

Pokročilý řešič problémů elastohydrodynamického mazání

Pojednání k státní doktorské zkoušce

Ildikó Ficza

Školitel: prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

Obsah prezentácie

- Vymedzenie riešenej problematiky
- Prehľad súčasného stavu poznania
- Zhodnotenie poznatkov na základe rešerše
- Vymedzenie cieľov práce a spôsobu riešenia
- Súčasný stav riešenia
- Záver

Vymedzenie riešenej problematiky

Elastohydrodynamické mazanie je charakteristické pre nekonformné povrchy - valivé ložiská, ozubené kolesá, vačky, ...

vysoké tlaky

+ elastická deformácia

+ malá kontaktná plocha

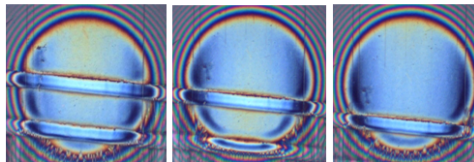
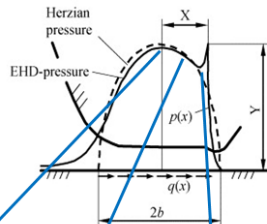
= **zložitý problém**

vyžadujúci detailné riešenie

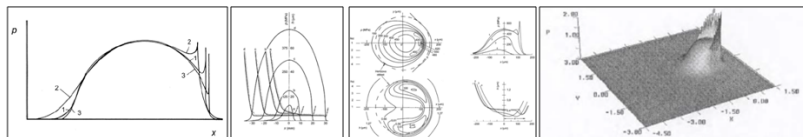


Motivácia

- štúdium prechodových dejov
- chovanie nerovností vo vnútri kontaktu
- podmienky valenia s čiastočným preklzom



Prvé numerické simulácie



Petrusevich (1951)

Dowson et al. (1959)

Ranger et al. (1974)

Venner et al. (2000)

1951

1959

1967

1974

1976

1987

1991

...

1st numerical
solution

Line contact –
direct solution

Point contact –
inverse solution

Line contact –
inverse solution

Point contact –
direct solution

Multigrid methods

Priame metódy

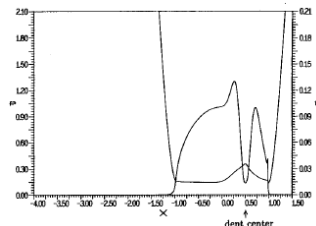
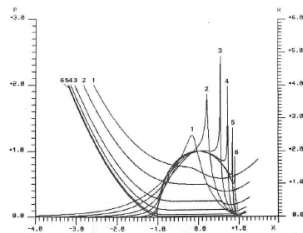
- Hamrock et al. (1976)
- Okamura, H. (1982)
- Chittenden et al. (1985)

Inverzné metódy

- Dowson et al. (1959)
- Ranger et al. (1974)
- Evans et al. (1981)

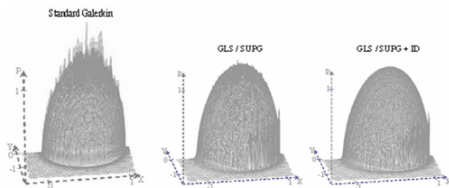
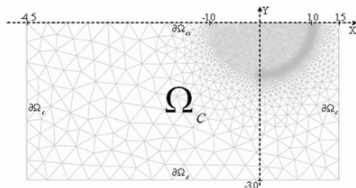
Moderné priame metódy

- iteratívna multigrid metóda
- Lubrecht, A.A. (1987)
- multilevel multi-integrácia
- Venner, C.H. (1991)
- conjugent gradient method
- Polonksy et al. (1999)



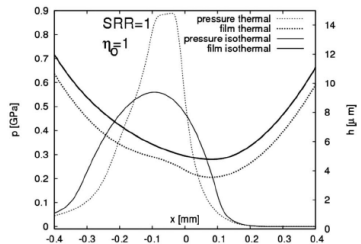
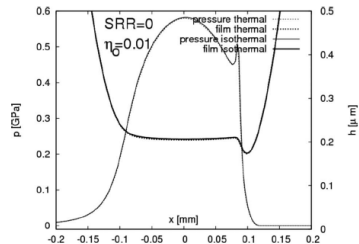
Prístup "fully coupled"

- simultánne riešenie Reynoldsovej a elastickej rovnice
- Metóda konečných prvkov
 - Hsiao et al. (1998),
 - Habchi et al. (2008)
- Differential deflection metóda
 - Evans et al. (2000),
 - Holmes et al. (2003)



Computational Fluid Dynamics

- Navier-Stokesove rovnice
- rozšírenie výpočtovej oblasti
- termálne javy
 - Almqvist et al. (2002),
 - Hartinger et al. (2008)



Štúdium povrchových nerovností

- modelovanie nerovností
 - stacionárne
 - časovo neustálené

- nerovnosť
 - modelová
 - reálna

- numerické práce
 - Lee et al., 1990,
 - Chang et al., 1991,
 - Venner et al., 1994,
 - Ehret et al., 1996

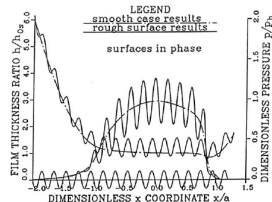
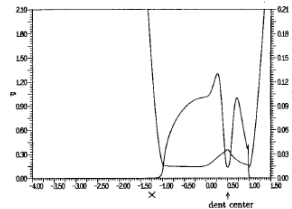
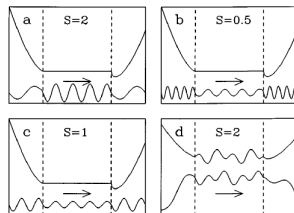
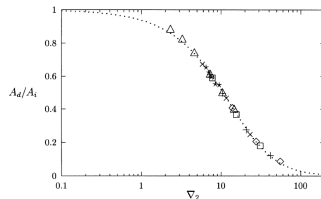


Fig. 10(a)



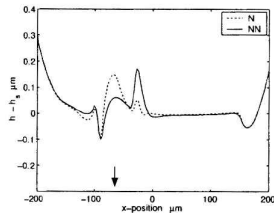
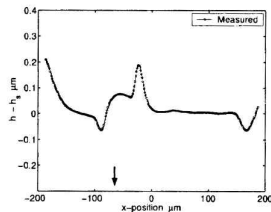
Štúdium povrchových nerovností

- elastická deformácia nerovnosti vo vnútri kontaktu
- systematický popis chovania nerovnosti vo vnútri kontaktu
- model amplitúdového útlumu
 - Venner et al., 1996,
 - Lubrecht et al., 1999
- semi-analytická metóda
 - Hooke, 1999,
 - Hooke et al., 2006



Štúdium povrchových nerovností

- vplyv prevádzkových podmienok:
čisté valenie/preklz
 - Venner, 1994, 1995
- neneutonský model
 - Greenwood, 2000,
 - Hooke, 2004,
 - Bair, 2006
- porovnanie s experimentmi
 - Felix-Quiñonez et al., 2004



Nenewtonské modely

- Ree-Eyringov model
 - Jacod et al., 2000,
 - Chapkov et al., 2006
- model medzného šmykového napätia
 - Jacod et al., 2003,
 - Zhang et al., 2002

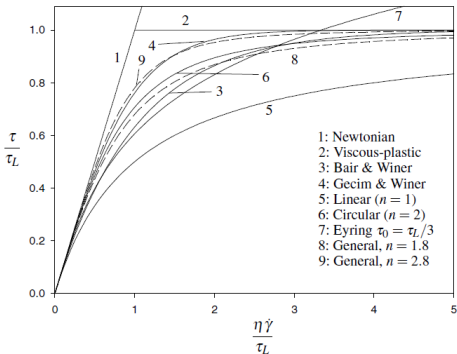


Figure 2.2: Non-Newtonian shear models. Reproduced from [32].

Zhodnotenie poznatkov na základe rešerše

	Priame metódy		Inverzné m.	Fully coupled	CFD
	Výpočet tlaku za daný odhad hrúbky		Výpočet hrúbky za daný odhad tlaku	Simultanné riešenie tlaku a hrúbky	Navier-Stokesove rovnice
	<ul style="list-style-type: none"> • Gauss-Seidel • Newton-Raphson 	<ul style="list-style-type: none"> • multigrid • multilevel multi-integrácia 	<ul style="list-style-type: none"> • iteračné metódy 	<ul style="list-style-type: none"> • MKP • DDM 	<ul style="list-style-type: none"> • komerčný software
+	<ul style="list-style-type: none"> • implementácia • požadovaná pamäť • kavitačná podmienka 	<ul style="list-style-type: none"> • výpočtová náročnosť $O(N \ln N)$ • štabilita • možnosť kombinovať s CGM, FFT 	<ul style="list-style-type: none"> • implementácia kavitačnej podmienky • požadovaná pamäť 	<ul style="list-style-type: none"> • riešenie v tlaku a hrúbky v 1 iteračnom cykle • výpočtová náročnosť $O(N \ln N)$ 	<ul style="list-style-type: none"> • rozšírená výpočtová oblasť • termálne javy
-	<ul style="list-style-type: none"> • výpočtová náročnosť $O(N^3)$ • obmedzené prevádzkové podmienky • Jacobiho matica 	<ul style="list-style-type: none"> • výpočtové časy pre pokročilé modely 	<ul style="list-style-type: none"> • štabilná len pre vysoko zaťažované kontakty • výpočtová náročnosť $O(N^3)$ 	<ul style="list-style-type: none"> • pokročilé modely 	<ul style="list-style-type: none"> • menej zaťažované kontakty • výpočtové časy

Zhodnotenie poznatkov na základe rešerše

- Vplyv povrchových nerovností a ich deformáciu vo vnútri kontaktu nemožno zanedbať.
- Čisté valenie - newtonský model
- Valenie s čiastočným preklzom - je nutné zahrnúť do výpočtov nelineráne chovanie maziva
 - Ree-Eyringov model
 - model medzného šmykového napätia

Cieľom dizertačnej práce

je objasniť vplyv nenewtonských tokových vlastností mazív na chovanie povrchových nerovností vo vnútri kontaktnej oblasti za podmienok s čiastočným preklzom užitím numerických metód.

Spôsob riešenia dizertačnej práce a čiastkové ciele:

1. Vývoj štabilného a rýchleho numerického algoritmu pre základné problémy EHD (stacionárne a prechodové deje).
2. Zahnutie do algoritmu modelovej nerovnosti a nenewtonských vlastností maziva.
3. Porovnanie s experimentálnymi výsledkami a vyhodnotenie výsledkov.

Návrh zmeny názvu dizertačnej práce:

Vliv nenewtonských mazív na chování povrchových nerovností v bodových kontaktech

Matematický popis

Reynoldsova rovnica

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \phi_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \phi_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) - u_m \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = 0$$

Kaviatčná podmienka:

$$p(x, y, t) \geq 0$$

Okrajové podmienky:

$$p(x_a, y, t) = p(x_b, y, t) = p(x, y_a, t) = p(x, y_b, t) = 0$$

Vlastnosti maziva

Závislosť viskozity od zmeny tlaku

$$\eta(p) = \eta_0 \exp \left((\ln(\eta_0) + 9.67) \left(-1 + \left(1 + \frac{p}{\rho_0} \right)^z \right) \right)$$

Závislosť hustoty od zmeny tlaku

$$\rho(p) = \rho_0 \frac{5.9 \cdot 10^8 + 1.34p}{5.9 \cdot 10^8 + p}$$

Ree-Eyringov model:

šmykový spád

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau_0}{\eta} \sinh \left(\frac{\tau_m}{\tau_0} \right)$$

efektívne viskozity

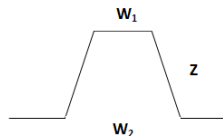
$$\Phi_x = \cosh \left(\frac{\tau_m}{\tau_0} \right) \quad \text{a} \quad \Phi_y = \frac{\sinh(\tau_m/\tau_0)}{\tau_m/\tau_0}$$

Rovnica hrúbky maziva

$$h(x, y, t) = h_0(t) + \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} - R(x, y, t) + \frac{2}{\pi E_r} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\rho(x', y') dx' dy'}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}}$$

Priečna nerovnosť $R(x, y, t)$

definovaná výškou Z a stranami W_1 a W_2



Rovnica silovej rovnováhy

$$w = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x', y') dx' dy'$$

Numerický model

Diskretizácia:

- tlakové členy: centrálna diskretizačná schéma 2. rádu
- konvekčné členy (klinový a vytlačovací člen): diskretizačná schéma NU2 (narrow upstream 2. rádu)
- časový krok: $h_T = 0.5h_X$

Výpočtová oblasť:

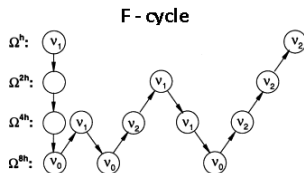
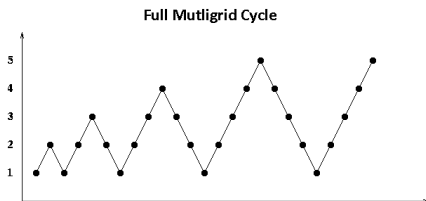
$$-2.5 \leq X \leq 1.5 \quad \text{a} \quad -2.0 \leq Y \leq 2.0$$

Výpočtová sieť:

- najjemnejšia sieť: 257×257 uzlových bodov
- najhrubšia sieť: 17×17 uzlových bodov

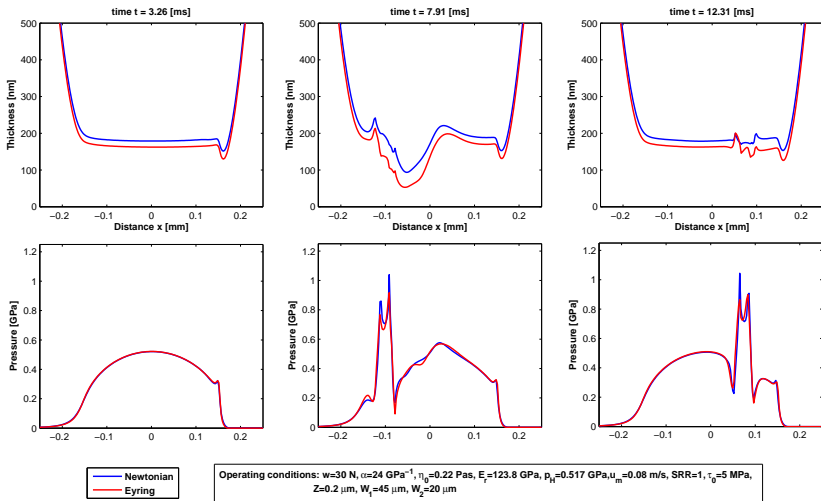
Metóda riešenia

- Reynoldsova rovnica - multigrid metóda (FMG a F-kyklus)
 - Gauss-Seidelova relaxácia
 - Jacobiho distributívna relaxácia
- Rovnica hrúbky maziva - multilevel multi-integrácia





Ukážka výsledkov



Záver

- Pojednanie ku štátnej doktorskej skúške vymedzuje tému dizertačnej práce, ktorou sú numerické simulácie chovania nerovností vo vnútri EHD mazaných kontaktov.
- V priebehu štúdia už boli splnené niektoré čiastkové ciele:
 - vývoj numerického algoritmu pre stacionárne, resp. prechodové deje,
 - zahrnutie modelovej nerovnosti do modelu,
 - zahrnutie neneutonského chovania maziva do modelu.
- Ďalšia práca sa bude týkať porovnaním neneutonských modelov maziva.

Ďakujem za pozornosť.