cdot N_f)^b = A \cdot N_f^B$			$\sigma_a = c + D \cdot \log N_f$	
			σ_f'	A	$b=B$	C	D
(a) oceli							
AISI 1015	227	415	976	886	- 0,140	545	- 69,6
Man-Ten	322	557	1 089	1006	- 0,115	703	- 83,0
RQC-100	683	758	938	897	- 0,0648	780	- 68,9
AISI 4142	1 584	1 757	1 937	1 837	- 0,0762	1 529	- 148
AISI 4340	1 103	1 172	1 758	1 643	- 0,0977	1 247	- 137
(b) jiné materiály							
2024-T4 Al	303	476	900	839	- 0,102	624	- 69,9
Ti-6Al-4V	1 185	1 233	2 030	1 889	- 0,104	1 393	- 157

V případě krátké doby života při vysokých napětích je únavový proces významně ovlivněn plastickou deformací. Protože rov. 7 se používá k popisu únavového chování hladkých zkušebních těles, je nutné v případě velkých deformací vyjádřit amplitudu napětí jako skutečné napětí. Také za hodnotu σ_f' (*součinitel únavové pevnosti*) je často bráno skutečné lomové napětí σ_f , které je vyšší než smluvní pevnost.

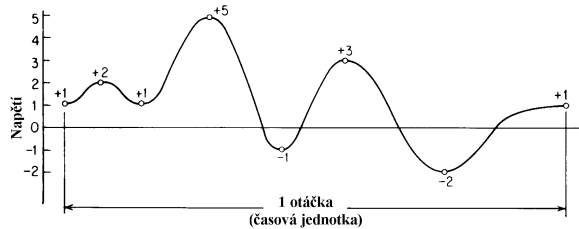
Některé konstrukční materiály, zvláště nízkouhlíkové a nízkolegované oceli, mají závislost $S-N$ charakteristickou tím, že prakticky od hodnoty N_f řádově 10^6 amplituda napětí S již prakticky neklesá – tj. existuje jistá úroveň napětí, pod kterou nedochází k únavovému porušení. Jak ukazuje obr. 4, $S-N$ křivka se asymptoticky blíží k amplitudě označené S_c . Tato limitní amplituda napětí se nazývá *mez únavy*. Pro zkušební tělesa bez vrubu s hladkým povrchem se pro mez únavy používá symbol σ_c (σ_e) a zpravidla se hovoří o materiálové charakteristice. Pro materiály u nichž $S-N$ křivka nemá zmíněný asymptotický tvar, jako jsou např. slitiny hliníku i mědi, se mez únavy uvažuje jako amplituda napětí odpovídající určité smluvní době života 10^7 nebo 10^8 cyklů. Termín únavová pevnost se používá ke specifikaci určité amplitudy napětí z $S-N$ křivky pro určitou dobu života. To znamená únavová pevnost pro 10^5 cyklů je jednoduše amplituda odpovídající počtu cyklů do porušení $N_f = 10^5$. Jiný termín používaný v souvislosti s $S-N$ křivkami je vysokocyklová únava a nízkocyklová únava. První termín identifikuje situace dlouhého únavového života, tj. amplituda napětí je dostatečně nízká a tedy plastická deformace není dominující pro chování materiálu. Vysokocyklová únava začíná od počtu cyklů 10^2 - 10^4 . V oblasti nízkocyklové únavy je zpracován přístup, jež souvisí s lokální plastickou deformací.



5. Zdroje cyklického zatěžování



Obr. 5 – Vzorok záznamu napětí působícího v čepu řízení motorového vozidla; (a) úplný záznam napětí-čas, (b) v záznamu je pouze napětí vyvolané nerovnostmi vozovky, (c) v záznamu je pouze zatěžování způsobené manévrováním vozidla



Obr. 7 – Zatěžování rotoru helikoptéry v průběhu jedné otáčky vrtule. Pérování lopatky a její interakce se vzduchem vyvolává dynamické zatěžování.

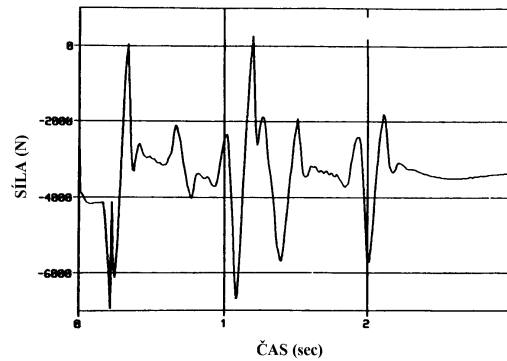
V praxi jen málo případů cyklického zatěžování lze charakterizovat konstantní amplitudou napětí. Mnohem častější je nepravidelné zatěžování v závislosti na čase. Příklady jsou uvedeny na obr. 5 až 8. Podle původu můžeme zatěžování součástí strojů, vozidel a konstrukcí rozdělit do čtyř kategorií. Statické zatížení se prakticky nemění a je stále přítomné. Pracovní zatížení se mění v závislosti na čase a je důsledkem provozního namáhání součástí. Vibrační zatížení je cyklické zatěžování o poměrně vysoké frekvenci, které má původ v prostředí, nebo je sekundárním projevem funkce součástí. Jedná se zpravidla o projevy turbulence, nebo interakci dvou nerovných povrchů, které jsou v kontaktu. Nahodilé zatížení jsou vzácné události, ke kterým nedochází za normálních okolností.

Např. uvažujme silniční mosty. Statická zatížení jsou způsobena vždy přítomnou vahou konstrukce a silnice. Cyklická pracovní zatížení jsou vyvolána vahou vozidel, zvláště těžkých kamionů, přejezdějících přes most. Vibrační zatížení jsou přídavná zatížení vyvolaná interakcí pneumatik s nerovností silnice. U mostů s velkým rozpětím dochází k vibračním zatížením vlivem turbulence větru. Nahodilé zatížení odpovídá přetížení mostu nebo zemětřesení.

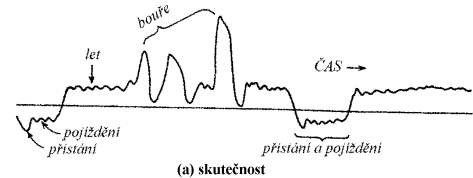
Pracovní a vibrační zatížení a často jejich kombinace jsou cyklická zatížení, která mohou způsobit únavové porušení. Poškození cyklickým zatěžováním je tím větší, čím větší působí statická složka zatížení. S-N křivky stanovené při konstantní amplitudě napětí mohou být použity k odhadu únavového života i pro případ nepravidelné historie zatížení-čas.

6. Experimentální zkoušení únavových vlastností

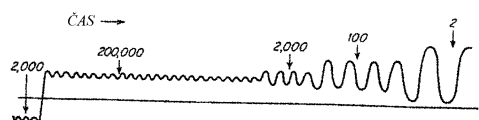
Zjišťování S-N křivek patří k základním zkouškám odolnosti materiálu vůči únavovému porušení. Některé standardy jsou zaměřeny na zkoušení kovů – např. ASTM E466, jiné na zkoušky plastů – např. ASTM D671. Výsledná data a křivky jsou publikovány v literatuře, zvláště v různých příručkách pro konstruktéry. Pochopení základů těchto zkoušek je základem efektivního využití výsledků zkoušek v praxi.



Obr. 6 – Síla působící v kulovém čepu přední nápravy automobilu přejezdějícího železniční koleje na přejezdu.

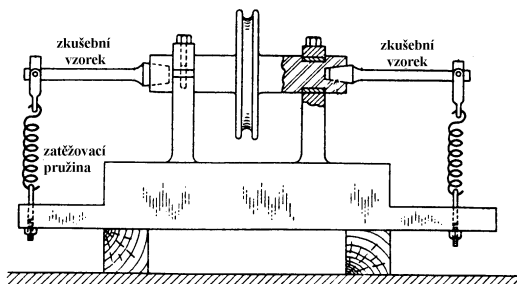


(a) skutečnost



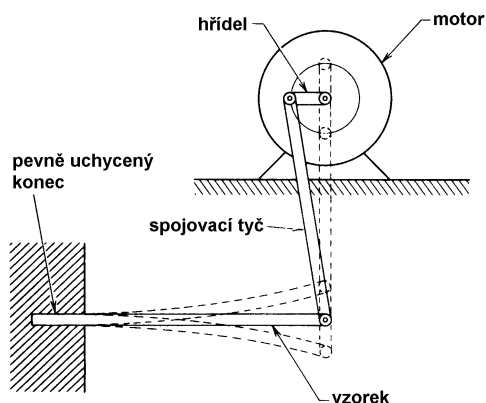
(b) zjednodušení

Obr. 8 - Zatěžování působící na závěs křídla letadla během provozu (a) a zjednodušená verze tohoto zatěžování (b).



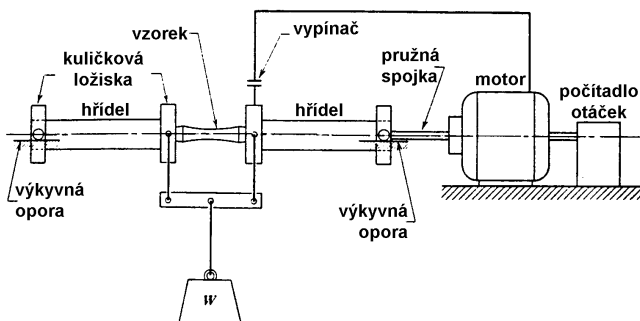
V případě obou typů zkoušek ohybem za rotace je střední napětí rovno nule.

Rotující páka může být použita ke zkouškám střídavým ohybem pro dosažení nenulového

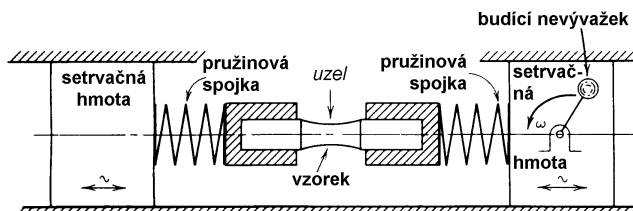


6.1 Zkušební zařízení

Jedno ze zařízení pro únavové zkoušky používané Wöhlerem je ukázáno na obr. 9. Jedná se o zatěžování označované termínem ohyb za rotace. Podobná zařízení se používají dodnes i když ve verzi čtyřbodového ohybu, jak ilustruje obr. 10.



středního napětí, jak je ukázáno na obr. 11. Změnami délky hřídele a spojovací tyče se mění jak amplituda, tak i střední napětí.



Další typ zkušebních strojů pro únavové zkoušky (vysokocyklová únava) jsou rezonanční pulsátory. Na obr. 12 je schéma pulsátoru, který je buzen mechanicky – nevyvážek rotující s vhodnou rezonanční frekvencí ω . V současné době vyráběné pulsátory umožňují jak nastavení středního napětí, ale i jiný způsob zatěžování než tah-tlak např. ohyb. Vedle mechanického buzení vibrací (německá firma Schenk – známá např. výrobou vyvažovacích systémů kol aut) jsou stroje buzené elektromagneticky (fy. Amsler – naše zkušebna), případně piezoelektricky. V případě mechanických systémů je frekvence kmitů ≈ 40 Hz, u elektromagnetických systémů až 100 Hz, piezoelektrické systémy – speciální vysokofrekvenční únava - zde je nutné chlazení vzorku, aby nedošlo k jeho přehřátí – Žilinská universita.

Úpravou a zdokonalováním jednoduchých mechanismů, které jsme popsali v souvislosti s únavovými zkouškami, vznikly složitější mechanismy jež umožňují zkoušky v krutu, kombinaci ohybu a torze, biaxiální ohyb atd. Zkušební tělesa mohou být tenkostěnné trubky namáhané cyklickým vnitřním tlakem kapaliny a tak podrobené dvojosému napětí. Ve většině případů se jedná o zatěžování konstantní amplitudou napětí a konstantní frekvencí cyklování. Rozvoj elektroniky umožnil u těchto strojů pozvolné změny amplitudy i středního napětí.

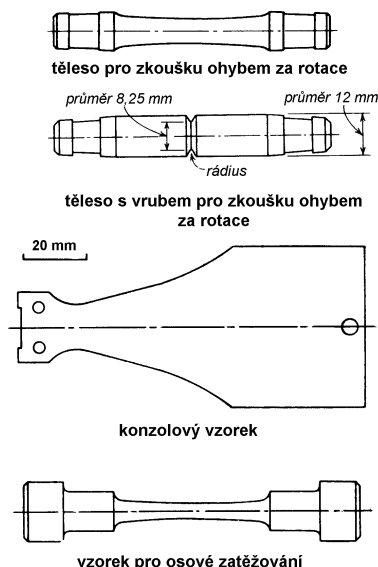
Pro únavové zkoušky se také používají servohydraulické zkušební stroje se zpětnou vazbou (hovořili jsme o nich v úvodní přednášce). Tyto stroje jsou velmi nákladné nejen z hlediska pořizovací ceny, ale také z hlediska provozních nákladů. Výhodou elektronických zkušebních strojů se zpětnou vazbou je, že umožňují provádět zkoušky s řízenou silou, deformací, přemístěním (jedná se o univerzální únavové stroje jak pro nízko- tak i vysoko-cyklovou únava). Mohou simulovat nepravidelné zatěžovací cykly, které byly sejmuty při provozu – viz obr. 5 až 8. U těchto strojů je průběh zkoušky i její vyhodnocení řízeno počítačem.

6.1 Zkušební vzorky

Zkušební tělesa pro únavové zkoušky jsou navrhována tak, aby je bylo možné použít pro studium daného problému a současně i upnout do zkušebního stroje, který je k dispozici. Některé příklady zkušebních těles jsou ukázány na obr. 13. Nejjednodušší jsou tělesa nevrubovaná, nebo také označovaná jako hladká – tvarem tato tělesa připomínají zkušební vzorky pro zkoušku tahem. Tělesa s koncentrátorem napětí, vrubem, se používají k hodnocení citlivosti materiálu na vruby při cyklickém zatěžování a zpravidla k popisu jejich chování se používá součinitel koncentrace napětí k_f .



Obr. 13 ↓



7. Fyzikální podstata únavového porušení

Pohlížíme-li na materiály s dostatečným zvětšením, pak zjistíme, že každý materiál je nehomogenní a neizotropní. Např. konstrukční materiály jsou složeny z agregátů malých zrn krystalů. Uvnitř každého zrna nejsou vlastnosti izotropní vlivem krystalografických rovin a přechodem do sousedního zrna se mění orientace krystalografických rovin. Nehomogenita materiálu není způsobena pouze strukturou hranic zrn, ale také shluky vakancí nebo přítomností částic o jiném chemickém složení, než je základní materiál (např. tvrdé hlinítky nebo křemičitany v ocelích). Několik fází a hranice mezi nimi, nebo jiné oblasti s více než jedním chemickým složením, také představují oblasti nehomogenity. Důsledkem zmíněných nehomogenit mikrostruktury je, že i napětí je rozděleno nehomogenně v rámci struktury. Oblasti, kde vlivem těchto nehomogenit dochází ke zvýšení napětí, jsou místy nukleace únavového porušení. Detaily chování materiálu na úrovni mikrostruktury výrazně závisí jak na základních mechanických vlastnostech, tak i rozdílech v mikrostruktuře.

U houževnatých konstrukčních materiálů v těch zrnech, která mají vhodnou orientaci vzhledem k působícímu napětí během zatěžování, začínají vznikat skluzové pásy. Skluzové pásy jsou oblasti lokalizace plastické deformace a případně i vzniku porušení. Počet skluzových pásů roste s počtem cyklů s tím, že tento jev má charakter nasycení. V některých skluzových pásích (perzistentní skluzová pásma) dochází k iniciaci trhlinek, které rostou v rámci hostitelských zrn a postupným spojením přeroste jedna z nich v magistralní trhlinu.

U materiálů, které mají omezenou houževnatost, jako jsou např. vysocepevné kovy, je mikrostrukturní poškození méně rozšířené, má „snahu“ se koncentrovat do okolí defektů. Malé trhliny se iniciují v okolí dutinek, inklusí, skluzových pásů, hranic zrn nebo povrchových škrábanců nebo defektů podobných trhlinám. Vzniklé trhliny rostou ve směru kolmém na hlavní napětí. Tedy proces iniciace únavového porušení v materiálech s omezenou tažností je charakteristický šířením trhliny z několika málo defektů ve srovnání s procesem iniciace porušení v materiálech s velkou tažností, kde dochází k intenzifikaci plastické deformace ve skluzových pásích a následnému porušení ve velké oblasti povrchu tělesa.

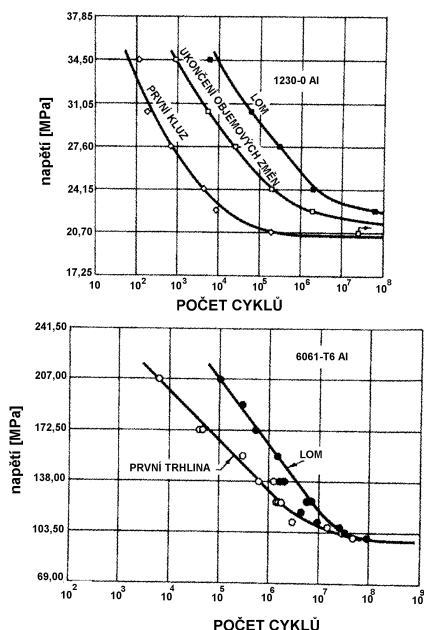
V kompozitech tvořených dlouhými vlákny a matricí prakticky nelze hovořit o iniciaci a šíření únavové trhliny.

Únavové porušení je v tomto případě charakterizováno počtem porušených vláken a delaminací rozhraní vlákno - matrice ve velkých oblastech.

S - N křivky se vynášejí nejen v reprezentaci amplituda - počet cyklů do porušení, ale také na počtu cyklů odpovídajícímu jistému stadiu únavového porušení - obr. 14. Na prvním obrázku se jedná o křivky únavového porušení, kde je dominantní porušení ve skluzových pásích - jedná se o vyžehnanou poměrně čistou hliníkovou slitinu. Druhý obrázek odpovídá precipitačně zpevněné hliníkové slitině, zde jsou pouze dvě S - N křivky - vznik první trhliny, vznik lomu.

V případě, že porušení materiálu je dáno především růstem trhliny, pak výsledný lom z makroskopického hlediska obecně vykazuje relativně hladkou plochu v blízkosti jeho iniciace. To můžeme vidět na obr. 15. Část lomu spojená s růstem únavové trhliny je obvykle rovinná a je orientována kolmo na působící tahové napětí. Drsnější povrch indikuje rychlejší růst trhliny. Někdy můžeme na lomové ploše uvidět kresbu tvořenou soustřednými křivkami kolem počátku lomu - označují se termínem postupové čáry (plážové značky - beach marks) - viz obr. 16. Postupové čáry jsou důsledkem změn v rychlosti šíření únavové trhliny vyvolané změnami napětí, teploty, případně chemického prostředí. Postupové čáry mohou být i obarvená místa na lomové ploše koroze.

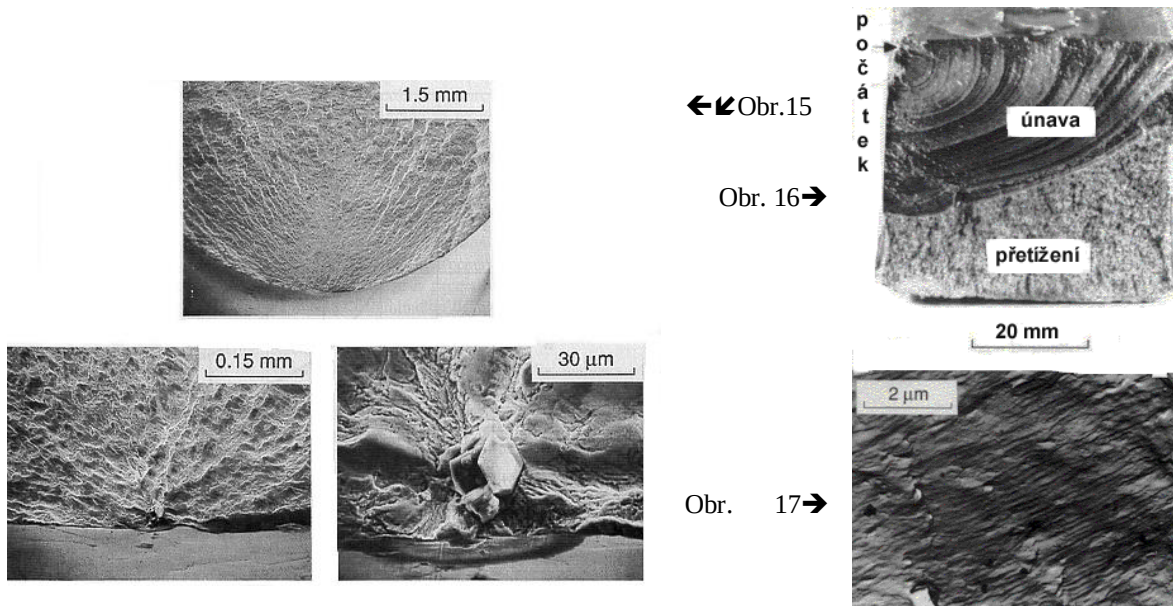
V okamžiku, kdy dosáhne trhliny kritické velikosti vzniká konečný lom, který může být houževnatý (provázený velkou deformací), nebo křehký (provázený malou



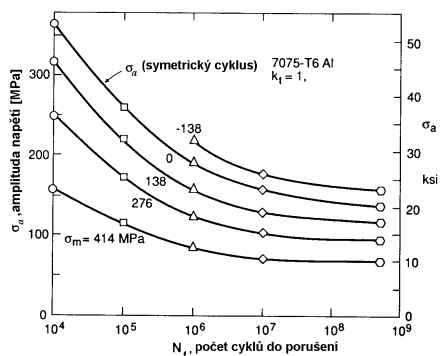
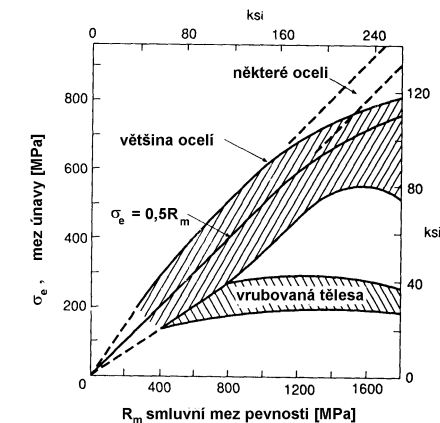


deformací). Lomová plocha konečného lomu je hrubší ve srovnání s únavovým lomem. V případě houževnatého lomu je lomová plocha na okrajích lemována smykovými okraji, které jsou skloněny pod 45° vzhledem k působícímu napětí.

Mikroskopické pozorování únavového lomu houževnatých materiálů často odhaluje přítomnost čar, které zanechal postup čela únavové trhliny v jednotlivých cyklech – tyto čáry se nazývají striace, viz obr. 17.



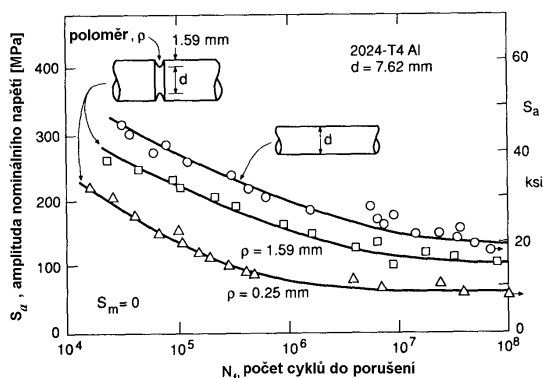
7. Ovlivnění únavové pevnosti – smluvní mezí pevnosti, středním napětím a geometrií součástí.



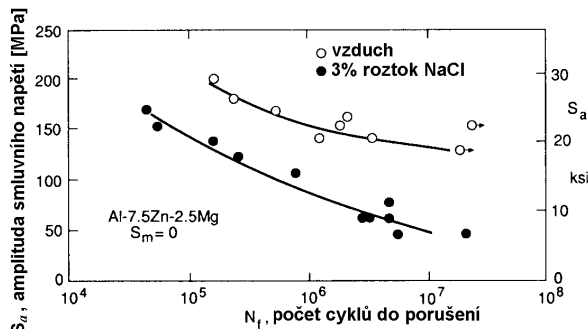
Mez únavy σ_e ocelí je často rovna polovině hodnoty smluvní meze pevnosti R_m , jak ilustruje obr. 18 (korelace meze únavy a smluvní meze pevnosti zjištěná pro hladké leštěné vzorky a vzorky s vrubem). Hodnoty ležící níž než předepisuje závislost $\sigma_e \approx 0,5 \cdot R_m$ v oblasti vysokých pevností patří ocelím s omezenou tažností. To svědčí o tom, že určitý stupeň tažnosti je nutný k zajištění odolnosti oceli vůči cyklickému zatěžování. Neznalost této skutečnosti vedla k únavovým lomům v případech, kde dříve nebyla únavou problémem – jednalo se o snižování hmotnosti vozidel použitím ocelí s vysokou pevností.

Podobné korelace jako na obr. 18 existují i pro jiné materiály, ale mez únavy je zpravidla nižší než polovina hodnoty meze pevnosti. Důležitý vliv na křivku S-N únavové životnosti má hodnota středního napětí. Pro danou amplitudu napětí vyvolá tahové střední napětí zkrácení únavového života ve srovnání se symetrickým cyklem. Pro ilustraci vlivu středního napětí na únavovou životnost slouží obr. 19 (křivky S-N zjištěné při různém středním napětí hladkých těles z hliníkové slitiny). Z obrázku plyne, že pro danou amplitudu napětí kladné (tahové) střední napětí zkracuje únavovou životnost a záporné (tlakové) střední napětí únavovou životnost prodlužuje.

Koncentrátory napětí (vruby) také ovlivňují S-N křivky – zkracují únavový život, tj. snižují hodnoty S-N křivky a to tím více, čím má daný vrub vyšší hodnotu k_f . Příklad tohoto vlivu dokumentuje obr. 20. Druhý důležitý trend vlivu vrubů je patrný z obr. 18 – mnohem výraznější vliv vrubů na únavovou pevnost je u vysocepevných ocelí, materiálů s omezenou tažností.



Obr. 20 Vliv vrubů jež mají hodnoty $k_f = 1,6$ a $3,1$ na únavovou životnost zjišťovanou při zkouškách ohybem za rotace pro hliníkovou slitinu.

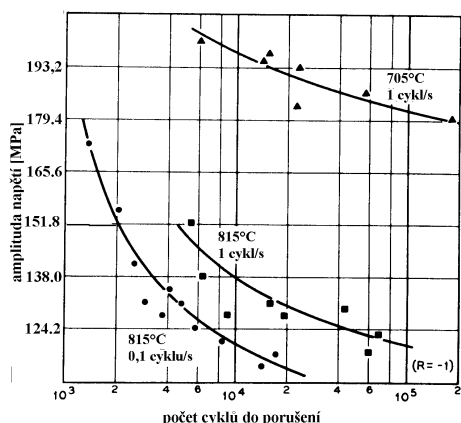


Obr. 21 Vliv solného roztoku simulujícího mořskou vodu na únavovou životnost hliníkové slitiny při ohybovém zatěžování.

7.1 Vliv prostředí a frekvence zatěžování

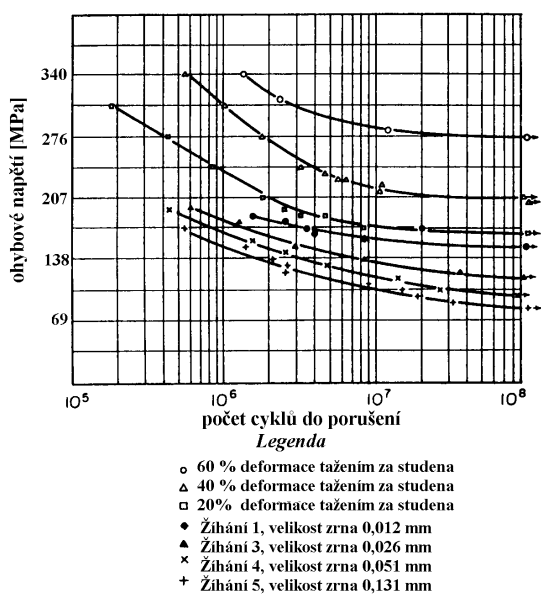
Chemický agresivní prostředí může urychlit iniciaci a růst únavové trhliny. Jedním z mechanismů je vznik korozních důlků, které působí jako koncentratory napětí. Druhý mechanismus spočívá v tom, že dochází k chemické reakci prostředí a materiálu v oblasti kořene trhliny, což má za následek urychlení růstu trhliny.

Příklad tohoto vlivu je na obr. 21. Stejně tak vlhkost a plyny ve vzduchu mohou působit jako agresivní prostředí zvláště za zvýšených teplot. Víme, že časově závislá deformace (creep) je mnohem pravděpodobnější při vysokých teplotách. Kombinace cyklické zatěžování, zvýšená teplota a tahové střední napětí vedou ke kombinaci creep a únava, což má za následek významné zkrácení únavového života (synergický vliv). Dále lze obecně říci, že chemický nebo tepelný vliv se projeví mnohem výrazněji pokud působí delší dobu. Tento fakt vede k závislosti únavové životnosti na frekvenci zatěžování – únavová životnost vyjádřena počtem cyklů do porušení bude tím kratší, čím bude nižší frekvence zatěžování. Příklad těchto vlivů je na obr. 22.



Obr. 22 Vliv teploty a frekvence zatěžování na S-N křivku niklové slitiny Inkonel

7.2 Vliv mikrostruktury



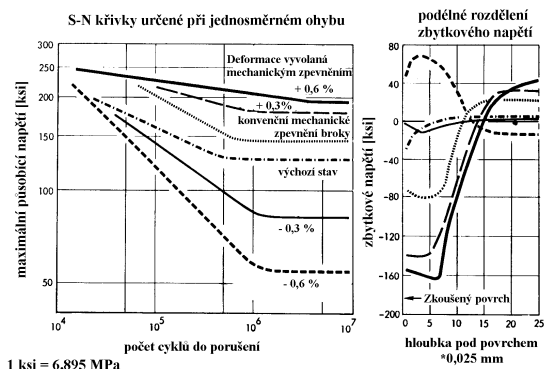
Jakákoliv změna mikrostruktury nebo povrchových podmínek zpravidla vede ke změně tvaru S-N křivky, zvláště pro dlouhé doby únavového života. U kovů se odolnost vůči únavovému porušení zvyšuje zmenšením velikosti inkluzí a dutin, zmenšením velikosti zrna a růst hustoty dislokací. Na základě posuvu S-N křivek mosazi je na obr. 23 ilustrován vliv způsobený změnou mikrostruktury. Rostoucí stupeň plastické deformace vyvolaný tažením za studena způsobuje růst hustoty dislokací a tím růst únavové pevnosti. Zvětšení velikosti zrna způsobené žitáním vyvolává pokles únavové pevnosti. Dá se říci, že strukturální změny, které vyvolávají změny únavové pevnosti pro velký počet cyklů do porušení se projeví kvalitativně stejnými změnami i v hodnotách smluvní meze pevnosti.

Mikrostruktura materiálu je často závislá na směru – např. protažená zrna i inkluze ve směru válcování materiálu. Únavová pevnost může být snížena ve směru protažení. Obr. 23 Vliv velikosti zrna a deformace za studena na S-N křivky určené ohybem za rotace pro mosaz 70Cu-30Zn



směru, kde působí napětí kolmo na rovinu válcování. Podobný vliv je i u vláknitých kompozitů, kde jak vlastnosti tak i struktura významně závisí na směru. Únavová pevnost je největší, působí-li napětí ve směru vláken a nejmenší působí-li kolmo na vlákna.

7.3 Zbytkové napětí a další povrchové vlivy

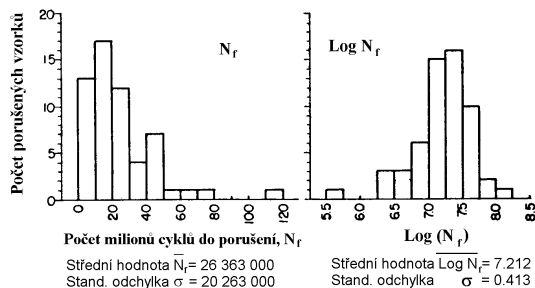
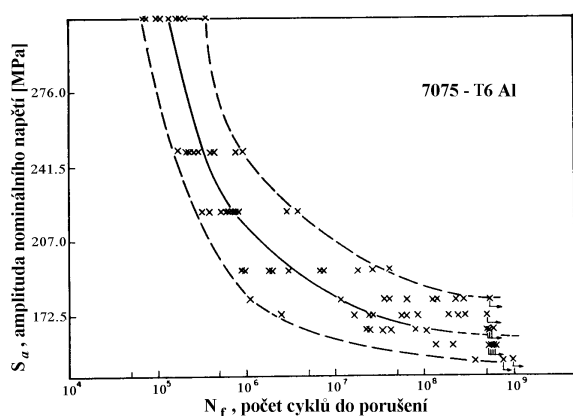


V podstatě existují dva způsoby, jak docílit tlaková napětí v povrchové vrstvě. Otryskání povrchu součásti malými ocelovými nebo skleněnými broky, nebo vyvolání ohybu součásti tak, že v povrchové vrstvě dojde k plastické deformaci. Druhá metoda má ale i opačný vliv a to na protilehlém povrchu ohýbané desky. Vliv mechanického zpevnění povrchu listové pružiny na S-N křivky i hodnoty zbytkového napětí v okolí povrchu jsou na obr. 24.

Leštění povrchu součásti jako proces obrábění zvyšuje únavovou pevnost, ale některé procesy obrábění jsou z hlediska únavové pevnosti škodlivé, zvláště když vyvolávají tahové zbytkové napětí. Různé povrchové úpravy, tak jako nauhličování nebo nitridace oceli mění chemické složení, mikrostrukturu i povrchové zbytkové napětí a tedy ovlivňuje únavovou pevnost. Pokovování, např. niklem nebo chrómem, ocelových součástí má zpravidla za následek vznik tahových povrchových napětí a tedy z hlediska únavy jsou škodlivé. Tedy většina povrchových úprav založená na deponování jiného materiálu na povrch součásti vede ke zhoršení únavových vlastností ve srovnání se základním materiálem.

Svařování vytváří jednak koncentrátoři napětí (defekty struktury – póry a jiné malé defekty) a zbytková napětí jako důsledek tuhnutí svarového kovu. Přítomnost svaru obecně redukuje únavovou pevnost a vyžaduje zvýšenou pozornost.

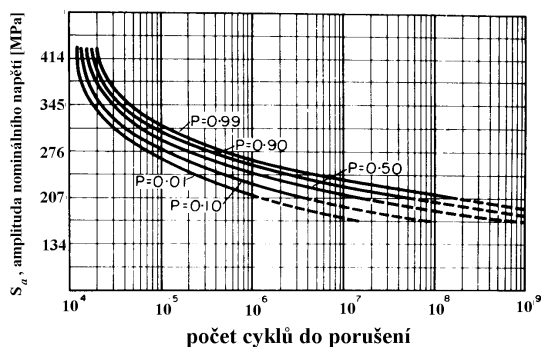
7.4 Statistický rozptyl.



← Obr. 25

↑ Obr. 26

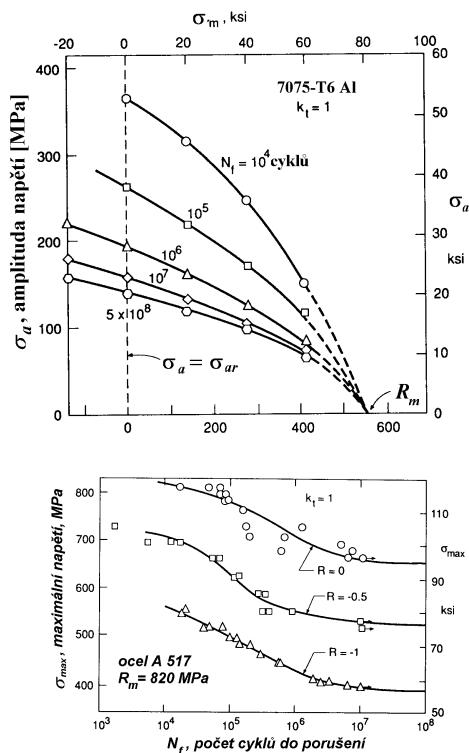
není vždy stejný. Na obr. 25 je vynesena S-N křivka experimentálně stanovená při zkoušce ohybem za rotace hladkých těles z hliníkové slitiny. Z obrázku vidíme, že rozptyl měřených hodnot N_f je větší pro delší životnosti. Na obrázku 26 je zhodnocen rozptyl naměřených hodnot N_f zjištěný na 57 vzorcích ze stejné slitiny 7075-T6 Al při zkoušce ohybem za rotace amplitudou $S_a = 207$ MPa. Na prvním grafu obr. 26 je brána do statistiky hodnota N_f a vidíme že hodnoty jsou rozděleny nesymetricky. V pravé části obrázku 26 je vynesena jako proměnná veličina $\log N_f$. V tomto případě je rozdělení naměřených hodnot symetrické. Použijeme-li standardní Gaussovo rozdělení (také označované jako normální) pro hodnoty $\log N_f$, pak hovoříme o log-normálním rozdělení hodnot N_f . Při hodnocení rozptylu mechanických charakteristik se většinou používá nesymetrické rozdělení – v souvislosti s rozptylem hodnot lomové houževnatosti jsme hovořili i o Weibullově rozdělení.



Statistický rozbor únavových dat umožňuje stanovit jak střední hodnotu $S-N$ křivky (50% pravděpodobnosti porušení), tak i křivky jež odpovídají různé pravděpodobnosti únavového porušení. Tyto systémy křivek $S-N-P$ dávají podrobnější informace o únavovém životě. Příklad systému křivek $S-P-N$ zpracovaného na základě hodnot uvedených na obr. 25 je uveden na obr. 27. Protože $S-N$ křivky jsou ovlivněny různými faktory – povrchová úprava, frekvence cyklování, teplota, chemicky agresivní prostředí, zbytková napětí - pravděpodobnost porušení z $S-N-P$ křivek založených na laboratorních zkouškách slouží pouze k hrubému odhadu.

8. Střední napětí

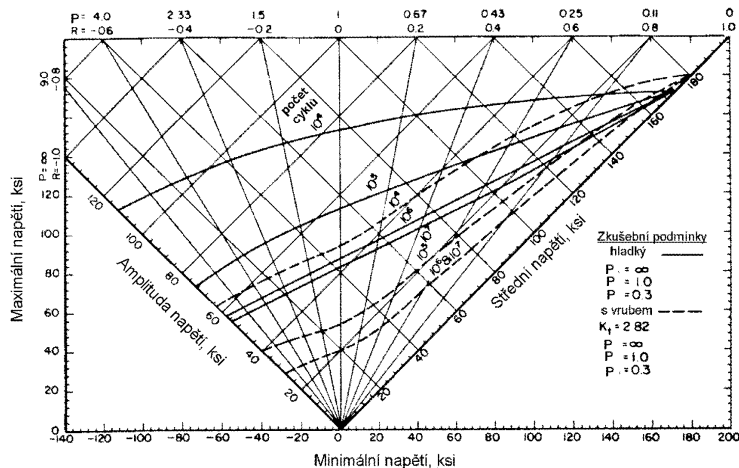
$S-N$ křivky, které obsahují data pro různá střední napětí jsou dostupné pro běžně používané materiály. Existují i konvence pro odhad těchto dat a rovnice pro odhad vlivu středního napětí. V této části se budeme zabývat vlivem středního napětí.



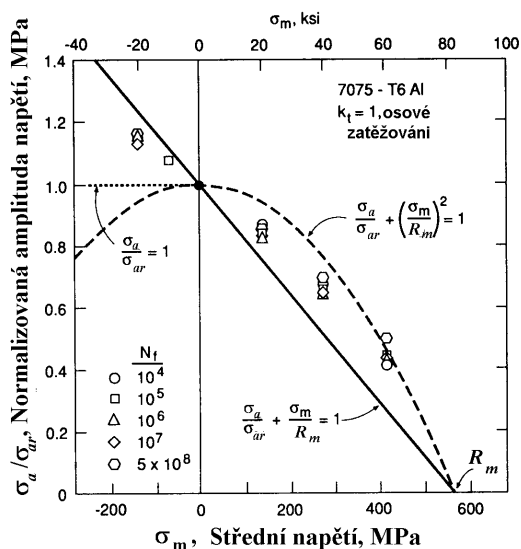
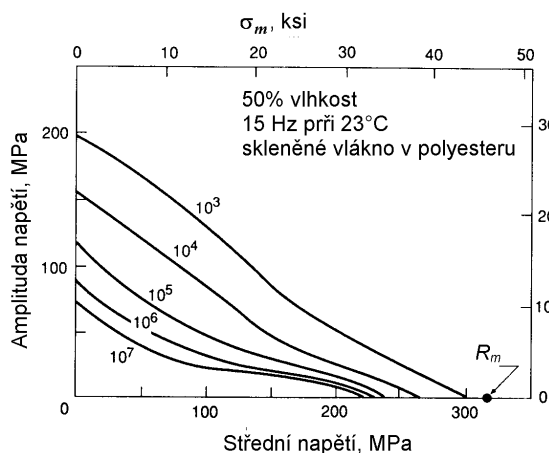
8.1 Prezentace dat vlivu středního napětí.

Jedna z možností, jak do souboru únavových dat začlenit vliv středního napětí, byla ukázána na obr. 19. Podobný význam má i diagram konstantního únavového života, který je na obr. 28. Diagram byl vytvořen tak, že z $S-N$ křivek na obr. 19 byly vybrány hodnoty napětí pro různé počty cyklů do porušení a z nich sestaveny závislosti σ_a versus σ_m pro každý ze zvolených počtů cyklů do porušení. Interpolací mezi jednotlivými čarami v této závislosti je možné získat představu o únavovém životě pro libovolně zvolené parametry zatěžovacího cyklu. Z diagramu konstantního únavového života je jasné vidět, že když vzroste střední napětí, pak má-li být do porušení zachován stejný počet cyklů, musí poklesnout amplituda napětí.

Jiný často používaný způsob vyjádření vlivu středního napětí je systém křivek σ_{max} versus N_f , z nichž každá odpovídá jisté hodnotě koeficientu nesymetrie zátěžného cyklu (viz např. $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ rovnice 4). Příklad tohoto způsobu vyjádření vlivu středního napětí na únavový život je na obr. 29. Protože každé dvojici hodnot (σ_a , σ_m) odpovídá jediná dvojice hodnot (σ_{min} , σ_{max}) podle rovnice 4 je vlastně tento způsob vyjádření vlivu středního napětí zcela ekvivalentní diagramu konstantního únavového života. Dva systémy souřadných os, které svírají úhel 45°, se často používají v příručkách pro prezentaci únavových charakteristik materiálů. Příklad takového diagramu konstantního únavového života pro osově



zatěžování tepelně zpracované titanové slitiny Ti-6Al-4V, smluvní mez pevnosti $R_m = 1186 \text{ MPa}$ (176 ksi, v digramu jsou uvedeny jednotky ksi = kilopond/(inch)² = 6,895 MPa) je uveden na obr. 30 pro titanovou slitinu. Tento specifický diagram obsahuje data získaná na základě zkoušek hladkých i vrubovaných těles.



Všechny příklady vlivu středního napětí byly uváděny pro konstrukční kovové materiály, ale mají obecnější platnost a mohou být použity i pro jiné materiály. Vidíme, že podobný trend je zřejmý i z obr. 31, který byl vytvořen na základě hodnot získaných pro kompozitní materiál.

8.2 Diagramy normalizované závislosti amplituda-střední napětí

Označme pro hladká zkušební tělesa pro specifický případ nulové hodnoty středního napětí (symetrický zátěžný cyklus) amplitudu napětí symbolem σ_{ar} . V diagramu konstantního únavového života je hodnota σ_{ar} dána průsečíkem s osou y ($\sigma_m = 0$) pro každou specifickou hodnotu únavového života. Hodnoty na ose y nyní vztáhneme k jednotlivým hodnotám σ_{ar} a tak získáme graf σ_a/σ_{ar} versus σ_m . Data uvedená na obr. 28 upravená tímto způsobem jsou vynesena na obr. 32. Vidíme, že v takto upraveném grafu všechny závislosti pro různé hodnoty únavového života vytínají v bodě $\sigma_m = 0$ na ose y jedničku a ostatní hodnoty ($\sigma_m \neq 0$) v mezích chyby měření vytváří jedinou závislost. Pro hodnoty poměrné amplitudy napětí (σ_a/σ_{ar}) blízké se nulové hodnotě se hodnota středního napětí blíží k hodnotě smluvní meze pevnosti R_m . Tato skutečnost dává možnost vytvořit obecný vztah pro vyjádření vlivu středního napětí s tím, že musí jím predikovaná závislost procházet dvěma body, $(\sigma_m, \sigma_a/\sigma_{ar}) = (0, 1)$ a $(R_m, 0)$. Tuto závislost označujeme pojmem normalizovaná závislost amplituda-střední napětí.

K popisu normalizované závislosti se nejčastěji

používá přímková závislost. Ve srovnání se skutečností je odhad vlivu středního napětí zvláště pro tvárné materiály poměrně konzervativní. Rovnice přímky má tvar

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \frac{\sigma_m}{R_m} = 1. \quad (9)$$

Vztah (9) se používá pro výpočet časové únavové pevnosti na základě známé hodnoty σ_{ar} ze symetrického cyklu. Podobný výraz se používá i v případě meze únavy

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_{er}} + \frac{\sigma_m}{R_m} = 1, \quad (10)$$

kde σ_e je mez únavy odpovídající střednímu napětí σ_m , σ_{er} je mez únavy zjištěná při symetrickém cyklu (je zcela jedno, zda se jedná o mez únavy, nebo o smluvní mez únavy). Tato rovnice i přímková závislost v normalizované závislosti byla poprvé navržena Goodmanem a proto se často setkáváme s výrazem *modifikovaná Goodmanova rovnice*, příp. *přímka*.

Pro tlaková střední napětí jsou rovnice (9) a (10) velice nekonzervativní. Pro zachování jistého konservatismu se zpravidla v případě tlakových středních napětí jejich vliv na únavovou životnost neuvažuje a v normalizovaném diagramu je tato skutečnost nahrazena přímkou rovnoběžnou s osou x .

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} = 1, \quad \frac{\sigma_e}{\sigma_{er}} = 1 \quad (\sigma_m \leq 0) \quad (11)$$

V literatuře existuje pro normalizovaný diagram amplituda - střední napětí řada jiných vztahů, které pro jistou skupinu materiálu lépe vystihují tento diagram. Jedním ze vztahů je tzv. *Gerberova parabola*, která je dána vztahem:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 = 1 \quad (\sigma_m \geq 0). \quad (12)$$

Tato rovnice je omezena pouze pro případy tahového středního napětí (viz obr. 32).



Obecně lze říci, že v normalizovaném diagramu amplituda-střední napětí leží poměrně blízko přímkové závislosti data získaná pro kovy s malou tažností – např. vysocepevné oceli. Naproti tomu pro tvárné materiály lépe vystihuje skutečnost Gerberova parabola. Pro lepší shodu v případě tvárných materiálů a to jak pro tahová, tak i tlaková střední napětí se často v rovnici (9) nahrazuje smluvní mez pevnosti R_m buďto skutečným lomovým napětím σ_f (určeného ze skutečného tahového diagramu), nebo součinitelem únavové pevnosti σ'_f (viz. rov. 7). Pro křehké kovy, jako jsou například některé litiny, mohou skutečné hodnoty být nižší, než udává Goodmanova přímka. Podobně je tomu i v případě kompozitních materiálů – obr. 31. Pro tyto případy je nutné použít specifické vztahy.

8.3 Odhady únavového života

Každou z rovnic vyjadřující závislost normalizovaná amplituda – střední napětí, ať již představuje přímku nebo křivku, můžeme vyřešit tak, že z ní vyjádříme amplitudu symetrického cyklu σ_{ar} . Např. rov. 9 upravíme na tvar

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{R_m}} \quad (13)$$

Počet cyklů do porušení v případě symetrického cyklu σ_{ar} je stejný jako počet cyklů do porušení pro nekonečně mnoho zatěžných cyklů daných dvojicemi napětí (σ_a, σ_m) , když mezi těmito napětími $(\sigma_a, \sigma_m, \sigma_{ar})$ platí rov. 13. Jinak řečeno, libovolnému zatěžovacímu cyklu lze přiřadit symetrický zatěžovací cyklus, který je co do délky únavového života ekvivalentní. Např. předpokládejme, že známe pro daný materiál $S-N$ křivku zjištěnou při symetrickém zatěžování, tj. známe konstanty rov. (6). Tuto rovnici, použijeme-li symbol (σ_{ar}) , přepíšeme na tvar

$$\sigma_{ar} = A \cdot (N_f)^B \quad (14)$$

kombinací s rovnicí (13) dostáváme vztah pro vyjádření $S-N$ křivky s nenulovým středním napětím

$$\sigma_a = \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m}\right) A \cdot (N_f)^B, \quad (15)$$

který přechází na vztah (6) v případě, že střední napětí je nulové. V log-log souřadnicích rov. 15 vyjadřuje systém rovnoběžných přímek, z nichž každá odpovídá určité hodnotě středního napětí. Obecně, nechť pro symetrický cyklus platí

$$\sigma_{ar} = f(N_f) \quad (16)$$

Kombinací s rovnicí (13) dostáváme

$$\sigma_a = \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m}\right) f(N_f), \quad (17)$$

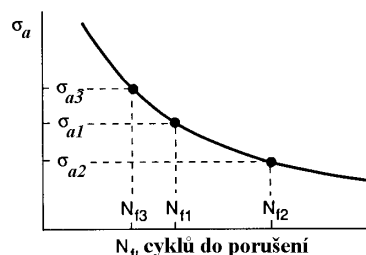
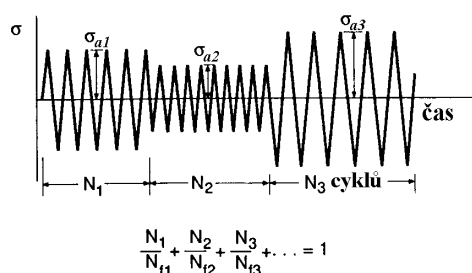
což odpovídá systému $S-N$ křivek obecného tvaru.

I pro případy, kdy neznáme explicitní výraz pro $S-N$ křivku můžeme použít rov. (13) pro odhad vlivu středního napětí, jak ukazuje rov. (17). Mějme případ, že známe $S-N$ křivku pouze pro případ nenulového středního napětí a chceme znát tuto závislost pro jinou hodnotu středního napětí. V tomto případě použijeme rov. (17) dvakrát. Poprvé k získání závislosti $S-N$ křivky pro symetrický cyklus a podruhé k výpočtu $S-N$ křivky pro zadanou hodnotu středního napětí. Analogickou manipulaci s $S-N$ křivkou můžeme dělat nejen pro konstantní hodnotu σ_m , ale i pro konstantní hodnotu součinitele nesymetrie cyklu R .

9. Zatěžování proměnnou amplitudou

Pravidelný cyklus s konstantní amplitudou představuje jistou idealizaci pro případ zkoušení. Skutečné cyklické zatěžování může obsahovat několik střídajících se amplitud, nebo být zcela nepravidelné. Nyní se budeme zabývat metodami odhadu únavového života pro takovýto způsob zatěžování.

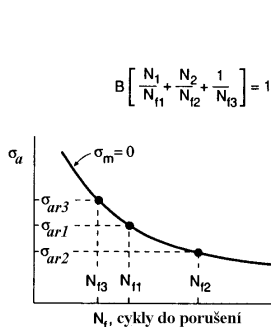
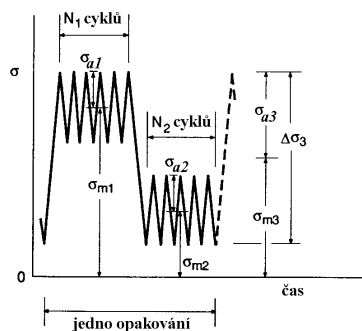
9.1 Palmgrenovo Minerovo pravidlo



Uvažujme případ s proměnnou amplitudou zatěžování, jak ukazuje obr. 33. Nechť je součást zatěžována nejprve amplitudou σ_{a1} po dobu N_1 cyklů. Z $S-N$ křivky odečteme, že počet cyklů do lomu při zatěžování amplitudou σ_{a1} je N_{f1} . V součásti došlo



k poměrnému únavovému porušení, které můžeme vyjádřit poměrem N_1/N_{f1} . Amplituda se změní na hodnotu σ_{a2} po dobu N_2 cyklů; této amplitudě odpovídá počet cyklů do porušení N_{f2} . Toto cyklování způsobí další poměrné porušení vyjádřené zlomkem N_2/N_{f2} . Palmgrenovo – Minerovo pravidlo jednoduše vyjadřuje délku únavového života. Únavový lom je pravděpodobný, když součet poměrných poškození dosáhne jedničky,



$$\frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \frac{N_3}{N_{f3}} + \dots = \sum \frac{N_j}{N_{fj}} = 1 \quad (18)$$

Toto jednoduché pravidlo bylo poprvé použito v Německu A. Palmgrenem v roce 1920 pro odhad únavového života kuličkových ložisek. K rozšíření tohoto pravidla sumace poměrného porušení nejen v únavě, ale i pro porušení při creepu, došlo až po roce 1945 zásluhou Minera.

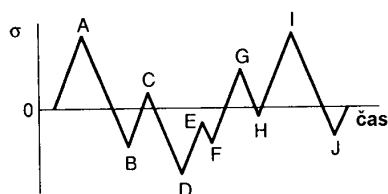
Často je možné cyklické zatěžování popsat jako opakující se bloky (viz. obr. 34). V tomto případě počet B opakujících se

bloků do porušení můžeme vyjádřit vztahem

$$B \left[\sum \frac{N_j}{N_{fj}} \right]_{\text{jedno_opakování}} = 1 \quad (19)$$

Některé cykly při proměnném zatěžování mohou probíhat i při nenulovém středním napětí jak, ilustruje obr. 34. V tomto případě musíme použít vztahu (13) k přepočtu nesymetrického cyklu na cyklus symetrický (konkrétní příklad si necháme do cvičení).

9.2 Počítání cyklů v případě nepravidelného zatěžování.



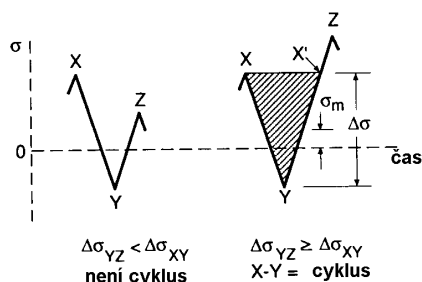
Vrcholy: A, C
Údolí: B, D
Jednoduchý kmit: A-B, B-C
Úplný kmit: A-D, D-G

Obr. 35 Definice nepravidelného zatěžování

V případě nepravidelného zatěžování v závislosti na čase (např. historie zatěžování na obr. 5 až 8) je obtížné jednotlivé události izolovat a převést na cykly, které by bylo možné zpracovat podle P-M pravidla a tak odhadnout délku únavového života. V padesátých a šedesátých letech minulého století bylo navrženo několik metod, z nichž největšího rozšíření ve světě doznala metoda

stékajícího deště navržená prof. T. Endo z Japonska kolem roku 1968.

Uvedme si základní princip této metody. Nepravidelná historie zatěžování se skládá z vrcholů a údolí, což jsou body, ve kterých se mění smysl zatěžování v závislosti zatížení (napětí) – čas (viz. obr. 35). Dále definujeme pojem kmit jako rozdíl mezi vrcholy a údolími nebo údolími a vrcholy. Jednoduchý kmit je dán rozdílem mezi



Vrchol: σ_X
Údolí: σ_Y
Rozkmit: $\Delta\sigma = \sigma_X - \sigma_Y$
Střed: $\sigma_m = (\sigma_X + \sigma_Y)/2$

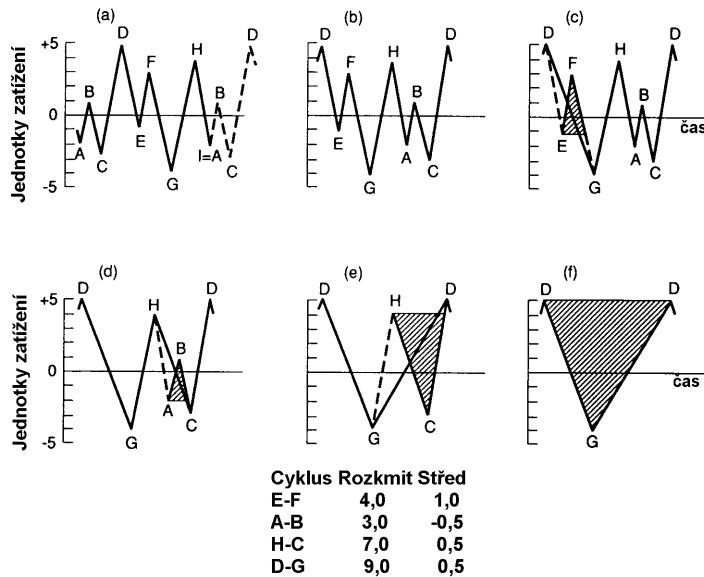
$\Delta\sigma_{YZ} < \Delta\sigma_{XY}$
není cyklus

$\Delta\sigma_{YZ} \geq \Delta\sigma_{XY}$
X-Y = cyklus

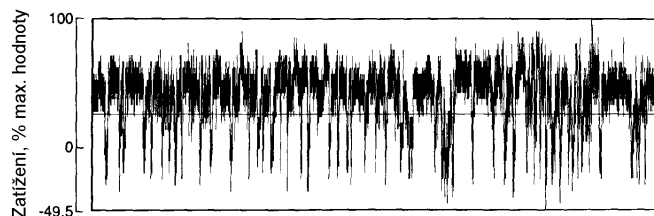
vrcholem a po něm bezprostředně následujícím údolím. Úplný kmit se měří mezi vrcholem a druhým údolím, které následuje po výchozím vrcholu. Při odečítání kmitů je lhostejné, zda začínáme vrcholem nebo údolím. Na obr. 35 jsou jednoduchými kmity $\Delta\sigma_{AB}$, $\Delta\sigma_{BC}$ a úplnými kmity $\Delta\sigma_{AD}$, $\Delta\sigma_{DG}$.

Při počítání cyklů metodou stékajícího deště je zatěžný cyklus identifikován, neboli započítán pouze v případě, když

splňuje kritérium ukázané na obr. 36 ↑. Vrchol-údolí-vrchol nebo údolí-vrchol-údolí v časové posloupnosti bodů X-Y-Z se počítá jako cyklus, jestliže druhý rozkmit $\Delta\sigma_{YZ}$ je větší nebo roven prvnímu rozkmitu $\Delta\sigma_{XY}$. Jestliže druhý rozkmit je skutečně větší nebo roven prvnímu rozkmitu, pak započítáme cyklus, kterému odpovídá hodnota rozkmitu rovna první hodnotě, tj. $\Delta\sigma_{XZ}$. Střední napětí cyklu je dáno střední hodnotou napětí σ_X , σ_Y .



nakonec A-B-C je další cyklus.



Střední hodnota																				
Rozkmít	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	Suma
20	4	1	5	2	2	5	—	—	3	6	15	27	29	32	22	12	6	2	—	173
25	2	4	3	9	8	10	4	6	2	7	17	37	36	43	33	13	7	1	2	244
30	1	1	5	3	1	1	4	3	—	4	13	20	20	23	20	8	6	1	—	134
35	1	1	4	2	3	2	—	1	3	2	8	17	16	11	11	7	2	—	—	91
40	—	1	1	1	2	1	1	—	—	4	7	15	16	9	8	2	—	—	—	68
45	—	1	—	4	3	—	—	—	—	2	1	9	7	2	3	1	—	—	—	33
50	—	—	2	2	2	1	—	—	—	2	2	3	3	1	1	1	1	—	—	21
55	—	—	1	1	—	—	—	—	—	2	2	4	4	2	—	1	—	1	—	18
60	—	1	1	—	—	—	—	—	—	1	1	3	2	1	—	—	—	—	—	10
65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	1	—	1	—	—	—	—	—	3
70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	1	—	—	—	—	—	—	3
75	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	1	2	—	—	—	—	—	—	—	4
80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
85	—	—	—	—	1	—	1	3	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8
90	—	—	—	—	—	—	—	—	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4
95	—	—	—	—	—	1	—	1	4	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7
100	—	—	—	—	—	—	—	5	3	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9
105	—	—	—	—	—	—	—	3	3	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9
110	—	—	—	—	—	—	—	—	2	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5
115	—	—	—	—	—	—	—	—	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3
120	—	—	—	—	—	—	1	—	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3
125	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
130	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
135	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
140	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
145	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
150	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Obr. 38 Záznam časového průběhu zatěžování sejmů z rámu dopravního prostředku, a matice čísel charakterizující zátěžné cykly (rozkmit, střední hodnota) zpracované metodou stékajícího deště. V matici střední hodnoty a hodnoty rozkmítu jsou vyjádřeny v procentech maximálního zatížení a zaokrouhleny.

Pomocí obrázku 37 si stručně popíšeme základní principy započítávání cyklů při nepravidelném zatěžování. Předpokládejme, že nepravidelná časová změna napětí se opakuje v určitých blocích. Pro stanovení začátku bloku je zavedena konvence, že počáteční extrém (údolí nebo vrchol) vezmeme ten, který má největší absolutní hodnotu napětí – viz obr. (a), (b). Vlastní počítání cyklů začneme z bodu D a používáme kritérium, které jsme uvedli na obr. 36. D-E-F není cyklus, E-F-G je cyklus. Do tabulky zapíšeme rozkmít E-F a z další procedury tyto dva započtené extrémy vypustíme a pokračujeme dál. Jestliže cyklus nemůže být započten posuneme se po časové ose o jeden extrém dál. Např. v obr. (d) po započtení E-F byly body E, F vypuštěny a postupováno dál, G-H-A není cyklus, H-A-B není cyklus, až

Počítání cyklů je úplné v případě, že je vyčerpána celá historie v bloku. V příkladu započtené cykly jsou E-F, A-B, H-C a D-G, jejichž rozkmít a střední hodnota jsou tabelovány v obr. 37. Poznamenejme, některé z těchto cyklů jsou jednoduché (E-F, A-B) a jiné úplné (H-C, D-G).

Pro dlouhé zatěžovací historie je vhodné výsledky počítání cyklů metodou stékajícího deště prezentovat jako matici zahrnující počet cyklů, které odpovídají různým kombinacím rozkmítu a střední hodnoty. Příklad je na obr. 38. Poznamenejme že hodnoty rozkmítu i střední hodnoty jsou zaokrouhleny na celá čísla a to proto, aby matrice měla rozumnou velikost. Počítání cyklů je často použito přímo na zatěžovací historii jak je tomu např. v obr. 38. Tato metoda je obsahem např. amerických norem ASTM E 1049 pro kovy a ASTM D671 pro plasty.