Oponentský posudek na disertační práci

Ing. Zdeňka Petřivého

nazvanou:

Effect of axial prestretching on mechanical response of nonlinear tubes

Předložená disertační práce je věnována analytickým modelům hyperelastických válcových tenkostěnných trubic a jejich rozšíření pro popis viskoelastického chování. Je zaměřena na dílčí jev nemonotónní závislosti mezi axiálním předpětím trubice, resp. jejím protažením, a změnou intraluminálního tlaku. Nejedná se sice o nový problém, byl již v minulosti částečně zkoumán, ale disertační práce si klade za cíl vnést na tuto problematiku nový pohled v kontextu uvažovaných materiálových modelů, přičemž je nově zkoumán také vliv viskoelasticity. Disertant si klade několik otázek, které mají nejen teoretický význam, ale jejich zodpovězení může být podnětné i pro praktické použití například při modelování biomechaniky cév.

Obsah a členění práce Práce čítající 98 stran, řadící se tedy kratším textům je rozčleněna do 7 kapitol. Kromě úvodu, kde je zpracován současný stav poznání ve vztahu k předmětu práce (6 stran) a závěru, tvoří její hlavní část kapitoly 2 až 5, v kapitole 6 je souhrn komentářů k dosaženým výsledkům, zejména ve vztahu k hypotézám, jež jsou jsou formulovány v kap. 2 jako cíle disertace. Vlastní náplni práci jsou tak věnovány kapitoly 3-5. Kapitola 3 (22 stran) obsahuje souhrn vesměs známých poznatků v oblasti mechaniky kontinua se zaměřením na hyperelastické a viskoelastické materiály a jejich použití pro modelování válcových trubic. Hlavní část se tak omezuje na 41 stran se věnovaných problematice "inflace" hyperelastických trubic (kap. 4) a rozšíření na vliv viskoelastických materiálů, ovšem ve velmi omezeném rozsahu. Dodatek práce obsahuje část odvození některých vztahů, které jsou uvedeny v hlavní části textu, dodatek D pak obsahuje jediný obrázek(!). Na tomto místě musím podotknout, že tato "technická část" mohla a měla být zpracována uceleněji tak, aby disertace byla samo obsažná a tedy pro oponenta a jiného zainteresovaného čtenáře přístupnější. Jako součást práce jsou na konci připojeny i dvě časopisecké publikace, které de-facto vymezují obsah i rozsah práce. Její zařazení je uvedeno v obsahu práce, jinak ne. Seznam literatury zaujímá 7 stran, je nečíslovaný.

Dosažení v disertaci stanoveného cíle Disertace se zaměřuje na jevy pozorované při zatížení tenkostěnných trubic vnitřním přetlakem s uvažováním axiálního předpětí. Zkoumá jeho vliv na tzv. "inverzní bod" a souvislost s objemovou změnou v lumen trubice (tím i její průtokovou kapacitou). Její konkrétní cíle vytčené v kapitole 2 jsou formulovány jako hypotézy 1-3. Lze konstatovat, že provedená studie publikovaná ve formě 2 recenzovaných článků jejich potvrzení (hypotézy 2,3), či vyvrácení (hypotéza 1) umožnila a cíle tak byly splněny. Vzhledem k úzké vazbě práce na 2 články společné se školitelem, Prof. Horným, postrádám přesnější vymezení podílu uchazeče na vzniku všech nových výsledků v práci uvedených.

Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky Rozbor provedený vzhledem k poměrně úzkému zaměření práce je dostatečný. V širším kontextu a v

souvislosti s modelováním tkání (modely s vláknitými strukturami) jsou však opominuty alternativní přístupy dnes již nezřídka využívající víceškálové modelování.

Teoretický přínos disertační práce Problematice mechaniky rotačně symetrických hyperelastických trubic byla věnována řada prací pokrývajících širokou škálu dílčích problémů. Předložená práce se věnuje jednomu ze zajímavých jevů: jak může axiální předpětí v prázdné trubici (tlak $P = 0$) ovlivnit tzv. inverzní bod, $\partial P/\partial \lambda_Z = 0$ s okrajovými podmínkami, které zohledňují předpětí λ_Z^{ini} (při tlaku $P = 0$) vyvozené geometricky (předepsanou axiální deformací), nebo silově (vyvozena axiální síla). Kromě vybraných hyeperelastických modelů je uvažováno i rozšíření pro viskoelastické trubice s velmi speciálním izotropním modelem viskoelasticity. Studie se omezuje na nestlačitelné tenkostěnné trubice, což limituje její praktické použití (viz dále). Podobná problematika případ silnostěnných trubic by vyžadovala mnohem zevrubnější analýzu s ohledem na možnou nehomogenitu uspořádání napříč stěnou, ale jistě by také byla siřeji použitelná i v oblasti cévní mechaniky. Za poměrně významný nedostatek snižující vyznění celé práce považuji a) absenci matematické (rigorózní) definice zkoumaného problému, b) v mnoha případech neúplné odvození dílčích výsledků, což znesnadňuje jejich ověření a potvrzení správnosti. Práce je poměrně stručná, doplnění explicitních odvození by zvýšilo její teoretický přínos a usnadnilo i pochopení rozdílů mezi zkoumanými variantami uvažovaného zatížení. *Cíle stanovené v práci byly dosaženy, ale jsou poměrně málo ambiciózní. Domnívám se, že problematiku bylo možné pojmout obecněji a s užší návazností na aplikovatelnost v biomechanice cév, nebo se věnovat souvisejícím otázkám stability. Rovněž problematika viskoelastického chování mohla být zpracována s ohledem na možnou anizotropii nebo provázanost axiálního a obvodového směru díky existenci spirálních vláknitých struktur, jak vyplývá z koncepce HGO modelu.*

Praktický přínos disertační práce Práce je zaměřena teoreticky, i když její výsledky mohou přispět při vývoji matematických modelů částí cévního řečiště nebo i v jiných inženýrských aplikacích, jako jsou části robotických struktur.

Vhodnost použitých metod řešení Použité metody jsou vesměs adekvátní. V rámci kontinuálního popisu rotačně symetrických těles je použit válcový souřadnicový systém. Deformační energie hyperelastických modelů jsou funkcemi invariantů deformačního tenzoru určených poměrnými protaženími. Rovnováha je vyjádřena v Eulerově konfiguraci pomocí Cauchyova napětí. Použitý viskoelastický model je ovšem velmi zjednodušený. Zřejmě nepřipouští ortotropii v axiálním a obvodovém směru s možností uvažovat rozdílné relaxační funkce.

Způsob, jak byly použité metody aplikovány V uvedených matematických výrazech jsem nenašel významné chyby, ne všechny mezikroky jsou však doloženy a je tedy obtížné správnost všech výsledků potvrdit. V tomto ohledu má práce jisté rezervy. Váže se ke dvěma publikovaným článkům, což se odráží v její struktuře i zpracování. Domnívám se, že formát disertační práce umožňuje využít detailnější zpracování dané problematiky, než jak je možné v časopisecké publikaci s limitovaným stránkovým rozsahem. Také řazení jednotlivých témat v podkapitolách není šťastné. Jestliže v kapitola 4 pojednává o hyperelastických materiálech, mělo by toto téma v ní být zpracováno v takové úplnosti, aby v kapitole 5 věnující se rozšíření pro viskoelastická kontinua nebyla obě témata promíchávána. Práce má rezervy i po stránce

vysvětlení postupu řešení: namísto uvedení kompletní formulace problému, který se má řešit, v odstavcích kapitoly 5.6 jsou uvedeny kombinace různých dílčích vztahů, jak pro hyperelastický, tak pro viskoelastický případ, které si čtenář sám musí doplnit a získat tak výsledný problém, resp rovnice. V případě časopiseckých publikací taková stručnost bývá kompenzována doprovodným materiálem, v případě textu disertace k tomu není důvod. Metody řešení jsou jen naznačeny (využití systému Maple). Problematika výpočtu konvolucí není komentována.

Formální úroveň práce Disertace je po jazykové i grafické stránce kvalitní, zcela odpovídá nárokům na tento typ kvalifikačních prací. Uvádění citací jménem prvního autora a rokem vydání je možné, ale méně přehledné než odkazy na číslovaný seznam. V některých případech není dostatečně využíváno odkazů na rovnice. Namísto obvyklého résumé, či abstraktu je práce uvedena předmluvou, s poněkud odlišnou strukturou (poukazuji na její první odstavec), než jak bývá obvyklé v případě abstraktu.

Připomínky a dotazy. Při přípravě obhajoby by se měl disertant vypořádat s následujícími připomínkami a dotazy.

1. V práci chybí matematická formulace problému výpočtu inverzního bodu. Disertant by měl předložit úplnou formulaci úloh, které přímo souvisejí s ověřením hypotéz 1,2 a 3. To znamená formulaci okrajové úlohy pro redukovaný model tenkostěnné trubice a v tomto kontextu formulaci podmínek optimality (týká se hypotézy 1 a 2), jasně rozlišit oba uvažované případy zatížení trubice (tzv. volná a tzv. uzavřená trubice). Zcela konkrétně, rovnice (4.19) odvozená v dřívějších citovaných pracích není totéž, co "úloha", v níž tato rovnice figuruje.

2. Stejně tak chybí jasně formulované úlohy, jejichž řešení je nezbytné pro ověření hypotézy 3 (oba uvažované způsoby zatížení) a které souvisejí s redukovaným modelem (5.9). V této souvislosti je nezbytné vysvětlit způsob řešení, výpočet konvolucí ve vztahu k časové diskreditaci.

3. Práce navazuje na množství teoretických výsledků, které se přímo vztahují k úloze inverzního bodu a redukovaným modelům tenkostěnné hyperelastické trubice. Disertant by měl jasně vymezit svůj podíl na společných publikacích a především uvést, které konkrétní vztahy lze považovat za originální a které naopak převzal.

4. Není jasná vypovídající hodnota studie závislosti inverzního bodu pro viskoelastickou trubici, kdy výsledky samozřejmě závisí na rychlosti zatěžování? Proč není počáteční předpětí uvažováno v relaxovaném stavu?

5. Viskoelastická odezva je charakterizována disipací a tedy odlišnou zatěžovací a odlehčovací křivkou závislosti napětí-deformace, což je charakteristické pro pulzatilní zatížení v cévách. Jaká je relevance studie v tomto kontextu? Pro širší aplikovatelnost modelu viskoelastické trubice se zdá poměrně limitující případ izotropního konvolučního jádra. Bylo by obtížné uvažovat ortotropní model s nezávislými?

6. Existence tzv. inverzního bodu bodu zřejmě úzce souvisí se stabilitou trubice. Je i v tomto smyslu studie využitelná? Do jaké míry je limitující omezení na válcovou geometrii (ve všech konfiguracích) bez možnosti postihnout její meridiální zakřivení? (Výdutě na cévách způsobené ztrátou jejich fyziologických vlastností.)

Doplňující dotazy a poznámky

- Jaká je přímá aplikovatelnost výsledků studie v oblastech biomechaniky nebo tzv. "soft-robotiky"? (Obě jsou v práci zmíněny,)
- Čím je v případě cév vyvozeno axiální předpětí? V případě předpětí (modelu) tzv. "otevřené trubice", na jaké axiální vzdálenosti se tak děje? Není jasné, proč nebyla uvažována kombinace protažení kontrolovanou axiální silou (nikoliv deformací) nezávisle na tlakovém zatížení. Je takový případ nevhodný z pohledu modelování cév a jejich ukotvení?
- Má podobná studie význam pro silnostěnnou trubici? Tam může hrát roli nehomogenita v radiální směru a navíc (v případě cév) i obvodové nehomogenní předpětí (hypotéza konstantního obvodového napětí).
- Hypotéza H1 (a zřejmě i hypotéza H2) by mohla být nahrazena jinou, která by se týkala existence řešení inverzní úlohy, resp. úlohy optimálního designu materiálu (deformační energie) trubice zajišťující stabilitu i existenci bodu (nebo pásma) necitlivosti $\partial P/\partial \lambda_Z = 0$. Předpětí může být jedním z parametrů.
- Pro symetrickou válcovou trubici má smysl uvažovat i torzní zatížení. Bylo by v takovém případě možné řešit analogické úlohy?
- Pro tenkostěnnou trubici se běžně uvažuje $\sigma_{rr} = 0$, materiál tedy ani nemusí mít tuhost v radiálním směru. Pak je podmínka nestlačitelnosti jen vztahem pro výpočet radiálního přetvoření. Jak lze za takových omezení řešit úlohu inverzního bodu v případě materiálu se spirálními vlákny?

Celkové hodnocení a doporučení Předložená disertační práce Ing. Petřivého dokládá jeho znalosti v oblasti nelineární mechaniky kontinua se zaměřením na problematikou modelování hyperelastických a částečně i viskoelastických válcových trubic a metody jejich deformačně napěťové analýzy. Prokazuje tak svoji odbornou erudici v oboru Aplikované vědy ve strojním inženýrství. Jím předložená disertace splňuje nároky kladené na tento typ kvalifikačních prací. Cíle v ní stanovené lze považovat za splněné v plném rozsahu, i když některé její části mají nedostatky ztěžující ověření použitých postupů a dosažených výsledků. Přesto jeho disertační práci rozhodně doporučuji k obhajobě. Věřím, že všechny nejasnosti a výše zmíněné nedostatky se podaří během obhajoby vysvětlit, v tom případě vřele doporučuji aby Ing. Zdeňkovi Petřivému byl udělen titul *doktor* dle zákona č. 111/ 1998 Sb.

V Plzni dne 15.9.2025

Prof. Dr. Ing. Eduard Rohan, DSc.