

EFFECT OF SURFACE LAYERS ON THE PROPENSITY OF DISK BRAKES TO FRICTIONALLY EXCITED THERMOELASTIC INSTABILITY DURING EXTREME BRAKING**J. Voldřich*, Š. Morávka***

Summary: *In the present contribution, the effect of a brake disk surface layer on the appearance and the transient behaviour of hot spots is investigated. The model of frictionally excited thermoelastic instability derived in Voldřich & Morávka (2003) is used. It is outlined that the surface layer may cause undesirable difficulties.*

1. Úvod

Jedním z hlavních cílů konstruktérů diskových brzd je co nejrychlejší chlazení brzdových disků a zajištění účinnosti brzd při opakovaném brzdění. V souvislosti s tím se (znovu) objevují snahy vylepšit brzdový disk vhodně navrženou tenkou vrstvou na třecí ploše disku. Zároveň je však potřebné předejít řadě dalších možných technických komplikací.

Jedním z nežádoucích jevů může být vznik teplotních skvrn v průběhu brzdění, který často vede k tzv. rubbingu. Ten jako řidiči pocítíme především ve formě nepříjemných vibrací při brzdění. Spojitost vzniku termoelastické nestability (dále jen TEN) s tímto jevem i způsob jeho matematického modelování jsme již zkráceně popsali v předchozím roce (Voldřich & Morávka, 2003). Model, který jsme vyvinuli, umožňuje respektovat i navrhovanou povrchovou vrstvu.

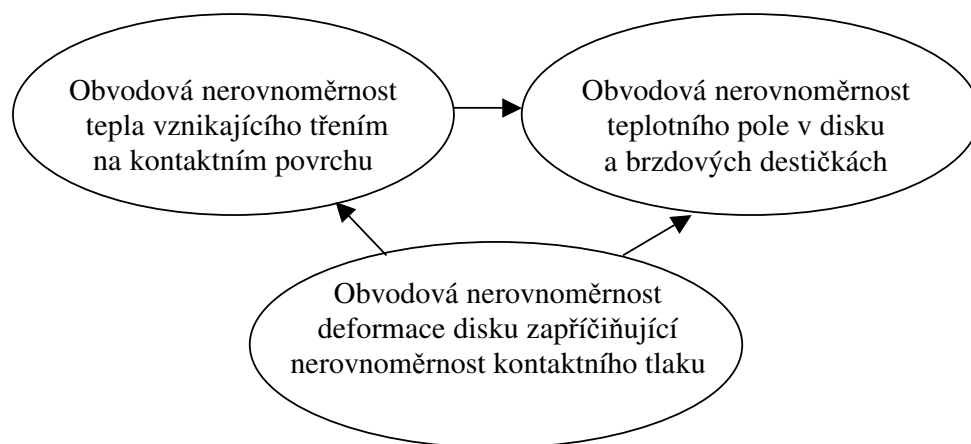
Cílem tohoto příspěvku je ocenit ve dvou extrémních případech vliv povrchové vrstvy ke zvýšení (snížení) náchylnosti ke vzniku termoelastické nestability. Za krajní možnosti jsou vybrány situace, kdy povrchová vrstva je tvořena keramikou $\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{MgO}$ s velmi nízkou tepelnou vodivostí 1-2,5 W/mK (viz Lexikon, 2001) nebo naopak nitridem hliníku AlN s vynikající vodivostí 130-150 W/mK. Samotné tělo disku z šedé litiny má vodivost cca 50 W/mK.

2. Termoelastická nestabilita

Termoelastická nestabilita je jev, kdy stejnoměrný teplotní tok (vznikající na třecím povrchu disku v průběhu brzdění) je narušen v obvodovém směru progresivně se vyvíjející perturbací. Tím samým mechanismem je narušeno rovnoměrné teplotní pole a kontaktní tlak na povrchu disku. Za vhodných podmínek může dojít ke zpětnovazebnímu zesilování nerovnoměrností a lokalizaci teplotních skvrn, kontaktního tlaku a třením vznikajícího tepla (viz obrázek č.1).

* RNDr. Josef Voldřich, CSc., Dr. Ing. Štefan Morávka: Nové technologie – Výzkumné centrum, Západočeská univerzita, Univerzitní 8, 30614 Plzeň; tel. 377632801, e-mails: voldrich@ntc.zcu.cz, moravka@ntc.zcu.cz

Ukazuje se, že k popsanému jevu dojde při překročení tzv. kritické rychlosti prokluzu mezi diskem a třecími segmenty (brzdovými destičkami), zatímco při nižší rychlosti prokluzu jsou naopak popsané perturbace tlumeny.



Obrázek č.1 Mechanismus zesilování perturbací.

Perturbace mohou být iniciovány jak náhodnými fluktuacemi, tak počáteční nerovnoměrností třecích ploch disku (zvlněním disku) nebo dynamickými vibracemi připojených částí automobilu (pohonová soustava, karoserie).

Matematický model, který umožňuje (po jednoduché modifikaci) postihnout dodatečnou povrchovou vrstvu disku při vyšetřování termoelastické nestability, jsme popsali v Voldřich & Morávka (2003). Jeho základem je analytický přístup postupně rozvíjený v pracích Dow & Burton (1972), Burton et al. (1973) a Lee & Barber (1993). Perturbace teplotního pole T a kontaktního tlaku p jsou hledány ve tvaru

$$T(x,y,t) = T_0 \exp(bt+jmx) \Theta(y), \quad (1)$$

$$p(x,t) = p_0 \exp(bt+jmx).$$

Velikost tepla (na jednotku plochy) vznikajícího třením je $fVp(x,t)$. Veličiny T_0 , p_0 jsou amplitudy počátečních nerovnoměrností (v čase nula), t značí čas, x je souřadnice ve směru prokluzu, y souřadnice kolmá k třecí ploše, f je koeficient tření a V rychlost prokluzu. Veličina b je tzv. růstový parametr (pro $b < 0$ jsou perturbace tlumeny, pro $b > 0$ jsou zesilovány a dochází k nestabilitě), prostorová frekvence $m = \frac{2\pi}{L}$, kde L je vlnová délka

perturbace. Matematické řešení je vhodně formulováno v komplexním oboru (j je imaginární jednotka), neboť v důsledku vazby spojené s třecím povrchem je nutné uvažovat i složky fázově opožděné. Skutečným řešením je pak reálná část vztahů (1).

Uvedený přístup lze považovat za oprávněný v počátečním stadiu vývoje perturbací, kdy dochází k plnému kontaktu mezi diskem a třecími segmenty. Toto stadium však zároveň rozhoduje o náchylnosti ke vzniku termoelastické nestability a teplotních skvrn. Další vývoj perturbací je spojen s tím, že jejich exponenciální růst v reálném brzdovém systému nemůže být trvalý. Skutečně v případě, kdy velikost amplitudy perturbace kontaktního tlaku p dosáhne celkové průměrné hodnoty přitlačného tlaku destiček, je plný kontakt narušen a dojde k jeho separaci. Průměrným tlakem je pak dále omezena i složka vznikajícího tepla $fVp(x,t)$, která se

podílí na vývoji nestability. Modelování vývoje perturbací ve druhém stadiu je ovšem možné jen numerickými metodami (např. metodou konečných prvků). Odkazujeme zde na práci Zagrodzki et al. (2001) (snad první v tomto směru), kde na vybraném příkladě jsou zdůrazněny některé překvapivé vlastnosti dalšího vývoje vyšetřované nestability.

3. Vstupní parametry hodnocených diskových brzd

Uvažujme běžnou diskovou brzdu osobního automobilu. Celková tloušťka disku nechť je 22 mm, střední průměr kontaktní plochy disku 224 mm, tloušťka brzdového segmentu (bez kovové podkladové destičky) 10 mm, úhel brzdového segmentu 52° (tj. část plného úhlu disku připadající na kontakt s destičkami). Pro průměr pneumatik 642 mm v uvedeném případě odpovídá rychlost vozidla 100 km/hod rychlosti prokluzu $V = 9,7$ m/s (prokluz mezi vozovkou a pneumatikou neuvažujeme). Tloušťku povrchové vrstvy zvolme 0,6 mm.

Rozhodující pro náchylnost k termoelastické nestabilitě jsou dále materiálové vlastnosti disku a brzdových destiček. V případě povrchové vrstvy třecí plochy disku rozlišujeme dvě varianty:

- povrchová vrstva je tvořena keramikou $\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{MgO}$ s velmi nízkou tepelnou vodivostí (budeme se na ni odvolávat jako na **vrstvu S**),
- povrchová vrstva je tvořena nitridem hliníku AlN s vynikající vodivostí (**vrstva A**).

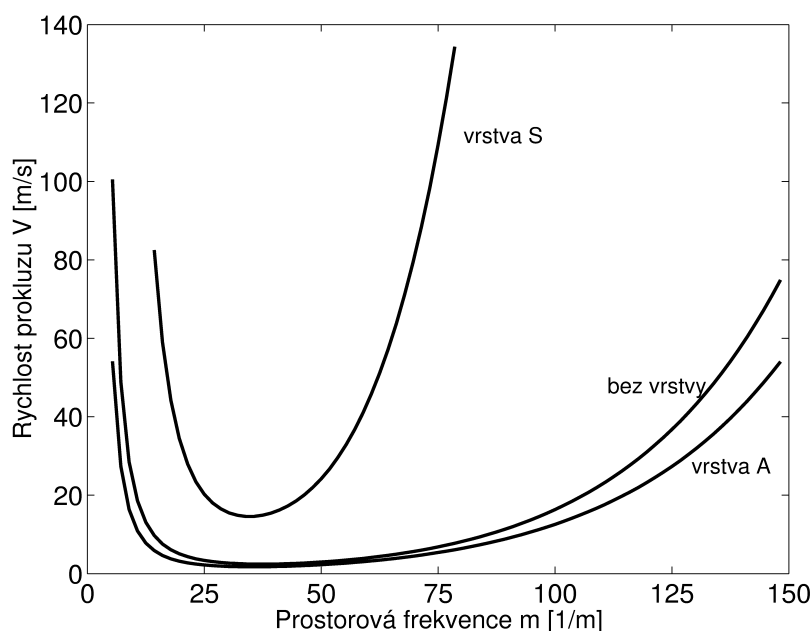
Pro srovnání budeme ještě sledovat původní uspořádání disku **bez vrstvy**. Přehled materiálových parametrů užitých ve výpočtech uvádíme v následující tabulce. Poznamenejme jen, že výběr materiálů povrchové vrstvy byl proveden s cílem zdůraznit jisté mezní situace spojené např. s tepelnou vodivostí a že skutečný materiál vrstev může být jiný. Zároveň stanovení materiálových parametrů povrchových vrstev může být obtížné a jejich hodnoty mohou být spojeny s technologií nanášení těchto vrstev. Hodnoty uvedené v tabulce byly převzaty z Lexikonu (2001).

	Vrstva A	Vrstva S	Tělo disku	Třecí segmenty
Materiál	AlN	$\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{MgO}$	šedá litina	semimetallic
Modul pružnosti [GPa]	300	60	110	1
Poissonovo číslo [-]	0,2	0,2	0,25	0,25
Tepelná roztažnost 10^{-5} [$^\circ\text{C}^{-1}$]	2	0,6	1,23	1
Tepelná vodivost [W/m $^\circ\text{C}$]	150	1	49,4	5
Měrná tepelná kapacita [J/kg $^\circ\text{C}$]	800	800	473	350
Hustota [kg/m ³]	3300	3125	7180	4000

4. Závislost růstového parametru b na rychlosti prokluzu V

Základní veličina, která popisuje náchylnost diskové brzdy ke vzniku termoelastické nestability, je tzv. kritická rychlost prokluzu, což je taková hodnota rychlosti V , při které je růstový parametr $b = 0$. Obdobně jako Lee & Barber (1993) znázorníme na obrázku č. 2 tuto

kritickou rychlost v závislosti na prostorové frekvenci m . Vidíme, že disk s povrchovou vrstvou A má horší vlastnosti, zatímco disk s vrstvou S je z našeho pohledu bezproblémový.



Obrázek č.2 Závislost kritické rychlosti prokluzu na prostorové frekvenci perturbací.

Navíc je potřeba si uvědomit, že při uvažované délce třecích segmentů, které zauímají úhel 52° po obvodu disku, je nejmenší možný počet modelovaných teplotních skvrn po obvodu disku 7. To odpovídá v našem případě nejnižší možné prostorové frekvenci $m = 62,5 \text{ m}^{-1}$. Při této hodnotě nelze již v případě vrstvy S dosáhnout v cestovním automobilu kritické rychlosti prokluzu. Tedy s vrstvou S nebude při žádném režimu brzdění k jevu TEN docházet a nemusíme se jí proto dále zabývat. Bohužel tato varianta je konstrukčně nepřijatelná z jiných důvodů. Malá vodivost povrchové vrstvy snižuje odvod tepla do disku, a při předepsaném disipačním výkonu zvyšuje jeho průměrnou povrchovou teplotu, což vede až k nežádoucímu snížení koeficientu tření a ztrátě brzdících schopností (tzv. uvadnutí).

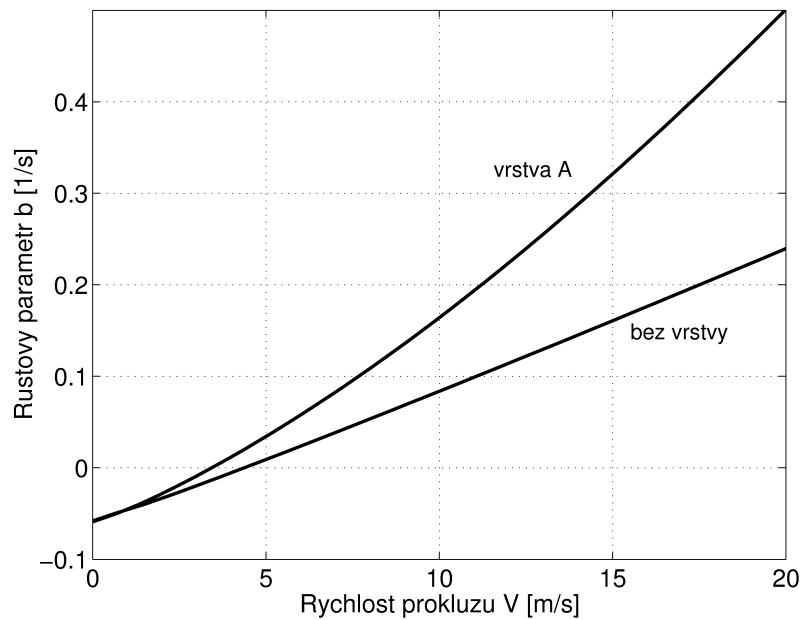
Obrázek č.2 sice říká, že varianta s vrstvou A je z hlediska vzniku TEN horší než varianta bez vrstvy, nelze z něj však vycházet při oceňování skutečného chování při předepsaném brzděném režimu. K tomu potřebujeme znát celou závislost růstového parametru b na rychlosti prokluzu V . Dostatečná je pak tato znalost pro dominantní prostorovou frekvenci (tedy $m = 62,5 \text{ m}^{-1}$ s počtem teplotních skvrn 7) z obrázku č.3.

4. Vývoj amplitudy perturbací pro zadaný brzděný režim

Jak se při různých problémech technické praxe ukázalo, je přesné stanovení kritické hodnoty vzniku nestabilit problematické. O to více je pak problematické sledování jejich vývoje. Jakákoliv malá perturbace (nesymetrie apod.) totiž začne být značně zesilována (v našem případě exponenciálně), vede k podstatné změně konstrukce oproti jejímu výchozímu stavu, případně vede až ke ztrátě její funkčnosti nebo k její destrukci. Přesto má matematické modelování nestabilit oprávnění především při porovnávání navrhovaných konstrukčních

variant, při přípravě experimentů apod., jestliže si uvědomíme omezení a nedostatky navrhovaných modelů.

V dalším budeme sledovat vývoj amplitudy perturbace teploty a kontaktního tlaku. Budeme zjednodušeně předpokládat, že materiálové parametry (viz tabulku z odstavce 3) jsou na teplotě nezávislé a že nedochází ke ztrátě plného kontaktu mezi diskem a třecími segmenty. Za iniciaci sledovaných perturbací dále uvažujeme pouze počáteční výrobní nepřesnost rovinnosti třecích ploch disku. Pro další vývoj je při tom rozhodující složka Fourierova rozkladu této nepřesnosti, která odpovídá „zvlnění“ disku s dominantní prostorovou frekvencí $m = 62,5 \text{ m}^{-1}$. Ve výpočtech, jejichž výsledky dále uvádíme, se pro zmíněnou frekvenci bere velikost nepřesnosti $3 \text{ } \mu\text{m}$. Způsob přepočtu této nepřesnosti na hodnoty veličin T_0 a p_0 ze vztahu (1) jsme již popsali v příspěvku Voldřich & Morávka (2003).



Obrázek č. 3 Závislost růstového paramteru b na rychlosti prokluzu V odpovídající kritickému počtu teplotních skvrn 7 (prostorové frekvenci $m = 62,5 \text{ m}^{-1}$).

Pro stanovení samotného vývoje amplitudy $\Omega(t)$ perturbace teplotního pole uijeme evoluční rovnici (viz vztah (7) příspěvku Voldřich & Morávka (2003))

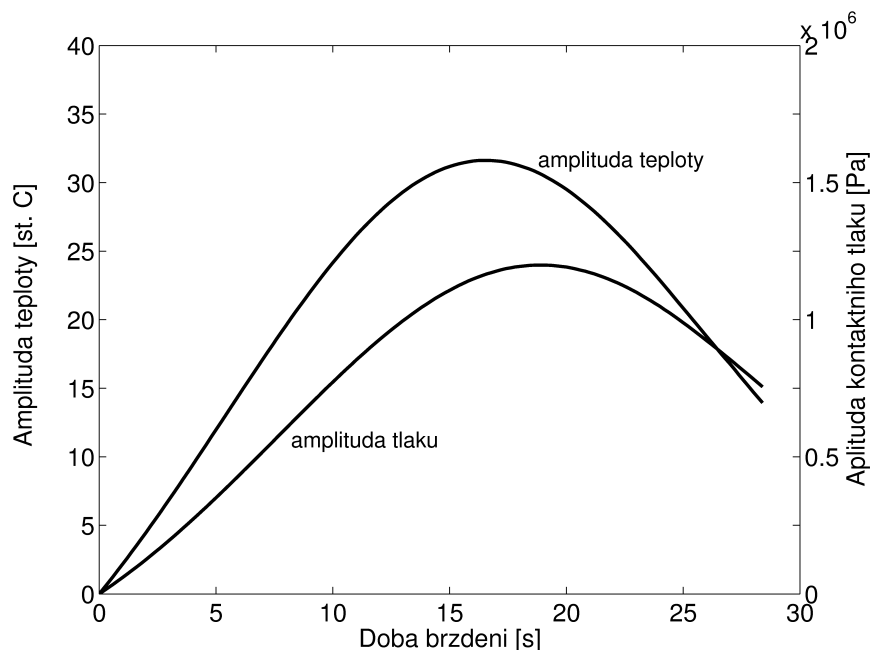
$$\frac{d\Omega(t)}{dt} = \Omega(t) \left[b(V(t)) - \frac{1}{\Psi} \frac{d\Psi}{dt} \right] + T_0 \cdot b(V(t)) . \quad (2)$$

Hodnoty perturbace kontaktního tlaku jsou stanoveny řešením úlohy rovinné deformace při zadáném teplotním zatížení. Užitá evoluční rovnice bere v úvahu změnu „teplotní kapacity“ perturbace Ψ v průběhu brzdění

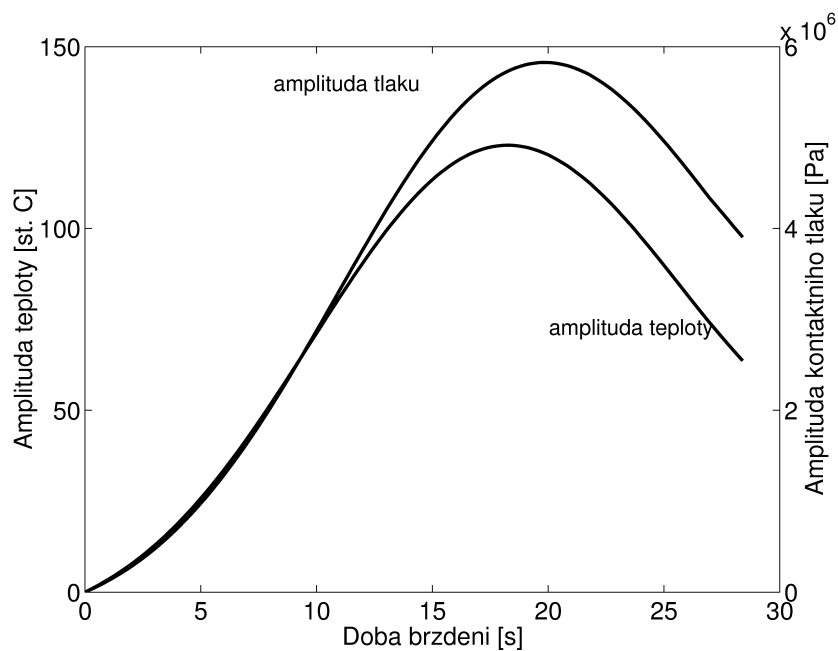
$$\Psi(t) = \int_0^a \Theta(y; b(V(t))) dy ,$$

neboť funkce Θ ze vztahu (1) závisí na hodnotě růstového paramteru b . Dále zde a značí poloviční tloušťku disku.

Jako příklad uvažujme dále brzdňý režim, kdy z počáteční rychlosti automobilu 150 km/hod (rychlost prokluzu 14,54 m/s) zastavíme rovnoměrným zpomalením $0,15g = 1,962 \text{ m/s}^2$. Vypočtené průběhy perturbací při tomto brzdňém režimu jsou znázorněny na obrázcích č. 4 a 5. Věnujme se oběma případům podrobněji.

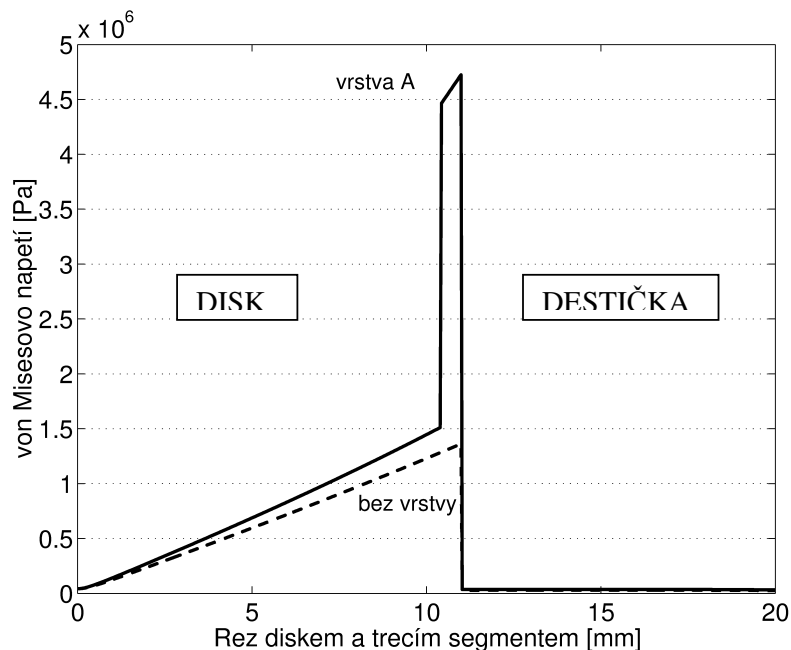


Obrázek č.4 Vývoj amplitudy perturbace teplotního pole a kontaktního tlaku při zastavení ze 150 km/hod zpomalením $0,15g$ – disk bez povrchové vrstvy.



Obrázek č.5 Vývoj amplitudy perturbace teplotního pole a kontaktního tlaku při zastavení ze 150 km/hod zpomalením $0,15g$ – disk s povrchovou vrstvou A (viz tabulku z odstavce 3).

Disk bez povrchové vrstvy. Hodnota amplitudy perturbace teploty z obrázku č.4 dosáhne 32°C, hodnota amplitudy perturbace tlaku pak 1,2 MPa. Uvážíme-li, že celkový průměrný kontaktní tlak je cca 1 MPa, dochází v rozhodující části brzdného režimu k plnému kontaktu mezi diskem a třecími segmenty. Vypočtené amplitudy jsou poměrně nízké. Užitečné je rovněž vyhodnocení napjatosti disku odpovídající jeho zvlnění v důsledku vyšetřovaných perturbací. Na obrázku č.6 jsou znázorněny hodnoty redukovaného von Misesova napětí v řezu disku, které odpovídají amplitudě 1°C perturbace teploty. V průběhu brzdění pak von Misesovo napětí v disku dosáhne pouze velikosti 40,5 MPa, což je výrazně méně než mez kluzu šedé litiny.



Obrázek č.6 Průběh von Misesova napětí v řezu poloviny disku s destičkou od amplitudy 1°C perturbace teplotního pole. Vyšší napjatost povrchové vrstvy A je způsobena vysokou tuhostí materiálu AlN. Rozhodující složkou je obvodové napětí „zvlněného“ disku.

Disk s povrchovou vrstvou A. Vypočtené hodnoty perturbací 123°C a 5,8 MPa jsou poměrně vysoké. K plnému kontaktu, kdy amplituda tlaku nepřesáhne cca 1 MPa, však dochází jen v prvních 5 s brzdění. V dalším průběhu již použitý výpočetní model nepopisuje skutečný stav kontaktu a lze proto očekávat nižší hodnoty amplitud perturbací. Oproti disku bez povrchové vrstvy se ovšem jedná o výrazně horší situaci. Velmi znepokojující je dále skutečnost, že vzhledem k napjatosti z obrázku č.6 lze vyvodit, že v průběhu brzdění přesáhne napjatost v povrchové vrstvě mez kluzu použitého materiálu AlN (dokonce přesáhne mez pevnosti).

5. Závěr

Příspěvek se zabývá hodnocením vlivu povrchové vrstvy disku na vznik termoelastické nestability a teplotních skvrn při brzdění. Povrchová vrstva s výrazně nižší teplotní vodivostí,

než má materiál těla disku, působí v tomto směru příznivě. Není však uspokojivá z jiných konstrukčních důvodů. Na druhé straně povrchová vrstva s vyšší teplotní vodivostí náchylnost ke vzniku termoelastické nestability zvyšuje. Při nevhodném brzděném režimu pak může dojít k tvorbě teplotních skvrn se zvýšenou amplitudou. V povrchové vrstvě dále může být dosaženo znepokojivé napjatosti přesahující mez kluzu použitého materiálu.

6. Poděkování

Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT v rámci projektu výzkumu a vývoje LN00B084.

7. Literatura

Burton, R.A., Nerlikar, V. & Kilaparti, S.R. (1973) Thermoelastic instability in a seal-like configuration. *Wear*, vol. 24, pp.177-188.

Dow, T.A. & Burton, R.A. (1972) Thermoelastic instability of sliding contact in the absence of wear. *Wear*, vol. 19, pp.315-328.

Lee, K. & Barber, J.R. (1993) Frictionally excited thermoelastic instability in automotive disk brakes. *ASME Journal of Tribology*, vol. 115, pp.607-614.

Lexikon technických materiálů (2001) Verlag Dashöfer

Voldřich, J. & Morávka, Š. (2003) Analysis of frictionally excited thermoelastic instability and hot spots in automotive disk brakes. *Inženýrská mechanika 2003*, Svratka.

Zagrodzki, P., Lam, K.B., Al Bahkali, E. & Barber, J.R. (2001) Nonlinear transient behaviour of a sliding system with frictionally excited thermoelastic instability. *ASME Journal of Tribology*, vol. 123, pp.699-708.