

# VYHODNOCENÍ PROVOZNÍCH DAT KOTLŮ S OHLEDEM NA VÝPOČET ŽIVOTNOSTI

*Jan Masák*

*BiSAFE s.r.o., Malebná 1049, 149 00 Praha 4, e-mail: masak@bisafe.cz*

*Materiál konstrukčních uzlů parních kotlů je v průběhu provozu poškozován procesy únavy, procesy tečení a interakcí tečení a únavy. Parametry, které vstupují do výpočtu poškození jsou zejména tlak a teplota. Vlastní výpočet vychází ze spekter zatížení, která se vytvářejí z dat archivovaných v řídicím systému kotle. Část sledovaných veličin a parametrů lze využít pro výpočty životnosti. Příspěvek se zabývá problematikou vyhodnocení provozních záznamů parního kotle.*

***Klíčová slova:** Kotlový buben, výpočty životnosti, analýza napětí, součinitel intenzity napětí, metoda konečných prvků*

## 1. Úvod

V současné době jsou kladeny značné nároky na ekonomiku provozu energetických zařízení. Z technického hlediska to znamená, že zařízení musí vykazovat značnou spolehlivost s minimem servisních zásahů. Navíc je snahou prodloužovat celkovou provozní dobu až za hranici návrhové životnosti zařízení.

Využití moderních výpočtových a inspekčních metod skutečně v řadě případů umožňuje prodloužit dobu provozu. Vyžaduje však dostatečné množství informací o aktuálním stavu a také o předchozím provozu zařízení. Údaje o aktuálním stavu zařízení poskytují vhodné defektoskopické a diagnostické kontroly, kdy se sleduje, zda jsou v konstrukci přítomny defekty, popř. se zjišťuje úroveň degradace materiálu apod. Ke kvalifikovanému výpočtu zbytkové životnosti jsou však tyto informace nedostatečné. Jsou totiž obrazem toho, jak bylo dané zařízení provozováno. Z provozních záznamů lze stanovit zatížení, které má dominantní vliv na čerpání životnosti zařízení a identifikovat události, které v minulosti mohly neblaze přispět k degradaci konstrukce.

Provozní záznamy mají různou formu a rozsah, který v minulosti nebýval vždy reprezentativní. V současné době však automatické řídicí systémy poskytují dostatečné množství informací, jež lze efektivně použít při výpočtech životnosti. Údaje je však nejprve nutné vhodným způsobem zpracovat, tak aby byly k dispozici základní provozní charakteristiky a extrémny, které se v provozu vyskytly.

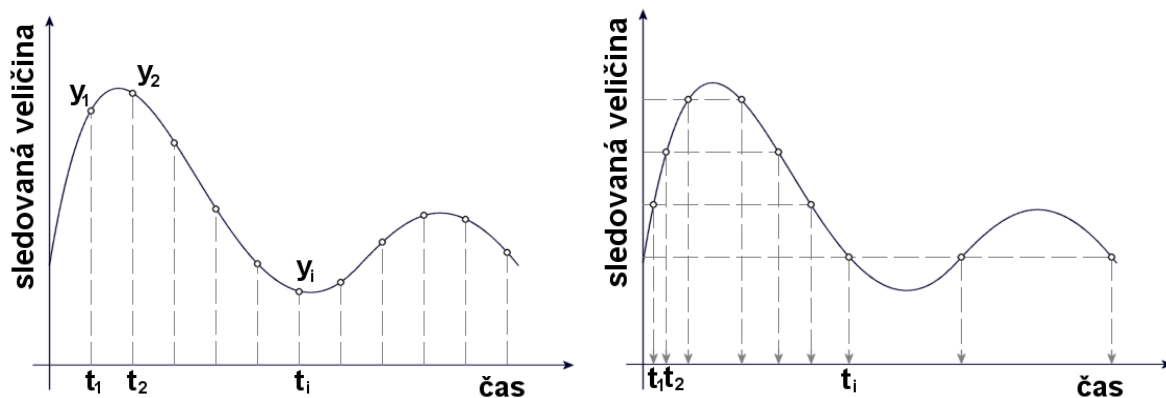
V předloženém příspěvku je zpracována problematika vyhodnocení provozních dat parního kotle s ohledem na základní mechanismy poškozování, kterými jsou creep a únava.

## 2. Veličiny potřebné pro výpočet životnosti

Moderní řídicí systémy umožňují archiovat velké množství informací nejrůznějšího charakteru a zaznamenávat změny mnoha veličin. Z hlediska výpočtu životnosti jednotlivých uzlů parního kotle jsou však potřebné jen některé z nich. Základním údajem je tlak a teplota páry v různých místech systému. Potřebné jsou však i další údaje, jako je teplota kovu a okamžitý výkon. U bubnů parních kotlů pak též hladina kotelní vody.

Z hlediska zálohování dat a rychlosti zpracování je důležitý způsob uchovávání sledovaných veličin. Snahou je samozřejmě uchovávat data v takové formě, aby byly minimalizovány nároky na kapacitu záznamových zařízení, ale současně musí být zaznamenány údaje dostatečně reprezentativní aby tak poskytl ucelený obraz o podmínkách provozu.

Prakticky se používají dva základní postupy – vzorkovací a hladinový (někdy označovaný jako přírůstkový). Oba způsoby jsou znázorněny na obr. 1. V případě vzorkovacího způsobu záznamu jsou v pevně stanovených intervalech zaznamenávány hodnoty sledované veličiny. Perioda vzorkování  $\tau$  musí být zvolena tak, aby záznam zachytil dostatečně přesně sledovaný děj. Je-li  $f$  nejvyšší frekvence vyhodnocovaného děje, pak by vzorkovací frekvence  $f_v = 1/\tau$  měla být minimálně dvojnásobná, tj.  $f_v \geq 2f$ . V druhém případě (hladinový způsob) se sledovaná veličina rozdělí na intervaly a sleduje se, v kterém intervalu se nachází. Zápis se provede v okamžiku překročení hranice intervalu. Výhodou hladinového postupu je, že data zpravidla vyžadují podstatně menší kapacitu záznamového média.



Obr. 1 Schematické znázornění principu vzorkovacího (a) a průběžného (b) způsobu zaznamenávání sledované veličiny

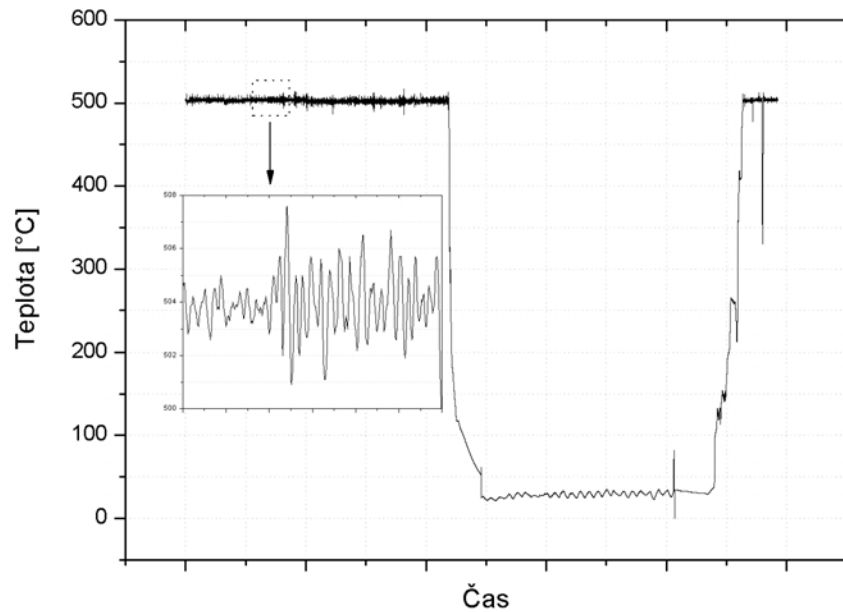
### 3. Spektra charakterizující poškození při tečení

Zpracováním měřených údajů získáme spektra jednotlivých veličin. Ty udávají dobu expozice na jednotlivých hladinách teploty a tlaku. S ohledem na poškozující mechanismy (creep a únava) a parametry (teplota a tlak) pak definujeme:

1. Spektrum tlaku charakterizující poškození tečením (SCP).
2. Spektrum teplot charakterizující poškození tečením (SCT).
3. Spektrum tlaku charakterizující poškození únavou (SUP).
4. Spektrum teplot charakterizující poškození únavou (SUT).

Jedním ze základních faktorů pro hodnocení životnosti a provozuschopnosti konstrukčních částí je vyhodnocení pracovních teplot. Zejména se jedná o případy, kdy je materiál poškozován tečením, protože poškození je závislé nejen na výši teplot, ale i na době celkové expozice na těchto teplotách.

Provozní teploty a tlak však nejsou absolutně konstantní, ale mění se v závislosti na odběratelských požadavcích i vlastním vytěžování kotlů. Příklad záznamu pracovních teplot je na obr. 2, kde lze rozlišit jednak provoz na pracovní teplotě (záznam je zvětšen ve výřezu) a odstávku zařízení, která odpovídá výraznému poklesu teploty.

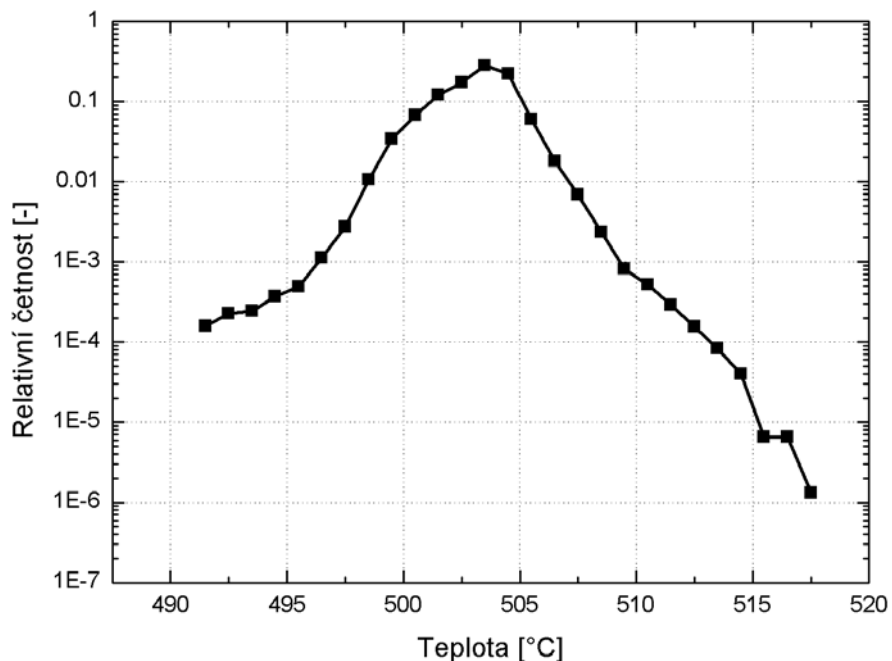


Obr. 2 Část záznamu teplot

Kolísání teplot během provozu není výrazné a pro hodnocení životnosti je prvořadým požadavkem statistické vyhodnocení teplotních spekter, která poskytují informace o dobách časové expozice na té které teplotní hladině. Průběh teplot je vyhodnocen ve formě relativních četností, tj.

$$t_i^r = \frac{\Delta t_i}{t_z},$$

kde  $t_i^r$  je relativní doba expozice na teplotní hladině  $T_i$ ,  $\Delta t_i$  je celková doba expozice na teplotě  $T_i$  a  $t_z$  je celková doba sledování provozních teplot. Příklad vyhodnoceného spektra teplot za sledované období je uveden na obr. 3.



Obr. 3 Spektrum teplot za sledované období provozu

Další hodnocení teplotních spekter lze provést stanovením efektivních teplot, které reprezentují stejný poškozuující účinek jako vlastní spektrum teplot. Vypočtená efektivní teplota pak slouží k porovnání s výpočtovou teplotou zařízení.

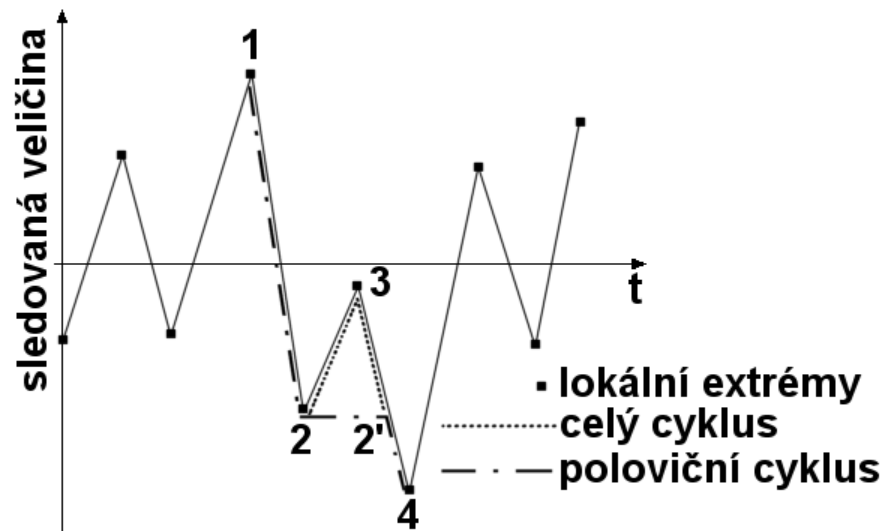
#### 4. Třídění záznamů

Při výpočtu únavového poškození pracujeme s kmity zatížení a únavové poškození daného cyklu charakterizuje amplituda napětí a střední hodnota cyklu zatížení. Hodnoty napětí, jako funkce času, nejsou zpravidla přímo měřeny. Změny napětí jsou ovšem dány kolísáním tlaku a teploty během provozu. Jinak řečeno, z průběhu tlaku a teploty lze vhodným matematickým modelem zrekonstruovat průběh napětí v analyzovaném prvku zařízení a problém zpracování časového průběhu napětí se přesouvá na zpracování měřeného tlaku a teploty.

Při zpracování posloupností dat je nutné zařazovat vybrané kmity sledované veličiny do tříd určených velikostí rozkmitu a střední úrovní kmitu. Obr. 4 znázorňuje příklad záznamu sledované veličiny a obsahuje i definice jednotlivých pojmů, které se používají při třídění záznamů. Křivka 1-2-2'-4 představuje poloviční cyklus (půlkmít), do kterého je vložen celý cyklus 2-3-2' (kmit). Celý cyklus představuje v diagramu napětí-deformace hysterezní křivku.

Obecná posloupnost hodnot se nejprve převede na posloupnost špiček kmitů (lokálních extrémů). Z takto upravené posloupnosti se pak vybírají a zařazují jednotlivé kmity nebo půlkmity pomocí některé z metod ASTM E1049-85 [1]:

1. Level-Crossing Counting (metoda přechodů tříd),
2. Peak Counting (metoda odečítání vrcholů),
3. Simple-Range Counting (metoda rozkmitů),
4. Range-Pair Counting (metoda párových rozkmitů),
5. Rainflow Counting (metoda stékající vody),
6. Simplified Rainflow Counting for Repeating Histories (zjednodušená metoda stékající vody pro opakované záznamy).



Obr. 4 Základní pojmy u metod třídění záznamu

Metody 1, 4 a 6 zaznamenávají celé kmity, metody 2 a 5 půlkmity. Pro metodu 3 lze dále zvolit, zda registrovat pouze kladné rozkmity (od dolní špičky k horní) nebo pouze záporné rozkmity (od horní špičky k dolní) nebo oba typy rozkmitů. V prvních dvou případech se zaznamenávají celé kmity, v třetím případě půlkmity.

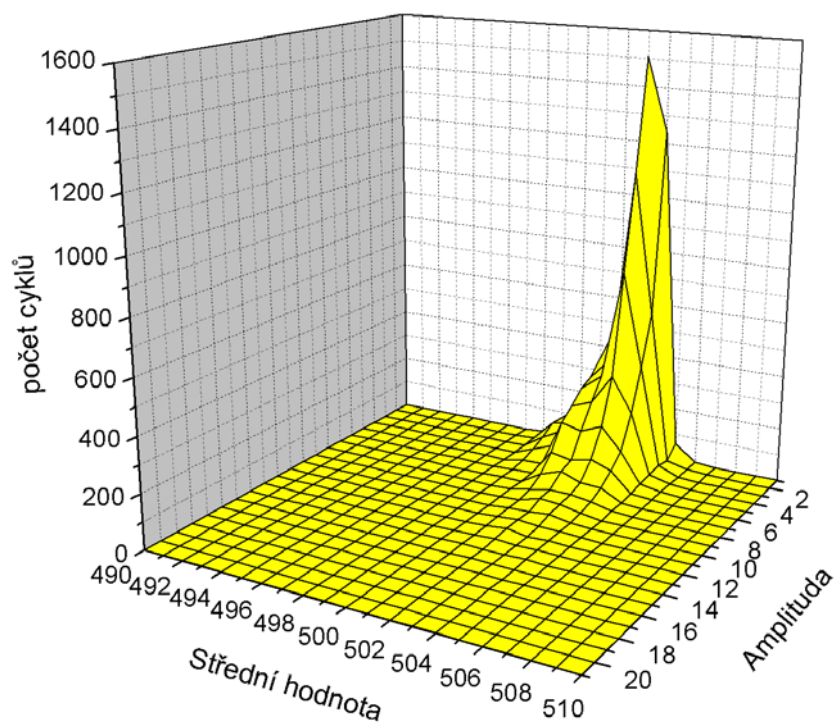
Výsledkem zpracování je matice počtu kmitů, kde v průsečíku  $i$ -tého řádku a  $j$ -tého sloupce je počet kmitů, jejichž rozkmit padl do  $i$ -té třídy pro rozkmity a jejichž střed padl do  $j$ -té třídy pro středy kmitů.

## 5. Metoda rain-flow

O metodě rain-flow, u nás známé jako metoda stékající vody (deště), se poprvé referovalo v roce 1968 [2], v odborných časopisech je doložena poprvé v roce 1972 [5]. Svě jméno dostala na základě představy, že voda stéká po střeše pagodovitěho tvaru, která vznikne natočením záznamu (viz detail na obr. 2) o 90 stupňů. Algoritmus metody je podrobně popsán ve výše zmíněné normě ASTM [1], kde lze nalézt i další modifikace této metody. Z publikací v českém jazyce lze doporučit např. [3, 4, 6].

Dnes je metoda stékání vody pravděpodobně nejpoužívanějším způsobem pro třídění záznamů pro únavové výpočty. Odpovídá fyzikální představě, že kumulace únavového poškození je spojena s nevratnou plastickou deformací. Jednotlivé kmity mají svůj obraz v diagramu napětí  $\sigma$  - deformace  $\varepsilon$  ve formě hysterese smyčky, jejíž plochu lze interpretovat jako přírůstek únavového poškození.

Metodu stékající vody lze zpracovat do formy výpočetního programu a zaznamenané hodnoty efektivně automaticky zpracovat. Výsledek takového počítačového zpracování je zobrazen na obr. 5, kde je graficky znázorněna matice četnosti jednotlivých cyklů, přičemž každý cyklus je charakterizován střední hodnotou a amplitudou.



5. Výsledek třídění záznamu teplot metodou stékající vody

## 6. Závěr

Provozní záznamy jsou nezbytnou součástí podkladové dokumentace při výpočtech zařízení v energetice a chemickém průmyslu. Podstatné jsou především informace o průběhu veličin, které bezprostředně ovlivňují namáhání zařízení, jako je např. tlak a teplota média.

Hodnoty sledovaných veličin lze uchovávat pomocí vzorkovacího nebo přírůstkového systému, přičemž přírůstkový systém je úspornější a tudíž výhodnější z hlediska menších nároků na kapacitu záznamových zařízení. Je však třeba podotknout, že se díky rozvoji výpočetní techniky a dostupnosti vysokokapacitních médií není tento problém již tolik palčivý. Např. na jeden CD disk lze zaznamenat data potřebná pro výpočet životnosti, která pokrývají jeden rok provozu zařízení. Možnosti jsou ještě větší při použití DVD disků, jejichž kapacita je přibližně sedmkrát vyšší.

Zaznamenané hodnoty se zpracují z hlediska mechanismů poškození creepem a únavou. Výsledkem jsou pak spektra, která udávají dobu expozice na jednotlivých hladinách tlaku a teploty a slouží jako podklad pro výpočet životnosti zařízení poškozovaných creepem. Při posuzování vlivu únavy je nutno rozložit zaznamenaný průběh sledované veličiny na jednotlivé cykly. Z mnoha postupů se nejlépe osvědčila metoda stékající vody.

## 7. Literatura

- [1] ASTM E 1049 – 85 Standard Practises for Cycle Counting in Fatigue Analysis, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985
- [2] Dowling N. E. Fatigue Failure Prediction for Complicated Stress-strain Histories, J. Materials, Vol. 7, 1972, No. 1, pp. 71 – 87
- [3] Frýba L., Sláma J. Třídění časových záznamů napětí, Stavebnický časopis, ročník 33, číslo 4, 1985
- [4] Klesnil M., Lukáš P. Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání, Academia, Praha, 1975
- [5] Matsuishi M., Endo T., Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress, Kyushu District meeting of Japan Society of Mechanical Engineers, Japan, 1968
- [6] Růžička M., Hanke M., Rost M. Dynamická pevnost a životnost, Vydavatelství ČVUT Praha, 1992

## Adresní údaje o autorech

<i>Plné jméno s tituly:</i>	Ing. Jan Masák
<i>Pracoviště a jeho začlenění do instituce/firmy:</i>	BiSAFE, s. r. o.
<i>Adresa pro korespondenci:</i>	Malebná 1049, 149 00 Praha 4
<i>E-mail:</i>	masak@bisafe.cz
<i>Fax:</i>	267 913 334
<i>Telefon:</i>	267 913 335