

THE MATERIAL MODEL OF RAILWAY WHEEL FOR NUMERICAL SIMULATIONS OF CYCLIC DEFORMATION

P. Pejchal*, J. Petruška**

Summary: *The stabilized hysteresis loop was determined for the material of railway wheel, by the condition of steady amplitude of axial strain. The compressive test by laboratory and elevated temperature were also performed. The Chaboche material model and the nonlinear kinematic material model was designed for this material. These material models were used in numerical simulations of rail wheel rolling on the rail. The stress strain responses, residual stresses and the different high cycle fatigue criterion were compared and the suitability of used material models was discussed.*

1. Úvod

Posouzení únavy materiálu, ke které dochází při valivém kontaktu železničního kola a kolejnice je základním problémem návrhu, výroby, údržby a bezpečnosti provozu železničních soustav. Pro kontaktní únavu železničních kol je typický vznik tří typů defektů. (Bernasconi,2006)

- Povrchové trhliny iniciované v důsledku akumulace plastické deformace, takzvaného ratchettingu, které mohou vést k oddělování tenkých povrchových vrstev. (Johnson,2000)
- Podpovrchové trhliny k jejichž iniciaci dochází typicky několik milimetrů pod povrchem (kontaktní plochou), kde se nachází oblast maximálních smykových napětí. V těchto místech může i v případě, že zde v několika počátečních cyklech vznikne plastická deformace, dojít k přizpůsobení (shakedown) materiálu, které je podporováno zpevněním, změnou geometrie kontaktní plochy a rozvojem zbytkového napětí. Velikost podpovrchových napětí však může být tak velká, že i v tomto případě dojde k iniciaci trhliny.
- Trhliny hluboko od povrchem, které se šíří z defektů i při velmi nízkých hodnotách složek tenzoru napětí.

* Ing. Petr Pejchal, UMTMB, FSI, VUT v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno, tel.: +420 541142804
e-mail: pejchal.p@centrum.cz

** Doc. Ing. Jindřich Petruška CSc., UMTMB, FSI, VUT v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno, tel.: +420 541142858, e-mail: petruska@fme.vutbr.cz

Pro posuzování únavy materiálu při valivém kontaktu těles byla navržena celá řada kritérií, jejich přehled uvádí např. (You,1996). Kritéria předpovídají zda dojde či nedojde k iniciaci makrotrhliny. Tyto kritéria se obvykle rozdělují na kritéria pro nízkocyklovou a vysokocyklovou únavu. Stanovení kritérií pro posouzení nízkocyklové únavy obvykle vychází z časových průběhů jednotlivých složek tenzoru přetvoření a tato kritéria předpovídají iniciaci povrchových, či podpovrchových únavových trhlin. Při stanovení kritérií, která byla navržena pro posuzování vysokocyklové únavy se obvykle vychází z časových průběhů složek tenzoru napětí, a to pro stabilizovanou (uzavřenou) hysterezní smyčku. To znamená, že posouzení vysokocyklové únavy pomocí těchto kritérií implicitně předpokládá, že se materiál přizpůsobí - dojde ke stabilizaci jeho deformačně napěťové odezvy. Rozlišujeme čtyři typy odezvy elastoplastického materiálu na cyklické zatížení (Johnson,2000).

- **Elastická odezva (Elastic):** V případě, kdy zatížení je natolik malé, že v žádném bodě materiálu nedojde k překročení meze kluzu materiálu.
- **Elastické přizpůsobení (Elastic shakedown):** V tomto případě byla během několika prvních cyklů v některém místě materiálu překročena mez kluzu. Konečná stabilizovaná deformačně napěťová odezva, je však vlivem zpevnění materiálu čistě elastická.
- **Plastické přizpůsobení (Plastic shakedown):** Během několika prvních cyklů došlo k postupnému nárůstu plastické deformace a stabilizovaný stav popisuje uzavřená hysterezní smyčka s nenulovou plochou.
- **Akumulace plastické deformace (Ratchetting):** Dochází k postupnému nárůstu plastické deformace v jednom směru až po dosažení kritické hodnoty přetvoření, kdy dojde k porušení materiálu. Obvykle dochází k oddělování tenkých plátek materiálu z kontaktní plochy.

O vzniku předešlých jevů bylo vysloveno několik vět (shakedown theorems), jejichž přehled uvádí (Johnson,2000) a na jejichž základě byly analyticky pro různé zatížení a geometrii valivého kontaktu odvozeny diagramy - tzv. „shakedown map“, které popisují podmínky vzniku předešlých jevů. Tyto diagramy jsou však odvozeny pouze pro základní geometrie, jako bodový kontakt a odvalování válce po rovině, za podmínek rovinné deformace.

Chceme-li zjistit jaká je odezva materiálu na cyklické zatížení při obecném valivém kontaktu, je vhodné použít některou z metod výpočtového modelování. V současné době je velmi rozšířená metoda konečných prvků (MKP). Použitý programový systém ANSYS umožňuje použití řady modelů mechanického chování materiálu (MM). Použitý materiálový model zásadně ovlivní matematickou simulací zjištěnou odezvu materiálu na cyklické zatížení. Například izotropní zpevnění způsobí elastické přizpůsobení během jednoho cyklu, lineární kinematické zpevnění vede buď na elastické nebo na plastické přizpůsobení. Postihnutí jevu akumulace plastické deformace vyžaduje použití materiálového modelu s nelineárním kinematickým zpevněním, a to například MM, který navrhl Caboche. (Chaboche,1990)

Chabocheho MM aplikuje podmínku plasticity von Misses. Podmínka plasticity je tedy tvaru rovnice (1), kde s je deviátor tenzoru napětí σ , a je deviátor kinematického tenzoru α (back-stress tensor), σ_0 je mez kluzu a R je izotropní proměnná pomocí které je možno zahrnout i zpevnování resp. změkčování materiálu.

$$f = \left(\frac{3}{2}(s - a) : (s - a)\right)^{1/2} - \sigma_0 - R \quad (1)$$

$$\frac{df}{d\sigma} : d\sigma > 0 \quad (2)$$

$$d\varepsilon_p = d\lambda \frac{df}{d\sigma} \quad (3)$$

$$d\lambda = d\varepsilon_{eq} = \left(\frac{2}{3}d\varepsilon_p : d\varepsilon_p\right)^{1/2} \quad (4)$$

Pokud je materiál zatěžován a platí rovnice (2), tak se předpokládá, že přírůstek plastické deformace má směr kolmý k ploše plasticity a je dán rovnicí (3) (Halama,2005), (Fedele,2005).

Chabocheho MM je model s nelineárním kinematickým zpevněním a jeho vlastnosti lze velmi dobře popsat rovnicí pro změnu kinematického tenzoru α (5,6). Je možno také zahrnout izotropní zpevnění, či změkčení pomocí izotropní proměnné R , jejíž změna je popsána rovnicí (7).

$$\alpha = \sum \alpha_i \quad (5)$$

$$d\alpha_i = \frac{2}{3}C_i d\varepsilon_p - \gamma_i \alpha_i d\lambda \quad (6)$$

$$dR = b(R_\infty - R)d\lambda \quad (7)$$

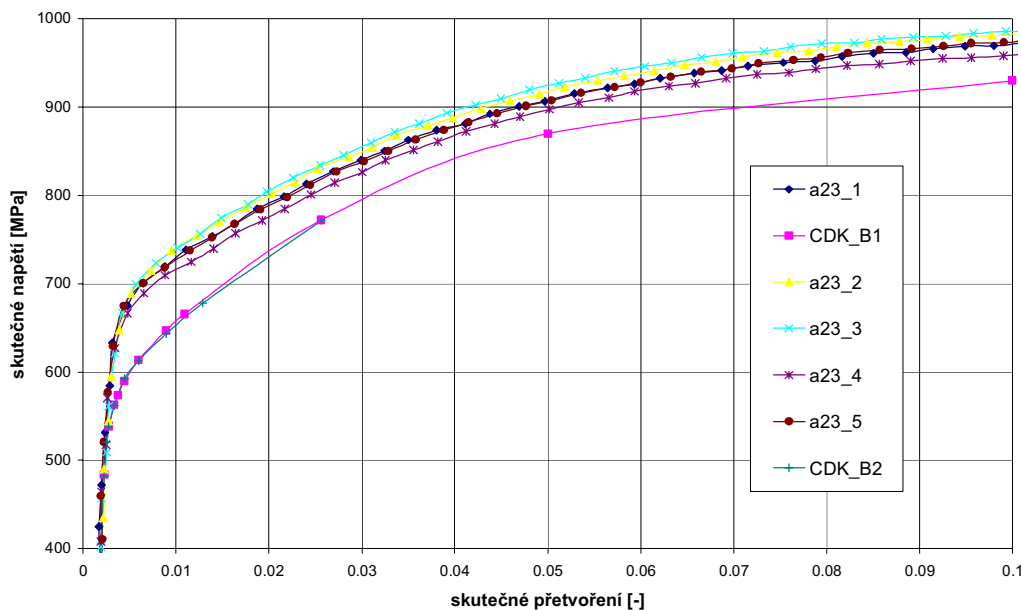
Kde C_i , γ_i , R_∞ a b jsou materiálové parametry.

2. Experiment

Z železničního kola byly odebrány z oblastí těsně pod kontaktní plochou vzorky materiálu. Osa vzorku byla rovnoběžná s osou kola. Na dvou vzorcích byla na Ústavu fyziky materiálů AV ČR, Brno stanovena cyklická deformační křivka (CDK) a to pro podmínky konstantní amplitudy deformace. Celkem bylo pro každý vzorek stanoveno 11 bodů CDK. Na každé úrovni amplitudy deformace byl realizován počet cyklů odpovídající přibližně 6% životnosti. CDK je vynesena na obrázku 1, vzorky: CDK_B1 a CDK_B2.

Na dalších pěti vzorcích tvaru válečku o průměru 10[mm] a výšce 15[mm] byly na pracovišti Ústavu strojírenské technologie, VUT v Brně provedeny pýchovací zkoušky. Závislost skutečného napětí na skutečném přetvoření pro vzorky a23_1 až a23_5 je taktéž uvedena na obrázku 1.

Z porovnání získaných závislostí je zřejmé, že materiál kola při cyklické deformaci výrazně změkčuje a to asi o 80 [Mpa] v celém rozsahu amplitudy rozkmitu deformace.



Obrázek 1: Železniční kolo – pýchovací zkouška a CDK

Byly stanoveny parametry těchto modelů mechanického chování materiálu kola (tab.1):

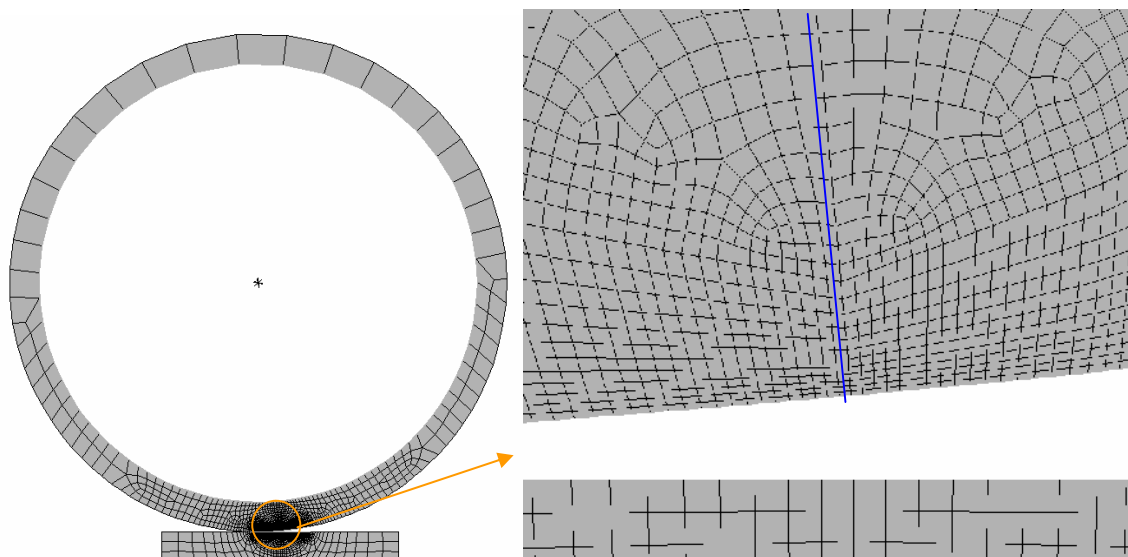
- Chabocheho materiálový model bez izotropního zpevnění z křivky závislosti napětí na deformaci CDK_B1. Tento model bude dále označován „chaboche“.
- Chabocheho materiálový model s izotropním zpevněním z křivek a23_1 až 23_5 a CDK_B1. V dalším označeno jako „chab-iso“.
- MM s nelineárním kinematickým zpevněním určen z křivky CDK_B1, v dalším označen jako „mkin“.

Tabulka 1: Parametry vybraných MM.

Chaboche	C_i	[Mpa]	495	1914	2360	7495
	γ_i	[-]	908	255	172	50
	σ_0	[Mpa]	600			
Chaboche + Izotr.	C_i	[Mpa]	495	1914	2360	7495
	γ_i	[-]	908	255	172	50
	σ_0	[Mpa]	680			
	R_∞	[Mpa]	600			
	b	[-]	3.5			

3. Výpočtový model

V programu ANSYS byl vytvořen rovinný geometrický model kola a kolejnice (obr.2). Použity byly lineární prvky, jejichž tloušťka pod povrchem v místě, ve kterém byly vyhodnocovány průběhy složek tenzoru napětí a tenzoru deformace byla 0.1 [mm]. Koeficient smykového tření byl 0.25.



Obrázek 2: Geometrie a na ní vytvořená síť prvků.

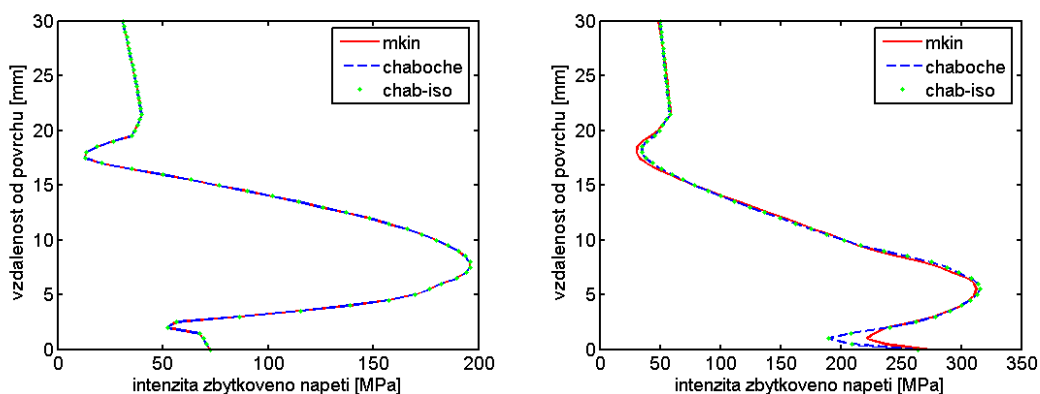
Odvalování se realizovalo zadáním vertikální síly a momentu podle tabulky 2 do pilotního uzlu a horizontálním posuvem pilotního uzlu ve středu kola. Pro každý MM a zatížení bylo realizováno 10 po sobě jdoucích přejetí v jednom směru. Průběhy složek tenzoru napětí a tenzoru deformace byly vyhodnocovány v uzlech na ose symetrie kola (modrá čára na obr.2).

Tabulka 2: Zatížení a označení jednotlivých realizací zatížení.

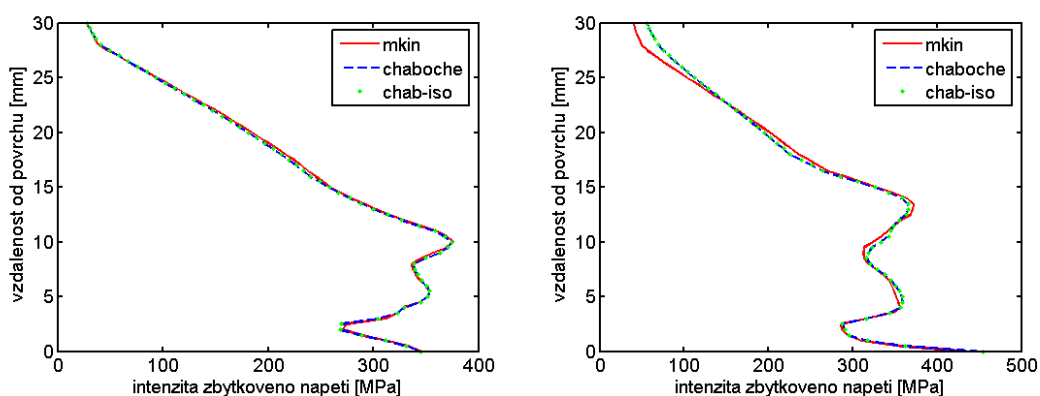
označení výpočtu		jedu 1	brzdim 1	jedu 2	brzdim 2
přítlačná síla	[kN]	19.6	19.6	27.5	27.5
brzdící moment	[kNm]	0	1.65	0	2.31

5. Analýza výsledků

Jako první byly porovnány hodnoty intenzity zbytkového napětí po desátém přejetí pro všechny použité materiálové modely. Na obrázcích 3 a 4 je vynesena hodnota intenzity zbytkového napětí (v kole) v závislosti na hloubce pod povrchem (kolmá vzdálenost od kontaktní plochy). Analogické závislosti získané pro intenzitu přetvoření jsou velmi podobné a proto zde nejsou uvedeny. Z obrázků je zřejmé, že intenzita zbytkového napětí je pro všechny MM téměř shodná, malé rozdíly se objevily pouze u MM mkin při výpočtu brzdim_1, ale ani tento rozdíl není nijak výrazný a maximum, včetně jeho polohy, bylo zachováno.



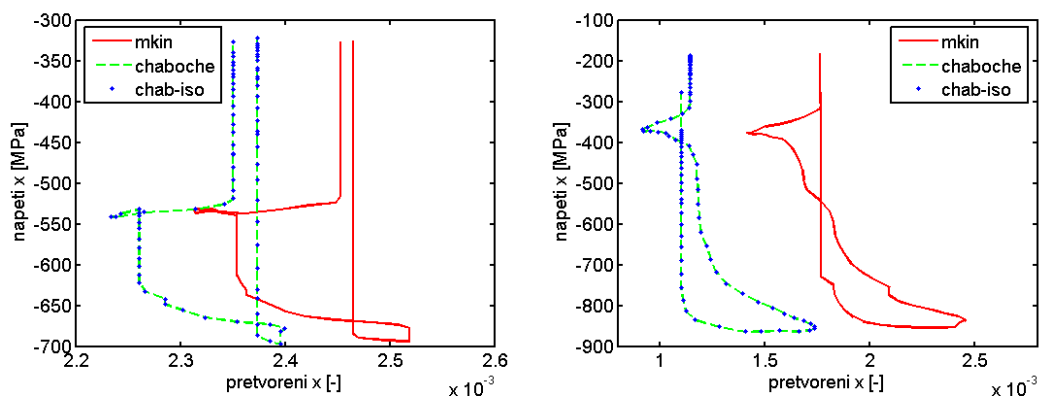
Obrázek 3: Intenzita zbytkového napětí pro výpočty jedu_1 a brzdím_1



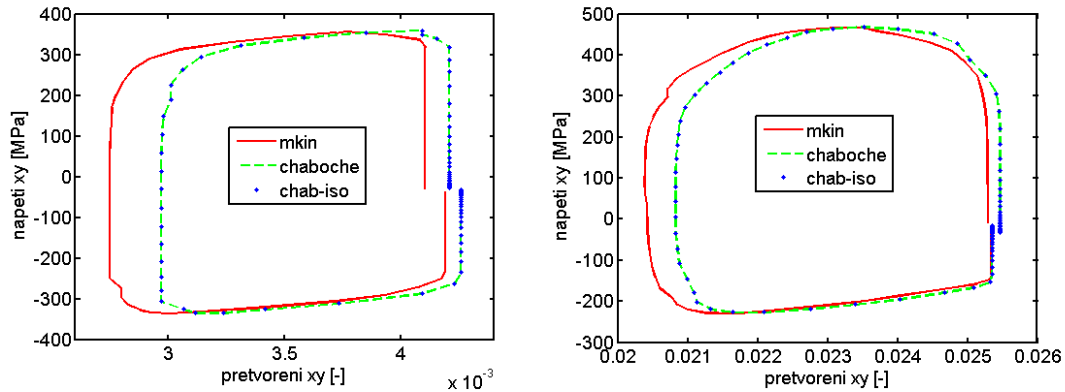
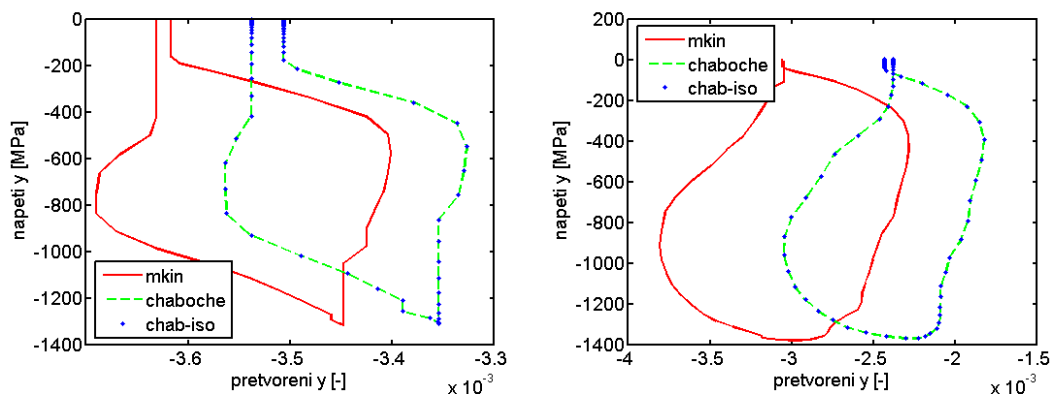
Obrázek 4: Intenzita zbytkového napětí pro výpočty jedu_2 a brzdím_2

Dále byly porovnány závislosti jednotlivých složek tenzoru napětí na přetvoření během jednotlivých přejetí. Na obrázcích 5, 6 a 7 jsou uvedeny tyto průběhy pro místo materiálu, kde byla dosažena maximální hodnota zbytkového napětí, které bylo u výpočtů jedu_2 6,5 [mm] pod povrchem a u výpočtů brzdím_2 asi 4,5 [mm] pod povrchem.

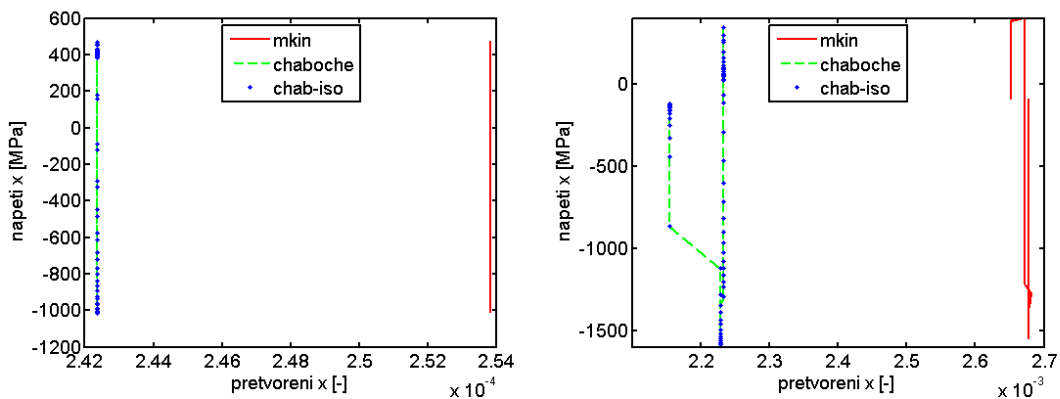
Rozsah napětí je pro všechny MM stejný. Přetvoření je vyšší u MM mkin, tento model však vykazuje nejmenší přírůstek přetvoření za 10. cyklus, z čehož vyplývá, že by se tento rozdíl v hodnotě přetvoření během dalších přejezdů snižoval.

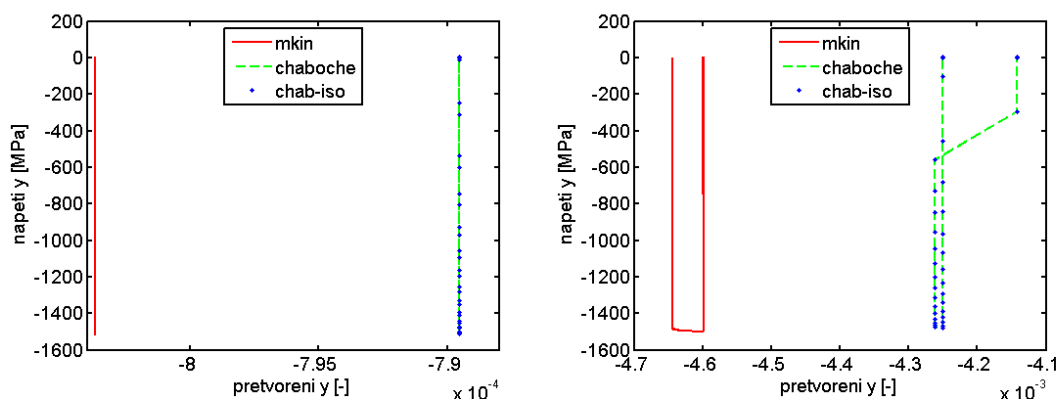


Obrázek 5: Závislost s_x na ϵ_x během 10. přejezdu, pro výpočty jedu_2 a brzdím_2

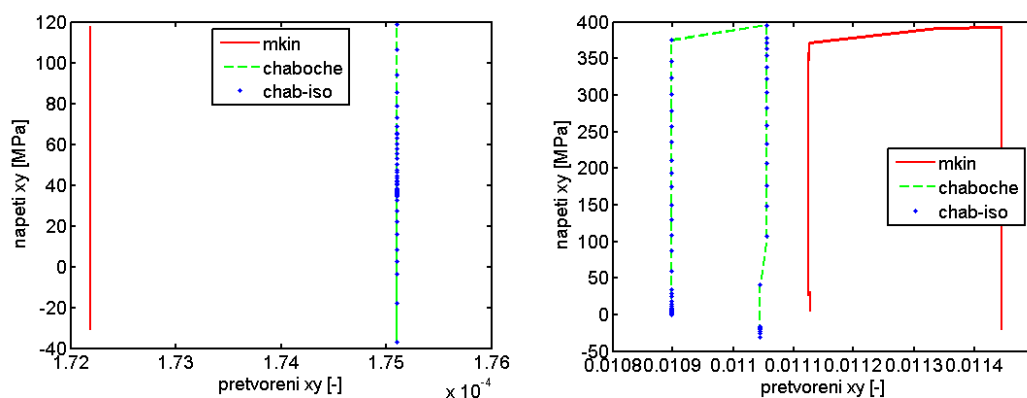
Obrázek 6: Závislost s_{xy} e_{xy} během 10. přejezdu, pro výpočty jedu_2 a brzdím_2Obrázek 7: Závislost s_y na e_y během 10. přejezdu, pro výpočty jedu_2 a brzdím_2

Stejné závislosti byly vyhodnoceny a porovnány i pro uzly na povrchu kola (v kontaktu), které jsou na obrázcích 8, 9 a 10. Je patrné, že v případech bez zatížení brzdícím momentem došlo ke stabilizaci odezvy a rozdíly v hodnotách přetvoření jsou malé. V případě simulací odvalování s bržděním jsou získané hodnoty přetvoření e_x a e_y opět větší pro MM mkin a pro tentýž model vykazují nižší nárůst, takže lze opět očekávat snižování rozdílu hodnot složek přetvoření. Hodnota přetvoření e_{xy} je opět vyšší pro MM mkin a na rozdíl od předchozích vykazuje i vyšší přírůstek, takže lze očekávat další zvyšování tohoto rozdílu.

Obrázek 8: Závislost s_x na e_x během 10. přejezdu, pro výpočty jedu_2 a brzdím_2



Obrázek 9: Závislost s_y na ϵ_y během 10. přejezdu, pro výpočty jedu_2 a brzdim_2



Obrázek 10: Závislost s_{xy} na ϵ_{xy} během 10. přejezdu, pro výpočty jedu_2 a brzdim_2

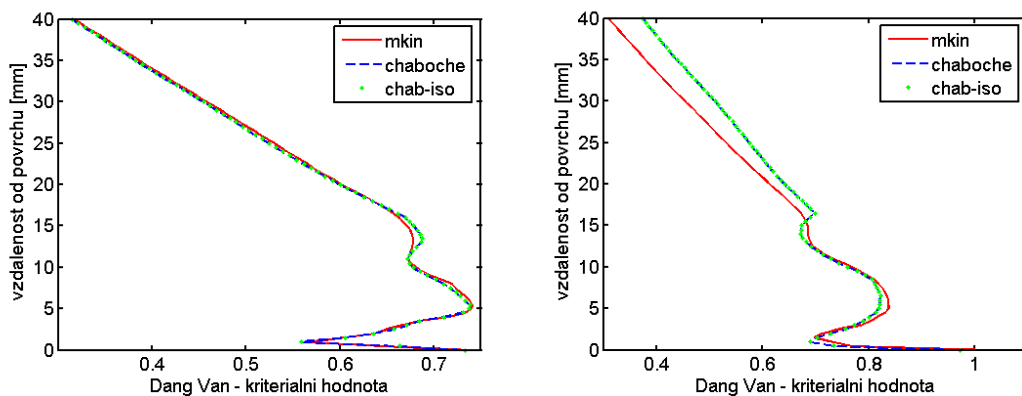
Poslední - 10. hysterezní smyčka byla prohlášena za stabilizovanou a pro tuto byly stanoveny kritériální hodnoty kritérií určených k posuzování možné iniciace makrotrhliny v podmínkách vysokocyklové únavy při víceosém zatěžování. Konkrétně se jedná o kritéria Dang Van, Sines a Crossland, jejichž popis uvádí např. (Dang Van, 1989). Pokud je kritériální hodnota větší, nebo rovna 1, tak se předpokládá iniciace makrotrhliny.

Při použití kritéria Dang Van získáme téměř shodné kritériální hodnoty pro všechny použité MM (obr. 11).

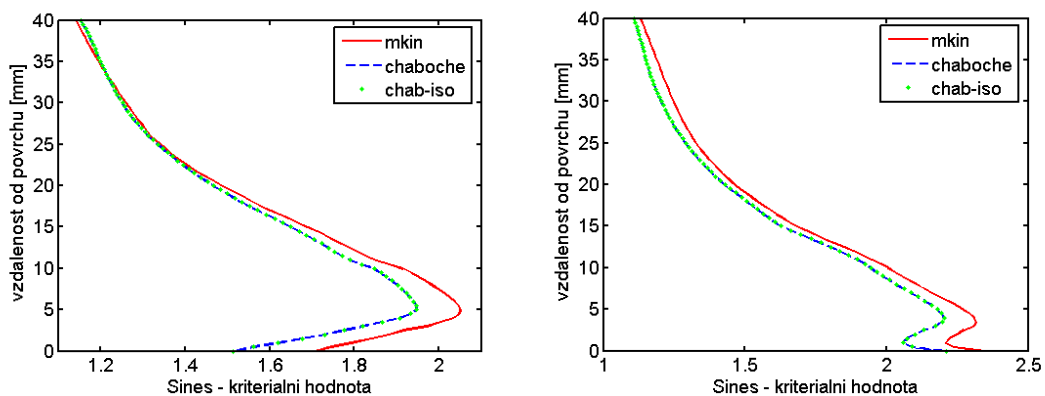
Při aplikaci kritéria Sines získáme pro MM chaboche a chab-iso totožné kritériální hodnoty, avšak pro MM mkin získáme podstatně vyšší hodnoty (obr. 12).

Při aplikaci kritéria Crossland získáme podobné průběhy pro všechny MM, avšak při použití MM mkin získáme podstatně vyšší kritériální hodnoty v obalsti maxima (obr. 13).

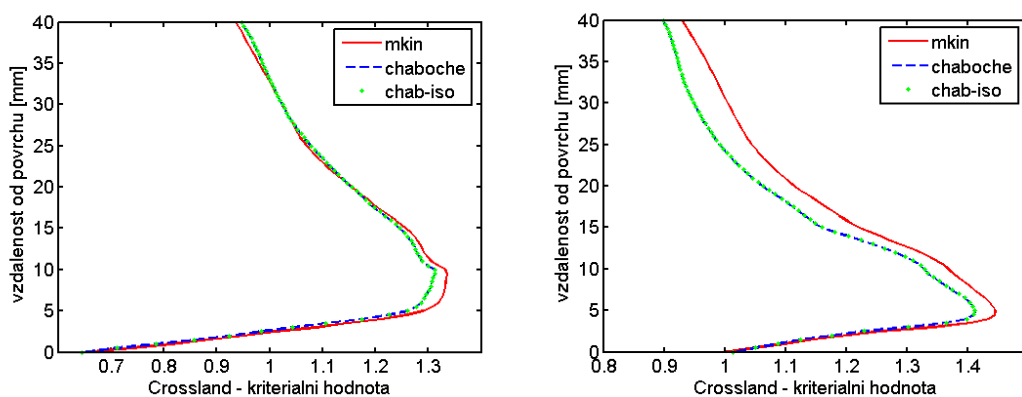
To, že kritériální hodnota Dang Van je stejná pro všechny MM je pravděpodobně způsobeno tím, že při stanovování kritériální hodnoty se zde vychází z celkového průběhu složek tenzoru napětí (je zohledněn tvar hysterezní smyčky), na rozdíl od zbývajících kritérií, které pracují s extrémními hodnotami napětí.



Obrázek 11: Kriteriaální hodnoty kritéria Dang Van, pro výpočty jedu_2 a brzdím_2



Obrázek 12: Kriteriaální hodnoty kritéria Sines, pro výpočty jedu_2 a brzdím_2



Obrázek 13: Kriteriaální hodnoty kritéria Crossland, pro výpočty jedu_2 a brzdím_2

6. Závěr

Byly odebrány vzorky materiálu železničního kola, provedeny pēchovací zkoušky a stanovena cyklická deformační křivka za podmínek konstantního rozkmitu deformace.

Na základě získaných závislostí napětí na deformaci byly stanoveny parametry modelů mechanického chování materiálu: Chaboche, Chaboche s izotropním zpevněním a MM s nelineárním kinematickým zpevněním.

Byl vytvořen výpočtový model umožňující simulaci odvalování železničního kola po kolejnici v podmínkách rovinné deformace a byly provedeny simulace odvalování za různých podmínek zatížení, při použití stanovených materiálových modelů

Průběhy hodnot složek tenzoru napětí během přejezdu se pro použité MM téměř neliší.

Při použití MM s nelineárním kinematickým zpevněním bylo po 10. přejetí dosaženo vyšších hodnot složek přetvoření, ale přírůstek přetvoření byl nižší, z čehož vyplývá, že rozdíl v hodnotě by se během dalších přejezdů snižoval. Tento jev byl patrný jak v oblasti maximální hodnoty intenzity přetvoření tak na povrchu kola s výjimkou přetvoření ϵ_{xy} na povrchu, jehož průběh vykazoval pro MM m_{kin} vyšší hodnotu i přírůstek.

Z průběhu složek tenzoru napětí v 10. cyklu byly stanoveny kritériální hodnoty kritérií určených pro posuzování vysokocyklové únavy při víceosém zatížení. Při použití kritéria Dang Van byly získány stejné hodnoty pro všechny použité MM. Při použití kritéria Sines a Crossland byly pro MM m_{kin} získány asi o 20% vyšší kritériální hodnoty.

7. Literatura

- Bernasconi. A., Filippini. M., Foletti. S., Vaudo. D. (2006) *Multiaxial fatigue of a railway wheel steel under non-proportional loading*. International Journal of Fatigue, vol. 28, pp. 663-672
- Johnson. K. L. (2000) *Plastic deformation in rolling contact*. Rolling contact phenomena; edited by Jacobson. D., Kalker. J., Springer Wien New York, pp.163-201
- You, B.R., and Lee, S.B. (1996) *A critical review on multiaxial fatigue assessments of metals*. International Journal of Fatigue. Elsevier.
- Chaboche, J.L. (1990) *Mechanics of solid materials*. Cambridge university press. Elsevier.
- Fedele. R., Filippini. M., Maier. G. (2005) *Constitutive model calibration for railway wheel steel through tension-torsion tests*. Computers and Structures, Volume 83, Issues 12-13, pp. 1005-1020
- Halama. R. (2005) *Řešení elastoplastické napjatosti v bodovém styku dvou zakřivencých těles*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Autoreferáty disertačních prací, svazek 49
- Dang. V. Et all. (1989) *Criterion for high cycle fatigue failure under multiaxial loading*. Biaxial and Multiaxial Fatigue, Mechanical Engineering Publications, pp. 459-478