

STANOVENÍ ÚNAVOVÉ DEGRADACE A ŽIVOTNOSTI ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ

ASSESSMENT OF FATIGUE DEGRADATION AND SERVICE LIFE OF POWER-PRODUCING EQUIPMENT

Milan Holický

Kloknerův ústav, České vysoké učení technické v Praze

Abstrakt

Cyklická únava materiálů významně ovlivňuje degradaci a celkovou životnost energetických zařízení v elektrárnách. Současné postupy hodnocení únavových jevů uváděné v nových mezinárodních předpisech ISO a CEN vycházejí z koncepce S-N křivek únavových vlastností materiálů a Palmgren-Minerova pravidla kumulace poškození. Nejistoty únavových vlastností energetických zařízení a účinků zatížení se podchycují dílčími součiniteli, které je nutno stanovit individuálně s ohledem na skutečné podmínky zařízení.

Abstract

Cyclic fatigue of materials significantly affects the degradation and service life of power-producing equipment. The present procedures of fatigue assessment provided in new international documents ISO and CEN are based on S-N curves of material properties and the Palmgren-Miner rule for accumulation of the fatigue damage. Uncertainties in fatigue properties of the equipment and in load effects are conveyed by the partial factors that should be specified individually considering actual conditions of the equipment.

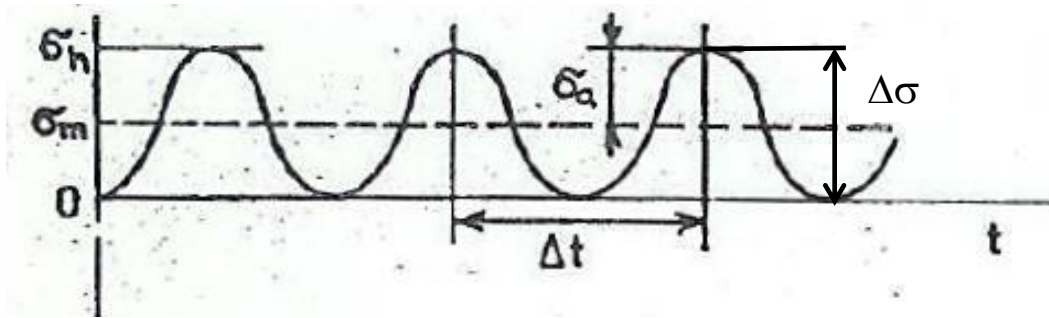
Úvod

Únava materiálů se projevuje při cyklickém, střídavém namáhání u řady dílců a konstrukcí. Typické příklady energetických zařízení zahrnují součásti turbín, příslušenství, kotlů, parogenerátorů, generátorů, potrubí, čerpadel, armatur atd. Odhaduje se, že přibližně 80 % mechanických porušení ocelových konstrukcí souvisí s únavou materiálu. Proto je problematika únavy materiálů předmětem experimentálního i teoretického výzkumu od počátku 19. století.

Současné postupy hodnocení únavových jevů jsou zachyceny v nových mezinárodních předpisech ISO [1], CEN [2], [3]. Tyto dokumenty vycházejí z koncepce S-N (Wöhlerových) křivek únavové odolnosti materiálů a z všeobecně přijatého Palmgren-Minerova pravidla kumulace postupného poškození od zatížení. Nejistoty únavových vlastností materiálů a modelů mechanického poškození zařízení od účinků cyklického zatížení se podchycují pravděpodobnostními rozbory a odvozenými dílčími součiniteli pro materiálové vlastnosti a účinky zatížení. Dostupné operativní postupy a terminologie nejsou však zcela jednotné a vyžadují další vývoj a koordinaci.

Podrobný popis analýzy únavového chování ocelových prvků je uveden v normě [3] a dalších publikacích. Pozoruhodný je dokument na Wikipedii [4] z roku 2020, který uvádí historický vývoj poznání, řadu odborných odkazů a početnou bibliografii (od roku 1837). Nedávná publikace [5] popisuje mechanickou podstatu progresivního únavového poškození materiálů a kovových prvků i možnosti jejich experimentálního vyšetřování. Uvádí rovněž řadu praktických poznatků a instruktivních výpočtů.

Popis cyklického namáhání způsobujícího únavu materiálu obvykle vychází z parametrů jednoosého střídavého napětí, které jsou zachyceny na obr. 1. Složitější případy víceosého namáhání běžných ocelových prvků (včetně styků a svarů), které se vyskytují u energetických zařízení, jsou uvedeny v mezinárodní normě pro ocelové konstrukce [3].



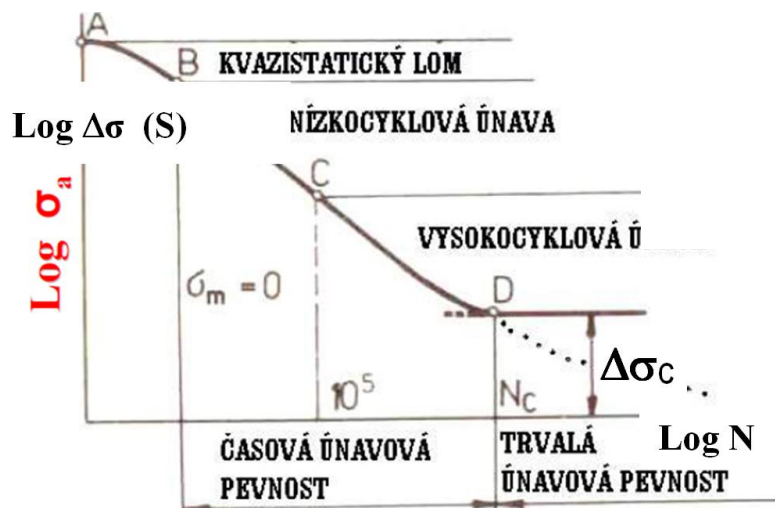
Obr. 1: Základní parametry cyklického namáhání, σ_h – horní napětí, σ_a – amplituda napětí, σ_m – střední napětí, $\Delta\sigma$ – rozkmit napětí, Δt – časová perioda cyklu

Únavové vlastnosti materiálů

Wöhlerova křivka $\Delta\sigma$ -N (též S-N křivka) používaná pro ověřování poškození únavou se zpravidla stanoví experimentálně za předpokladu, že:

- nominální nebo horní napětí jsou stanovena v místě koncentrace napětí,
- metoda stanovení napětí je přesně určena.

Jednou z nejdůležitějších charakteristik únavy je Wöhlerova křivka $\Delta\sigma$ -N [3] (též S-N křivka [1], [2]), tj. závislost počtu cyklů do únavové poruchy N na rozkmitu napětí $\Delta\sigma$ (S), zachycená v logaritmickém měřítku na obr. 2.



Obr. 2: Wöhlerova křivka odolnosti $\log\Delta\sigma$ - $\log N$ (S-N) křivka

Wöhlerova křivka odolnosti (S-N nebo $\log\Delta\sigma$ - $\log N$ křivka) je zpravidla stanovena pro jedonosé namáhání. Pro složitější víceosé namáhání je třeba odvodit ekvivalentní pravidlo.

Nepřavidelné cyklické zatížení s proměnnou amplitudou se zpravidla redukuje na sérii ekvivalentních zatěžovacích cyklů na základě specifické metodiky „stékání a nádrže“ [2], která je stručně popsána v příloze A tohoto příspěvku. Podrobné postupy a příklady aplikace této metodiky pro stanovení rozkmitu (rozpětí) návrhové únavové odolnosti materiálu a vysokofrekvenčního zatížení jsou podrobně uvedeny v dokumentu [2].

Účinky zatížení

Prvky energetických zařízení jsou zpravidla vystaveny komplikovanému, často náhodnému sérii proměnného zatížení. Spolehlivé stanovení únavového poškození a životnosti těchto zařízení metodou napětí nebo přetvoření zpravidla sleduje následující operativní postup [3].

1. Komplikované únavové zatížení se redukuje na sérii jednoduchých opakovaných zatížení na základě techniky analýzy stékání nebo nádrže.

2. Histogram cyklických napětí vytvořený metodikou stékání je podkladem pro spektrum únavového poškození.
3. Pro každou úroveň napětí je stanoveno kumulativní poškození na základě S-N křivky.
4. Vliv všech složek poškození se sloučí na základě Palmgren-Minerova pravidla kumulace účinků zatížení.

Hodnocení únavy a životnosti

Materiálová vlastnost popsaná Wöhlerovou S-N křivkou, která se využívá pro hodnocení únavového poškození, se opírá o experimentální vyšetřování vlastností materiálu. Experimentální vzorky materiálu jsou vystaveny cyklickému namáhání při konstantní amplitudě napětí až do porušení. Rozpětí (rozkmit) napětí S vztažené k počtu cyklů do porušení N tvoří Wöhlerovu S-N křivku, která je důležitou únavovou charakteristikou materiálu a může být závislá na průměrném napětí cyklického zatížení.

Skutečný vliv proměnného napětí působícího na konstrukci se uvažuje prostřednictvím kumulativního poškození. Nejčastěji se aplikuje Palmgren-Minerovo pravidlo, podle kterého se kumulují dílčí poškození n_i/N_i , kde n_i je počet aplikovaných cyklů a N_i počet cyklů do porušení daného S-N křivkou. Kumulovaný stupeň poškození nemá přestoupit kritickou hodnotu D_c , která se ideálně rovná jedné. Porušení teoreticky nastane, jestliže kumulovaný stupeň porušení překročí kritickou hodnotu D_c , tj. platí-li fyzikální vztah

$$\sum \frac{n_i}{N_i} > D_c . \quad (1)$$

V praktických případech jsou však veličiny N_i a D_c ve vztahu (1) závislé na skutečných podmínkách působení konstrukce a možnostech jejich monitorování (detekce trhlin). Obě veličiny je nezbytné považovat za náhodné. Při operativním odhadu únavového poškození materiálů a konstrukcí se proto hodnota počtu cyklů do porušení N_i a kritická hodnota únavového poškození D_c uvažují návrhovými hodnotami [1], [2], pro ocelové konstrukce [3]. Příslušné návrhové hodnoty se stanoví na základě charakteristických (nominálních) hodnot a příslušných dílčích součinitelů, které přihlížejí k náhodnému chování počtu cyklů N_i a kritické hodnoty únavového poškození D_c .

Únavovou životnost t_f lze odhadnout na základě reprezentativního (středního) počtu aplikovaných cyklů zatížení n_f až do únavové poruchy a střední časové periody cyklu zatížení Δt_f . Únavová životnost je tedy dána součinem

$$t_f = n_f \Delta t_f . \quad (2)$$

V různých odborných oblastech se při odhadu únavové životnosti materiálů uplatňuje několik metod [4]: metoda napětí, metoda přetvoření, metoda šíření trhlin a pravděpodobnostní postupy založené na předchozích metodách.

Ověření na základě dílčích součinitelů

Nejistoty kritického únavového poškození energetického zařízení se v souladu s aktuálně platnými předpisy uvažují prostřednictvím metodiky dílčích součinitelů stanovené mezinárodními předpisy [1], [2], [3]. Podrobný postup ověřování únavy závisí na analýze mechanického působení zařízení. Metodika dílčích součinitelů se při analýze únavového poškození aplikuje v návaznosti na pravidla kumulace únavového poškození na základě Wöhlerovy S-N křivky.

Únavová odolnost popsaná S-N křivkou je stanovena pro příslušný materiál se zřetelem k únavové pevnosti materiálu $\Delta\sigma_c$ ($2\Delta\sigma_a$), kde $\Delta\sigma_c = 0,3 \sim 0,5$ pevnosti materiálu. Návrhová hodnota únavové pevnosti $\Delta\sigma_{cd}$ je redukována dílčím součinitelem γ_{MF} :

$$\Delta\sigma_{cd} = \Delta\sigma_c / \gamma_{Mf} . \quad (3)$$

Dílčí součinitel γ_{Mf} pro únavovou pevnost je specifikován v příslušných materiálově zaměřených předpisech (1,0 až 1,35); závisí na druhu materiálu, možnosti opravy, následcích únavové poruchy, možnosti monitorování a opravy zařízení (pro závažné poruchy 1,35 [3]).

Fyzikální vztah pro porušení zařízení únavou (1) je doplněn dílčími součiniteli [1]:

$$\sum \frac{n_i}{N_i(\gamma_S S_i, \Delta\sigma_c / \gamma_{Mf})} < \frac{D_c}{\gamma_d} = \sum \frac{n_i}{N_i(\gamma_S S_i, \sigma_{cd})} < \frac{D_c}{\gamma_d} . \quad (4)$$

Do tohoto rozšířeného vztahu (zahrnujícího dílčí součinitele) se dosazují nejlepší odhady skutečné frekvence zatížení veličiny n_i a rozkmitu působícího napětí S_i . Odhad počtu cyklů do porušení $N_i(\gamma_S S_i, \Delta\sigma_{cd})$ závisí na návrhové hodnotě únavové pevnosti materiálu σ_{cd} podle vztahu (3) na rozkmitu napětí S_i vynásobené dílčím součinitelem nejistoty zatížení γ_S . Kritická hodnota D_c je ve vztahu (4) redukována dílčím součinitelem γ_d , který přihlíží k nejistotě kumulace poškození, k požadované životnosti a k následkům únavové poruchy [1].

Dílčí součinitele γ_S pro nejistoty rozkmitu S_i a γ_d pro kritickou hodnotu únavového poškození D_c je třeba stanovit na základě statistického rozboru dostupných dat. Jde o hodnoty větší než jedna (až do $\sim 1,5$), které závisejí zejména na:

- nejistotách a citlivostech příslušných náhodných veličin,
- schopnostech konstrukce (zařízení) uplatnit alternativní přenos zatížení,
- frekvenci monitorování a kontroly a možnostech opravy zařízení.

Dílčí součinitel γ_d pro kritickou hodnotu D_c je významný faktor, který je nutno stanovit individuálně na základě skutečných podmínek a následků poruchy energetického zařízení.

Souhrn

1. Únava materiálů a únavové poškození mohou významně ovlivnit degradaci a celkovou životnost energetických zařízení v elektrárnách.
2. Nové mezinárodní předpisy ISO a CEN vycházejí z koncepce S-N křivky únavových vlastností materiálů a Palmgren-Minerova pravidla kumulace únavového poškození.
3. Nejistoty rozkmitu S_i únavové pevnosti $\Delta\sigma_c$ a kritické hodnoty únavového poškození D_c se vyjadřují dílčími součiniteli, které je nutno pro každé zařízení stanovit individuálně.
4. Dílčí součinitele únavové pevnosti $\Delta\sigma_c$ a kritické hodnoty únavového poškození D_c lze stanovit statistickým rozbořem dostupných dat.

Literatura

- [1] ISO (2015): *ISO 2394:2015, General principles on reliability for structures*. Standard, ISO.
- [2] CEN (2019): *prEN 1990:2019, Eurocode – Basis of structural and geotechnical design*. European Standard, Working Document, European Committee for Standardization.
- [3] ČNI (2013): *ČSN EN 1993-1-9, Eurocode 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Únava*. Technická norma, Český normalizační institut, Praha.
- [4] Wikipedia (2020): *Fatigue (material)*, [online]. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_\(material\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(material))
- [5] Lašek, S. (2013): *Základy degračních procesů*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava. ISBN 978-80-248-3373-6

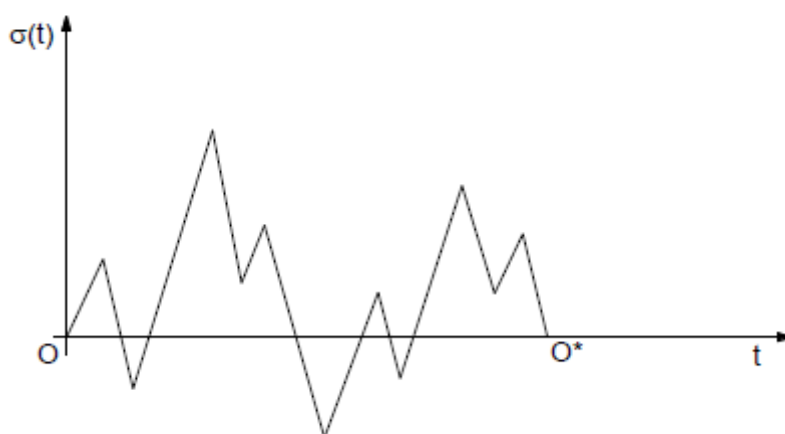
Poděkování

Príspevek byl zpracován v rámci řešení Národního centra pro energetiku TN010000007, Segmentu 1, PB1.16. Vývoj nástrojů predikce technického stavu zařízení elektráren a tepláren podporovaného Technologickou agenturou České republiky.

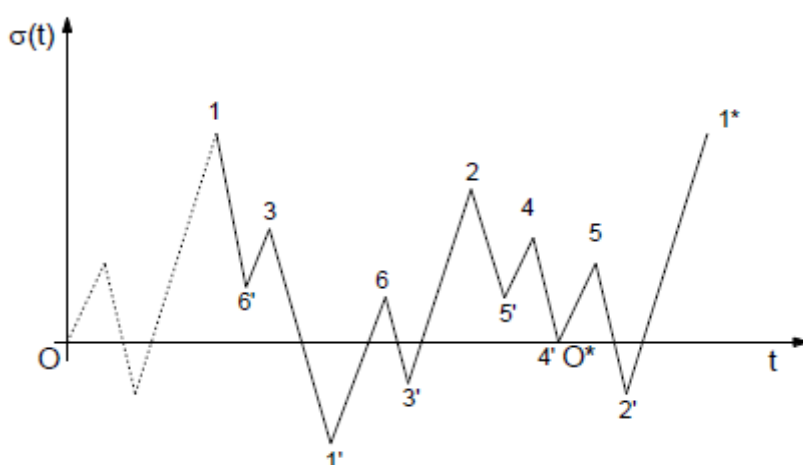
Příloha A – Metodika stékání a nádrže

Následující stručný popis metodiky „stékání a nádrže“ (rain-flow and reservoir) navazuje na informativní přílohu F mezinárodního dokumentu [2]. Tato informativní příloha F popisuje možnost transformace nepravidelného zatížení s proměnnou amplitudou napětí na ekvivalentní průběh pravidelného cyklického napětí pro konstrukce vystavené vysokofrekvenční únavě. Přínosem transformace je možnost využití Palmgren-Minerova pravidla kumulace únavového poškození i pro nepravidelné (náhodné) zatížení.

První krok transformace je zachycen na obr. A.1. Počáteční část skutečného průběhu napětí až do první maximální hodnoty se oddělí v místě maximálního napětí a tato počáteční část se přenesne na konec diagramu. Průběh napětí doplněný o počáteční oddělenou část je zachycen na obr. A.2; má dvě maximální hodnoty označené 1 a 1*.



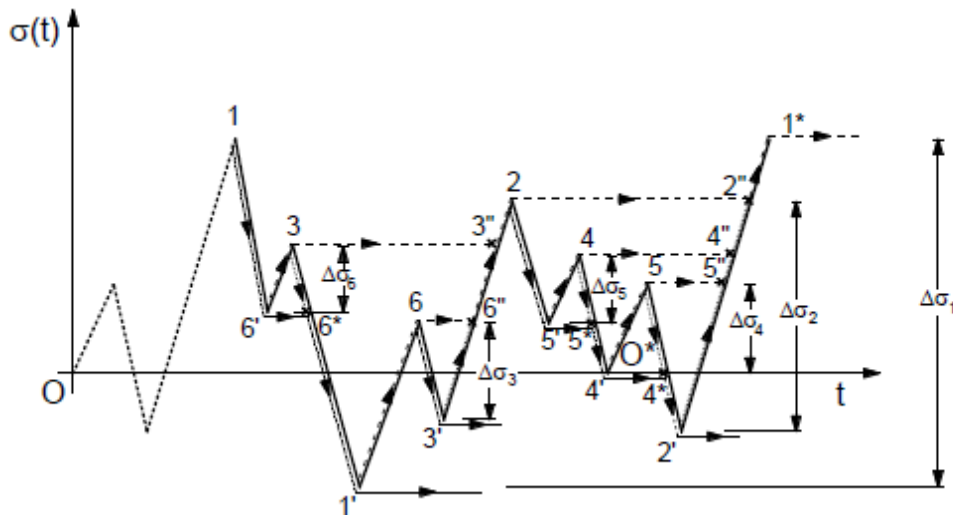
Obr. A.1: Počáteční průběh napětí



Obr. A.2: Modifikovaný průběh napětí

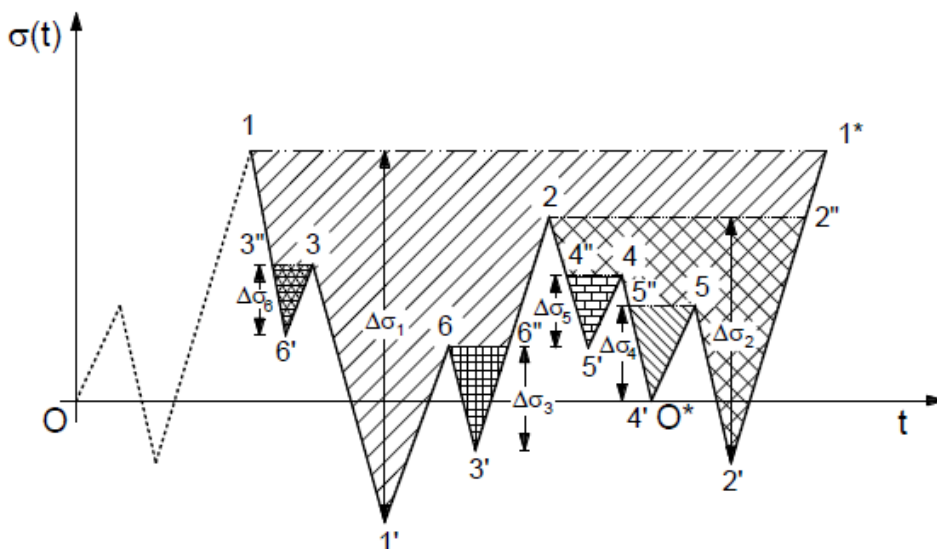
U doplněného průběhu napětí na obr. A.2 se označí sestupná lokální maxima číslicemi 1, 2, ... 6. Předpokládá se dále, že gravitační síly působí rovnoběžně s osou t a modifikovaný průběh napětí zachycený na obr. A.3 ukazuje směr stékání hypotetických kapek vody. Kapky stékají

z vrcholů 1, 2, ... 6 a naplňují následující údolí průběhu napětí; cesta každé kapky na suchou část průběhu napětí odpovídá polovičnímu cyklu napětí, jeho rozkmitu (rozsahu) $\Delta\sigma_i$ a doby trvání podél osy t . Každá kapka dopadne na část modifikovaného průběhu napětí nebo jeho mokrou část (obr. A.3). Na konci stékání je celý modifikovaný průběh zaplněn vodou. Výsledné cykly napětí odpovídají propojeným polovičním cyklům.



Obr. A.3: Metodika stékání

Ke stejnému výsledku vede metodika „nádrže“, která je zachycena na obr. A.4. Dno hypotetické nádrže tvoří modifikovaný průběh únavového napětí zachycený na obr. A.2. Zaplněná nádrž se postupně vyprazdňuje prostřednictvím nízkých bodů ($1'$, $2'$, ..., $6'$) tak dlouho, dokud nejsou nádrže prázdné (obr. A.3); každé vyprazdňování odpovídá jednomu cyklu a výška vody každého vyprazdňování odpovídá příslušnému rozsahu (rozkmitu) napětí $\Delta\sigma_i$ podle obr. A.4.



Obr. A.4: Metodika nádrže