



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

**POČÍTAČOVÁ SIMULACE STABILITY VÁLCOVÝCH
SKOŘEPIN**

Jarmila Křiváková*

Článek je zaměřen na počítačové modelování stability válcových skořepin řešených dynamickou nelineární analýzou programovým souborem COSMOS/M v návaznosti na experimentální výzkum.

Klíčová slova : *stabilita válcových skořepin, kritická síla, plastická materiálová křivka, boulení stěny, MKP-modely, plastická deformace.*

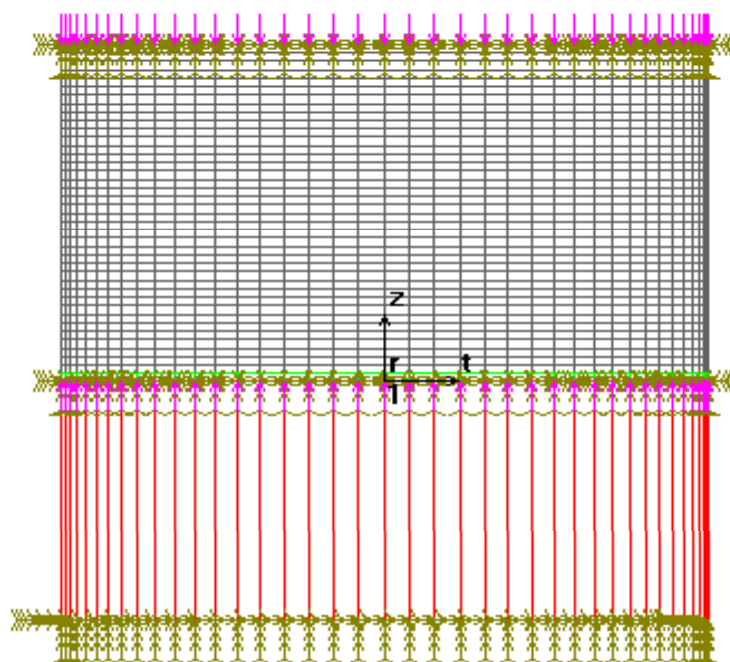
Počítačové modelování boulení stěny válcové skořepiny je řešeno v rámci grantového projektu „ Statická a dynamická analýza potrubí válcových nádob v interakci s prostředím.“ Navazuje na experimentální výzkum stability krátkých tenkostěnných trubek. Cílem je nalezení vhodného MKP- modelu pro řešení osově zatížených tenkostěnných válcových deformačních elementů.

Experimentální výzkum byl řešen na skupinách modelů tenkostěnných trubek ve dvou materiálových variantách, třech tloušťkách stěny skořepiny a dvou výškách trubky. Modely byly zatěžovány časově narůstající statickou silou po obvodu.

K teoretickému řešení byl použit programový soubor COSMOS/M. Válcová trubka byla modelována čtyřuzlovými skořepinovými prvky typu SHELL4T v tloušťkách odpovídajících zkoušeným vzorkům, tj. pro vnitřní průměr trubky 72 mm, tloušťky stěny 0,5 mm, 1 mm a 1,5 mm, výšky 85 mm a 42,5 mm. Zpevněné okraje byly vytvořeny zvětšením tloušťky horní a dolní vrstvy elementů na dvojnásobek.

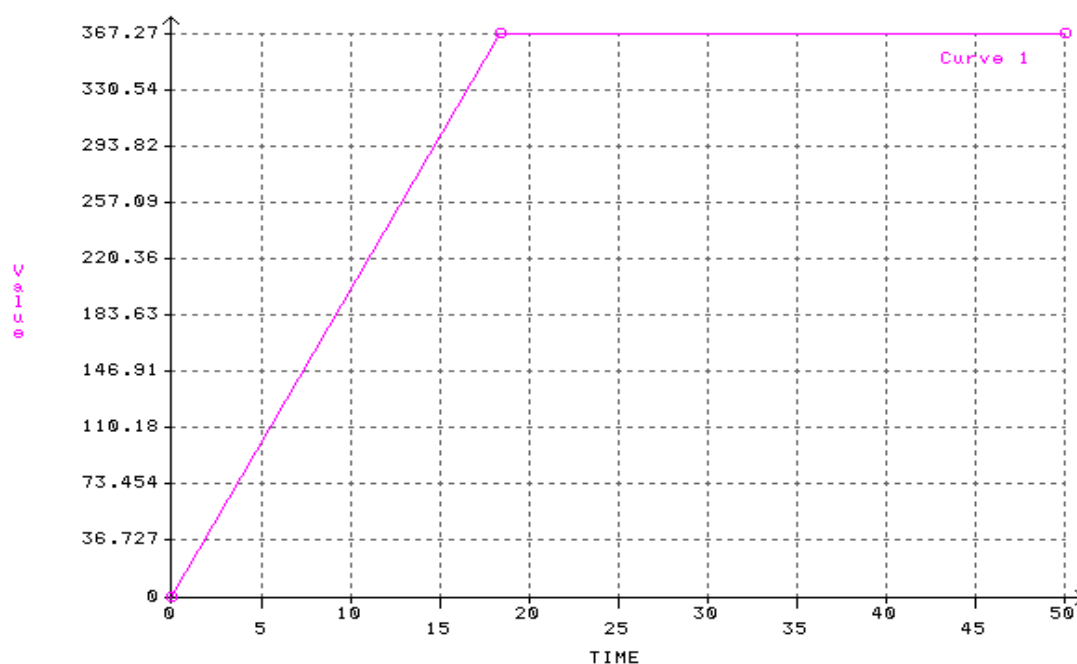
* Křiváková Jarmila, Ing. CSc., Katedra mechaniky a částí strojů, VA v Brně
E-mail: jarmila.krivakova@vabo.cz

EG CLR
1
2
3



Obr. 1: Schéma výpočtových modelů

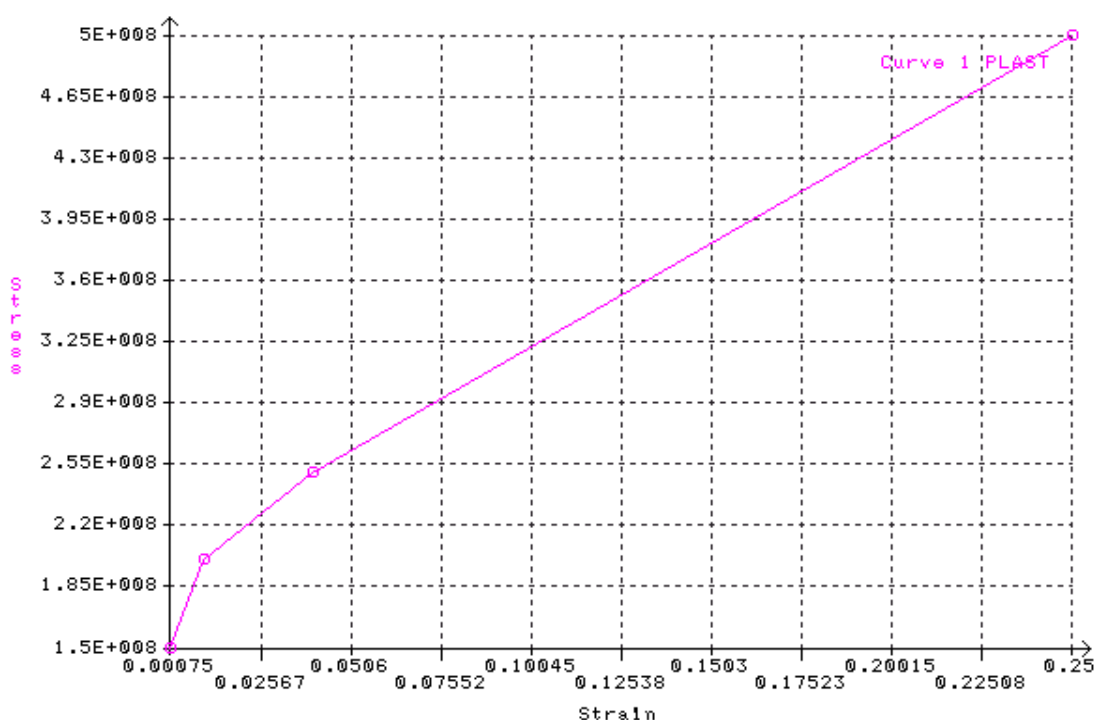
Výpočtové modely válcové skořepiny byly zatíženy na obou okrajích soustředěnými uzlovými silami v okrajových uzlech jako simulace rotačně symetrického lineárně rostoucího tlakového zatížení a do výpočtu byly zavedeny pomocí časové křivky (obr.1). Časové závislosti uzlových sil byly odvozeny z experimentálně zjištěných časových diagramů celkových sil působících na model (viz obr.2).



Obr. 2: Příklad jednoduché časové křivky zatížení

Uložení bylo realizováno v horní a spodní řadě okrajových uzlů tak, aby zabránilo posuvům v radiálním a tečném směru a rotacím kolem podélné osy trubky. Pro zabránění posunu trubky jako tuhého tělesa, byly k uzlům na spodní hraně modelu připojeny měkké lineární pružiny ve směru podélné osy trubky (prvky typu SPRING) vázané k rámu.

Materiálové modely válcové skořepiny (prvky SHELL4T) byly uvažovány jako VMI-materiál, zadaný plastickou materiálovou křivkou, vytvořenou na základě statických tahových zkoušek vzorků použitých ocelí (viz obr.3). Pro prvky typu SPRING (lineární pružiny) byl použit běžný materiálový model.



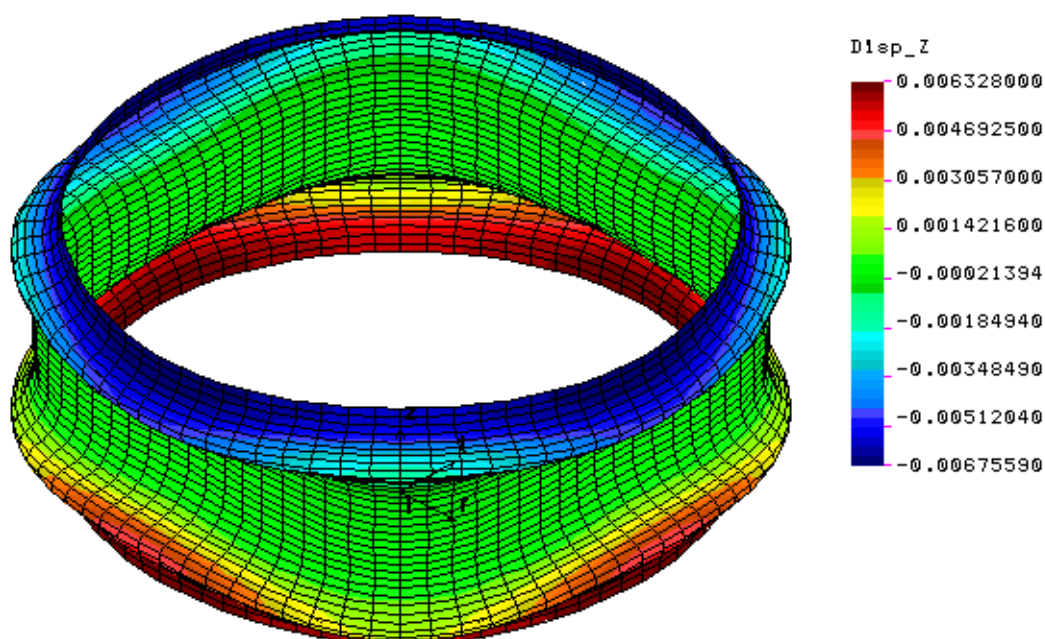
Obr. 3: Typická materiálová křivka pro výpočtové modely

Celý výpočet každé varianty byl prováděn dynamickou nelineární analýzou s automaticky nastavitelným časovým krokem výpočtu. V okamžiku dosažení kritické vzpěrné síly se výpočet výrazně zpomalil vlivem opakovaných četných iterací, což je pro použitý program COSMOS/M typické.

Statická nelineární analýza, použitá namísto dynamického přístupu se ukázala v kritické oblasti méně výhodná a mnohem pomaleji konvergující. Výpočtové časy nelineární dynamické analýzy byly velmi dlouhé, řádově v desítkách hodin, což je podmíněno jak použitým softwarem (školní verze programu bez rychlého dynamického řešiče), tak i běžným PC. Přesto se dosažené výsledky jeví jako realistické, především v oblasti vypočtených sil a deformací (obr. 4 až 8).

Pro výpočet stability zmíněných válcových skořepin pomocí programu COSMOS/M byly vytvořeny různé typy MKP modelů lišících se hustotou elementů, nebo se zhuštěnou sítí prvků v místech vytváření prvních okrajových lemů.

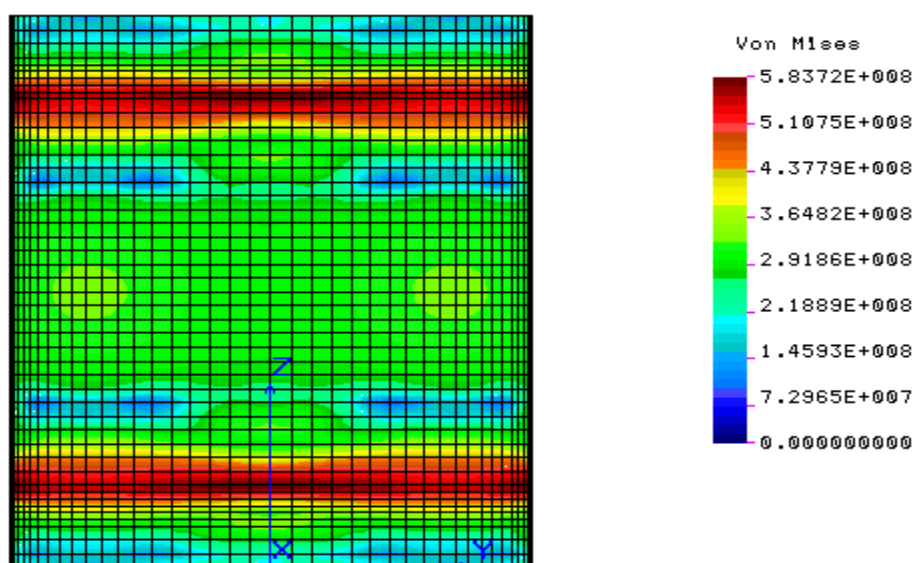
NLin DISP Step:147 =20.8388



Obr. 4: Typický případ deformovaného vzorku menší výšky

Vlivem narůstající tlakové síly v horních a dolních uzlech modelu se trubka nejprve soudkovitě boulila a postupně se vytvořily v horní a v dolní části modelu prstencové oblasti extrémního napětí (obr.5), v nichž po dosažení kritické síly došlo k vývoji prvních lemů. Nárůst síly se prakticky eliminoval zkracováním výpočtového kroku při rychlém rozvoji deformace a úpravou časové křivky od dosažení kritické síly na konstantní hodnotu. Teoretické řešení bylo třeba zastavit ve fázi, kdy se vnitřní povrchy stlačovaných lemů přiblížily natolik, že by se začaly vzájemně prostupovat (obr. 7).

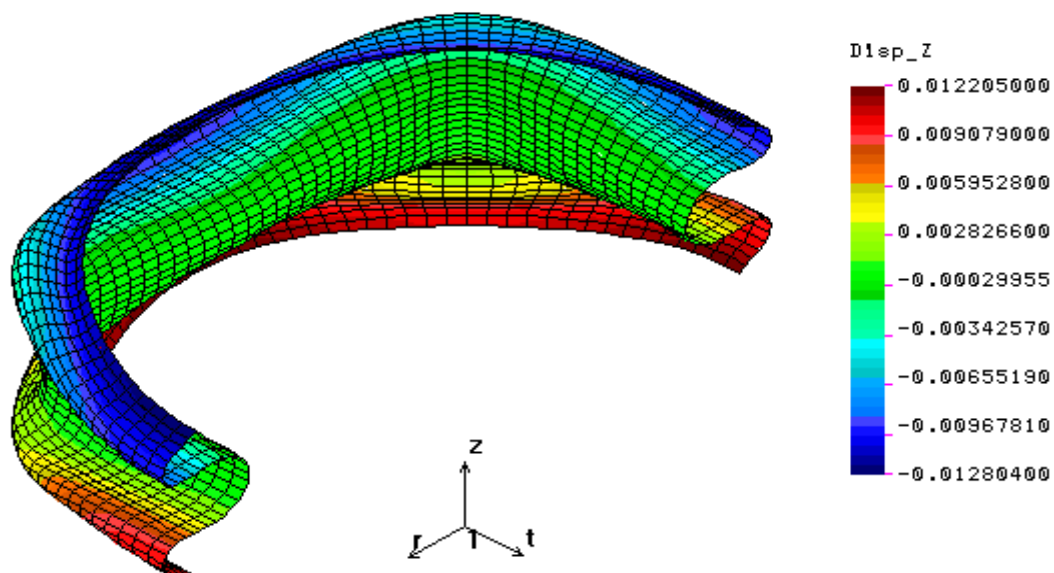
STRESS Step:70 =7.00726



Obr. 5: Výpočtové napětí na vzorku před vznikem prvních lemů

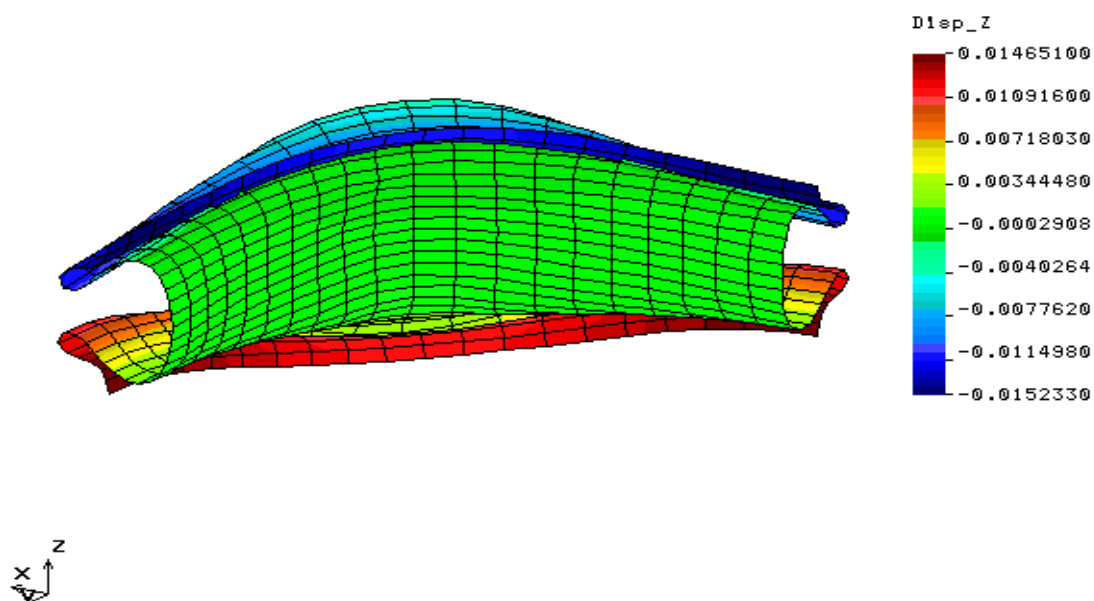
Pro další etapu výpočtu bylo třeba vycházet z takto dosaženého tvaru výpočtového modelu a vhodným způsobem zabránit prostupování střednicové roviny lemů. Pokusy s vytvořením dorazových prvků typu GAP v uvedené oblasti nebyly úspěšné. Z tohoto důvodu byly použity pomocné dvojuzlové prvky typu TRUSS, které modelovaly další přenos osové síly v krčku obou lemů (prvky 4. skupiny v obr. 8).

NL1n DISP Step:90 =18.364



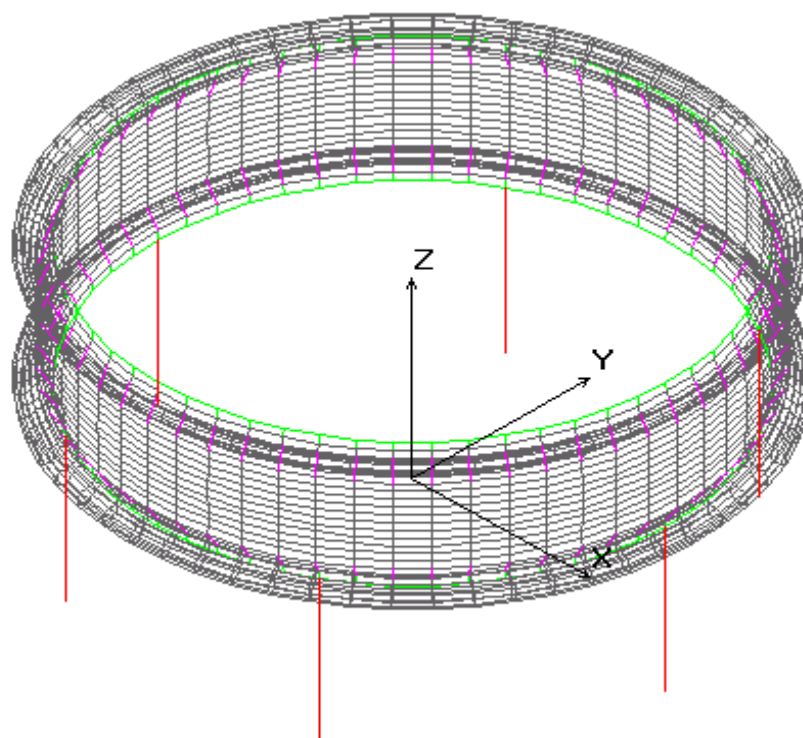
Obr. 6: Vývoj deformace poloviny výpočtového vzorku

NL1n DISP Step:155 =17.4996



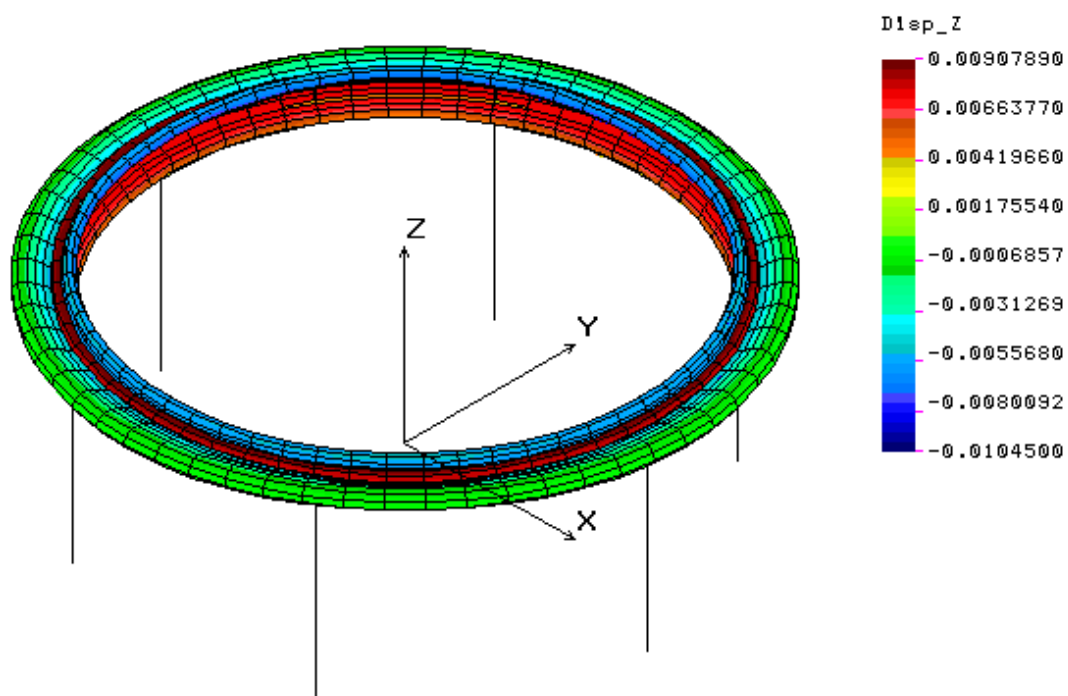
Obr. 7: Konečná fáze první etapy výpočtu před uzavřením lemů

EG CLR
 1
 2
 3
 4



Obr. 8: Výpočtový model deformovaného vzorku pro druhou fázi výpočtu

NLin DISP Step:70 =0.00387584



Obr. 9: Konečný výpočtový tvar deformovaného vzorku

Nelineární modul programu COSMOS/M neumožňoval přímé použití deformovaného modelu na konci první fáze výpočtu jako vstupního modelu pro další výpočet. Nový model bylo třeba znovu sestavit ručně na základě zjištěných hodnot

deformací a odpovídajících zatěžovacích sil v uzlech a realizovat další fázi výpočtu osově deformace vzorku. Výsledkem bylo dosažení i třetího středního lemu na vzorku menší výšky, jak ukazuje obr. 9.

Závěry

Programovým souborem COSMOS/M a popsaným MKP modelem stability válcové trubky lze dosáhnout odpovídajících výsledků srovnatelných s experimentem v oblasti kritické síly a deformace trubky, zejména v počáteční fázi rozvoje plastické deformace, tj. do vytvoření dvou okrajových lemů. Lze jej použít k výpočtům stability tam, kde již první ztráta stability je rozhodující. Souborem COSMOS/M nebylo možné simulovat zatížení vzorků časově proměnnou deformací, jako při experimentu, což vedlo ke zmíněným iteracím v oblasti kritické síly. Také pro modelování dalšího rozvoje plastické deformace není tento programový soubor příliš vhodný s ohledem na silovou kontrolu nelineárního řešení. I přesto bylo možné dospět k některým následujícím zjištěním:

Modely poloviční výšky se chovaly prakticky obdobně jako vysoké modely a k rozvoji plastické deformace docházelo při dosažení stejné kritické síly.

Ideální rotačně symetrický průběh deformace vzorků po ztrátě stability byl v experimentu spíše náhodným jevem, avšak i přesto několikrát potvrzeným, zejména u vzorků menší výšky. Ve většině případů však s ohledem na imperfekce vzorků i jejich uložení docházelo po počátečním náznaku okrajových lemů spíše ke zborcení vzorků ve tvaru písmene „S“ nebo „Z“ po jejich výšce a trojboké obvodové deformaci na okrajích v podobě rovnostranných trojúhelníků s opačně orientovanými vrcholy.

U teoretického řešení byla axiální deformace vzorků vždy symetrická a s postupující deformací okrajových lemů se vytvářely vždy obvodové deformace čtyřvrcholové, což je z výše uvedených obrázků patrné.

Další navazující etapou bude tvorba MKP modelů pro dynamický výpočet ztráty stability vlivem rázového zatížení simulujícího zkoušky na padostroji

Literatura:

- [1] Navrátil,O.,Křiváková,J. a kol.: Počítačové modelování nelineárních dynamických procesů ve zbraňových systémech s použitím programu COSMOS/M, VA Brno, 1999, záv.výzk.zpráva projektu obranného výzkumu MO.
- [2] Křiváková,J.,Navrátil,O.: Počítačová simulace osově zatížené tenkostěnné trubky, VA Brno, 2001, průběžná výzk. zpráva grantového projektu GAČR.
- [3] Niazzy,A.S.,Chang,S.,Kahyai,S.: NSTAR, Nonlinear Analysis, COSMOS/M – User Guide, version 1.71, SRAC, 1994.

POČÍTAČOVÁ SIMULACE STABILITY VÁLCOVÝCH SKOŘEPIN

Jarmila Křiváková*

Příspěvek je zaměřen na počítačové modelování stability válcových skořepin řešených dynamickou nelineární analýzou programovým souborem COSMOS/M v návaznosti na experimentální výzkum. Je součástí teoretického a experimentálního výzkumu řešení stability krátkých tenkostěnných trubek a válcových nádob v interakci s prostředím, řešeného v rámci grantového úkolu.

Experimentální výzkum byl prováděn na skupinách modelů tenkostěnných trubek ve dvou materiálových variantách, třech tloušťkách stěny skořepiny a dvou výškách trubky. Modely byly zatěžovány časově narůstající statickou silou po obvodu. K teoretickému řešení byl použit programový soubor COSMOS/M. Válcová trubka byla modelována čtyřuzlovými skořepinovými prvky typu SHELL4T v tloušťkách, odpovídajících zkoušeným vzorkům.

Výpočtové modely válcové skořepiny byly zatíženy na obou okrajích soustředěnými uzlovými silami v okrajových uzlech jako simulace rotačně symetrického lineárně rostoucího tlakového zatížení a do výpočtu byly zavedeny pomocí časové křivky. Časové závislosti uzlových sil byly odvozeny z experimentálně zjištěných časových diagramů celkových sil působících na model.

Uložení bylo realizováno v horní a spodní řadě okrajových uzlů tak, aby zabránilo posuvům v radiálním a tečném směru a rotacím kolem podélné osy trubky. Pro zabránění posunu trubky jako tuhého tělesa, byly k uzlům na spodní hraně modelu připojeny měkké lineární pružiny ve směru podélné osy trubky (prvky typu SPRING) vázané k rámu.

Materiálové modely válcové skořepiny (prvky SHELL4T) byly uvažovány jako VMI-materiál, zadaný plasticitou materiálovou křivkou, vytvořenou na základě statických tahových zkoušek vzorků použitých ocelí. Pro prvky typu SPRING (lineární pružiny) byl použit běžný materiálový model.

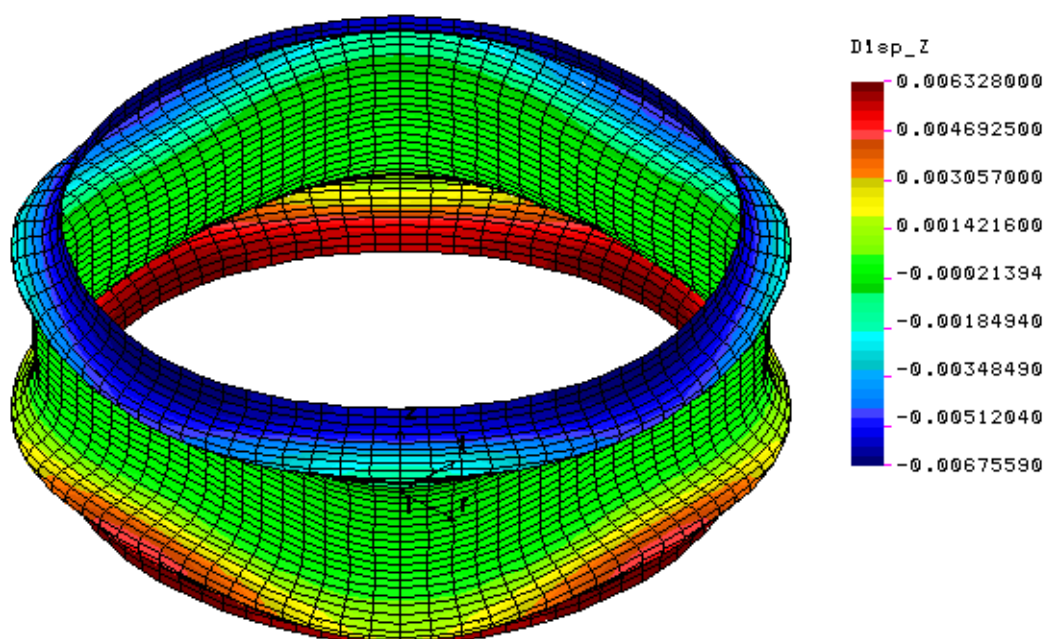
Výpočet každé varianty byl prováděn dynamickou nelineární analýzou s automaticky nastavitelným časovým krokem výpočtu. V okamžiku dosažení kritické vzpěrné síly se výpočet výrazně zpomalil vlivem opakovaných četných iterací, což je pro použitý program COSMOS/M typické (silová kontrola nelineárního řešení).

Pro výpočet stability zmíněných válcových skořepin pomocí programu COSMOS/M byly vytvořeny různé typy MKP modelů lišících se hustotou elementů, nebo se zhuštěnou sítí prvků v místech vytváření prvních okrajových lemů.

Vlivem narůstající tlakové síly v horních a dolních uzlech modelu se trubka nejprve soudkovitě boudila a postupně se vytvořily v horní a v dolní části modelu prstencové oblasti extrémního napětí, v nichž po dosažení kritické síly došlo k vývoji prvních lemů. Teoretické řešení bylo třeba zastavit ve fázi, kdy se vnitřní povrchy stlačovaných lemů přiblížily natolik, že by se začaly vzájemně prostupovat.

*Křiváková Jarmila, Ing. CSc., Katedra mechaniky a částí strojů, VA v Brně
E-mail: jarmila.krivakova@vabo.cz

NLin DISP Step:147 =20.8388



Pro další etapu výpočtu bylo třeba vycházet z takto dosaženého tvaru výpočtového modelu a vhodným způsobem zabránit prostupování střednicové roviny lemů. Pokusy s vytvořením dorazových prvků typu GAP v uvedené oblasti nebyly úspěšné. Z tohoto důvodu byly použity pomocné dvojuzlové prvky typu TRUSS, které modelovaly další přenos osové síly v krčku obou lemů.

Nelineární modul programu COSMOS/M neumožňoval přímé použití deformovaného modelu na konci první fáze výpočtu jako vstupního modelu pro další výpočet. Nový model bylo třeba znovu sestavit ručně na základě zjištěných hodnot deformací a odpovídajících zatěžovacích sil v uzlech a realizovat další fázi výpočtu osové deformace vzorku. Výsledkem bylo dosažení i třetího středního lemu na vzorku menší výšky.

Programovým souborem COSMOS/M a popsaným MKP modelem stability válcové trubky lze dosáhnout odpovídajících výsledků srovnatelných s experimentem v oblasti kritické síly a deformace trubky, zejména v počáteční fázi rozvoje plastické deformace, tj. do vytvoření dvou okrajových lemů. Lze jej použít k výpočtům stability tam, kde již první ztráta stability je rozhodující. Souborem COSMOS/M nebylo možné simulovat zatížení vzorků časově proměnnou deformací, jako při experimentu, což vedlo ke zmíněným iteracím v oblasti kritické síly. Také pro modelování dalšího rozvoje plastické deformace není tento programový soubor příliš vhodný s ohledem na silovou kontrolu nelineárního řešení. I přesto bylo možné dospět k některým následujícím zjištěním:

Modely poloviční výšky se chovaly prakticky obdobně jako vysoké modely a k rozvoji plastické deformace docházelo při dosažení stejné kritické síly.