

BUCKLING OF DYNAMIC BRAKE RESISTOR GRID COMPONENT

P. Skalka¹, P. Janíček², V. Fuis³, J. Petruška⁴, F. Pešlová⁵, M. Geprt⁶

Summary: *The paper deals with problems of buckling in resistors of electric rail vehicles. The resistors are objects in that the electric power is expended during dynamic braking of these vehicles. The paper presents the results of experiments carried out on resistors in the laboratory conditions of the proving station in MEP Postřelmov and the results of computational modelling of buckling in metal sheets.*

1. Úvod

Brzdové odporníky jsou pro svou vysokou výkonovou zatížitelnost, dobrou odolnost proti vibracím a rázům vhodné pro elektrodynamické brzdy lokomotiv, tramvají a vozidel metra. Brzdový odporník se užívá k přeměně kinetické energie vozidla při elektrickém brzdění v teplo. Základem odporového bloku (obr.1) je odporový svazek tvořený lisovanými lamelami (obr.2), které jsou vzájemně propojeny bodovými svary a tvoří meandr (obr.3) s požadovaným počtem lamel. Počet lamel je dán mechanickými možnostmi nosných svorníků a rozměry skříně, do které se pak upevňuje. Lamela z odporového materiálu je tvarově prolisována tak, aby byla zvýšena její tuhost, a tím i tuhost celého svazku. Současně svým tvarem přispívá k příznivému proudění vzduchu mezi jednotlivými lamelami. Každá lamela je na obou koncích opatřena oválným otvorem, čímž je zajištěna tepelná dilatace každé lamely samostatně.



Obr. 1. Odporový blok R9

¹ Ing. Petr Skalka, ÚMTMB FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno, email: psumt@email.cz

² Prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc, ÚMTMB FSI VUT Brno, email: janicek@fme.vutbr.cz

³ Ing. Vladimír Fuis, Ph.D, ÚMTMB FSI VUT Brno, email: fujs@fme.vutbr.cz

⁴ Doc. Ing. Jindřich Petruška, CSc, ÚMTMB FSI VUT Brno, email: petruska@umt.fme.vutbr.cz

⁵ Prof. Ing. Františka Pešlová, CSc, Univerzita Pardubice, DFJP, email: frantiska.peslova@upce.cz

⁶ Ing. Michal Geprt, MEP Postřelmov, a.s., Postřelmov, email: geprt@mep.cz

Každý odporový svazek obsahuje připojovací vývody z korozivzdorného materiálu. Vývody jsou na začátku a na konci meandru připevněny bodovými svary ke krajním lamelám.



Obr. 2. Lisovaná lamela (detail)

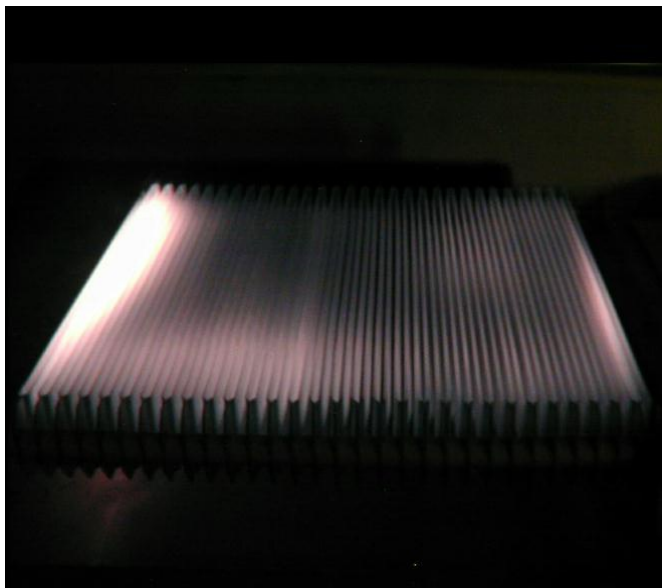


Obr. 3. Meandr s připojovacími vývody

Nosnou část odporového svazku tvoří dva svorníky z korozivzdorné oceli o průměru 12 mm s nasunutou izolační trubicí a keramickými vložkami. Svorníky s izolační trubicí jsou postupně vsunuty do keramických vložek a oválných otvorů odporového svazku. Mezi keramickou vložkou a odporovým materiálem je umístěna izolační podložka tloušťky $t = 0,25$ mm ze stejného materiálu jako izolační trubka. Odporový svazek je zajištěn proti samovolnému povolení samojistnými maticemi. Na konci svorníku jsou našroubovány izolátory a zajišťovací matice M12.

Takto vytvořený odporový blok se tzv. zahořuje (obr. 4). Zahořování je kontrolní proces při kterém se odporový blok průtokem elektrického proudu ohřeje na cca 650°C . Kontroluje se provedení bodových svarů (elektrická vodivost) a případná nehomogenita odporového materiálu.

Odporníky se upevňují přes izolátory do skříně odporníku. Uložení odporových bloků ve skříně a konstrukce bočnic skříně umožňují dilataci složeného odporového bloku při maximálním zahřátí odporového materiálu. Odporové bloky se mohou do skříně uložit vedle sebe nebo nad sebe v několika vrstvách podle výkonových parametrů odporníku. Odporový blok je vyroben z materiálů, které nezatežují životní prostředí.



Obr. 4. Zahořování odporového bloku

2. Aplikace odporníků R9 v praxi



Obr. 5. Aplikace odporníků R9 v praxi

3. Spolupráce s průmyslem

Součinnost akademických institucí s průmyslem je již řadu let ožehavé téma. Klíčovou roli zde hraje „vytváření vzájemné důvěry“ mezi akademickými institucemi a průmyslem a to je právě to, co u nás schází. Záleží také na konkrétních lidech, kterých se spolupráce týká. Tato spolupráce je totiž velmi důležitá pro aplikovaný výzkum a vývoj a neměla by se podceňovat!

4. Experimentální výzkum

Experimentální výzkum se uskutečňuje na zkušebně firmy MEP Postřelmov. Cílem výzkumu je studium chování odporníků různých konstrukčních provedení v závislosti na různých provozních podmínkách. Simulace provozních podmínek probíhá tak, že odporník je připojen k elektrickému zařízení, které simuluje zátěž odporníku odpovídající zátěži odporníku při brždění trakční jednotky. Během simulace je prostřednictvím termočlánků snímána teplota v určitých diskretních bodech vybraných plechů odporníku. Simulaci lze rozdělit na dvě etapy:

1. etapa: zatížení odporníku elektrickým proudem, jež odpovídá elektrickému proudu při brždění trakční jednotky. Během této simulace dosahují teploty až 900°C.

2. etapa: představuje stav zatížení, který odpovídá stavu po brždění trakční jednotky a odporníkem neprochází elektrický proud. Odporník je ochlazován na teplotu okolního prostředí za podmínek přirozené konvekce.

Při probíhajících simulacích lze popsat chování odporníku takto :

Během *1. etapy* dochází přibližně při teplotách 720°C (80% zátěž odporníku) ke ztrátě globální deformační stability.

Během *2. etapy* dochází při teplotách okolo 135°C (15% zátěž odporníku) k lokálnímu boulení jednotlivých plechů – obr. 6.



Obr. 6. Globální průhyb a lokální boulení plechů

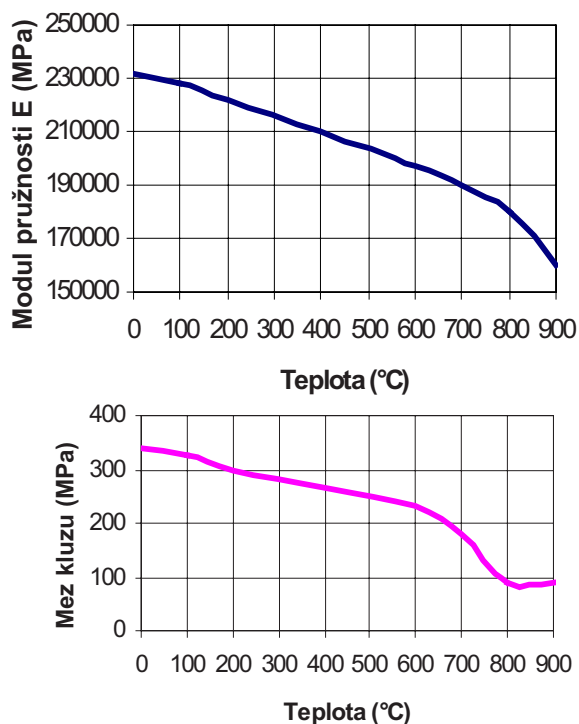
Globální prohnutí a lokální boulení jednotlivých plechů odporníků může mít katastrofické důsledky, např. vznik elektrického zkratu a tím ztrátu funkčnosti odporníku – nelze brzdit trakční jednotku!

Aby nedocházelo k vzniku těchto nežádoucích jevů, byla navržena různá konstrukční opatření v podobě prostřihů jednotlivých plechů – obr.7. Jednotlivé plechy jsou na obou okrajích prostřihány, čímž se osová tlaková napětí na okrajích plechů přerozdělí do těchto prostřihů a nedochází tak k lokálnímu boulení.



Obr. 7. Deformace jednotlivých typů plechů po simulaci brždění

Experimenty prokázaly, že u takto navržených plechů odporníků (plechy s řadou prostřihů na obou stranách) skutečně nedochází k lokálnímu boulení plechů a plechy se pouze globálně prohýbají.



Součástí experimentálního výzkumu jsou také materiálové analýzy, týkající se výběru vhodného materiálu. Cílem materiálové analýzy je najít takový materiál, který by byl vhodný pro výrobu plechů odporníků a to jak po stránce pevnostní, tak i po stránce elektrického odporu. Materiálem, který se v současnosti používá pro výrobu plechů odporníků, je materiál s označením CRONIX 080. Nevýhodou používaných materiálů je vysoká citlivost materiálových charakteristik na teplotu. Na obr.8 jsou zobrazeny materiálové charakteristiky materiálu CRONIX 080 v podobě středních hodnot měření. Závislost koeficientu teplotní roztažnosti $\alpha(T)$ byla převzata z literatury.

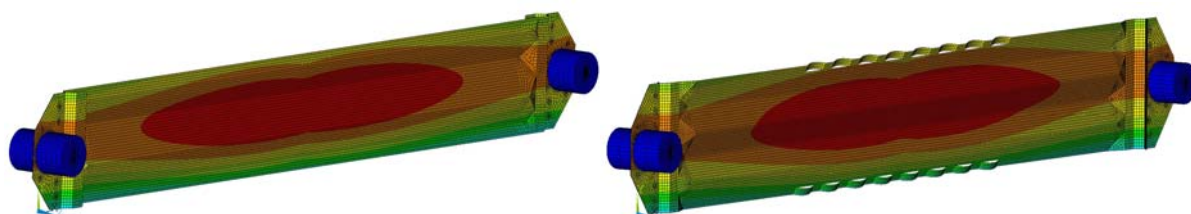
Obr. 8. Materiálové charakteristiky – Cronix 080

5. Výpočtové simulace provozní zátěže odporníků

Výpočtové simulace byly prováděny pro experimentálně zjištěná teplotní pole a pro teplotní závislosti $R_{0,2}(T)$, $E(T)$, $\alpha(T)$. K určování deformačně - napětových stavů byl používán systém MKP – program Ansys.

5.1 Konečnoprvkový model geometrie řešených plechů

Výpočtové simulace byly prováděny pro plech s původní geometrií a pro plech s konstrukčně upravenou geometrií (plech s prostřihy).



Obr.9. Konečnoprvkový model : a) původní geometrie, b) konstrukčně upravená geometrie plechu

Konečnoprvkový model je tvořen prvkem SHELL, který představuje plech a prvkem SOLID, který tvoří izolátory. Interakce mezi těmito prvky je zprostředkována prostřednictvím kontaktních prvků. Konečnoprvkový model geometrie (obr.9a) odpovídá plechům z rozměrových řad 75 x 600 x 0,4 mm. Geometrie plechu s prostřihy (obr.9b) odpovídá rozměrové řadě 85 x 600 x 0,4 mm.

5.2 Materiálový model

Ve výpočtových simulacích byly uvažovány teplotně závislé materiálové charakteristiky, které zobrazuje obr. 8.

5.3 Okrajové podmínky

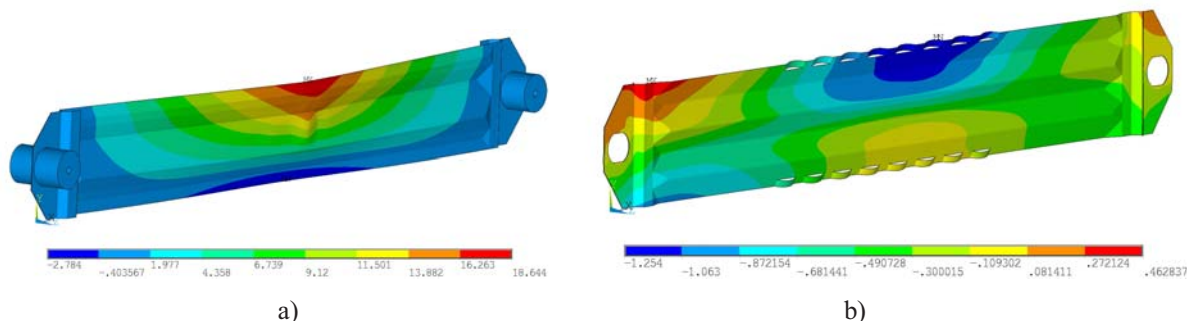
Chování odporového bloku během provozu je do značné míry závislé na jeho uchycení. Proto je důležité respektovat tuto skutečnost i ve výpočtovém modelu předepsáním vhodných okrajových podmínek. Okrajové podmínky byly předepsány na izolátory tímto způsobem: byly zamezeny posuvy ve směrech Y, Z a rotace okolo os X, Y. Umožněny byly posuvy ve směru X, čímž je dovolena osová dilatace jednotlivých plechů během ohřevu a ochlazování odporového bloku. Umožněná rotace okolo osy Z dovoluje průhyb plechu (ve směru Y), ke kterému dochází vlivem rozdílných teplot v krajních oblastech plechu.

5.4 Teplotní zatížení

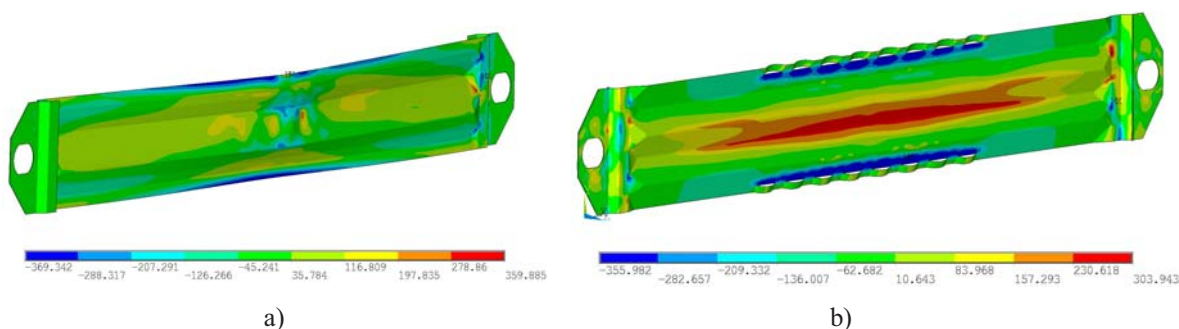
Z naměřených teplot v daných diskrétních bodech bylo vytvořeno extrapolací a interpolací spojitě teplotní pole, které představuje zatížení jednotlivých plechů (obr.9). Jedná se o ustálené teplotní pole, které odpovídá měřenému výkonu, okolní teplotě 20°C a přirozené konvekci.

6. Vyhodnocení výpočtových simulací

Prezentované výsledky výpočtových simulací představují stav po jednom zátěžném cyklu odporníku (ohřev a ochlazení odporníku). Výsledky prezentují stav při teplotě 20°C a odpovídají modelům dle obr. 9.



Obr.10. Posuvy U_z odpovídající teplotě 20°C po zátěžném cyklu

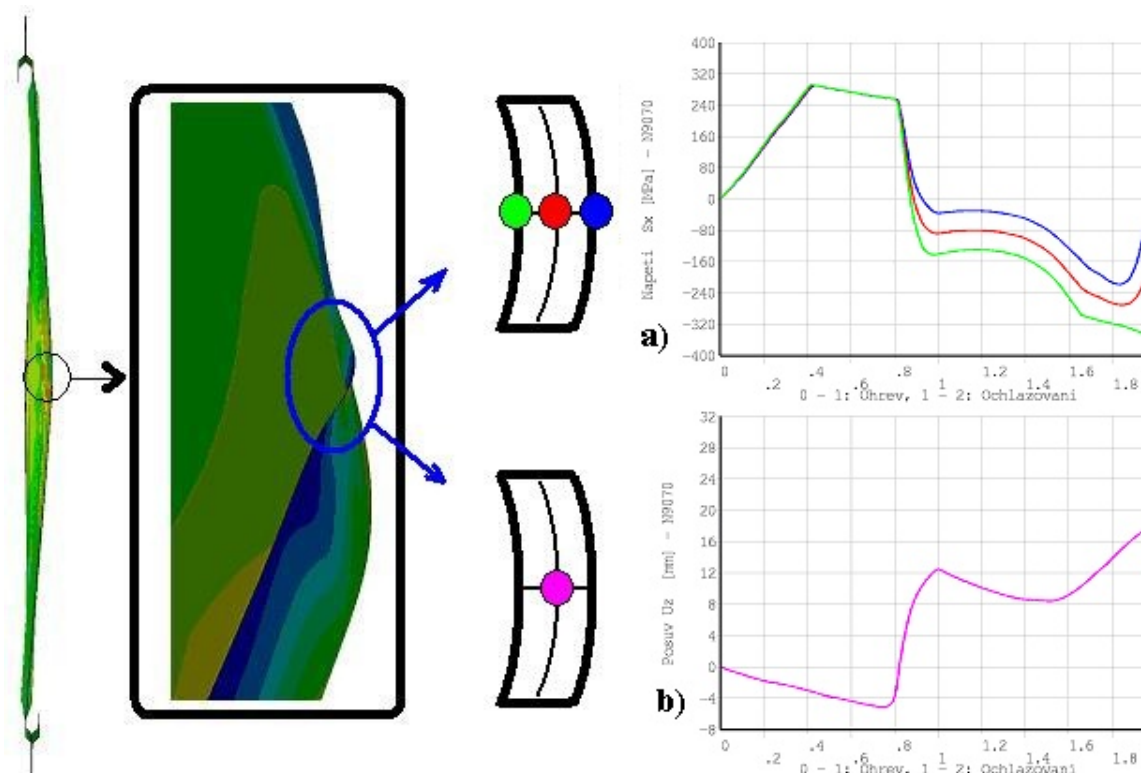


Obr.11. Osová napětí S_x odpovídající teplotě 20°C po zátěžném cyklu

Konstrukční úprava původní geometrie s následným prostřížením okrajů jednotlivých plechů se ukazuje jako vhodné řešení. Na obr.10. lze vidět, že hodnoty posuvů U_z u plechu s prostříhy (obr.10b) jsou výrazně nižší než u plechu původního (obr.10a). Důležitou roli zde hraje geometrická tuhost plechu, která se prostřiháním okrajů snižuje. Prostříhy pak mají funkci „amortizátoru“, který „pohlcuje“ osová tlaková napětí, která se přerozdělují do jednotlivých prostřihů (obr.11b) a nedojde tak k boulení plechů! U plechu s původní geometrií se zbytková tlaková napětí neměla kam přerozdělit, jako v případě plechu s prostříhy, a došlo zde k lokálnímu boulení plechu (obr.11a).

Výpočtové simulace popisují chování jednotlivých plechů (75 x 600 x 0,4 mm) odporníků podle obr.12. V první etapě zatížení odporníku nehomogenním teplotním polem dochází k vzniku tlakových napěťových polí. V některých z těchto napěťových polí může být překročena mez kluzu a dochází tak k zplastizování těchto oblastí (zejména okraje plechu). Některá místa ovšem zůstávají v elastickém stavu. Při následném ochlazení (druhá etapa) se materiál vrací do výchozího nezatíženého stavu, v čemž mu ovšem brání zplastizovaná místa. Jelikož plech při ochlazení na výchozí teplotu (z níž začínala simulace) není nijak z vnějšku zatížen, tak zbytková napětí, způsobená předchozí lokální plastickou deformací při ohřevu, vytvářejí rovnovážnou soustavu vnitřních sil. Tomuto rovnovážnému stavu vnitřních sil odpovídá i rovnovážný deformační stav. Ten je při určitých teplotních polích plechů takový, že vzniká lokální boulení plechu (lokální ztráta deformační stability). V první etapě

dochází rovněž ke ztrátě globální deformační stability, což se projevuje výrazným nárůstem posuvu U_z (obr.12b) při teplotách odpovídajících 80% zatížení odporníku.



Obr.12. Osová napětí S_x a posuv U_z v místě boulení u plechu 75 x 600 x 0,4 mm

7. Navržená opatření

Jelikož v současnosti není k dispozici takový materiál, který by vyhovoval jak po elektrické stránce, tak i po stránce pevnostní a současně měl nízkou citlivost na vysoké teploty z hlediska materiálových vlastností, pak k zamezení nežádoucích jevů jako jsou velké globální průhyby a lokální boulení existují tato dvě možná opatření:

- 1) Jiné konstrukční řešení plechů, které povede k tomu, že na okrajích plechů nebudou vznikat tak velká lokální tlaková osová napětí. Tato varianta je v současnosti ještě řešena.
- 2) Vhodnější umístění odporníků na lokomotivách a jejich konfigurace rozmístění, aby se zajistilo jejich intenzivní chlazení. Pokud se podaří plechy ochladit tak, aby teplota plechu nepřesahovala přibližně 300°C (odpovídající mez kluzu je cca 300MPa) je předpoklad, že v plechu nevzniknou od teplotních polí makroplastické deformace a plech nevyboulí.

8. Plán další práce

V současné době probíhají výpočtové simulace na elektro – termo – aerodynamické úrovni. Nadále bude řešena problematika vhodného tvaru pro dané hodnoty mařených výkonů v odpornících a následně budou navrženy i vhodnější způsoby umístění a chlazení odporníků vedoucí k nižším teplotám plechů.

Literatura

- [1] J. Altenbach, A.S. Sacharov: *Die Methode der finiten Elemente in der Festkörpermechanik*, Leipzig 1982
- [2] D.O. Brush, B.O. Almroth: *Buckling of Bars, Plates and Shells*, New York 1975
- [3] P. Janíček, Fr. Pešlová: *Posouzení mezních stavů odporníků III*, Brno 2003
- [4] P. Janíček, Fr. Pešlová: *Posouzení mezních stavů odporníků IV*, Brno 2004
- [5] P. Janíček, Fr. Pešlová: *Posouzení mezních stavů odporníků V*, Brno 2004
- [6] P. Janíček, Fr. Pešlová: *Posouzení mezních stavů odporníků lokomotiv, TECHMAT*, 2004
- [7] www.mep.cz