

## Modelování otěru palivových proutků

Štěpán Dyk<sup>1</sup>

### 1 Úvod

*Otěr* je specifickým typem opotřebení, ke kterému dochází v případě, že dvě součásti jsou k sobě ve stykové ploše přitlačovány normálovou silou a zároveň dlouhodobě dochází k jejich relativnímu kmitavému pohybu v tečném směru. Tím je způsoben lokální úbytek hmoty v kontaktní ploše.

Palivové proutky (PP) jsou v palivových souborech s předepnutím upnuty do distančních mřížek. V důsledku rozkmitání PP vlivem tlakových pulsací chladiva a vlivem obtékání proudem chladiva dochází v kontaktu s buňkami distančních mřížek k relativnímu skluzovému pohybu, který při dlouhodobém účinku vede k otěru pokrytí PP. V tomto případě je otěr velmi důležitým parametrem, neboť při ztenčení stěny pokrytí PP (zirkoniová tenkostěnná trubička) pod limitní hodnotu může dojít k nežádoucímu průniku zvýšeného množství štěpných produktů do chladiva. Otěr je v současné době určován experimentálně, viz Kim et al. (2006), nebo výpočetními přístupy, viz Zeman (2016), přičemž je zkoumána např. citlivost otěru na geometrických a materiálových parametrech kontaktu, viz Kim (2010); Lee and Kim (2007), či charakteru buzení.

### 2 Matematický model otěru PP v kontaktu s buňkami distančních mřížek

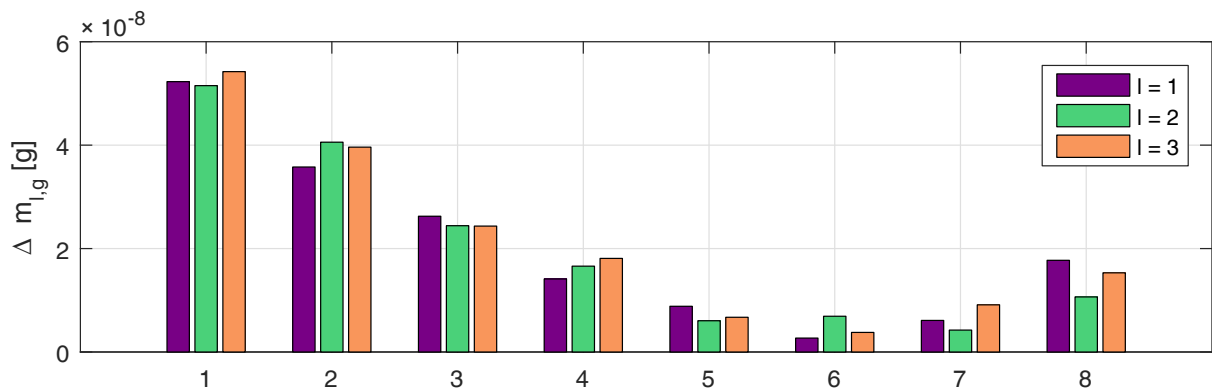
Pro určení otěru pokrytí palivových proutků je klíčová znalost pohybu PP. Pro výpočet lze použít např. komplexní model PP vyvíjený dlouhodobě na Katedře mechaniky FAV ZČU v Plzni, který sestává ze dvou poddajných kontinuí – pokrytí PP a sloupce palivových tablet, viz Zeman (2016); Dyk (2017). Tento model zahrnuje detailní popis rázových sil mezi oběma kontinuí, třecích sil v kontaktu a efekt předepnutí buněk distančních mříží a axiálního pružinového fixátoru. Model umožňuje simulaci kmitání PP v časové oblasti a následný výpočet skluzových rychlostí v daném kontaktním bodě. Pro modelování otěru byl navržen vztah vyjadřující tzv. *hodinový otěr* pokrytí PP, viz Zeman (2016), pro který platí

$$\Delta m_{l,g} = \mu W_{l,g} \frac{3600}{t_2 - t_1}, \quad l = 1, 2, 3, \quad g = 1, 2, \dots, 8, \quad (1)$$

kde  $\mu$  je otěrový parametr v [g/J],  $W_{l,g}$  je práce třecí síly v daném kontaktním bodě a příslušné indexy definují úroveň distanční mřížky  $g = 1, 2, \dots, 8$  a buňky  $l = 1, 2, 3$  na dané úrovni. Časy  $t_1, t_2 \in \mathbb{R}^{0+}$  vymezují časový interval, v němž již došlo k odeznění přechodových kmitů a PP kmitá ustáleně. Práci třecích sil v kontaktním bodě lze vyjádřit ve tvaru

$$W_{l,g} = \int_{t_1}^{t_2} f(c_{l,g}) |N_{l,g}(d_{j,g,r}) c_{l,g}| dt, \quad l = 1, 2, 3, \quad g = 1, 2, \dots, 8, \quad (2)$$

<sup>1</sup> student doktorského studijního programu Aplikovaná věda a informatika, obor Aplikovaná mechanika, e-mail: sdyk@ntis.zcu.cz



**Obrázek 1:** Ukázka hodinového otěru pokrytí PP na úrovních distančních mřížek  $g$  v kontaktu s buňkami  $l$

kde  $f(c_{l,g})$  je třecí koeficient,  $N_{l,g}$  je normálová síla a  $c_{l,g}$  je skluzová rychlost v daném kontaktním bodě. Ukázka výsledků výpočtů hodinového otěru pokrytí PP při uvážení buzení tlakovými pulsacemi chladiva ve standardním provozním režimu a při plně rozvinutých záznějích (daných blízkými, ale nestejnými otáčkami hlavních cirkulačních čerpadel) je uvedena na obr. 1.

### 3 Závěr

Metodika simulace pohybu PP a následné analýzy otěru umožňuje určit úbytek hmoty v daném kontaktním bodě. Výpočty lze provádět při modelování kmitání PP na různých úrovních abstrakce a v případě znalosti vývoje klíčových parametrů palivového proutku (mezera palivo-pokrytí, předepnutí buněk distančních mřížek, axiální síla pružinového fixátoru) lze provést odhad vývoje otěru pokrytí PP v průběhu kampaně.

### Poděkování

Tento příspěvek byl podpořen grantem SGS-2016-038.

### Literatura

- Dyk, Š., Zeman, V. (2017). *Nonlinear Vibration of Nuclear Fuel Rods*. Mechanisms and Machine Science, Vol 44, pp. 185–190.
- Kim, H.-K., Lee, Y. H., Heo, S. P. (2006) *Mechanical and experimental investigation on nuclear fuel fretting*. Tribology International, 39(10):1305–1319. The Fourth International Symposium on Fretting Fatigue The Fourth International Symposium on Fretting Fatigue.
- Kim, K.-T. (2010) *The effect of fuel rod supporting conditions on fuel rod vibration characteristics and grid-to-rod fretting wear*. Nuclear Engineering and Design, 240(6):1386–1391.
- Lee, Y.-H., Kim, H.-K. (2007) *Effect of spring shapes on the variation of loading conditions and the wear behaviour of the nuclear fuel rod during fretting wear tests*. Wear, 263(1-6):451–457, 2007. 16th International Conference on Wear of Materials.
- Zeman, V., Dyk, Š., Hlaváč, Z. (2016) *Mathematical modelling of nonlinear vibration and fretting wear of the nuclear fuel rods*, Archive of Applied mechanics, Vol 86(4): 657–668.