

Identifikace kavitačních procesů na povrchu ozubených kol

Doktorand: **Ing. Stanislav Jirouš**
 Fakulta strojní
 Studijní program P2301 – Strojní inženýrství
 Studijní obor: 3901V003 – Aplikovaná mechanika
 Technická univerzita v Liberci

Aktuálnost tématu, význam pro praxi a pro vědní obor

Práce se zabývá simulací proudění oleje v prostoru zubové mezery pastorku a ozubeného kola při provozu ozubeného soukolí. Je řešena problematika možnosti vzniku povrchového poškození zubů pastorku vlivem kavitace. Řešení problému kavitace je téma velice aktuální. Ve většině případů je její vznik nežádoucí, neboť způsobuje poškození povrchu strojních součástí. Včasná diagnostika těchto kavitačních jevů a jejich následné odstranění v praxi významně zvyšuje životnost strojních součástí. Vznik a rozvoj kavitace lze posoudit experimentálními metodami a rovněž matematickým modelováním. V práci je analyzována možnost vzniku kavitace pomocí matematické simulace. K modelování proudění oleje v zubové mezeře byla použita metoda konečných objemů v prostředí software Ansys/Fluent. Autor zpracoval metodiku řešení proudění kapaliny v zubové mezeře ozubeného soukolí. Výrazně zjednodušil geometrii ozubeného soukolí a tím také výpočetního času, když nahradil rotační pohyby spoluzabírajícího ozubeného kola a pastorku náhradním pohybem. Zjednodušením geometrie je možno matematicky modelovat oblast možného vzniku kavitace při přijatelných nárocích na výpočetní čas. Z těchto uvedených důvodů se jedná o téma aktuální, významné pro praxi a rozvoj vědního oboru.

Cíle práce

Doktorand stanovil několik cílů své práce, které jsou uvedeny na str. 8. Hlavním cílem je posoudit problematiku proudění oleje (olejového filmu) v zubové mezeře ozubeného soukolí s ohledem na možný vznik a vývoj kavitačních procesů na povrchu zubů. Cílem je popsat možné přístupy řešení problému a uskutečnit numerické výpočty s cílem ověřit podmínky vhodné pro vznik kavitace. Lze konstatovat, že uvedené cíle byly splněny.

Dalším cílem je výsledky numerických výpočtů porovnat s dostupnými experimentálními daty. Autor by měl u obhajoby vysvětlit, zda a jaký druh numerického výsledku byl porovnán s experimentem.

Postup řešení problému, zvolené metody zpracování

V kap. 2 jsou uvedeny možné příčiny poškození povrchu ozubených kol a to vlivem účinků proudící tekutiny nebo mechanickým opotřebením při záběru ozubených kol. V kap. 3. je uveden řešený pastorek s poškozením v oblasti mezi patní a roztečnou kružnicí jeho ozubení. Poškození povrchu bylo pozorováno velice brzy po zahájení provozu (cca po 12 hodinách provozu). V kap. 4 autor popsal teoretické poznatky z oblasti kavitace. Uvedl podmínky vzniku kavitace, typy a fáze kavitace, popis fázového rozhraní mezi kapalinou a plynem, popis dynamiky sférické bubliny včetně jejího kolapsu, vliv rozpustnosti plynu v kapalině. Dále popisuje možné účinky kavitace, např. poškození povrchu, vibrace, hluk. V kap. 5 uvedl popis matematického modelu pro výpočty proudění, dále pak přehled možností modelování vícefázového proudění. V kap. 6 popsal možnosti modelování kavitace, ovšem ve vlastních výpočtech tyto modely nevyužil. Kap. 7 se zabývá vlastním numerickým řešením, použitým řešičem s definicí okrajových podmínek.

V kap. 8 definoval pohyb ozubených kol užitím nové metody pro realizaci rotace ozubených kol, kde kinematika ozubených kol je nahrazena pohybem pouze jednoho ozubeného kola. Tato metoda využívá zjednodušení, kdy je zkoumán pouze jeden záběr ozubeného soukolí v jedné zubové mezeře. Toto zjednodušení přináší řadu výhod při realizaci numerické simulace, zejména při řízení kvality a lokální obnovy výpočetní sítě. Tato část práce je významným přínosem pro problematiku modelování proudění v zubové mezeře ozubeného soukolí. Dále v kap. 8 uvádí základní vlastnosti mazacího oleje (viskozitu, hustotu, stlačitelnost, tepelnou roztažnost, tlak nasycených par) a rovněž metodiku vyhodnocení tlakového pole.

V kap. 9 autor uvádí výsledky numerických simulací. Nejprve použil jednofázový model s časovým krokem $\Delta t = 5 \cdot 10^{-6}$ s, viskozitou $\mu = 0,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (viz kap. 9.1). Vyhodnotil tlakové pole na povrchu zubů. Detailní vyhodnocení bylo provedeno ve dvou segmentech, kdy segment 1 je umístěn blíže k boku zubu. Každý segment je rozdělen na 8 dílčích bodů. Sledované tlaky dosahují nejnižších hodnot v bodech 3 a 4 segmentu 2 cca $p_{\text{abs}} = 50\,000 \text{ Pa}$. Autor uvedl podmínku vzniku kavitace tlak $p_{\text{abs}} \leq 3600 \text{ Pa}$. Kavitace tedy nenastala. Rovněž vyhodnotil Reynoldsovo číslo $Re = 25,9$, což směřuje na laminární proudění. Hydraulický průměr je vypočítán na základě prostoru vzniklého při záběru ozubeného kola, viz obr. č. 56, při uvažování obdélníkového průřezu se stranami délky 5,2 mm a 2 mm. Následně výpočet

zopakoval pro jemnější výpočetní síť V17 (viz kap. 9.1.1) s konstatováním, že nebylo dosaženo významnějšího rozdílu ve výsledcích a tím je použita výpočetní síť V16 dostatečná. Dále v kap. 9.1.2 posoudil vliv nižší viskozity $\mu = 0,02 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ se závěrem, že změny vypočtených tlaků jsou minimální oproti modelu s vyšší viskozitou. V kap. 9.2 provedl výpočet pomocí vícefázového modelu VOF (olej – vzduch), pro časový krok, výpočetní síť a viskozitu oleje stejné jako v kap. 9.1. Výsledky jsou obdobné jako pro jednofázový model v kap. 9.1. Podmínky vhodné pro kavitaci nenastaly.

Následně autor použil jednofázový model s časovým krokem $dt = 1e^{-6} \text{ s}$, viskozitou $\mu = 0,02 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ a výpočetní sítí V16. Při simulaci s 5x menším časovým krokem byly ve většině segmentů zjištěny poklesy tlaků pod $p_{\text{abs}} = 3600 \text{ Pa}$, což je autorem daná podmínka pro vznik kavitace. Ve srovnání s modelem pro časový krok $dt = 5e^{-6} \text{ s}$ nastaly minimální hodnoty tlaku cca ve stejném čase, ale bylo dosaženo výrazně nižších hodnot tlaku. Četnosti výskytu tlaku $p_{\text{abs}} \leq 3600 \text{ Pa}$ jsou přehledně vyznačeny v tabulkách. Dále autor použil jednofázový model s časovým krokem $dt = 1e^{-6} \text{ s}$, viskozitou $\mu = 0,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ a výpočetní sítí V16. Z grafu 26 je vidět, že dosažené hodnoty minimálních tlaků jsou obdobné pro obě viskozity. Pro ověření vlivu časového kroku autor uvedl výpočet jednofázového modelu se zmenšeným časovým krokem $dt = 5e^{-7} \text{ s}$, viskozitou $\mu = 0,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ a výpočetní sítí V16. Uvádí rozdíl v četnosti tlaků $p_{\text{abs}} \leq 3600 \text{ Pa}$ pouze 2%.

Připomínky a otázky:

- Str. 7, odstavec 1. Uvedeno: vlastnosti olej, správně je: vlastnosti oleje.
- Str. 7, odstavec 2. Uvedeno: rotační rychlosti, správně je: rotačními rychlostmi.
- Str. 7, odstavec 3. Uvedeno: které způsobuje, správně je: který způsobuje.
- Str. 12, odstavec 1. Uvedeno: negativní účinku, správně je: negativní účinek.
- Str. 12, odstavec 2. Uvedeno: maximálními otáčky, správně je: maximálními otáčkami.
- Str. 12, odstavec 3. Jaké zařízení umožňuje detekovat a měřit charakteristiky kavitace?
Co je to charakteristika kavitace?
- Str. 12, odstavec 5. První věta nedává smysl. Vysvětlete význam první věty.
- Str. 17, odstavec 5. Uvedeno: rozraní kapaliny, správně je: rozhraní kapaliny.
- Str. 21, rovnice 19. Je úprava vztahu 19 provedena správně?
- Str. 26, odstavec 2. Uvedeno: viskozita, správně je: viskozitu. Uvedeno: korozivní účinku, správně je: korozivní účinky.

- Str. 26, odstavec 4. Je chybně uvedena hodnota objemového modulu pružnosti vzduchu. Jaká je jeho hodnota při atmosférickém tlaku?
- Str. 26, poslední odstavec. Uvedeno: kterou jsou, správně je: které jsou.
- Str. 30, odstavec 2. Uvedeno: Stření, správně je: Střední.
- Str. 30, odstavec 3. Vysvětlete poslední větu.
- Str. 38, odstavec 4. Uvedeno: Plessetovi, správně je: Plessetově.
- Str. 41, odstavec 1. Uvedeno: se použit, správně je: je použit.
- Str. 51, odstavec 2. Uvedeno: realizován pohybu, správně je: realizován pohyb. Text u obr. 22 začíná malým písmenem.
- Str. 62, odstavec 5. První věta je zavádějící. Vysvětlete její význam.
- Str. 65, Text u obr. 31 a 32 začíná malým písmenem. V popisech obrázku 32 jsou pravopisné chyby: výpočtní, výpočetn.
- Str. 66, odstavec 1. Uvedeno: Obrázku, správně je: Na obrázku.
- Str. 67, odstavec 1. Uvedeno: byly požity, správně je: byly použity. Tab. 3 uvedeno: objemový elementů, správně je: objemových elementů.
- Str. 68, odstavec 2. Uvedeno: z globální, správně je: z globálního.
- Str. 69, odstavec 2. Uvedeno: hraniční hodnou, správně je: hraniční hodnotou.
- Str. 69, odstavec 2. Uvedeno: bát zatížená, správně je: být zatížena.
- Str. 69, odstavec 3. Uvedeno: objemové elementu, správně je: objemového elementu.
- Str. 71, odstavec 1. Uvedeno: jiné rozlišené, správně je: jiné rozlišení.
- Str. 74. Popis tabulky 8 je uveden pod tabulkou.
- Str. 75, odstavec 3. K není součinitel stlačitelnosti ale modul objemové pružnosti. Vztah (100): Tlak se neznačí velkým písmenem P, ale malým písmenem p. Nejedná se ale o tlak, nýbrž o změnu tlaku Δp . Obdobně místo objemu V má být správně změna objemu ΔV .
- Str. 75. Co vyjadřuje veličina m ve vztahu (101)? Zároveň co vyjadřuje veličina K_0' ve vztahu (103)?
- Str. 75, odstavec 5. U veličiny K chybí jednotky.
- Str. 76. Uveďte odkaz na vztah 105.
- Str. 76, odstavec 2. U vztahu K_0 chybí jednotka.
- Str. 77, odstavec 1. Uvedeno: budeme pravděpodobně, správně je: bude pravděpodobně.
- Str. 77, obr. 39. Pod hodnotou $p = 0$ Pa se v grafu vyskytuje negativní tlak (podtlak). Je to správně?

- Str. 77, odstavec 2. Uvedeno: vzduchem rozpuštěného, správně je: vzduchem rozpuštěným.
- Str. 77, odstavec 2. Uvedeno: Pokud doje, správně je: Pokud dojde.
- Str. 78, odstavec 1. Uvedeno: který by mohly, správně je: které by mohly.
- Str. 78, odstavec 3. V první fázi vyhodnocení byl zvolen statický přístup zpracování hodnot tlaků. Co je tím myšleno?
- Str. 78, odstavec 4. Uvedeno: je prováděno, správně je: je proveden.
- Str. 79, obr. 43. Název obrázku začíná malým písmenem.
- Str. 79, odstavec 2. Uvedeno: Ve velké části zubové mezery s předpokládaným výskytem tlaků významných hodnot podtlaků byly V této části věty je navíc slovo tlaků.
- Str. 80, odstavec 1. Uvedeno: zobrazena body, správně je: zobrazeny body.
- Str. 81, odstavec 2. Uvedeno: je uveden zobrazen. Slovo uveden je v textu navíc.
- Str. 81, odstavec 3. Uvedeno: Na obrázku jsou zobrazeny první tři fáze pohybu. Fáze odpovídají času $1e^{-4}$, $2e^{-4}$, $3e^{-4}$. V případě velikosti časového kroku $dt = 5e^{-6}$ je pro realizaci jedné fáze potřeba 1000 iterací. Dotaz: Jaká je velikost jedné fáze, jeví se nesoulad mezi uvedeným textem a popisky v obr. 45 a obr. 46? Pokud by dle obr. 45 byla velikost jedné fáze 0,005 s, pak pro realizaci jedné časové fáze je potřeba 1000 časových kroků. Pokud by bylo uvedeno dle textu 1000 iterací, pak by pro výpočet jednoho časového kroku byla pouze 1 iterace? Nemá být místo 1000, 5000, 6000, 30000 iterací uvedeno časových kroků?
- Str. 82, nadpis. Chybí jednotka u časového kroku $dt = 5e^{-6}$.
- Str. 82, odstavec 1. Jakým způsobem byla definována stlačitelnost oleje?
- Str. 82, odstavec 2. Uvedeno: ozubeného kolo, správně je: ozubené kolo.
- Str. 83, graf. 1. V grafu 1 až 64 jsou uvedeny hodnoty absolutního tlaku, kdy tlak $p = 0$ Pa odpovídá vakuu. Naopak v obrázcích 48, 50, 51, 52 tlak $p = 0$ Pa odpovídá atmosférickému tlaku, tlaky jsou tedy relativní vůči této hodnotě. Proč není značení tlaků sjednoceno?
- Str. 84, odstavec 2. Uvedeno: dochází prvotnímu k poklesu tlaku. Nesprávné pořadí písmena k ve větě.
- Str. 84, V odstavci 2 je uvedeno, že počáteční podmínky byly nastaveny na hodnotu atmosférického tlaku. Proč na obr. 48 hodnota atmosférického tlaku odpovídá tlaku $p = 0$ Pa (zeleně)? Uváděné hodnoty odpovídají relativnímu tlaku vůči ovzduší. Podobně viz obr. 48, 50, 51, 52.

- Str. 85, odstavec 2. Časové průběhy hodnot statického tlaku ve sledovaných segmentech 01 v bodech 1 až 8 popisuje obr. č. 49. Není to pravda.
- Str. 85, odstavec 3. Uvedeno: Grafy 2 znázorňuje, správně je: Graf 2 znázorňuje.
- Str. 86, odstavec 3. Uvedeno: umístěných více prostoru zubové mezery, smysl dává: umístěných více v prostoru zubové mezery.
- Str. 86, odstavec 3. Uvedeno: je sledován průběh, přesněji mělo být uvedeno: je sledován průběh tlaku.
- Str. 86, odstavec 3. Uvedeno: k podmínkám, které by umožnili tvoření parních bublin či výskytu kavitace, správně je: k podmínkám, které by umožnily tvoření parních bublin či výskyt kavitace.
- Str. 87, odstavec 1. Autor uvádí, že v bodech segmentu_01 (2,3,4) situovaných blíže k roztečné kružnici je změna hodnoty tlaku z maximální na minimální realizována během výrazně kratší doby než v bodech segmentu_01 (6,7,8) situovaných dále k roztečné kružnici. Čím si to autor vysvětluje?
- Str. 88, graf 4. Chybí označení bodů 1 a 5 v názvu grafu.
- Str. 89, odstavec 1. Uvedeno: Přejít z maximální hodnoty tlaku do minimální je však realizovaný rychleji v oblasti blíže roztečné kružnice. Věta nedává smysl s ohledem na text na str. 87, kdy u segmentu_01 autor rovněž uvádí, že změna hodnoty tlaku z maximální na minimální je realizována během výrazně kratší doby v bodech situovaných blíže k roztečné kružnici.
- Str. 89, odstavec 2. Uvedeno: kdy hodnota minima tlaku klesne ze svého maxima na minimum. Věta bude dávat smysl po vypuštění slova minima před slovem tlaku.
- Str. 89, odstavec 2. Uvedeno: odpovídá času simulace 0,013750 a 0,018750 [s], správně je: odpovídá času simulace 0,013750 až 0,018750 [s].
- Str. 91, odstavec 1. Uvedeno: kdy spoluzabírající segment vstupuje do prostoru ... Do jakého prostoru vstupuje?
- Str. 92, obr. 55. Uvedeno: zubové mezer, správně je: zubové mezery.
- Str. 93, odstavec 1. Pro charakteristický rozměr dle délky je pro Reynoldsova čísla $Re = 1600$ a $Re = 160$ uvedena stejná viskozita $\mu = 0,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$. Kterému Reynoldsovu číslu odpovídá hodnota viskozity $\mu = 0,02 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$?
- Str. 94, odstavec 1. Uvedeno: která je realizované, správně je: která je realizovaná.
- Str. 94, graf 5. Špatně uvedeno rozlišení povrchové sítě $l = 0,003 \text{ [m]}$ a $l = 0,002 \text{ [m]}$, neodpovídá hodnotě $l = 0,0002 \text{ [m]}$ uvedeně v textu.

- Str. 96, odstavec 2. Uvedeno: řerveně, správně je: červeně.
- Str. 96, odstavec 2. Uvedeno: ovlivňující numerickou simulace, správně je: ovlivňující numerickou simulaci.
- Str. 99, odstavec 2. Změna viskozity právě v důsledku změny teploty je v této zkoumána. Co autor myslel touto větou?
- Str. 99, odstavec 3. Uvedeno: Na grafu č. 12 jsou porovnány časové průběhu, správně je: V grafu č. 12 jsou porovnány časové průběhy.
- Str. 99, odstavec 3. U hodnoty viskozity $\mu = 0,2$ chybí jednotky.
- Str. 101, odstavec 1. Uvedeno: že kapaliny, správně je: že kapalina.
- Str. 102, odstavec 1. Uvedeno: Vlastnosti použitých fází v numerické simulace jsou, správně je: Vlastnosti použitých fází v numerické simulaci jsou.
- Str. 102, odstavec 2. Uvedeno: na všech plochách reprezentující geometrii, správně je: na všech plochách reprezentujících geometrii.
- Str. 102, odstavec 2. Uvedeno: reprezentovaná světlo zelenou barvou, správně je: světle zelenou barvou.
- Str. 104, odstavec 2. Uvedeno: může být významný v případě, se velikost absolutního tlaku, správně je: že se velikost absolutního tlaku.
- Str. 105, odstavec 1. Uvedeno: Na obrázku č. 58 jak zobrazen, správně je: je zobrazen.
- Str. 107, odstavec 1. Uvedeno: Velikost časového kroku byla nastavena na velikost $dt = 1e^{-6}$ [s], časový krok je pro toto nastavení pětinasobný. Je to správně? Dle mne je tento časový krok 5 krát menší oproti časovému kroku $dt = 5e^{-6}$ [s].
- Str. 107, odstavec 2. Uvedeno: pro časová krok, správně je: pro časový krok.
- Str. 107, graf 16. Jak si autor vysvětluje pokles vypočteného tlaku pod hranici vakua a to až o nezanedbatelnou hodnotu 100 kPa až 150 kPa?
- Str. 110, odstavec 2. Uvedeno: časového průběhů statického tlaku, správně je: časového průběhu statického tlaku.
- Str. 110, tabulka 10, tabulka 11. Uvedeno: menšího než tlaku, správně je: menšího než tlak.
- Str. 111, graf 20. Zkonvergoval výpočet v každém časovém kroku?
- Str. 115, obr. 62. Pro které segmenty a body jsou uvedeny četnosti výskytu tlaku pod hodnotou tlaku nasycených par?
- Str. 115, odstavec 2. Uvedeno: Četností minim tlaku, správně je: Četnost.
- Str. 115, odstavec 2. Uvedeno: Tablka, správně je: Tabulka.

- Str. 115, odstavec 2. Uvedeno: výskytu tlaku nižšího, správně je: výskytu tlaku nižšího.
- Str. 117. V popisu grafu 24 a 25 je nesprávně uvedena 2x stejná hodnota viskozity $\mu = 0,02 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Str. 118, odstavec 1. Je uvedena stejná doba poklesu tlaku na lokální minimum $t = 13\cdot 10^{-6} \text{ s}$ pro viskozitu $\mu = 0,02 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ a $\mu = 0,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$. Je to správně?
- Str. 118, odstavec 1. Uvedeno: Grafické porovnání je časových průběhů, správně je: Grafické porovnání časových průběhů.
- Str. 118, odstavec 1. Uvedeno: Na základě časového intervalu, ve kterém je splněna podmínka velikosti tlaku pro vznik kavitace, je vytvořen č. 63. Správně má být obr. č. 63.
- Str. 119, odstavec 1. Uvedeno: velikost tlaku, správně je: velikosti tlaku.
- Str. 119, obr. 63. V tomto obrázku je možnost vzniku kavitace rozšířena až do hodnoty $p_{\text{abs}} = 5000 \text{ Pa}$ z dříve uváděné hodnoty $p_{\text{abs}} = 3600 \text{ Pa}$. Proč? Spodní hranici tlaku autor uvádí $-\infty \text{ Pa}$. Proč, když tlak může ve skutečnosti nabývat hodnoty pouze větší než vakuum, tedy větší než $p_{\text{abs}} = 0 \text{ Pa}$?
- Str. 120, odstavec 3. Uvedeno: na obrázku, správně je: na obrázku.
- Str. 121, odstavec 1. Je uvedeno, že výsledné průběhy tlaku jsou velice podobné pro velikosti malých časových kroků $dt = 1\text{e}^{-6} \text{ s}$ a $dt = 5\text{e}^{-7} \text{ s}$. Toto tvrzení je ale dle obr. 64 nepřesné.
- Str. 121, odstavec 1. Uvedeno: Rozílnost, správně je: Rozdílnost.
- Str. 121, odstavec 1. Uvedeno: Rozílnost v důsledku velikosti časového kroku může souviset s časovými měřítky, které doprovázejí děje kavitace. Dotaz: Jak souvisí rozdíl časových průběhů tlaků pro různé časové kroky s uvedenými časovými měřítky kavitačního děje? Kavitační model nebyl uvažován. Jak by mohl ovlivnit výpočet?
- Str. 121, odstavec 1. Uvedeno: Průběh rychlostní pole, správně je: Průběh rychlostního pole.
- Str. 122, odstavec 1. Uvedeno: ozubené mezery, správně je: zubové mezery.
- Str. 122, odstavec 1. Věta: V poslední fázi vystupuje z prostoru zubové mezery a tok oleje (a vzduchu) proudění do prostoru zubu, který opouští zubovou mezeru. Špatná formulace věty.
- Str. 123, odstavec 4. Uvedeno: které sloužili, správně je: které sloužily.
- Str. 127. U literárního zdroje [41] není uveden autor a název článku.

- Str. 127. Literární zdroj [45]. Wikipedia není dostatečně důvěryhodný zdroj informací pro doktorskou práci.
- Str. 128. V seznamu označení veličin, viz kap. 12, je použit stejný znak pro různé veličiny, např. α , λ , σ , γ . Naopak některé veličiny v seznamu označení chybí, např. na str. 75 veličiny K_0 , K_0' aj.
- Str. 131 až 133, přílohy 2 až 9. U viskozity μ nejsou jednotky uvedeny s horním indexem. V příloze 6 je v nadpisu nesprávně uveden časový krok $dt = 5e^{-6}$. Místo pojmu velikost časového kroku je v přílohách uvedeno velikost řasového kroku.

Výsledky disertační práce s uvedením konkrétního přínosu studenta

Doktorand matematicky modeloval proudění oleje v prostoru zubové mezery pastorku a ozubeného kola pomocí metody konečných objemů v prostředí software Ansys/Fluent.

Pohyb ozubených kol ve výpočtovém modelu realizoval užitím nové metody, kde kinematika ozubených kol je nahrazena pohybem pouze jednoho ozubeného kola. Dochází ke zjednodušení, kdy je vyšetřován pouze jeden záběr ozubeného soukolí v jedné zubové mezeře. Pastorek je statický a odvaluje se pouze zub spoluzabírajícího ozubeného kola. Použitá metoda zjednodušuje numerickou simulaci zejména z hlediska náročnosti výpočetní sítě. Tato část práce je významným přínosem studenta.

Student provedl simulace pro různá nastavení matematického modelu. Byl zkoumán vliv výpočetní sítě, viskozity oleje, časového kroku pro jednofázový model a rovněž vliv vícefázového modelu olej – vzduch. Při simulaci pro jednofázový matematický model s časovým krokem $dt = 1e^{-6}$ s, viskozitou $\mu = 0,02 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ a výpočetní sítí V16 byly zjištěny poklesy tlaků pod hranici $p_{\text{abs}} = 3600 \text{ Pa}$, což je autorem daná podmínka pro vznik kavitace. Pro viskozitu $\mu = 0,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ a rovněž menší časový krok $dt = 5e^{-7}$ s jsou výsledky obdobné. Při použití jednofázového modelu s časovým krokem $dt = 5e^{-6}$ s, viskozitou $\mu = 0,02 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ nebo $\mu = 0,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ byly zjištěny hodnoty tlaku cca $p_{\text{abs}} = 50\,000 \text{ Pa}$. Je zřejmé, že správná volba časového kroku má významný vliv na výsledky simulace a tedy i posouzení podmínek potřebných pro vznik kavitace.

Tyto matematické simulace by bylo vhodné doplnit o experimentální nepřímé ověření matematického modelu. Autor provedl matematické modelování proudění bez zapojení kavitačního modelu. Posuzoval možné podmínky vzniku kavitace dosažením požadované hodnoty tlaku. Dosažené výsledky jsou dobrým základem pro další zkoumání této problematiky

jednak s využitím experimentálního ověření, tak rovněž zapojením kavitačního modelu do matematické simulace.

Formální úprava disertační práce, jazyková úroveň, publikační aktivity

Práce je členěna do 12 kapitol, které na sebe logicky navazují. Práce obsahuje celkem 129 stran textu a 5 stran příloh. V práci je značné množství pravopisných chyb a překlepů, což snižuje její úroveň. Doktorand měl projevit větší pečlivost při psaní textu. Některé obrázky jsou zpracovány kvalitně, naopak některé grafy by měly být opatřeny většími popisky pro přehlednost (např. graf 3, graf 4, graf 5 apod.). Občas chybí odkazy na použitou literaturu, např. str. 16. Autor uvádí 46 odkazů na literární a internetové prameny, což je dostačující.

V práci nejsou uvedeny vlastní publikace doktoranda, proto je nelze posoudit. Doporučuji doložit publikační aktivity autora při obhajobě.

Doporučení

Doktorand projevil přehled a vědomosti v oblasti matematického modelování proudění kapaliny a také v oblasti kavitace. V dané problematice se dobře orientuje. Práce splňuje požadavky na teoretickou a aplikační úroveň. Doktorand vypracováním disertační práce prokázal, že ovládá vědecké metody, má hluboké teoretické znalosti a přináší nové poznatky v oboru. Práci doporučuji k obhajobě.

Ostrava, 2.11. 2015.

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Fakulta strojní

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Posudek disertační práce
Identifikace kavitačních procesů na povrchu ozubených kol

autor Ing. Stanislav Jirouš
studijní program Strojní inženýrství, studijní obor Aplikovaná mechanika

Disertační práce se zabývá numerickým řešením toku oleje v olejovém filmu mezerou mezi dvěma zabírajícími ozubenými koly. Cílem práce je posouzení možných způsobů řešení tohoto problému a provedení numerických výpočtů pro stanovení podmínek pro vznik kavitačních jevů, které vedou k významnému poškození povrchu ozubených kol. Práce o rozsahu 134 stran obsahuje celkem 10 kapitol, seznam literatury, seznam označení a 10 příloh. V seznamu literatury není uvedena žádná práce uchazeče.

Po úvodní části jsou v druhé kapitole uvedeny jednak možnosti poškození povrchu ozubeného kola vlivem proudící tekutiny a mechanickým opotřebením při záběru ozubených kol a jednak cíle disertační práce. Ve třetí kapitole je popsáno poškození povrchu ozubených kol na základě podkladů od výrobce. V čtvrté kapitole jsou uvedeny charakteristiky jednotlivých typů kavitace a podrobně popsány fáze procesu kavitace, tj. vznik kavitačních jader, růst kavitačních bublin a jejich kolaps včetně příslušných rovnic. Pátá kapitola je věnována popisu matematických modelů proudění, kde jsou kromě základních bilančních rovnic a konstitučních vztahů popsány metody řešení turbulentního a vícefázového proudění. Jednak jsou uvedeny způsoby středování pohybových rovnic a stručný přehled modelů s turbulentní vazkostí a jednak různé přístupy k řešení vícefázového proudění se zaměřením na metodu určování fázového rozhraní pomocí objemového podílu tj. metodu VOF (Volume-Of-Fluid). Šestá kapitola obsahuje základní přehled způsobů modelování kavitace zahrnujících zejména modely implementované v software ANSYS Fluent. V sedmé kapitole je popsán matematický model použitý pro numerické řešení včetně možností volby výpočetní sítě a zadání okrajových podmínek. Z hlediska řešení zadané úlohy je významná tzv. dynamická síť, která byla použita při modelování pohybu ozubených kol.

Významnou částí celé práce je osmá kapitola, zabývající se jednak geometrií výpočetního modelu ozubeného soukolí a jednak popisem vlastností použitého oleje a metodikou vyhodnocení tlakového pole. Nejprve je uveden popis použitého ozubeného soukolí a jeho geometrie, přičemž není uvažována geometrie převodové skříně. Pro výpočet byla použita zjednodušená geometrie soukolí, která zahrnuje segmenty ozubených kol, zubová mezera zabírajících zubů a část okolní geometrie, navržená za předpokladu, že uvažování dalších zubů spoluzabírajícího kola nedejde k ovlivnění dějů v zubové mezeře. Dále je podrobně popsána použitá geometrie, okrajové podmínky a definice pohybu ozubeného soukolí ve výpočetním modelu k simulaci odvalování ozubených kol. Zjednodušení geometrie pouze na segmenty ozubených kol pak umožňuje použít zjednodušení jejich pohybu tak, že jedno ozubené kolo je v klidu a druhé ozubené kolo se odvaluje, tj. koná rotaci kolem dvou os současně. Pro výpočet je využita tzv. dynamická výpočetní síť s přesítováním a kontrolou kvality sítě. Předpis pohybu ozubeného kola byl definován pomocí UDF funkce.

Výsledky numerických simulací jsou shrnuty v deváté kapitole. Výpočty byly provedeny pro řadu variant, které byly navzájem porovnány. Při výpočtu toku oleje v mezeře mezi ozubenými zuby byl použit model jednofázové i dvoufázové tekutiny. Výpočty byly provedeny pro laminární proudění na základě odhadu charakteristického Reynoldsova čísla určeného pomocí střední rychlosti oleje a hydraulického průměru zubové mezery, které bylo porovnáno s kritickými hodnotami pro proudění v kruhovém potrubí. Dále byly sledovány

vlivy různých parametrů na výsledky simulace, jako je rozlišení výpočetní sítě, velikost časového kroku, hodnoty dynamické vazkosti odpovídající teplotách 40 a 100 °C. Výsledky simulací ukázaly, že průběhy tlaků při použití jednofázového i dvofázového modelu jsou podobné. Rovněž se na průběhu tlaků příliš neprojevila řádová změna dynamické vazkosti oleje. Výsledky výpočtů ukázaly významný vliv časového kroku, kde při použití dostatečně malého časového kroku byly dosaženy hodnoty tlaku nižší než tlak sytých par, tedy byly splněny podmínky pro vznik kavitace. Při posuzování výsledků se předpokládal podle Seetona (2006) tlak sytých par oleje cca 3600 Pa prakticky nezávislý na teplotě. Nezbytné zmenšení časové kroku ale vede ke značnému zvětšení časové náročnosti výpočtu. V závěrečné kapitole jsou pak shrnuty dosažené výsledky numerických simulací proudění oleje v mezeře mezi zabírajícími ozubenými koly.

Připomínky a dotazy

K disertační práci nemám zásadní připomínky, týkající se způsobu řešení zadaného problému. Práce je velmi pečlivě zpracována a obsahuje velmi málo překlepů a formálních chyb. V textu v kapitole 8.7.1 chybí popis obr. 42 Oblasti s výskytem poškození a obr. 43 Porovnání poškození části zubu a CFD modelu na uvažovaných PID. V kap.9.1 je dynamická vazkost označována jako η i μ , odpovídající seznamu označení. Na začátku kap.9 se pak uvádí, že byly „...použity dvě hodnoty kinematické viskozity na základě dat výrobce oleje a předpokládaného vývoje teploty v zubové mezeře...“, ale dále se uvádí dynamická vazkost.

V anotaci se uvádí že numerické výpočty budou porovnány s dostupnými experimentálními daty, ale v disertační práci pak porovnání chybí. Znamená to, že kromě snímků poškození povrchu zubů žádná experimentální data nejsou dostupná?

Výpočty byly provedeny pro laminární proudění na základě odhadu charakteristického Reynoldsova čísla určeného pomocí střední rychlosti oleje a hydraulického průměru zubové mezery, které bylo porovnáno s kritickými hodnotami pro proudění v kruhovém potrubí, kde lze přechod předpokládat pro Re v intervalu od 2300 do 4000. Na základě určení velikosti Reynoldsova čísla je v numerických simulacích uvažováno laminární proudění, i když odhad přechodu do turbulence na základě kritérií pro vyvinuté proudění v kruhovém potrubí pomocí hydraulického průměru je poněkud velké zjednodušení. Odhadnuté hodnoty Re jsou ale natolik malé, že lze laminární proudění předpokládat.

Výpočty byly provedeny s modelem stlačitelné tekutiny, ale při výpočtu není uvažován vliv zahřívání oleje a uvažuje se konstantní vazkost. Znamená to, že se předpokládá i konstantní teplota? Proč byl tedy použit model stlačitelné tekutiny?

Značná pozornost je věnována vlivu nastavení numerického výpočtu, jako je použitá síť, krok výpočtu a pod., na výsledky simulace. Je třeba si uvědomit, že o přesnosti numerického řešení parciálních diferenciálních rovnic rozhoduje především použité numerické schéma, které je ve Fluentu dané a nelze jej ovlivnit.

Závěry a hodnocení

Předložená disertační práce se zabývá numerickým řešením toku oleje v olejovém filmu mezerou mezi dvěma zabírajícími ozubenými koly s cílem posoudit možnosti řešení a provést numerické výpočty pro stanovení podmínek pro vznik kavitace, která vede ke značnému poškození povrchu ozubených kol. Tato problematika je velmi aktuální z technických aplikací. Obsah disertační práce splňuje zadané cíle. Zvolený postup řešení vychází z detailního rozboru problematiky. Práce představuje sofistikované použití komerčního software ANSYS Fluent doplněného UDF funkcemi pro předpis pohybu ozubeného kola.

Provedené výpočty prokázaly schopnost CFD metod simulovat proudění oleje v zubové mezeře a z výsledného tlakového pole usuzovat pomocí tlaku sytých par oleje na možnost vzniku kavitace a tím i možného poškození vyšetřovaných ozubených kol.

Autor disertační práce prokázal odpovídající znalosti nejen z aplikované mechaniky, ale i použití komerčního software k řešení komplikovaných technických problémů. Připomínky k písemnému zpracování disertace nijak nesnižují dosažené výsledky a vlastní přínos disertační práce. Předložená disertační práce přináší původní výsledky, které byly přijatelně publikovány, splňuje všechny podmínky podle zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. a proto ji doporučuji k obhajobě.

V Praze dne 2.listopadu 2015



Posudek na disertační práci k získání titulu "PhD" v oboru *Aplikovaná mechanika*.

Název práce: *Identifikace kavitačních procesů na povrchu ozubených kol.*

Autor práce: *ing. Stanislav Jirouš*

Fakulta strojní Technická Universita v Liberci

Jedním z efektivních způsobů jak zlevnit a zpřesnit experimentální výzkum je numerické modelování. V případě strojních součástek a zařízeních vystavených dlouhodobé zátěži je důležité jednak hledisko dlouhodobé provozní spolehlivosti a současně i hlediska ekonomičnosti a ekologičnosti. Snaha optimalizovat životnost a účinnost převodovek je stále velmi aktuální a je jí věnováno mnoho pozornosti ve všech vyspělých zemích. Technická praxe ukazuje, že jedním z limitujícím faktorem životnosti ozubených převodů jsou kavitační účinky (kolabující bublinky) mazacího a chladicího oleje. Vhodnou volbou oleje, jeho viskozity a provozní teploty, lze toto nežádoucí poškození styčných ploch mezi zabírajícími zuby snížit a v ideálním případě zcela odstranit..

Tématem práce je numerické modelování proudění oleje mezi povrchy zabírajících zubů s cílem zjistit, zda jeho teplota a tlak neodpovídají již hodnotám jeho fázového přechodu (vzniku kavitace vlivem vypaření). K modelování je použit komerční program ANSYS/Fluent, který je již potřebnými modely kavitace, turbulence a generace sítě vybaven. Co však tento program nedovoluje, je modelovat definovaný pohyb těles (kontaktních ploch) určité geometrie. Při řešení nestacionárních úloh vyžaduje značné úsilí i tvorba vhodně dynamické výpočtové sítě, která splňuje požadavky na implementovaný výpočtový algoritmus (regulární tvar konečného objemu, doporučená šikmost (skewness)>0.95). Z těchto důvodů je předložená doktorská práce podřízena následujícím cílům:

- použít komerční výpočtový program (ANSYS/Fluent) pro nestacionární simulaci 3D záběru ozubených kol v výpočtu hydrodynamických parametrů olejové mazací vrstvy
- komerční program doplnit vlastními funkcemi pro pohyb ozubených kol a navrhnout vhodnou výpočtovou síť.
- vypočtené průběhy tlaků na styku zubů posoudit z hlediska možného výskytu kavitace a porovnat (alespoň kvalitativně) s experimentem

Za užitečné považuji samotnou formulaci cílů práce, protože problematika má úzkou návaznost na aktuální úkoly českého strojírenství.

Hodnocení.

V první části práce (kap. 4 až 6) jsou stručně popsány základní vlastnosti kavitace a proudění dvoufázové tekutiny. Vedle kavitace způsobené fázovým přechodem, která vede ke vzniku bublin s vysokým vnitřním přetlakem a které při svém kolapsu způsobují poškození povrchu se diskutuje i kavitace způsobená rozpuštěnými plyny (vzduchu). Tento druhý typ kavitace má za následek jen dramatickou změnu hustoty a viskozity oleje. Standardním způsob jsou popsány potřebné zákony bilance, tak jak jsou uváděny v manuálech komerčních programů. Samotný přínos práce spatřuji v kap. 7, 8 a 9 kde autor vytvořil vlastní podprogramy (user defined functions) popisující pohyb ozubených kol, včetně detailního záběru zubu do zubní mezery ve 3D geometrii. Takto vytvořené programy mu umožnily simulovat průběh tlaku v oleji v mezizubní mezeře při záběru. I když se autor z hlediska výpočtové náročnosti (více jak 10 milionů buněk a

časový krok 10^{-6} s, s dobou simulace 0,03 s) omezil jen na jeden zub s odpovídající zubní mezerou, dosáhl věrohodných průběhů tlaku, umožňující posoudit kdy (čas od okamžiku záběru) tak i očekávané místo vzniku kavitační oblasti. Moje hodnocení z hlediska bodů relevantních pro disertační práci k udělení titulu PhD je následující:

- *Rozbor z hlediska současného stavu řešené problematiky.* V práci je použit moderní komerční program ANSYS/Fluent k simulaci dvoufázového laminárního proudění v nestacionární geometrii. Vychází z obecné formulace zákonů bilance založené na kontinuálním popisu plynné i kapalně fáze s použitím metody Volume of Fluid.
- *Teoretický přínos k řešení dané problematiky.* Jako hlavní přínos autora spatřuji ve tvorbě vlastních podprogramů (user defined functions) popisujících pohyb ozubených kol včetně detailního záběru zubu do zubní mezery ve 3D geometrii. Těmito podprogramy doplnil komerční software tak, že mohl numericky analyzovat hydrodynamické poměry při záběru ozubení
- *Praktické využití výsledků simulací* bude jistě následovat. Předpokládám, že budou simulace porovnány s pozorováním konkrétních převodů a bude dále ověřována přesnost predikce kavitačních účinků.
- *V práci použité metody považuji* za vhodné a i způsob jejich aplikace za zdařilý. Jak teoretická formulace problému tak i návaznost na aplikaci odpovídá současným trendům jak výpočtové mechaniky tekutin a termodynamiky tak i požadavkům kladeným na konstrukci vysoce zatěžovaných zařízení.
- *Doktorand prokázal patřičné znalosti* v oboru konstrukce strojů, mechaniky tekutin, termodynamiky a numerické matematiky. Způsob jakým tak složitý problém zpracoval ukazuje, že si osvojil vědecké metody práce.
- *Formální úroveň práce je postačující.* V práci jsem našel jen drobné nepřesnosti ve formulaci a překlepy, např.:
 - pojem nuklid (str. 17) je používán ve fyzice pro látky, které se skládají z atomů majících stejný počet jak protonů tak i neutronů (má být nucleí- jádro)
 - za vztahem (25): modul stlačitelnosti vzduchu je zřejmě jiný než modul stlačitelnosti kapalin.
 - Na Obr. 8 má být v_{in} , místo v_{Ln} .
 - V Kap. 4.8 je vhodnější používat Henryho zákon s Henryho konstantou silně závislou na teplotě. Bunsenův koeficient platí jen pro teplotu $T=273,15$ K a není tak zohledněna závislost rozpustnosti plynů na teplotě. A další.
 - Popis obrázků je jen s námahou čitelný.
- *Cíle stanovené v disertaci byly splněny.*

K práci mám následující dotazy:

1. Filtrace tlaku (Simple Moving Average-SMA) vede k odstranění fluktuací o velikosti až 5kPa. Lze odhadnout relaci mezi amplitudou fluktuací tlaku vyvolanou výpočtovým procesem (iterační proces, zaokrouhlovací chyby a pod.) a velikostí fluktuací způsobených samotným procesem kavitace? I když samotný proces kavitace (kolapsu bublin) simulován není, je dobré znát jak daleko je vypočtený tlak od tlaku nasycených par oleje.

2. Máte nějaké vysvětlení vlivu velikosti časového kroku na Grafech 21, 22 na oscilaci tlaku. Jde o numerický artefakt?
3. Byl při simulaci použit nějaký již implementovaný kavitační model, tak jak je uvedeno v kap. 6.4? Mám na mysli model, který by respektoval množství parní fáze (poměr α) a tím i změny hustoty a viskozity oleje?

Závěr

Práce má dobrou odbornou i grafickou úroveň a tvoří kompaktní celek, počínaje formulací cílů, přes definici metod jak těchto cílů dosáhnout až k dobře interpretovatelným výsledkům. Autor práce *samostatně vypracoval podprogramy (user defined functions) popisující pohyb ozubených kol, včetně detailního záběru zubu do zubní mezery ve 3D geometrii. Provedl náročné numerické výpočty nestacionárního proudění oleje v této mezeře a vymezil oblast možné kavitace.* Mohu konstatovat, že předložená práce splňuje ustanovení § 72, odst. 3 Zákona č. 111/1998 o vysokých školách a doporučuji proto aby byl **Ing. Stanislavu Jiroušovi** po její úspěšné obhajobě, udělen titul PhD na Fakultě strojní Technické University v Liberci..

V Praze dne 14. října 2015


Prof. Ing. František Maršík, DrSc
Ústav termomechaniky AVČR