

9. lekce

Únavové poškození konstrukce při časově proměnlivém zatížení

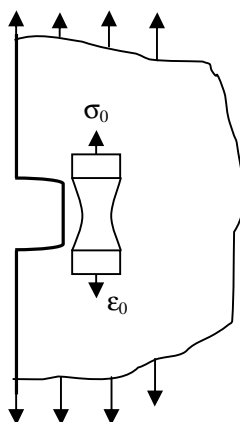
Obsah:

9.1– Úvod	2
9.2 – Pojem kmitavého namáhání	3
9.3 – Wöhlerova křivka	4
9.4 – Součinitel bezpečnosti v oblasti časované pevnosti	5

9.1– Úvod

Kmitavé zatížení konstrukce vytváří únavové poškození materiálu. Toto poškození je následkem plastické deformace, která je lokalizována do okolí vrubů. Nejde jen o vrub ve vlastním slova smyslu (viz.6.lekce), ale o všechna místa, kde materiál mění znatelně své vlastnosti, deformační tuhost, či kde vykazuje diskontinuity rozmanitého typu.

Vrubové účinky vznikají také v povrchové vrstvě materiálu, která má sníženou tuhost a zpravidla mikrogeometricky nepravidelný tvar. Konstrukční vruby, defekty materiálu a nerovnosti povrchu mají velký vliv na únavovou pevnost těles. Jen určitý omezený objem materiálu je vystaven koncentrovanému plastickému přetvoření při elastické cyklické deformaci celého tělesa. To ukazuje, že únavové poškození je lokální proces a závisí tedy na lokálních vlastnostech materiálu (viz obr 9.1). Protože přitom vzniká nakonec únavový lom, je zřejmé, že plastické deformaci předchází šířící se kořen trhliny, celý rozvoj poruchy soudržnosti musí být postupný a závisí na počtu změn zatížení.



Obr.9.1

Lokální mechanické vlastnosti materiálu se cyklickými plastickými deformacemi mění. Měřítkem těchto vlastností nejsou výsledky statických zkoušek materiálu, neboť ty ukazují průměrné vlastnosti v průřezu tělesa většinou při homogenním nebo lineárním rozdělení napětí a neuplatňují se při nich změny vyvolané mechanickým stárnutím materiálu mnohonásobně opakovanou místní plastickou deformací.

U únavového poškození má zásadní vliv místní zvýšení napětí, jeho nerovnoměrné rozdělení okolo nejvíce namáhaného místa, tzv. gradient napětí.

Únava celé konstrukce je tedy porušení soudržnosti konstrukce kmitavým zatížením při nižší úrovni nominálního napětí, než je mez statické pevnosti, přičemž vzniká lokální poškození materiálu postupně se rozvíjející střídavou plastickou deformací až do objevení se únavové trhliny. Ta se pak šíří postupně až do konečného lomu konstrukce.

9.2 – Pojem kmitavého namáhání

Převážná většina strojních částí a konstrukcí je v provozu namáhána časově proměnlivými silami, které mají povahu opakovaných účinků. Obecný případ s různě velkými výkmity sil a s různým charakterem jejich časové proměnlivosti nazýváme kmitovým namáháním.

Je-li proměnlivost sil ustálena do stále stejných nejvyšších a nejnižších mezí při stejné frekvenci změn, jde o prosté **cyklické namáhání**, které **je zvláštní případem namáhání kmitového**.

Se zřetelem k tomu, že kmitové namáhání lze složit superpozicí z řady jednoduchých cyklických namáhání o různé amplitudy a frekvenci, je pro porozumění změn, které proměnlivé účinky v tělesech vyvolávají, vhodné nejdříve sledovat ustálené cykly namáhání, a pak studovat zákony kumulace poškození, vyvolaného superpozicí jednotlivých cyklických namáhání.

Pokud síly vyvolávají jím úměrná napětí, je vhodné se zabývat dále časovým průběhem napětí. Analogicky se lze zabývat časovým průběhem poměrné deformace.

Uzavřená změna napětí, která nabývá spojité řady hodnot, se nazývá **cyklus napětí** (viz obr 9.2). K hlavním charakteristikám napěťového cyklu patří:

- perioda cyklu, tj. čas, v němž proběhne uzavřená jednorázová změna napětí.
- největší s_h a nejmenší s_d napětí cyklu, tj. krajní hodnoty napětí v průběhu jednoho cyklu.
- střední napětí cyklu s_m

$$s_m = \frac{1}{2}(s_h + s_d),$$

- amplituda napětí cyklu, tj. polovina algebraického rozdílu krajních hodnot napětí cyklu

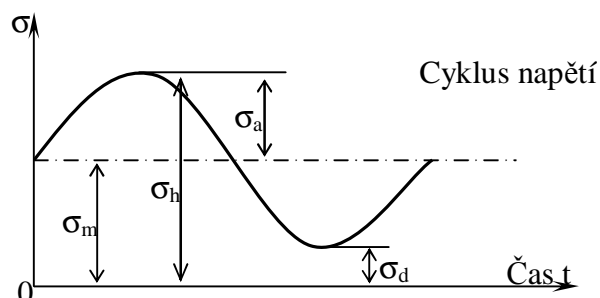
$$s_a = \frac{1}{2}(s_h - s_d),$$

- rozkmít napětí $2 s_a$

- součinitel nesouměrnosti napěťového cyklu $R = \frac{s_d}{s_h}$.

Tento součinitel má pro střídavé souměrné napětí hodnotu $R=-1$, pro střídavé nesouměrné napětí $-1 < R < 0$, pro mívivé $R=0$ a pro tepavé $0 < R < 1$. Uvedená napětí lze si představit jako napětí složená ze dvou částí:

- stálého (konstantního) napětí, rovného co do velikosti střednímu napětí cyklu s_m ,
- proměnného (cyklického) napětí o velikosti amplitudy s_a .

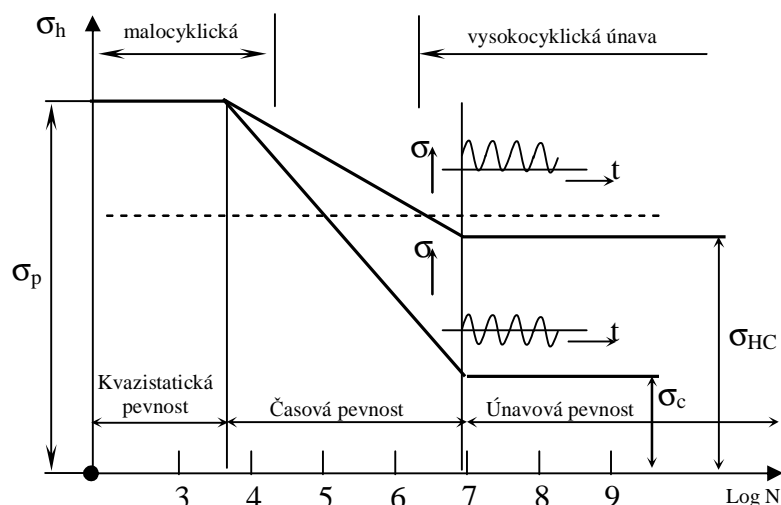


Obr. 9.2

9.3 – Wöhlerova křivka

Nejstarším podkladem pro hodnocení únavové pevnosti materiálu je tak zvaná **Wöhlerova křivka**. Wöhler před více než sto lety tuto křivku určoval pro ohyb za rotace na válcových tyčích kruhového průřezu jako podklad posouzení pevnosti náprav u železničních vozidel. Je nutno zdůraznit, že jde o křivku cyklické pevnosti, tj. křivku, která představuje stoprocentní poškození zkušební tyče lomem. Obsahuje tedy všechny fáze vzniku a vývoje únavových trhlin až do konečného lomu, aniž tyto fáze rozlišuje. Tato křivka má dosud velký praktický význam, neboť je získána nejjednodušším způsobem, a po dlouhou dobu se používala jako podklad výpočtů, až se v technické praxi vžila.

Život vzorku, který je složen z etapy vzniku i rozvoje únavové trhliny při cyklickém namáhání, je přirozeně zatížen velkým rozptylem. Ukazuje se, že Wöhlerova křivka nemůže poskytnout spolehlivou představu o únavové pevnosti hladkých válcových těles, pokud není doplněna také veličinami vyjadřujícími rozptyl výsledků zkoušek. Statistické zpracování únavových zkoušek je základní podmínkou objektivnějšího hodnocení únavových vlastností materiálu.



Obr 9.3

Wöhlerova křivka hladkých vzorků technických kovových materiálů má typický charakter v souřadnicích $s - \log N$ (viz obr. 9.3). Diagram je možno rozdělit na tři typické úseky. V první části leží kvazistatická pevnost (zpravidla do 10^3 cyklů). V druhé části diagramu je přímkový pokles mezního napětí s $\log N$, a tedy pevnost vzorku závisí na počtu cyklu. Tento úsek proto nazýváme **oblastí časované pevnosti**. Konečně v třetí části diagramu, zpravidla u kovů za normální teploty pro počet cyklů nad 10^7 , je dosaženo tak zvané základní **meze únavy**, označované v normách symbolem S_c **pro střídavé cyklické napětí** (souměrný cyklus) a symbolem S_{HC} **pro mříjivé cyklické napětí**. Při $N > 10^7$ nezáleží již prakticky pevnost vzorku na počtu cyklů namáhání.

V oblasti časované pevnosti lze Wöhlerovu křivku vyjádřit mocninou funkcí

$$S_N^m N = S_C^m N_C$$

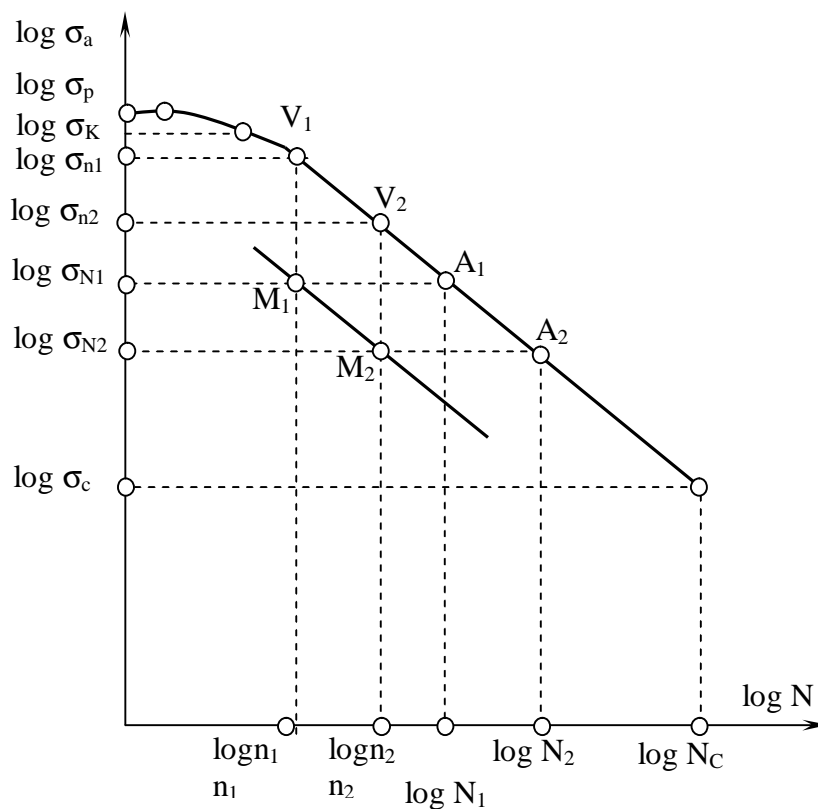
kde N_C je základní počet cyklů pro mez únavy S_C , rovný u ocelí obvykle 10^6 až 10^7 (základna zkoušek únavy).

9.4 – Součinitel bezpečnosti v oblasti časované pevnosti

Rovnice (9.1) se jeví pro další matematické zpracování jako velmi vhodná a vykazuje dostatečně spolehlivé výsledky pro oblast dlouhodobé časované únavy. Pro praktickou potřebu se exponent n určí pomocí dvou experimentálně zjištěných bodů A_1 , A_2 na Wöhlerově křivce (viz obr. 9.4). Potom exponent n vypočteme ze vztahu:

$$n = \frac{\log N_2 - \log N_1}{\log s_{N1} - \log s_{N2}} = \frac{\log(N_2 / N_1)}{\log(s_{N1} / s_{N2})} \quad (9.2)$$

Kde s_{N1} a s_{N2} jsou napětí střídavých souměrných cyklů, která rozruší materiál po N_1 a N_2 cyklech zatížení. Z obr. 9.4 je zřejmé, že body A_1 ($\log N_1; \log s_{N1}$) a A_2 ($\log N_2; \log s_{N2}$) leží na přímce. Protože hodnota exponentu n je různá podle toho, je-li táž Wöhlerova křivka vyjádřena podle s_h nebo s_a , budeme v dalším důsledně klást $s_N = s_a$. Je-li součást namáhána n_1 cykly souměrného střídavého napětí o amplitudě s_{N1} , můžeme tento stav znázornit bodem M_1 (n_1 , s_{N1}).



Obr. 9.4

Vedeme-li bodem M_1 rovnoběžky s osou N a s_a do průsečíku s únavovou křivkou, můžeme určit součinitel bezpečnosti podle napětí ze vztahu $k_s = \frac{s_{n1}}{s_{N1}}$, kde s_{n1} je časová mez únavy odpovídající n_1 cyklům zatížení do poruchy. Součinitel bezpečnosti podle počtu cyklů je dán výrazem $k_N = \frac{N_1}{n_1}$, kde N_1 je počet střídavých souměrných cyklů o amplitudě s_{n1} , při němž se materiál rozruší.

Poněvadž oba body A_I a V_I leží na únavové křivce, kterou jsme vyjádřili rovnicí (9.1), dostaneme

$$s_{N_1}^m N_1 = s_{n_1}^m n_1,$$

čili

$$\left(\frac{s_{n_1}}{s_{N_1}} \right)^m = \frac{N_1}{n_1},$$

z čehož plyne

$$k_s^m = k_N. \quad (9.5)$$

Vztah (9.5) ukazuje, že mezi součinitelem bezpečnosti podle napětí a součinitelem bezpečnosti podle cyklu je jednoznačná závislost, jejíž tvar je při platnosti rovnice (9.1) vyjádřen výrazem (9.5). Má-li materiál skutečnou mez únavy σ_C , pak lze říci, že součinitel bezpečnosti podle meze únavy je

$$k_C = \frac{s_C}{s_{N_1}} \quad (9.6)$$

Je-li $k_C < 1$ (jako např. pro bod M_I na obr. 9.4), potom při počtu cyklů N_I , určeném ze vztahu

$$N_1 = N_C \left(\frac{s_C}{s_{N_1}} \right)^m$$

nastane porušení. Je-li $k_C > 1$, nemůže porušení nastat při žádném počtu cyklů.

Je třeba upozornit, že výsledky zkoušek podle Wöhlera vykazují značný rozptyl. Proto je nutno udávat u každé Wöhlerovy křivky pravděpodobnost (spolehlivost) hodnot. Obvykle se používá průměrné Wöhlerovy křivky odpovídající pravděpodobnosti přežití $p = 0,5$.