

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

**STABILITNÍ PROLOMENÍ KUŽELOVÝCH
SKOŘEPIN S MALÝM VZEPĚTÍM**

Dizertační práce

Autor: Ing. Doubravka Středová

Školitel: doc. Ing. Petr Paščenko, Ph.D.

2012

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Náchodě dne 7. 9. 2012

Ing. Doubravka Středová.....

ANOTACE

Dizertační práce je věnována problematice ztráty stability kuželových skořepin s malým vzepětím. Standardní metody výpočtu nejsou vzhledem ke geometrii zkoumaných skořepin a okrajovým podmínkám použitelné. V práci je navržena možná metoda výpočtu stabilitní únosnosti kuželových skořepin s okrajovým úhlem z rozsahu $5^{\circ} \div 15^{\circ}$. Navržená metoda je platná pro různé typy okrajových podmínek od prostého podepření (nulová radiální tuhost), přes prosté podepření kuželové skořepiny s okrajovým prstencem (konečná radiální tuhost) po kloubově uložený spodní okraj skořepiny (nekonečně velká radiální tuhost).

KLÍČOVÁ SLOVA

Kuželová skořepina, ztráta stability, numerická analýza, MKP

ANNOTATION

Thesis is devoted to the issue of loss of stability of conical shells with small camber. Standard methods of calculation are not applicable due to the geometry of the examined shells and boundary conditions. Possible method of calculating loss of stability of conical shells with edge angle from range $5^{\circ} \div 15^{\circ}$ is found in the thesis. The propounded method is valid for the boundary conditions of simple support (zero radial stiffness), simply supported conical shells with the circumferential ring (represents finite radial stiffness) and hinged lower edge (infinite radial stiffness).

KEYWORDS

Conical shell, loss of stability, numerical analysis, FEM

Doubravka STŘEDOVÁ, Ing., Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů, email: doubravka.stredova@upce.cz

OBSAH

SEZNAM POUŽITÉ SYMBOLIKY	7
1 ÚVOD.....	9
2 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	11
2.1 Základní pojmy	11
2.2 Ztráta stability tenkostěnných skořepinových konstrukcí.....	12
2.3 Řešení ztráty stability kuželových skořepin.....	16
2.3.1 Rozměry oskulačního válce	16
2.3.2 Ztráta stability válcové skořepiny zatížené vnějším přetlakem	17
2.3.3 Únosnost kuželové skořepiny dle ECCS	19
2.3.4 Počáteční imperfekce	23
2.4 Kuželové skořepiny s malým vzepětím	24
2.5 Publikace významných autorů	25
3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	28
4 PŘEHLED POUŽITÝCH METOD ŘEŠENÍ	29
4.1 Analytické řešení.....	29
4.2 Numerické analýzy.....	29
4.2.1 Správnost řešení nelineárních úloh pomocí MKP programů.....	30
4.3 Experiment	32
5 TVORBA NUMERICKÉHO MODELU	34
5.1 Vliv geometrie kuželových skořepin.....	34
5.2 Vliv natočení okrajového prstence	36
6 KUŽELOVÉ SKOŘEPINY BEZ VÝZTUŽNÉHO PRSTENCE.....	40
6.1 Ukázka numerického řešení ztráty stability	40
6.2 Obecné poznatky	42
6.3 Kloubově uložený okraj kuželové skořepiny	45
6.3.1 Zobecnění výsledků	48
6.3.2 Kontrola výsledků – ukázkový případ	50
6.4 Prostě podepřený okraj kuželové skořepiny.....	51

6.4.1	Zobecnění výsledků	53
6.4.2	Kontrola výsledků – ukázkový případ	54
6.5	Vyhodnocení	55
7	KUŽELOVÉ SKOŘEPINY S VÝZTUŽNÝMI PRSTENCI.....	56
7.1	Ztráta stability kuželových skořepin s okrajovými prstenci.....	56
7.2	Zobecnění výsledků – okrajový úhel	59
7.3	Vyhodnocení	60
8	ZOBEČNĚNÍ VÝSLEDKŮ – RADIÁLNÍ TUHOST PRSTENCE.....	61
8.1	Radiální tuhost prstence – parametr Γ	61
8.2	Ověření parametru Γ	63
8.3	Ukázkový příklad – výpočet limitního přetlaku.....	65
8.4	Vyhodnocení	66
9	EXPERIMENTY ZTRÁTY STABILITY KUŽELOVÝCH SKOŘEPIN.....	67
9.1	Zkušební zařízení	67
9.1.1	Úprava zkušebního zařízení.....	67
9.2	Experimenty ztráty stability prostě podepřených kuželových skořepin bez okrajového prstence.....	68
9.3	Experimenty ztráty stability prostě podepřených kuželových skořepin s okrajovým prstencem.....	70
9.4	Vyhodnocení	71
10	POČÁTEČNÍ IMPERFEKCE	72
10.1	Tvar a umístění počáteční imperfekce	72
10.2	Numerické analýzy.....	72
10.3	Vliv hloubky prohlubně	74
10.4	Vyhodnocení	77
11	POROVNÁNÍ METOD VÝPOČTU MEZNÍHO PŘETLAKU.....	78
11.1	Kloubově uložená kuželová skořepina.....	78
11.2	Prostě podepřená kuželová skořepina	80
11.3	Kuželová skořepina s okrajovým prstencem.....	82
11.4	Diskuze výsledků	83

12	ZÁVĚR	84
12.1	Stručný souhrn práce	84
12.2	Vědeckotechnický přínos dizertační práce.....	85
12.3	Uplatnění výsledků v praxi	86
12.4	Cíle budoucího výzkumu	86
	LITERATURA.....	87
	VLASTNÍ PUBLIKACE DIZERTANTA	88
	PŘÍLOHY.....	89

SEZNAM POUŽITÉ SYMBOLIKY

b	šířka okrajového prstence	mm
C_θ	parametr zohledňující geometrii a okrajové podmínky	–
D	desková tuhost	Nmm
D_{imp}	průměr prohlubně	mm
E	Youngův modul pružnosti materiálu	MPa
E_T	tangenciální modul	MPa
F_x	membránová meridiánová síla	N
F_r	membránová radiální síla	N
F_θ	vnitřní obvodová síla v okrajovém prstenci	N
$f_{y,k}$	mez kluzu materiálu	MPa
m	součinitel regresní křivky	–
m_x	počet půlvln v osovém směru	–
n_θ	počet celých vln po obvodě	–
K	součinitel regresní křivky	–
K'	součinitel regresní křivky zahrnující vliv materiálu	MPa
L	délka kužele (skořepiny)	mm
l_e	ekvivalentní délka oskulačního válce	mm
l_g	délka šablony pro měření prohlubní	mm
p	vnější přetlak (vnitřní podtlak)	MPa
p_{el}	vypočítaný limitní elastický vnější přetlak dle navržené metody	MPa
p_{EXP}	naměřené mezní zatížení	MPa
p_{imp}	tlak působící na plochu prohlubně	MPa
p_{GNA}	geometricky nelineární elastické mezní zatížení ideální konstrukce	MPa
p_{GNIA}	geometricky nelineární elastické mezní zatížení reálné konstrukce	MPa
p_{GMNA}	geometricky nelineární plastické mezní zatížení ideální konstrukce	MPa
p_{kr}	kritické zatížení ideální konstrukce	MPa
r	radiální souřadnice; poloměr střednicové plochy skořepiny	mm
r_1	poloměr na horním okraji komolého kužele	mm
r_2	poloměr na spodním okraji komolého kužele	mm
r_e	ekvivalentní poloměr oskulačního válce	mm
r_r	vnitřní poloměr okrajového prstence	mm
t	tloušťka stěny skořepiny	mm
t_r	tloušťka okrajového prstence	mm
u	posunutí ve směru meridiánu	mm

U_0	parametr prohlubně	–
$U_{0,max}$	přípustná hodnota parametru prohlubně	–
u_r	posunutí ve směru osy rotace skořepiny	<i>mm</i>
v	posunutí ve směru obvodu	<i>mm</i>
w	posunutí kolmo k povrchu skořepiny	<i>mm</i>
x	souřadnice ve směru meridiánu	<i>mm</i>
α	redukční součinitel pružné imperfekce	–
α_{DP}	redukční součinitel pružné imperfekce navržený v dizertační práci	–
α_{ECCS}	redukční součinitel pružné imperfekce dle ECCS	–
α_c	okrajový úhel kuželové skořepiny	<i>rad; °</i>
β	součinitel plastické oblasti	–
β_c	poloviční vrcholový úhel kuželové skořepiny	<i>rad; °</i>
Γ	parametr zohledňující tuhost prstence	–
γ_{M1}	dílčí součinitel únosnosti při boulení	–
Δw_0	hloubka prohlubně	<i>mm</i>
ε	relativní prodloužení	–
η	interakční exponent	–
θ	obvodová souřadnice	<i>mm</i>
λ_0	mezní poměrná štíhlost při stlačení	–
λ_p	mezní relativní štíhlost v plastické oblasti	–
λ_θ	relativní štíhlost	–
μ	Poissonovo číslo	–
$\sigma_{\theta Ed}$	návrhové hodnoty napětí působící ve směru obvodu ovlivňující boulení	<i>MPa</i>
$\sigma_{\theta kr}$	hodnota kritického napětí v obvodovém směru	<i>MPa</i>
$\sigma_{\theta Rcr}$	kritické pružné napětí při boulení v obvodovém směru	<i>MPa</i>
$\sigma_{\theta Rd}$	návrhová pevnost při boulení v obvodovém směru	<i>MPa</i>
$\sigma_{\theta Rk}$	charakteristická pevnost při boulení v obvodovém směru	<i>MPa</i>
φ	obvodový úhel	<i>rad; °</i>
χ_θ	součinitel vzpěrnosti při boulení	–
ω	parametr závislý na geometrii skořepiny	–

1 ÚVOD

Tenkostěnné ocelové skořepiny jsou rozšířeným typem konstrukcí v mnoha oblastech průmyslu, ať už strojírenského, energetického nebo stavebního. Jsou využívány vzhledem ke své relativně vysoké únosnosti při zachování nízké hmotnosti konstrukce. V moderních předpisech a normách pro navrhování takovýchto konstrukcí jsou zakotveny analytické metody, kterými jsou řešeny tzv. *standardní konstrukční uzly* (hladká válcová skořepina, kuželová skořepina, kruhová deska, kulová skořepina apod.). Rozsah platnosti výpočtových metod pro konkrétní konstrukci je v normách přesně definován. Jedná se zejména o tvar konstrukce, způsob jejího uložení a zatížení. Při navrhování konstrukcí, které se vymykají platnosti norem (*nestandardní konstrukční uzly*), je nutné přistoupit k *numerické výpočtové kontrole* nebo *experimentům*.

Tématem dizertační práce je řešení stabilitní únosnosti kuželových skořepin s malým vzepětím. Tento typ skořepiny se ve velké míře využívá při stavbě pevných kuželových střech vertikálních uskladňovacích nádrží, kde okrajový úhel α_c se obvykle pohybuje v rozmezí $5^\circ \div 15^\circ$. Okraje střech jsou většinou opatřeny výztužnými prstenci.

Ztráta stability (mezní stav boulení) je jedním z posuzovaných mezních stavů tenkostěnných kuželových skořepin. Platnost výpočtu stabilitní únosnosti kuželových skořepin je v normách a doporučeních podmíněna *velikostí okrajového úhlu* $\alpha_c \geq 25^\circ$, a dále úplným *zamezením radiálního posuvu okrajů kužele*. Při nedodržení těchto podmínek se úloha stává *výrazně nelineární*. Při návrhových výpočtech nelze tedy použít normové vztahy, které vycházejí z *lineární teorie ztráty stability* tenkostěnných skořepinových konstrukcí.

Stabilitní únosnost tenkostěnných skořepinových konstrukcí může také být značně ovlivněna přítomností *počátečních imperfekcí*, což jsou nedokonalosti tvaru, uložení a zatížení, dále pak nedokonalosti v rozložení materiálových vlastností a zbytková napětí. Tyto nedokonalosti vnášejí již v počátku do konstrukce jistý podíl ohybové napjatosti a ovlivňují tak její únosnost. Za nejvýznamnější lze jednoznačně považovat *geometrické imperfekce* (geometrické úchyly od ideálního tvaru).

Cílem dizertační práce je sestavení přibližné analytické metody, která by umožnila levnou a rychlou výpočtovou kontrolu *stabilitní únosnosti kuželových skořepin s okrajovým úhlem* $\alpha_c < 25^\circ$. Dalším cílem práce je stanovení vlivu použitých okrajových podmínek na stabilitní únosnost. V práci jsou zkoumány podmínky *prostého podepření* nevyztuženého okraje, *kloubové uložení* a kuželové skořepiny, které mají konečnou tuhost v radiálním směru (*kuželová skořepina vyztužená okrajovým prstencem*). Výzkum únosnosti kuželových skořepin je třeba doplnit o stanovení *vlivu počátečních imperfekcí (imperfekce tvaru) na únosnost zkoumaných konstrukcí*. Tyto úkoly spočívají v detailním pochopení fyzikální podstaty řešeného problému, dále pak v potřebném množství provedených výpočtových analýz a ověřovacích experimentů.

Úvodní část práce je věnována podrobné analýze současného stavu problematiky konstruování kuželových skořepin. Je zde uveden postup navrhování kuželových skořepin dle stávajících doporučení a norem [1], [2], [3]. I když tento postup není pro výpočet zkoumaných skořepin s malým vzepětím vhodný, je zde podrobněji probrán, neboť je nutné se v této problematice bezpečně orientovat, a to včetně rozsahu platnosti norem. V dizertační práci je

z uvedených norem a doporučení převzata všeobecně platná terminologie, tzn. názvy numerických analýz a použitých fyzikálních veličin. Dále je v úvodní části provedena rešerše prací autorů, kteří se problematikou kuželových skořepin zabývají nebo v minulosti zabývali.

V dalších kapitolách (3, 4) jsou stanoveny cíle dizertační práce a představeny metody řešení problému. Tato část práce je doplněna o část výsledků souběžného výzkumu příčně zatěžená válcové skořepiny. V této kapitole je prokázána správnost výsledků numerických analýz provedených pomocí metody konečných prvků. V kapitole 5 je představena tvorba numerického modelu a dokázána vhodnost použitých zjednodušení.

Hlavní část práce spočívá v návrhu metody výpočtu limitního zatížení kuželových skořepin s malým vzepětím s různými případy okrajových podmínek. Řešený rozsah okrajového úhlu je $\alpha_c = 5^\circ \div 15^\circ$. Mezi řešené okrajové podmínky patří prosté podepření a kloubové uložení, které reprezentují nulovou a nekonečně velkou radiální tuhost okraje skořepiny (kapitola 6). Mezi těmito dvěma krajními podmínkami uložení se nachází kuželové skořepiny s okrajovými prstenci, které reprezentují konečnou radiální tuhost (kapitola 7). Navržená metoda výpočtu limitního přetlaku je zobecněna pro řešení kuželových skořepin s libovolným okrajovým úhlem z rozsahu $\alpha_c = 5^\circ \div 15^\circ$ a libovolnou tuhost okrajového prstence (kapitola 8).

V 9. kapitole je představeno zkušební zařízení, které je k dispozici na DFJP. Na tomto zařízení probíhají experimenty ztráty stability kuželových skořepin s malým vzepětím a kulových vrchlíků.

Závěr dizertační práce je věnován jednomu ze stěžejních bodů dalšího výzkumu tenkostěnných skořepinových konstrukcí. Tímto bodem je problematika vlivu počátečních imperfekcí (*počátečních imperfekcí tvaru*) na únosnost kuželových skořepin s malým vzepětím. Pomocí série numerických analýz je (v kapitole 10) stanoven nový redukční součinitel, kterým je zohledněn vliv imperfekcí tvaru na únosnost kuželových skořepin s malým vzepětím. V dalším výzkumu je třeba provést hlubší úvahy o tvaru a umístění počáteční imperfekce. Dosažené výsledky je nutné ověřit řadou experimentů.

V kapitole 11 je provedeno shrnutí dosažených výsledků. Je zde provedeno srovnání výsledků vnějšího dovoleného přetlaku vypočítaných metodami uvedenými v dizertační práci.

Numerické analýzy, jejichž výsledky jsou v dizertační práci uvedeny, jsou provedeny v počítačových programech COSMOS/M a CosmosWorks, založených na *metodě konečných prvků* (MKP). Tyto programy jsou k dispozici na DFJP.

2 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

Posuzování stabilitní únosnosti skořepinových konstrukcí bylo a je předmětem zkoumání řady vědeckých pracovníků. Výsledky jejich práce jsou zakotveny v normách, předpisech a doporučeních. Mezi nejvýznamnější z těchto podkladů patří Evropské doporučení pro navrhování ocelových skořepinových konstrukcí ECCS [1] a evropská norma pro navrhování ocelových konstrukcí EN 1993-1-6:2007 včetně její české verze ČSN EN 1993-1-6 [3], která je v této dizertační práci citována.

Analýzy sloužící k výpočtům únosnosti ocelových skořepinových konstrukcí jsou většinou založeny na posuzování mezních stavů. Mezi uvažované mezní stavy únosnosti ocelových skořepin ve zmíněných normách a doporučení patří plasticita, cyklická plastifikace, boulení, únava. V této práci jsou uvažovány pouze

- *mezní stav plastické únosnosti (materiálová nelinearita)*, kdy dochází k vytvoření dostatečného počtu plastických kloubů – konstrukce se postupně vlivem zatížení mění na kinematický mechanismus
- *mezní stav elastické ztráty stability (geometrická nelinearita)*, v těchto případech dochází vlivem zatížení k výrazným změnám geometrie a tím ke snížení únosnosti konstrukce při úrovni napětí, které může být hluboko pod mezí kluzu.

Standardní konstrukční uzly jsou řešeny pomocí přibližných analytických vztahů, které je možné nalézt v normách a předpisech. Při řešení nestandardních konstrukcí, jejichž tvar, způsob uložení, apod. se vymyká platnosti norem, je většinou nutné přistoupit k numerickému řešení nebo k experimentu.

K výpočtovým analýzám jsou využívány počítačové programy, které jsou založeny na *metodě konečných prvků* (MKP). Tyto programy obsahují kromě lineárních modulů i nelineární moduly, díky nimž je možné při výpočtu zohlednit *geometrickou nelinearitu* (velké posuvy) a *materiálovou nelinearitu* (pružně-plastické chování materiálu), které mohou výrazně ovlivnit únosnost konstrukce.

2.1 Základní pojmy

V tomto odstavci jsou vysvětleny některé pojmy, které jsou v práci používány. ***Ideální skořepina*** je konstrukce, která se vyznačuje ideální geometrií, ideálním způsobem zatěžování, ideálním způsobem uložení, ideálním rozložením materiálových charakteristik, absencí zbytkových napětí, apod. Nedokonalosti, které jsou obsaženy v geometrii, způsobu zatížení, způsobu uložení, homogenitě vlastností materiálu se nazývají ***počáteční imperfekce***. U ***reálných konstrukcí*** se zmíněné nedokonalosti tvaru nazývají ***počáteční výrobní imperfekce***. Imperfekce vnášejí již v počátku zatěžování do konstrukce jistý podíl ohybového namáhání a ovlivňují mezní zatížení, při kterém dojde ke ztrátě stability.

Pojmy ***standardní a nestandardní konstrukční uzly*** byly již také zmíněny. Mezi standardní uzly patří konstrukce geometricky jednoduchého tvaru např. hladká válcová skořepina, hladká kulová skořepina, anuloid, kuželová skořepina (s okrajovým úhlem $\alpha_c > 25^\circ$). Vztahy pro řešení lineární stability standardních uzlů je možné odvodit ze základního diferenciálního popisu v uzavřeném tvaru. V těchto konstrukcích téměř výhradně

převládá membránový stav, z čehož plyne, že teorie vlastních čísel a tvarů je bez problémů použitelná. Naproti tomu *nestandardní uzly*, mezi něž patří válcová skořepina s otvory, kuželová skořepina s malým vzepětím nebo kulový vrchlík s malým vzepětím, je třeba řešit numericky nebo pomocí experimentů.

2.2 Ztráta stability tenkostěnných skořepinových konstrukcí

Ztráta stability (boulení) tenkostěnné skořepinové konstrukce může nastat tehdy, pokud je v její stěně vlivem zatížení vyvoláno nadměrné membránové tlakové napětí. V okamžiku boulení dochází k přerozdělení rovnováhy v tlaku na rovnováhu v tlaku a ohybu (tzv. bifurkace - rozdvojení rovnováhy). Vzhledem ke skutečnosti, že membránová tuhost skořepin je ve srovnání s ohybovou tuhostí o několik řádů vyšší, projeví se při ztrátě stability přeměna membránové energie napjatosti na společnou membránovou a ohybovou energii napjatosti doprovobenými viditelnými deformacemi v podobě vln (boulení skořepin). Přitom dochází k výraznému snížení únosnosti skořepiny, případně k jejímu úplnému stabilitnímu zhroucení (viz příklady na obr. 2.1). Po ztrátě stability zaujme skořepina nový rovnovážný stav. V některých případech je možné tuto skořepinu dále používat až do dosažení jiného mezního stavu, avšak její únosnost je třeba ověřit výpočtem. Příkladem může být boulení plechu kuželové střechy mezi výztužnými žebry. Mezního stavu ztráty stability střešního plechu je dosaženo, avšak na celkovou únosnost střechy to vzhledem k lokálnímu charakteru nemusí mít výrazný vliv.



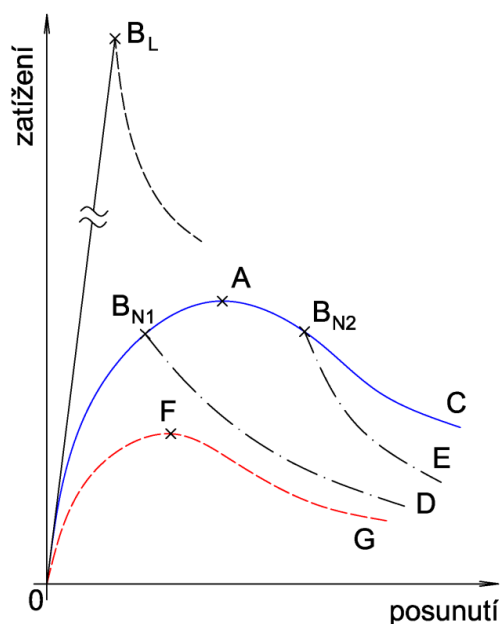
Obr. 2.1 Příklady mezního stavu boulení v praxi

V knize D. Bushnella [4] jsou popsány dva základní typy boulení ideální skořepiny.

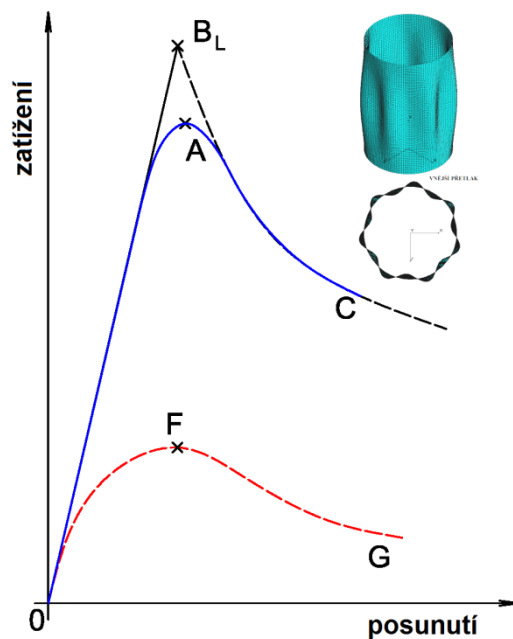
- **Lineární buckling (bifurkační boulení)**, při kterém dochází v bifurkačním bodě B_L (viz diagram na obr. 2.2 a 2.3) k rozdvojení rovnováhy ideální skořepiny. Skořepina se zdeformuje do nového tvaru, který odpovídá danému kritickému zatížení. Hodnota kritického napětí odpovídající bodu B_L je získána např. pomocí analýzy zobecnělého

problému vlastních čísel a tvarů. Vlastní číslo odpovídá kritickému zatížení a vlastní tvar je tvar, ve kterém ztratí ideální skořepina stabilitu. Fyzikální smysl má nejmenší kladné vlastní číslo a jemu příslušný tvar. Je zřejmé, že hodnota kritického zatížení je pouze teoretická. Při zatěžování reálných konstrukcí jí nemůže být nikdy dosaženo. Tato hodnota je ve zmíněných předpisech pro účely návrhových výpočtů korigována redukčním součinitelem α (vliv počátečních imperfekcí), součinitelem zohledňujícím nelineární chování materiálu (plasticita) a v neposlední řadě příslušným součinitelem bezpečnosti γ . Na obrázku 2.3 je příklad tvaru ideální kloubově uložené válcové skořepiny zatížené vnějším přetlakem v okamžiku ztráty stability. Je zde patrný typický tvar deformace v podobě několika podélných vln.

- **Nelineární kolaps (prolomení, snap-through)** – tento typ deformace je typický např. pro skořepiny typu kulový vrchlík, jejichž namáhání již v počátku zatěžování zdaleka není čistě membránové. Jistý podíl ohybového namáhání je dán geometrií skořepiny nebo okrajovými podmínkami. Tuhost skořepiny při zatěžování vlivem vzniku tlakových membránových meridiánových sil klesá (rovnovážná křivka 0AC na obr. 2.2, tzv. primární křivka). Po dosažení vrcholu (bod A) se konstrukce prolomí osově symetricky do inverzního tvaru. Jedná se o tzv. *osově symetrický nelineární kolaps*. Může však nastat situace, že se konstrukce prolomí *osově nesymetricky*, a to buď před nebo po dosažení vrcholu A (křivky 0B_{N1}D nebo 0B_{N2}E, tzv. sekundární křivka). Tento mechanismus boulení se nazývá **nelineární buckling**.



Obr. 2.2 Zatěžovací charakteristika nestandardního konstrukčního uzlu (kuželová skořepina s malým vzepětím)



Obr. 2.3 Zatěžovací charakteristika standardního konstrukčního uzlu (např. kloubově uložená válcová skořepina zatížená vnějším přetlakem)

V grafech na předchozích obrázcích jsou uvedeny zatěžovací charakteristiky typické pro nestandardní konstrukční uzel (obr. 2.2; kuželová skořepina s malým vzepětím) a pro standardní konstrukční uzel (obr. 2.3; válcová skořepina). Na obou obrázcích je zakreslen bod B_L, jemuž odpovídá teoretická hodnota kritického zatížení. Modré křivky popisují skutečné

chování ideální konstrukce. Rozdíl mezi teoretickou hodnotou kritického zatížení a skutečným chováním konstrukce typu kuželová skořepina s malým vzepětím může být značný. Situace je naprosto odlišná u standardních konstrukčních uzlů. Tyto skořepiny v počátku zatěžování obsahují minimální podíl ohybového napětí ve stěně. Rozdíl mezi teoretickou hodnotou kritického zatížení a skutečným chováním ideální konstrukce je v tomto případě minimální. Je zřejmé, že únosnost standardních konstrukčních uzlů je možné počítat pomocí analýzy zobecněného problému vlastních čísel a tvarů a poté tuto hodnotu upravit příslušnými koeficienty. Naproti tomu u nestandardních konstrukčních uzlů by tento postup výpočtu mohl být *výrazně na straně nebezpečné!*

Výše uvedené typy ztráty stability popisovaly chování ideální skořepiny. Reálné skořepiny s počátečními imperfekcemi se chovají obdobně, avšak zatěžovací křivka je obvykle posazena níže než u ideální skořepiny – viz křivka 0FG (na obr. 2.2 a obr. 2.3). Počáteční imperfekce vnášejí do skořepinové konstrukce jistý podíl ohybového napětí. To, jak výrazný vliv budou mít tyto imperfekce na stabilitní únosnost konstrukce, záleží na typu skořepiny. U skořepin s převládajícím membránovým napětím ve stěně (standardní konstrukční uzly) budou mít počáteční imperfekce výrazný vliv na stabilitní únosnost. Z grafu na obr. 2.3 je zřejmý výrazný rozdíl mezi únosností reálné konstrukce (červená křivka) a ideální konstrukce (modrá křivka, resp. bod B_L). Lze tedy konstatovat, že počáteční imperfekce u takovéto konstrukce reprezentují ohybový stav.

Nestandardní konstrukční uzly vykazují při zatěžování již z podstaty své geometrie značně nelineární charakter chování. Z tohoto důvodu další ohybový účinek vyvolaný imperfekcemi již nemusí mít výrazný vliv na stabilitní únosnost. Rozdíl mezi zatěžovacími charakteristikami ideální (modrá) a reálné (červená) skořepiny nemusí být velký (viz obr. 2.2)

Jako příklad stabilitního zhroucení skořepinové konstrukce do inverzní polohy lze uvést střechu stadionu v Minneapolis (obr. 2.4 a 2.5).



Obr. 2.4 Střecha stadionu v Minneapolis



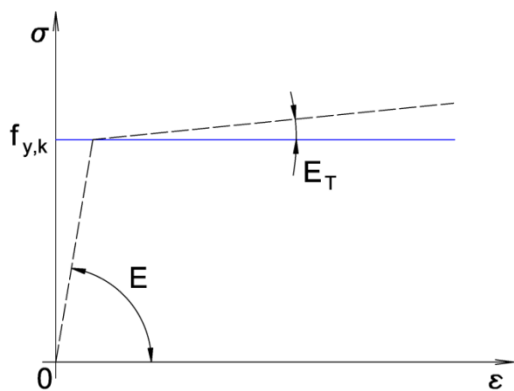
Obr. 2.5 Střecha stadionu po prolomení do inverzní polohy vlivem přetížení sněhem

Kontrola na mezní stav ztráty stability v lineárním oboru může být dle ČSN EN 1993-1-6 provedena pomocí níže uvedených typů analýz. Použití určitého typu analýzy je podmíněno typem konstrukce, její geometrií, použitým materiálem apod. Numerické analýzy sloužící k posouzení mezního stavu ztráty stability jsou provedeny v počítačovém programu,

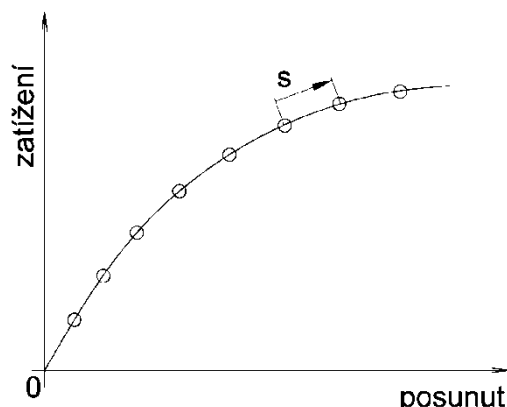
založeném na metodě konečných prvků (MKP). Značení a popis je převzato z ČSN EN 1993-1-6 [3] a ECCS [1]

- *Lineární analýza rozdělení tvaru (linear buckling bifurcation analysis – LBA)* – založena na teorii vlastních čísel a tvarů, výsledkem analýzy je vlastní číslo (kritické zatížení) a vlastní tvar (na obr. 2.2 bod B_L), ve kterém dojde ke ztrátě stability ideální skořepiny.
- *Geometricky nelineární analýza (geometrically nonlinear elastic analysis - GNA)* – je analýza ideální skořepiny s ohledem na geometrickou nelinearitu (velké posuvy), která zahrnuje změny geometrie skořepiny od působícího zatížení, předpokládá se elastické chování materiálu.
- *Materiálově nelineární analýza (materially nonlinear analysis – MNA)* – je použitelná pro ideální konstrukci za předpokladu malých deformací, se zohledněním nelineárního pružně-plastického chování materiálu. Výsledkem analýzy je určení mezního zatížení v plastickém stavu.
- *Geometricky a materiálově nelineární analýza (geometrically and materially nonlinear analysis – GMNA)* – počítá s geometrickou nelinearitou a nelineárním pružně-plastickým chováním materiálu. Výsledkem je geometricky nelineární plastické mezní zatížení ideální konstrukce.
- *Geometricky nelineární analýza s uvážením imperfekcí (geometrically nonlinear elastic analysis with imperfections included - GNIA)* – oproti analýze GNA zahrnuje vliv počátečních imperfekcí, jedná se tedy o analýzu reálné skořepinové konstrukce s uvážením geometrické nelinearity.
- *Geometricky a materiálově nelineární analýza s uvážením imperfekcí (geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections included – GMNIA)* – výsledkem analýzy je mezní zatížení reálné konstrukce při ztrátě stability v pružně-plastickém stavu na reálné konstrukci. Porovnáním s výsledky GMNA analýzy je možné určit vliv počátečních imperfekcí na stabilitní únosnost konstrukce.

V analýzách zohledňujících materiálovou nelinearitu je v rámci dizertační práce použit zjednodušený von Misesův bilineární model pružně-plastického chování materiálu (obr. 2.6). Kromě hodnot E , μ , $f_{y,k}$ je mu z důvodu konvergence výpočtu v plastické oblasti předepsán tangenciální modul $E_T \sim E/10^4$. Při výpočtu je použita strategie řízení nelineárního procesu přírůstkem oblouku zatěžovací křivky (obr. 2.7), neboť při použití jiné strategie, jako je řízení nelineárního procesu přírůstkem síly nebo přírůstkem posuvu, by došlo vlivem ztráty stability k selhání výpočtu (divergenci).



Obr. 2.6 Nelineární model chování materiálu



Obr. 2.7 Metoda přírůstku oblouku rovnovážné křivky

2.3 Řešení ztráty stability kuželových skořepin

V této kapitole je uvedeno řešení stabilitní únosnosti kuželových skořepin zatížených osovým tlakem nebo vnějším přetlakem podle Evropského doporučení ECCS [1]. Část věnovanou nevyztuženým kuželovým skořepinám je sestavena *R. Greinerem* a *C. Poggim*. Platnost je zde omezena na navrhování kuželových skořepin s *okrajovým úhlem* $\alpha_c \geq 25^\circ$. Tato podmínka je dána rozsahem platnosti lineární teorie skořepin, na níž jsou uvedené předpisy založeny. Další omezení se vztahuje typ okrajových podmínek (značení viz tabulka 2.1). Vztahy z ECCS nemohou být použity pro okrajové podmínky BC3, tedy pro *možný posuv okraje skořepiny* ve směru normály ke střednicové ploše kuželové skořepiny $w \neq 0$.

Tab. 2.1 Popis okrajových podmínek

Kód počáteční podmínky	Posuvy ve směru normály plochy	Posuvy ve směru meridiánu plochy
BC1	$w = 0$	$u = 0$
BC2	$w = 0$	$u \neq 0$
BC3	$w \neq 0$	$u \neq 0$

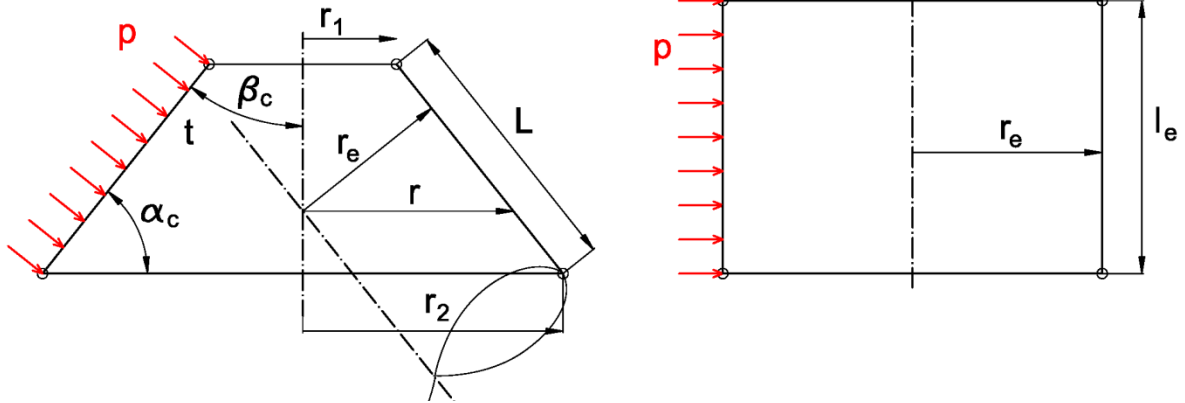
Pozn. Okrajová podmínka $w = 0$ je také nazývána jako „válcová podmínka“, u kuželových skořepin může být použita tzv. prstencová podmínka $u \cos \alpha + w \sin \alpha = 0$, která zamezuje posuvy ve směru kolmém k ose rotace.

Řešení únosnosti kuželové skořepiny spočívá v převedení geometrie kužele v tzv. náhradní (oskulační) válec, poté je vypočítána hodnota kritického zatížení náhradního válce. Navržení stabilitní únosnosti reálné skořepiny spočívá v přepočítání hodnoty kritického zatížení ideální skořepiny pomocí pseudoanalytických vzorců, sestavených autory doporučení ECCS. V těchto vztazích jsou obsaženy součinitele, které zohledňují podmínky konkrétního případu skořepiny (materiál, zatížení, apod.).

2.3.1 Rozměry oskulačního válce

Kuželová skořepina je převedena na oskulační válec (náhradní válec, obr. 2.8), a poté je řešena únosnost válcové skořepiny s rozměry vycházejícími z geometrie kuželové skořepiny l_e a r_e . Z důvodu přehlednosti je symbol vnějšího přetlaku v obrázku zakreslen pouze na

jedné straně kužele i náhradního válce. Rozměry náhradního válce také závisí na způsobu zatěžování kuželové skořepiny.



Obr. 2.8 Převod geometrie kuželové skořepiny zatěžované vnějším přetlakem na náhradní válec

Délka náhradního válce kužele zatíženého vnějším přetlakem je vyjádřena vztahem

$$l_e = \min \left[L; \left(\frac{r_2}{\sin \beta_c} \right) (0,53 + 0,125 \beta_c) \right] \quad (2.1)$$

Kde β_c [rad] je polovina vrcholového úhlu kužele. Platí

$$\beta_c = \frac{\pi}{2} - \alpha_c$$

Pozn. V doporučení ECCS je ve vztazích použit poloviční vrcholový úhel β_c , v dizertační práci je používán okrajový úhel α_c

Poloměr náhradního válce, jehož délka je $l_e = L$, je vyjádřen

$$r_e = \frac{0,55r_1 + 0,45r_2}{\cos \beta_c} \quad (2.2a)$$

Pokud je délka náhradního válce $l_e = \left(\frac{r_2}{\sin \beta_c} \right) (0,53 + 0,125 \beta_c)$, je poloměr roven

$$r_e = 0,71r_2 \frac{1 - 0,1\beta_c}{\cos \beta_c} \quad (2.2b)$$

2.3.2 Ztráta stability válcové skořepiny zatížené vnějším přetlakem

Po určení rozměrů náhradního válce je dále stabilita kuželové skořepiny řešena jako stabilita náhradního válce zatíženého vnějším přetlakem. Vztah pro kritické napětí náhradního válce vychází z lineární teorie skořepin. Odvození je převzato z knihy Volmira A. S. [5] a vychází z lineární parciální diferenciální rovnice kruhové válcové skořepiny

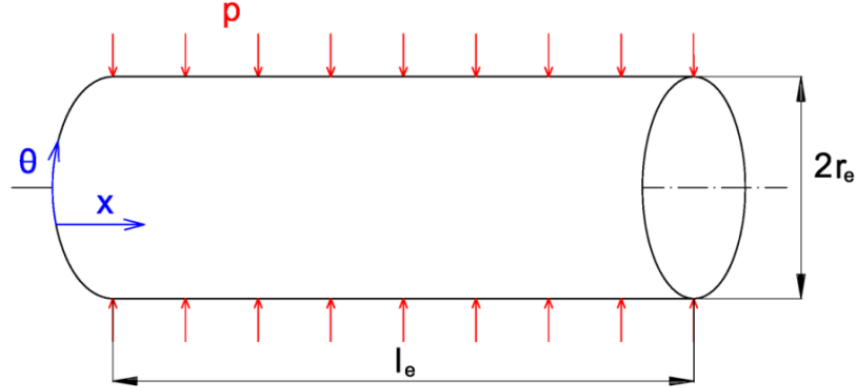
$$\frac{D}{t} \nabla^8 w + \frac{E}{R^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \sigma_x \nabla^4 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \sigma_\theta \nabla^4 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) + 2\tau_{x\theta} \nabla^4 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} \right) = 0 \quad (2.4)$$

kde $\nabla^8 = \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2$, Laplaceův operátor $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$

Okrajové podmínky pro $x = 0$, $x = L$ jsou

$$w = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$$

Válcová skořepina zatížená vnějším přetlakem se zakreslenými souřadnicemi v osovém a obvodovém směru je uveden na obrázku 2.9



Obr. 2.9 Schéma válcové skořepiny zatížené vnějším přetlakem

Řešení válcové skořepiny zatížené vnějším přetlakem vychází z rovnice (2.4). Ta pro tento typ zatížení přejde v rovnici

$$\frac{D}{t} \nabla^8 w + \frac{E}{R^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \sigma_\theta \nabla^4 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) = 0 \quad (2.5)$$

Řešení rovnice (2.5) je předpokládáno ve tvaru závislém na osové i obvodové souřadnici

$$w = f_0 \sin \frac{m\pi x}{l_e} \cos \frac{n\theta}{r_e} \quad (2.6)$$

kde m je počet půlvln v osovém směru a n je počet celých vln po obvodě, f_0 je amplituda. Po provedení příslušných derivací předpokládaného řešení (2.6) a dosazení do rovnice kruhové skořepiny (2.5) vychází

$$\frac{D}{t} \left(\frac{m^2 \pi^2}{l_e^2} + \frac{n^2}{r_e^2} \right)^4 + \frac{E}{r_e^2} \frac{m^4 \pi^4}{l_e^4} - \sigma_\theta \left(\frac{m^2 \pi^2}{l_e^2} + \frac{n^2}{r_e^2} \right)^2 \frac{n^2}{r_e^2} = 0 \quad (2.7)$$

Dosazením za deskovou tuhost

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}$$

vychází vztah pro napětí

$$\sigma_\theta = \frac{Et^2}{12(1-\mu^2)} \frac{\left(\frac{m^2 \pi^2}{l_e^2} + \frac{n^2}{r_e^2} \right)^2}{\frac{n^2}{r_e^2}} + \frac{E}{r_e^2} \frac{\frac{m^4 \pi^4}{l_e^4}}{\left(\frac{m^2 \pi^2}{l_e^2} + \frac{n^2}{r_e^2} \right)^2 \frac{n^2}{r_e^2}} \quad (2.8)$$

Z rovnice (2.8) přímo vyplývá, že minimální napětí nastane pro minimální počet půlvln v osovém směru, tedy $m = 1$. Počet vln v obvodovém směru vyplývá z podmínky minima napětí σ_θ . Výpočet je zjednodušen předpokladem, vycházejícím z geometrie válce

$$\left(\frac{\pi r_e}{nl_e}\right)^2 \ll 1 \quad (2.9)$$

Podmínka minima napětí je vyjádřena

$$\frac{d\sigma_\theta}{dn} = 0$$

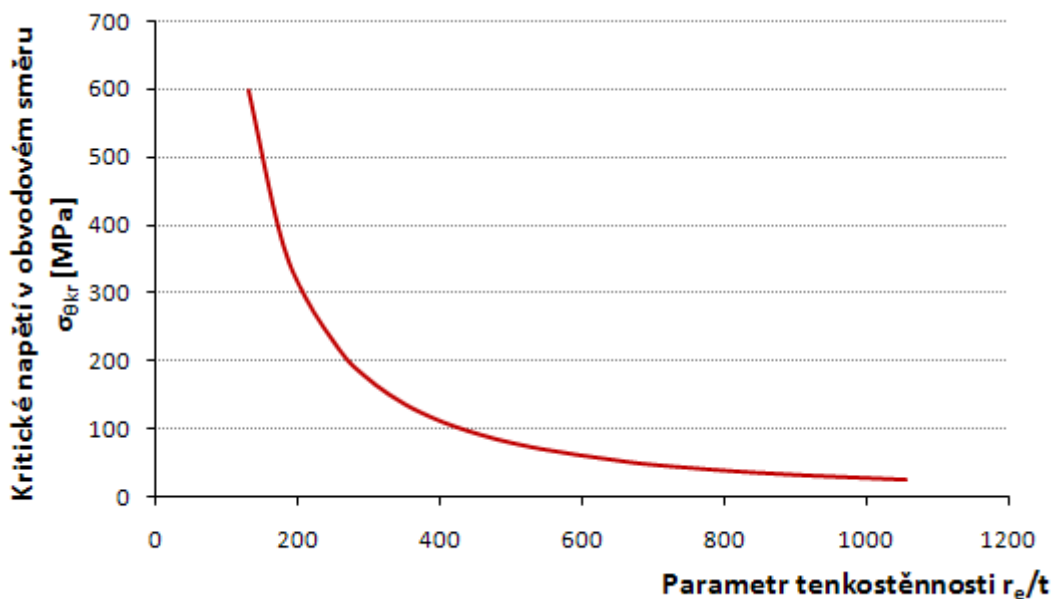
Počet vln odpovídajících kritickému napětí je

$$n = \sqrt[4]{6\pi^2 \sqrt{1-\mu^2} \sqrt{\frac{r_e}{l_e}} \sqrt[4]{\frac{r_e}{t}}} \quad (2.10)$$

Kritické napětí ocelové skořepiny pro vnější přetlak po dosažení počtu vln n do (2.7) vychází

$$\sigma_{\theta kr} = 0,92E \frac{t}{l_e} \sqrt{\frac{t}{r_e}} \quad (2.11)$$

Na obr. 2.10 je znázorněn příklad průběhu tohoto napětí v závislosti na parametru tenkostěnnosti skořepiny r_e/t . Je zde zřejmý výrazný vliv tenkostěnnosti na stabilitní únosnost skořepiny. S růstem parametru tenkostěnnosti únosnost skořepiny klesá.



Obr. 2.10 Průběh závislosti kritického napětí na geometrii skořepiny

2.3.3 Únosnost kuželové skořepiny dle ECCS

Následující vztahy vedou ke kontrole navrženého zatížení skořepinové konstrukce. Tyto vztahy jsou převzaty z Evropského doporučení ECCS [1] a reprezentují výsledky mnoha experimentů řady výzkumných pracovníků. Berou v úvahu vliv pružně plastického chování materiálu, vliv počátečních imperfekcí a hodnoty kritického zatížení, získaného pomocí lineární teorie skořepin (2.11). Návrhová únosnost v obvodovém směru musí splnit podmínku

$$\sigma_{\theta Ed} \leq \sigma_{\theta Rd} \quad (2.12)$$

kde $\sigma_{\theta Ed}$ je hodnota návrhového napětí působící v obvodovém směru, $\sigma_{\theta Rd}$ je návrhová pevnost při boulení v obvodovém směru. Tato hodnota je závislá na materiálových charakteristikách a geometrii skořepin podle vztahu

$$\sigma_{\theta Rd} = \frac{\sigma_{\theta Rk}}{\gamma_{MI}} \quad (2.13)$$

veličina $\sigma_{\theta Rk}$ je charakteristická pevnost při boulení v obvodovém směru, γ_{MI} je dílčí součinitel únosnosti, jehož hodnota by neměla být menší než $\gamma_{MI} = 1,1$. Charakteristická hodnota pevnosti při boulení je dána

$$\sigma_{\theta Rk} = \chi_{\theta} f_{y,k} \quad (2.14)$$

kde $f_{y,k}$ je mez kluzu materiálu a χ_{θ} je součinitel vzpěrnosti při boulení, kterým je posuzován vliv plasticity na únosnost skořepin zatěžovaných vnějším přetlakem.

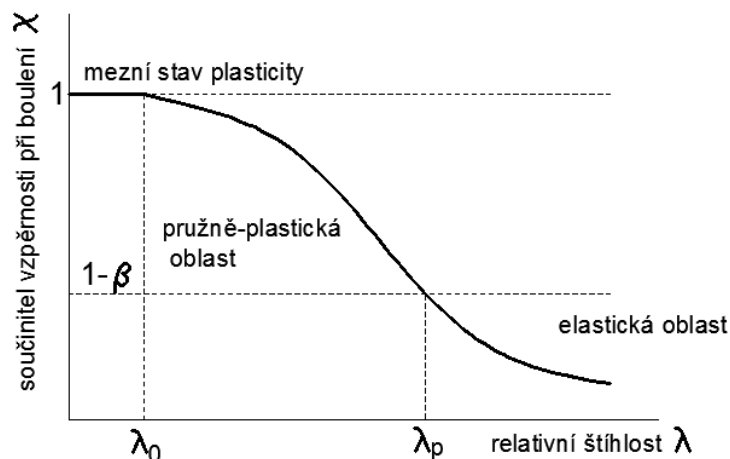
Vztahy pro součinitel vzpěrnosti při boulení jsou uvedeny v tabulce 2.2. Součinitel vzpěrnosti při boulení χ je funkcí poměrné štíhlosti skořepiny λ , která určuje oblast, ve které dojde ke ztrátě stability (elastická, pružně-plastická a plastická oblast).

Tab. 2.2 Oblast ztráty stability

Oblast ztráty stability	Součinitel vzpěrnosti při boulení χ	Relativní štíhlost skořepiny
Plastická	$\chi = 1$	$\lambda \leq \lambda_0$
Elasto-plastická	$\chi = 1 - \beta \left[\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_p - \lambda_0} \right]^{\eta}$	$\lambda_0 \leq \lambda \leq \lambda_p$
Elastická	$\chi = \frac{\alpha}{\lambda^2}$	$\lambda_p \leq \lambda$

Pozn. η je součinitel vzájemného působení, jeho hodnota je pro zkoumané případy skořepinových konstrukcí $\eta = 1,0$.

Na obr. 2.11 je uvedena závislost součinitele vzpěrnosti při boulení χ na relativní štíhlosti λ podle vztahů uvedených v tabulce 2.2. Vztahy pro součinitel χ platí pro všechny složky napětí, z tohoto důvodu není uváděn index θ označující složku napětí v obvodovém směru.



Obr. 2.11 Průběh závislosti součinitele vzpěrnosti při boulení χ na relativní štíhlosti skořepiny

Relativní štíhlost λ_θ (pro složku napětí v obvodovém směru) závisí na mezi kluzu materiálu $f_{y,k}$ a pružném kritickém napětí $\sigma_{\theta Rcr}$.

$$\lambda_\theta = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\theta Rcr}}} \quad (2.15)$$

Hodnota pružného kritického napětí $\sigma_{\theta Rcr}$ vychází z lineární teorie skořepin, v evropském doporučení je jeho hodnota již upravena v závislosti na okrajových podmínkách a geometrii (oskulačního) válce (viz dále – tabulka 2.4).

Hraniční hodnota λ_p - mezní relativní štíhlost v plastické oblasti je stanovena ze vztahu

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} \quad (2.16)$$

kde α je redukční faktor, který zohledňuje vliv počátečních imperfekcí (viz tabulka 2.3), součinitelem β je vyjádřen rozsah plastické oblasti. Hraniční hodnota λ_0 je mezní poměrná štíhlost při stlačení. Hodnoty parametrů λ_0 , β jsou výsledkem mnoha experimentů. Pro případ *válcové skořepiny* zatížené *vnějším přetlakem* jsou v evropském doporučení hodnoty těchto parametrů stanoveny

$$\lambda_{\theta 0} = 0,40, \quad \beta = 0,60$$

V **plastické oblasti**, kdy $\lambda_\theta \leq \lambda_0$, není vliv počátečních imperfekcí zohledněn, nastává mezní stav plasticity a charakteristická pevnost při boulení v obvodovém směru (2.14) je rovna mezi kluzu materiálu

$$\sigma_{\theta Rk} = \chi_\theta f_{y,k} = 1 \cdot f_{y,k}$$

V oblasti $\lambda_0 \leq \lambda_\theta \leq \lambda_p$ se již na únosnosti spolupodílí vliv pružně-plastického chování materiálu a počátečních imperfekcí. Charakteristická pevnost při boulení v obvodovém směru je dána vztahem

$$\sigma_{\theta Rk} = \chi_\theta f_{y,k} = 1 - \beta \left[\frac{\lambda_\theta - \lambda_0}{\lambda_p - \lambda_0} \right]^\eta \cdot f_{y,k}$$

kde vliv počátečních imperfekcí je zohledněn v parametru λ_p (mezní relativní štíhlost v plastické oblasti; rovnice 2.16).

Při hodnotách $\lambda_\theta \geq \lambda_p$, tzn. v **elastické oblasti**, již nelineární chování materiálu neovlivňuje stabilitní únosnost konstrukce a charakteristická pevnost při boulení v obvodovém směru je dána vztahem

$$\sigma_{\theta Rk} = \chi_\theta f_{y,k} = \frac{\alpha}{\lambda^2} \cdot f_{y,k} = \alpha \cdot \sigma_{\theta Rcr}$$

Vliv počátečních imperfekcí na stabilitní únosnost válcové skořepiny zatížené vnějším přetlakem je vyjádřen pomocí redukčního součinitele pružné imperfekce α v obvodovém směru. Jeho hodnota je závislá na jakosti výroby (viz tab. 2.3).

Tab. 2.3 Hodnoty redukčního součinitele pružné imperfekce α

Třída jakosti výroby	Popis	α
A	Speciální	0,75
B	Vysoká	0,65
C	Základní	0,50

Evropské doporučení bere prostřednictvím faktoru C_θ v potaz vliv geometrie a okrajových podmínek na hodnotu kritického napětí (tabulka 2.4).

$$\sigma_{\theta Rcr} = 0,92E \frac{C_\theta t}{\omega r_e} \quad (2.17)$$

Ve vztahu pro kritické napětí (2.17) je zahrnut bezrozměrný parametr ω , který závisí na geometrii konkrétní vřetové skořepiny podle vztahu

$$\omega = \frac{l_e}{r_e} \sqrt{\frac{r_e}{t}}$$

Tab. 2.4 Kritické napětí pro různé případy geometrie vřetové skořepiny

Typ vřetové skořepiny	Bezrozměrný parametr ω	$\sigma_{\theta Rcr}$
Krátká	$\frac{\omega}{C_\theta} < 20$	$\sigma_{\theta Rcr} = 0,92E \frac{C_{\theta s} t}{\omega r_e}$
Střední	$20 \leq \frac{\omega}{C_\theta} \leq 1,63 \frac{r_e}{t}$	$\sigma_{\theta Rcr} = 0,92E \frac{C_\theta t}{\omega r_e}$
Dlouhá	$\frac{\omega}{C_\theta} > 1,63 \frac{r_e}{t}$	$\sigma_{\theta Rcr} = E \left(\frac{t}{r_e}\right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{C_\theta t}{\omega r_e}\right)^4 \right]$

Pozn. Hodnoty parametrů C_θ a $C_{\theta s}$ jsou pro různé typy okrajových podmínek uvedeny v tabulce 2.5

Tab. 2.5 Hodnoty parametrů C_θ a $C_{\theta s}$

Typ okrajových podmínek na koncích vřetové skořepiny	C_θ	$C_{\theta s}$
BC1, BC1	1,5	$1,5 + \frac{10}{\omega^2} - \frac{5}{\omega^3}$
BC1, BC2	1,25	$1,25 + \frac{8}{\omega^2} - \frac{4}{\omega^3}$
BC2, BC2	1,0	$1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}}$
BC1, BC3	0,6	$0,6 + \frac{1}{\omega^2} - \frac{0,3}{\omega^3}$
BC2, BC3	0	0
BC3, BC3	0	0

Vřetové skořepiny zatížené osovým tlakem nemusí být kontrolovány na stabilitu, pokud pro ně platí

$$\frac{r_e}{t} \leq 0,21 \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}}$$

Návrhová únosnost v obvodovém směru je závislá na vnějším přetlaku podle vzorce

$$\sigma_{\theta Ed} = p \left(\frac{r_e}{t} \right) \quad (2.18)$$

Vztah pro kritický přetlak je potom s použitím (2.17) a (2.18) uvažován ve tvaru

$$p_{\theta Rcr} = 0,92E \frac{c_{\theta}}{\omega} \left(\frac{t}{r_e} \right)^2 \quad (2.19)$$

2.3.4 Počáteční imperfekce

V předcházejících odstavcích byl již zmíněn vliv počátečních imperfekcí (nedokonalostí v geometrii, materiálu, způsobu uložení, zatěžování apod.) na únosnost skořepin. U kuželových skořepin s malým vzepětím se vyskytuje v oblasti uložení výrazné ohybové namáhání, které vychází ze samé podstaty konstrukce. To má na únosnost nejvýznamnější vliv. Vliv dalšího ohybového namáhání, které je vyvoláno počátečními imperfekcemi, proto nemusí být tak výrazný. U konstrukce s vysokým podílem membránové napjatosti, jako je např. kloubově uložená osově tlačaná válcová skořepina, mají počáteční imperfekce výrazný vliv na stabilitní únosnost.

V dizertační práci bude mj. zkoumán i vliv geometrických počátečních imperfekcí na stabilitní únosnost kuželových skořepin. Podle ČSN EN 1993-1-6 [3] a doporučení ECCS [1] jsou uvažovány tři typy geometrických úchylek ovlivňujících boulení: *ovalita* (úchylka kruhovitosti), *mimořádná excentricita* (úchylka spojitosti střednicové plochy podél spojů plechů) a *místní prohlubně* (místní úchylky v kolmém směru od jmenovité střednicové plochy). Při výzkumu vlivu počátečních imperfekcí na stabilitu kuželových skořepin budou však uvažovány pouze místní prohlubně.

Hloubka prohlubně Δw_0 je měřena pomocí šablony, která je pro měření v meridiánovém směru rovná a v obvodovém směru zakřivená do předpokládaného poloměru r střednicové plochy skořepiny. Délka šablony je určena vztahem

$$l_g = 4\sqrt{rt} \quad (2.20)$$

Velikost (průměr) prohlubní, které budou obsahovat numerické i experimentální modely, bude stejně velký, jako je délka šablony l_g .

Hloubka prohlubně je posuzována pomocí parametru prohlubně U_0 , který je stanoven ze vztahu

$$U_0 = \frac{\Delta w_0}{l_g}$$

Parametr prohlubně musí splnit podmínku

$$U_0 \leq U_{0,max}$$

kde $U_{0,max}$ je přípustná hodnota, která je určena pro jednotlivé třídy jakosti výroby (viz tabulka 2.6)

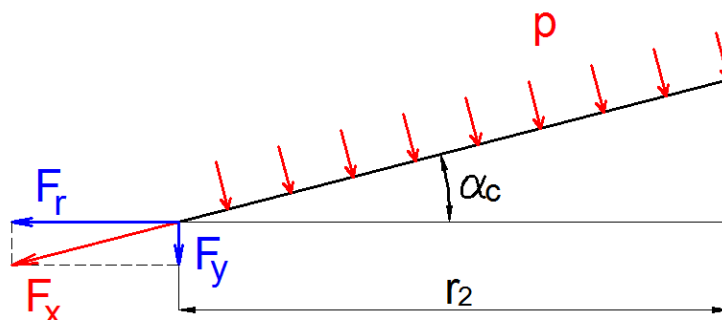
Tab. 2.6 Doporučené přípustné hodnoty parametru prohlubně

Třída jakosti výroby	Popis	$U_{0,max}$
A	Speciální	0,006
B	Vysoká	0,010
C	Základní	0,016

2.4 Kuželové skořepiny s malým vzepětím

Kuželové skořepiny s menším okrajovým úhlem vykazují značně nelineární chování. Není proto možné použít lineární řešení, užívané v doporučení ECCS. Nelinearita je způsobena

- **okrajovým úhlem kuželové skořepiny $\alpha < 25^\circ$.** U těchto skořepin dochází při zatěžování k posunutí oblasti maximálního meridiánového ohybového momentu směrem od okraje ke středu kužele. Při $\alpha_c \rightarrow 0$ se kužel stává kruhovou deskou s maximálním ohybovým momentem ve středu desky. Úloha se ze stabilitní mění na pevnostní. Dále z rovnic (2.2) a obrázku 2.8 je patrné, proč není možné použít standardní metody výpočtu stabilitní únosnosti – poloměr náhradního válce je příliš velký a neplatí předpokládané zjednodušení (2.9). Poloměr náhradního válce je závislý na výrazu $1/\sin \alpha_c$ a pro okrajový úhel blíží se nule roste nade všechny meze. Z těchto důvodů dochází ke značnému zkreslení výsledku kritického zatížení (2.11).
- **posuvem okraje skořepiny v radiálním směru** (směr kolmý k ose rotace skořepiny), ke kterému dochází při zatěžování kuželových skořepin s volným koncem, nebo s okrajem vyztuženým tenkým obvodovým prstencem. V průběhu zatěžování vzniká ve stěně skořepiny meridiánová síla F_x , jejíž velikost roste se zmenšujícím se okrajovým úhlem α_c podle výrazu $1/\sin \alpha_c$. Teoreticky pro $\alpha_c \rightarrow 0$ platí $F_x \rightarrow \infty$. Při působení vodorovné složky této síly F_r dochází k radiálnímu posuvu okraje skořepiny a tím k poklesu vrcholu střechy. To se projeví poklesem okrajového úhlu α_c a tedy výrazným nárůstem meridiánové síly. Postupně tento proces může dojít k celkovému prolomení konstrukce do inverzní polohy (snap-through). Síly působící ve stěně kuželové skořepiny jsou znázorněny na obrázku 2.12.



Obr. 2.12 Schematické znázornění sil působících ve stěně kuželové skořepiny zatížené vnějším přetlakem

Problém je třeba řešit pomocí numerických analýz s uvažováním geometrické i materiálové nelinearity. Dále je nutné experimentálně ověřit dosažené výsledky. Cílem je sestavení jednoduchého pseudoanalytického vztahu, který vychází z rovnice kritického přetlaku (2.19)

$$p = K \cdot E \frac{1}{\omega} \left(\frac{t}{r_e} \right)^m \quad (2.21)$$

Kde koeficienty K a m budou nalezeny pomocí série numerických analýz. Ekvivalentem koeficientu K je v evropském doporučení parametr C_θ

Dále je třeba upravit redukční součinitel pružné imperfekce, jelikož konstantní hodnoty uvedené v tabulce 2.3 mohou být příliš konzervativní. Tyto hodnoty jsou stanoveny pro hladkou válcovou skořepinu zatíženou vnějším přetlakem. Tento typ konstrukce, jak bylo zmíněno výše (odst. 2.1 a 2.2), je z důvodu vysokého podílu membránové napjatosti velmi citlivý na počáteční imperfekce. Kuželová skořepina s malým vzepětím naproti tomu vykazuje značně nelineární chování ze samé podstaty konstrukce (výrazný ohyb v oblasti okrajové podmínky). Na hodnotu stabilitní únosnosti má nejvýznamnější vliv geometrická nelinearita (spolu s pružně-plastickým chováním materiálu). Při uvažování vlivu počátečních imperfekcí může dojít k dalšímu poklesu stabilitní únosnosti (viz obr. 2.2, str. 10), ovšem ne tak výraznému jako tomu je v případě válcové skořepiny.

2.5 Publikace významných autorů

Postup navrhování stabilitní únosnosti kuželových skořepin v souladu s doporučeními a normami byl uveden v kapitole 2.2. Tato metoda však není použitelná pro kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha < 25^\circ$. Další poznatky z oblasti řešení kuželových skořepin je třeba hledat v odborných člancích. Mezi nejvýznamnější autory, kteří se zabývají nebo v minulosti zabývali výzkumem v oblasti kuželových skořepin, patří A. S. Volmir, M. Esslingerová, W. Wunderlich, C. Poggi, M. K. Chryssanhopoulos a další.

Část prací ruského klasického autora **A. S. Volmira** [6], týkajících se výzkumu stability konstrukcí, je věnována kuželovým skořepinám s velmi malým vzepětím. Kuželová skořepina s různými okrajovými podmínkami je zde zatížena spojitým tlakem nebo lokální osovou silou ve vrcholu. Odvození příslušných rovnic vychází ze soustavy obyčejných nelineárních diferenciálních rovnic (rovnice rovnováhy a rovnice kompatibility) kruhové desky s počáteční imperfekcí v podobě osově symetrického příčného průhybu. Deska s touto imperfekcí reprezentuje tvar kuželové skořepiny. V rovnicích jsou uvažovány pouze posuvy v radiálním směru, který je považován za nejvýznamnější. Zřejmě toto zjednodušení vede ke značné neshodě výsledků v oblasti po ztrátě stability s výsledky numerických řešení (viz [14]). Zavedení posuvů i ve směru obvodovém by bylo neúměrně komplikované, jelikož potom by bylo nutné řešit soustavu parciálních nelineárních diferenciálních rovnic.

M. Esslingerová je dalším z řady významných autorů zabývajících se stabilitou skořepinových konstrukcí. V článku [7] popisuje pružně-plastické chování kuželové skořepiny v okamžiku boulení. Skořepina je zatížena vnitřním přetlakem a zároveň osovou silou. Vnitřní přetlak má v počátku zatěžování příznivý vliv na stabilitní únosnost kuželové skořepiny. Při dalším zatěžování dochází k poklesu stabilitní únosnosti z důvodu vyčerpání

plastické únosnosti stěny kužele. Výsledkem jsou analytické vztahy, které popisují chování kuželové skořepiny v průběhu zatěžování. Jejich platnost je však omezena velikostí okrajového úhlu $\alpha_c \geq 30^\circ$ a zároveň platí pouze pro okrajovou podmínku BC1 (kloubově uložený okraj).

Jeden z autorů podílejících se na vytvoření evropského doporučení ECCS je **W. Wunderlich**. Ve svém článku [8] se spolu s kolegyní U. Albertin věnují posouzení vlivu okrajových podmínek a počátečních imperfekcí na únosnost kuželové skořepiny. Komolé kužele s okrajovými úhly $\alpha_c = 60^\circ$ a $\alpha_c = 35^\circ$ a různou tloušťkou stěny jsou zatíženy osovou silou. Počáteční imperfekce jsou předpokládány ve tvaru nejnižšího vlastního tvaru konkrétní skořepiny. Skořepiny s okrajovými podmínkami vetknutí, kloubového uložení a volným okrajem vykazují velmi podobnou citlivost na přítomnost počátečních imperfekcí. Po dosažení určité mezní hodnoty hloubky počáteční imperfekce, nemá další zvětšování její hloubky významný vliv na mezní zatížení. Zkoumané kužele se sice svojí geometrií pohybují v oblasti platnosti norem, avšak zejména způsob vytvoření počátečních imperfekcí a posouzení jejich vlivu na únosnost skořepiny je pro dizertační práci velmi cenný.

Součástí evropského doporučení je také výzkum autora **M. K. Chryssanthopoulose**. Ten se v článku [9] věnuje experimentům s hladkými a po meridiánu vyztuženými kuželovými skořepinami s okrajovým úhlem $\alpha_c \geq 30^\circ$. Kužele jsou zatíženy osovou silou, radiální posuv okrajů je zamezen. Článek [10] je věnován numerickým analýzám vyztužených kuželů, kde hlavní pozornost je upřena na typ okrajových podmínek. Mezi nejdůležitější závěry obou článků patří ověření značné citlivosti kuželových skořepin na způsob uložení. Možný posuv okraje kužele má vliv nejen na jeho mezní zatížení ale i na jeho počáteční meridiánovou tuhost. Autor v těchto případech poukazuje na nutnost použití numerických analýz s nelineárními moduly, jelikož výpočet pomocí analýzy vlastních čísel a tvarů může být výrazně na straně nebezpečné. Ačkoli geometrie ani způsob zatížení zkoumaných kuželových skořepin neodpovídá tématu dizertační práce, výzkum M. K. Chryssanthopoulose v oblasti počátečních imperfekcí je pro výzkum kuželových skořepin s malým vzepětím cenný a zajímavý.

Dalším významným autorem je **C. Poggi**. V článku [11], a dále jako spoluautor M. K. Chryssanthopoulose a A. Spagnoliho v článku [12] se věnuje numerickým analýzám osově zatížených hladkých imperfektních kuželových skořepin. Výsledky numerických analýz únosnosti kuželových skořepin s okrajovým úhlem $90^\circ > \alpha_c > 0^\circ$ jsou zpracovány v přehledném grafu. Autor opět upozorňuje na nutnost řešení únosnosti kuželových skořepin s okrajovým úhlem $\alpha_c < 25^\circ$ pomocí nelineárních analýz. Již při $\alpha_c = 30^\circ$ je hodnota kritického zatížení (bifurkační boulení) o cca 10% větší než hodnota mezního zatížení (nelineární kolaps), tento rozdíl se při dalším snižování hodnoty okrajového úhlu rapidně zvyšuje. Vliv počátečních imperfekcí s měnící se amplitudou je zde podrobně popsán na konkrétním případě kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 75^\circ$. Vzhledem ke geometrii zkoumané skořepiny a způsobu zatížení, není možné výsledky dále použít, avšak stejně jako v případě výsledků W. Wunderlicha v článku [8] je třeba důkladně prostudovat způsob vytvoření počátečních imperfekcí.

P. Paščenko se ve své práci [14] věnuje chování vyztužených kuželových střech s malým vzepětím v průběhu zatěžování. V práci je nalezena analytická metoda řešení takovýchto

konstrukcí. Při řešení je střecha převedena na náhradní rámovou konstrukci. Metoda je založena na nelineární teorii prutů a teorii prolomení rámové konstrukce. Metoda je součástí počítačového programu ERBOSS. Cílem dalšího výzkumu je navázání na poznatky dosažené P. Paščenkem v oblasti kuželových střech s malým vzepětím.

Z předchozího rozboru problematiky je zřejmé, že pro řešení únosnosti hladkých kuželových skořepin s malým vzepětím není možné použít metody, které jsou obsaženy v normách a doporučeních. Vzhledem ke zvoleným okrajovým podmínkám a geometrii kuželové skořepiny je úloha silně nelineární. Prostudované práce významných autorů neobsahují řešení, pomocí nichž by bylo možné posoudit stabilitní únosnost zkoumaných konstrukcí. Oblast řešení únosnosti kuželových skořepin s malým vzepětím dosud není vzhledem ke své komplexnosti dostatečně probádána.

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cílem dizertační práce je podrobná analýza chování hladkých kuželových skořepin s malým vzepětím, zatížených vnějším přetlakem. Je zkoumán zejména vliv *geometrie* (velikost okrajového úhlu), *okrajových podmínek* a *počátečních imperfekcí* na stabilitní únosnost kuželových skořepin. Dosažené výsledky jsou v omezené míře ověřeny experimentálně.

Oblast navrhování kuželových skořepin s *okrajovým úhlem* $\alpha_c < 25^\circ$ dosud není dostatečně zmapována. Při navrhování takovýchto konstrukcí není možné použít standardní metody, které jsou součástí norem a doporučení. V této dizertační práci jsou zkoumány kuželové skořepiny s okrajovým úhlem v rozsahu $\alpha_c = 5^\circ \div 15^\circ$.

Normy dále neobsahují vztahy, kterými by bylo možné řešit únosnost kuželových skořepin, u kterých je okraji *umožněn posuv okraje v radiálním směru*. V práci jsou zkoumány krajní okrajové podmínky prostého podepření a kloubového uložení a také kuželové skořepiny s konečnou radiální tuhostí, která je reprezentovaná výztužným okrajovým prstencem.

Dalším cílem výzkumu tenkostěnných skořepinových konstrukcí je stanovení vlivu počátečních imperfekcí na únosnost kuželových skořepin, který je v doporučení ECCS zohledněn pomocí redukčního součinitele α (viz tab. 2.3). Použití stávajícího redukčního součinitele může být velmi konzervativní, jelikož jeho hodnoty byly stanoveny pro hladkou válcovou skořepinu, která je na přítomnost počátečních imperfekcí vysoce citlivá.

Na základě těchto znalostí budou sestaveny zjednodušené výpočtové vztahy stabilitní únosnosti v uzavřeném tvaru, zohledňující i vliv počátečních imperfekcí. Vztahy budou moci sloužit k rychlému a levnému navrhování kuželových skořepin s malým vzepětím v běžné praxi.

4 PŘEHLED POUŽITÝCH METOD ŘEŠENÍ

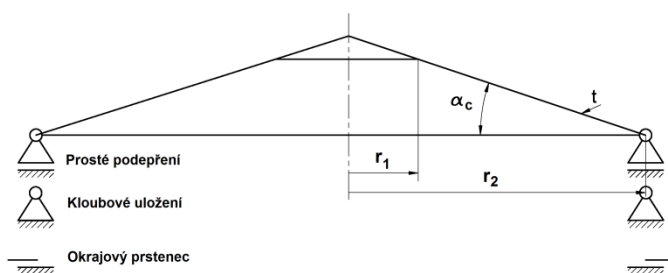
4.1 Analytické řešení

V předešlých kapitolách byl nastíněn postup řešení únosnosti kuželových skořepin, který je popsán v normách a doporučení. Tento postup vychází z lineární teorie skořepin – odvození kritického tlaku náhradního válce zatíženého vnějším přetlakem (2.11). Tato hodnota je pak pro potřeby navrhování reálných konstrukcí upravena součiniteli zohledňujícími vliv okrajových podmínek, geometrie, pružně-plastického chování materiálu, počátečních imperfekcí apod. Z důvodu kompatibility postupu řešení kuželových skořepin s malým vzepětím se stávajícími předpisy jsou v této práci hledány součinitele, které rovněž budou upravovat známý vztah (2.19) pro výpočet kritického přetlaku (viz v rovnici 2.21 součinitele K a m)

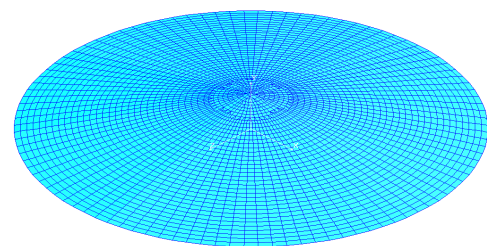
4.2 Numerické analýzy

Vzhledem k značné složitosti a rozsáhlosti popisovaného problému by bylo velmi náročné a nákladné zkoumat stabilitu skořepin pouze s použitím experimentů. Pomocí numerických analýz, které jsou prováděny v počítačových programech založených na metodě konečných prvků (MKP), je možné relativně rychle a levně simulovat celou řadu pokusů. Výsledky analýz pak jsou ověřovány experimentálními modely s vhodně zvolenými parametry (geometrie, způsob uložení a zatěžování).

Numerické analýzy zohledňující geometrickou a materiálovou nelinearitu a počáteční imperfekce (GNA, GMNA, GNIA, GMNIA) jsou prováděny v programech COSMOSWorks [16] a COSMOS/M [17]. V první fázi výzkumu jsou prováděny numerické analýzy stability kuželových skořepin se dvěma krajními případy okrajových podmínek – kloubové uložení a prosté podepření (zamezený a volný radiální posuv). Dále jsou zkoumány kužele s konečnou radiální tuhostí, která je reprezentovaná okrajovými výztužnými prstenci. Další část výzkumu bude věnována geometrickým imperfekcím (prohlubním).



Obr. 4.1 Schéma kuželové skořepiny



Obr. 4.2 Numerický model

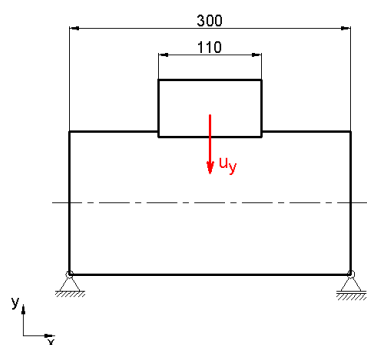
Schéma kuželové skořepiny s uvažovanými okrajovými podmínkami je na obr. 4.1. Numerický model (obr. 4.2) je vytvořen ze čtyř-uzlových skořepinových prvků SHELL4. Modely jsou zatíženy vnějším jednotkovým přetlakem $p = 1\text{MPa}$. V analýzách zohledňujících materiálovou nelinearitu je použit zjednodušený von Misesův bilineární model pružně-plastického chování materiálu (obr. 2.6). Výpočet je řízen pomocí strategie řízení nelineárního procesu přírůstkem oblouku zatěžovací křivky (obr. 2.7).

Úlohy z oblasti tenkostěnných skořepinových konstrukcí jsou velmi náročné na sestavení vhodného výpočtového modelu. Výsledkům numerických analýz není možné slepě věřit, mohou být zadána nesprávná data. Také počítačový program může obsahovat nějakou chybu. Z těchto důvodů je v této kapitole ověřena správná funkce MKP programu CosmosWorks a to pomocí experimentu a jiného MKP programu – ANSYS11.

4.2.1 Správnost řešení nelineárních úloh pomocí MKP programů

Potvrzení věrohodnosti výsledků numerických analýz je provedeno na úloze příčně zatěžované válcové skořepiny, která představuje v praxi často používanou konstrukci – válcová skořepina na sedlové podpoře (např. cisterna). V této práci uvedené výsledky souběžného výzkumu příčně zatěžované válcové skořepiny byly uveřejněny v dizertační práci [15] a článku [23]. Tento problém je pro sledování funkčnosti programů vhodnější než např. úloha ztráty stability vrchlíků nebo kuželových skořepin s malým vzepětím, jelikož snímání zatěžující síly působící na experimentální vzorek je v této úloze mnohem snazší. Naměřený průběh zatěžující síly v závislosti na posuvech je porovnáván s rovnovážnými charakteristikami získanými numericky pomocí výše zmíněných MKP programů. Dále jsou porovnávány tvary deformace jednotlivých modelů.

Na obr. 4.3 je schéma modelů s rozměry a zakresleným směrem posuvu tuhého razníku. Na dalším obrázku 4.4 je experimentální model skořepiny zachycený v počátku zatěžování. Model skořepiny je vyroben z trubky o tloušťce plechu $0,56\text{mm}$, na okrajích je trubka opatřena víky o tloušťce 8mm . Tuhý razník a víka jsou k trubce přivařeny. Během výroby zkušební vzorku vznikly počáteční imperfekce, které v numerických analýzách nebyly zohledněny. Únosnost válcové skořepiny je obecně značně ovlivněna přítomností počátečních imperfekcí (viz kap. 2). Z tohoto důvodu může být limitní síla, při které dojde ke ztrátě stability vzorku válcové skořepiny, výrazně nižší, než je limitní síla získaná numericky.



Obr. 4.3 Schéma modelu válcové skořepiny



Obr. 4.4 Experimentální model skořepiny uchytený v lisu

V průběhu experimentu byla zaznamenávána síla, působící na razník. Experiment byl ukončen při svislém posuvu razníku 65mm . Na obr. 4.5 je deformovaný model v závěru experimentu. Materiál skořepiny byl podroben tahové zkoušce. Zjištěná mez kluzu byla použita v numerických analýzách, ve kterých byla zohledněna geometrická i materiálová nelinearita. Vzhledem k předpokládanému symetrickému tvaru deformování, byla vymodelována pouze $1/4$ modelu, zbytek byl nahrazen okrajovými podmínkami symetrie.



Obr. 4.5 Závěr experimentu

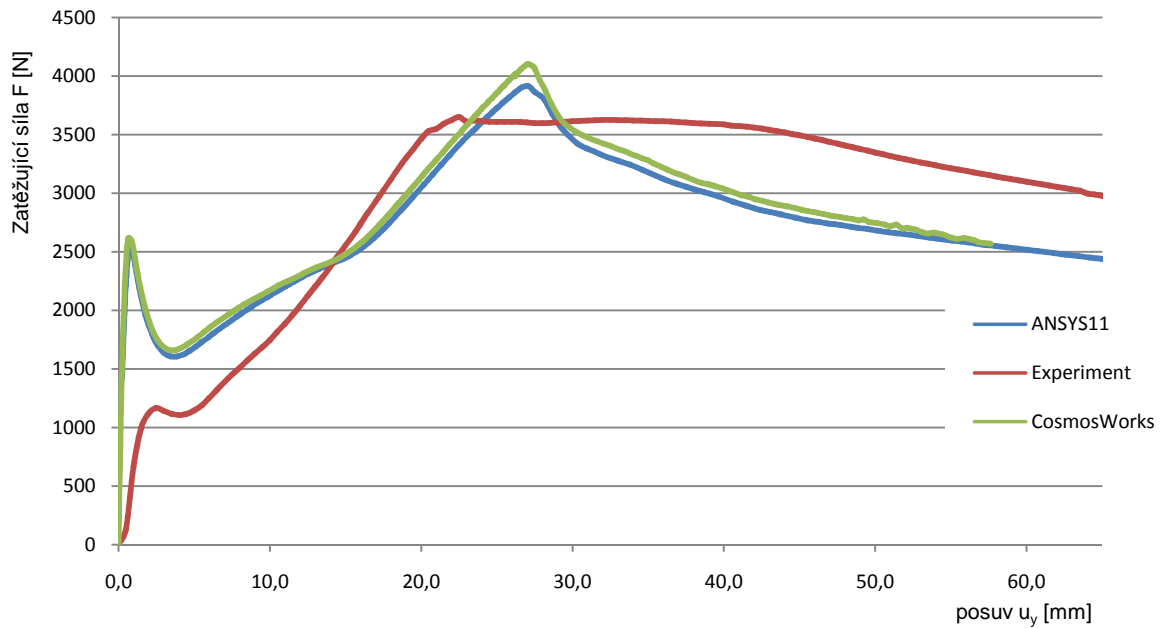


Obr. 4.6 Detail deformace zkušební vzorku

Rozměry numerického modelu jsou shodné s rozměry uvedenými na obr. 4.3, tloušťka pláště skořepiny je $0,56\text{mm}$, vík 8mm . Tloušťka stěn a vík razníku je z důvodu zachování dostatečné tuhosti volena 30mm . V numerické analýze typu GMNA je uvažován von Misesův bilineární model chování materiálu s mezí kluzu $f_{y,k}=170\text{MPa}$, modulem pružnosti $E=2,06E5$ a tangenciálním modulem $E_T \sim E/10^4\text{MPa}$, Poissonovo číslo použitého materiálu je $\mu=0,3$. Skořepina i sedlo jsou vysítovány skořepinovými prvky, kde v ANSYSu se jedná o prvek SHELL 4 node181, kterým byla vytvořena mapovaná síť. V CosmosWorksu je použit parabolický trojúhelníkový prvek. Při řešení byla použita strategie řízení iteračního procesu přírůstkem posuvu. Rovnovážné charakteristiky získané experimentálně a numericky z obou MKP programů jsou uvedeny na obr. 4.7.

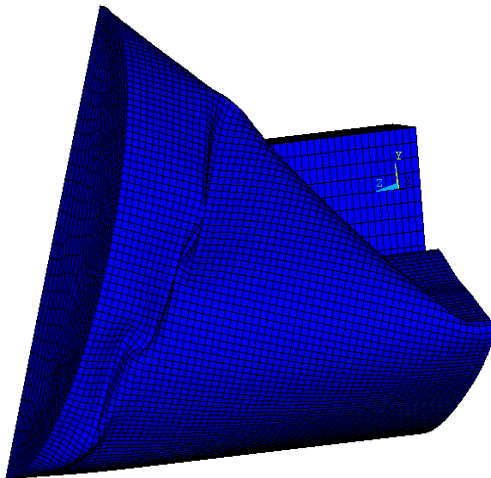
Při zatěžování dochází ke dvěma ztrátám stability, k první při svislém posuvu razníku cca 1mm , ke druhé při 26mm . Porovnáním průběhů zatěžujících sil je patrna již zmíněná značná závislost hodnoty limitní síly na počátečních imperfekcích, které se v reálných konstrukcích vyskytují. Zřejmě z tohoto důvodu je naměřená hodnota limitní síly nižší. První ztráta stability nastala u reálné skořepiny nepatrně později patrně kvůli vymezení vůlí mezi pláštěm a podložkou. Po první ztrátě stability je průběh sil podobný. U reálné skořepiny došlo ke druhé ztrátě stability dříve (v okamžiku, kdy byl posuv razníku cca 22mm), opět zřejmě vlivem imperfekcí je hodnota limitní síly nižší. Ovšem rozdíl již není tak výrazný. V souladu s teorií skořepinových konstrukcí je tento jev možné vysvětlit tak, že při první ztrátě stability došlo k vytvoření vln v plášti skořepiny, jejichž proplastizované hrany mohou působit při dalším zatěžování jako výztužná žebra.

Vyšší hodnoty zatěžovací křivky reálné skořepiny v závěrečné fázi experimentu lze vysvětlit rozdílným zpevněním skutečného materiálu oproti výpočtovému modelu s uvažovaným jednodušším pružně-plastickým modelem chování materiálu.

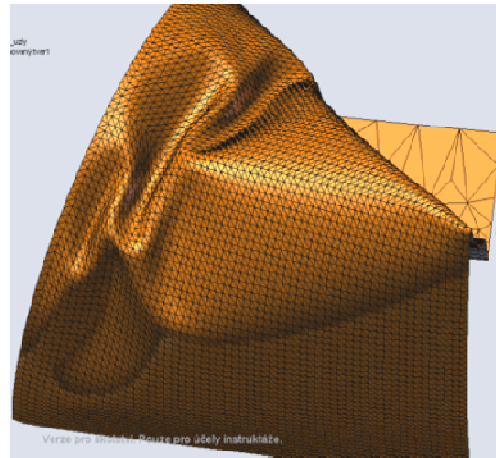


Obr. 4.7 Rovnovážné charakteristiky

Na obrázcích 4.8 a 4.9 jsou tvary numerických modelů v závěru analýz. Porovnáním s tvarem deformované reálné skořepiny na obr. 4.6 je patrna velmi dobrá shoda simulace chování modelu daleko za mezním stavem u obou MKP programů. Za povšimnutí stojí zejména tvar a umístění vytvořených vln.



Obr. 4.8 Tvar deformace – ANSYS11



Obr. 4.9 Tvar deformace – CosmosWorks

Z porovnání výsledků experimentů a numerických analýz vyplývá, že i v oblasti daleko za první ztrátou stability válcové skořepiny vykazují používané MKP programy velmi dobrou shodu s experimenty.

4.3 Experiment

Zejména při řešení komplikovaných nelineárních úloh je třeba ověřit dosažené výsledky experimentálně. Při vytváření numerického modelu dochází k četným zjednodušením.

Výsledkům získaným numericky proto není možné bezvýhradně věřit. Provedením experimentu je možné odhalit i hrubé chyby ve výsledcích.

Výsledky numerických analýz v této dizertační práci jsou v omezené míře verifikovány experimenty ztráty stability reálných vzorků kuželových skořepin. Zkušební vzorky jsou vyrobeny pomocí svařování. V první fázi výzkumu je jim ponechán volný nevyztužený okraj. Tento způsob uložení reprezentuje prosté podepření (BC3). Další vzorky jsou opatřeny okrajovými prstenci. V další fázi budou vzorky vyráběny lisováním, ovšem je třeba zvolit geometrii vzorků tak, aby bylo možné navázat výzkumem vlivu počátečních imperfekcí. Jelikož zkoumané konstrukce patří mezi nestandardní konstrukční uzly a již v počátku zatěžování je přítomen *výrazný ohybový stav*, nemusí se tedy další ohybová napjatost vnesená přítomností počátečních imperfekcí výrazně projevit.

Experimenty ztráty stability kuželových skořepin probíhají na zkušebním zařízení, které je k dispozici na katedře mechaniky, materiálů a částí strojů. Na obr. 4.15 a 4.16 je ukázáno toto zařízení a zkušební vzorek po provedeném experimentu. Podrobnější seznámení se zkušebním zařízením a provedenými experimenty je uvedeno v kapitole 9.



Obr. 4.15 Zkušební zařízení s volně položeným experimentálním modelem



Obr. 4.16 Zkušební vzorek po provedeném experimentu

5 TVORBA NUMERICKÉHO MODELU

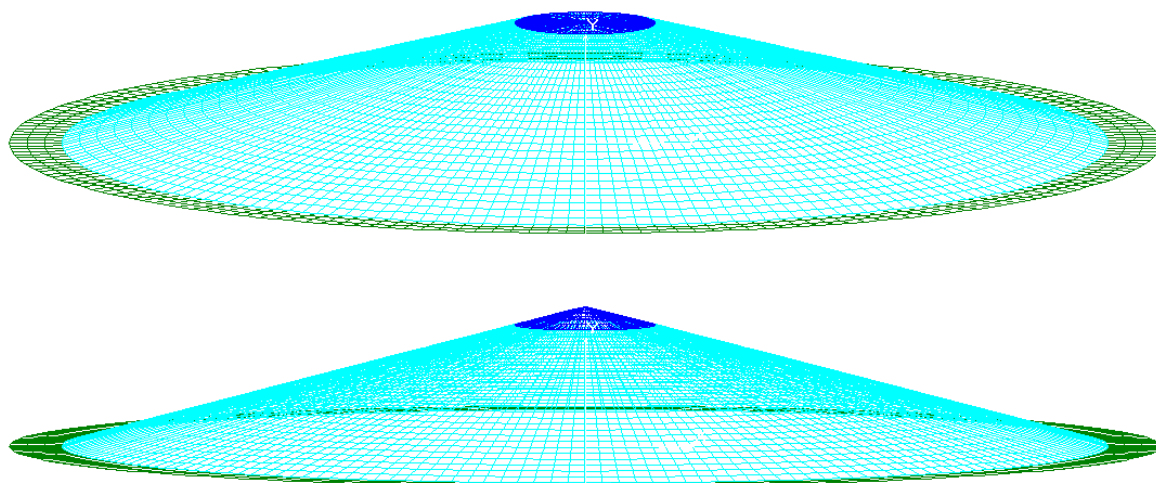
Při vytváření numerického modelu se výpočtář nevyhne použití řady zjednodušujících předpokladů. Je třeba se mít na pozoru, aby každá odchylka od skutečné konstrukce byla co nejmenší a na straně bezpečné. Model kuželové střechy je poměrně jednoduchý. Ale i v tomto případě je nutné zabezpečit, aby použitá zjednodušení neovlivnila konečné výsledky. V této kapitole je ověřeno, jak ovlivňuje volba geometrie a možné natočení okrajového prstence stabilitní únosnost kuželové skořepiny.

Numerické modely mají následující rozměry. Poloměr spodního okraje je $r_2 = 150\text{mm}$, analyzované hodnoty okrajového úhlu α_c jsou 5° , 10° a 15° . Tloušťka stěny kuželové skořepiny je v rozmezí $t = 0,4 \div 4,0\text{mm}$. Kuželové skořepiny s konečnou radiální tuhostí mají okrajový prstenc o délce $b = 15\text{mm}$ a tloušťka prstence je v rozmezí $t_r = 0,4 \div 20\text{mm}$. Numerické modely jsou v programu COSMOS/M tvořeny skořepinovými elementy SHELL4.

5.1 Vliv geometrie kuželových skořepin

S ohledem na výrobu zkušebních vzorků je třeba analyzovat vliv zvolené geometrie na stabilitní únosnost zkoumaných kuželových skořepin. Experimentální vzorky vyráběné svařováním jsou v podobě celého kužele, vzorky kuželových skořepin vyráběné lisováním budou v podobě komolých kuželů. V následujícím textu jsou porovnávány tři typy geometrie kuželových skořepin (numerické modely kuželových skořepin s okrajovým prstencem jsou uvedeny na obr. 5.1)

- Celý kužel
- Komolý kužel bez zpevnění horního okraje
- Komolý kužel se zpevněním (horní plocha o poloměru r_1 má tloušťku 10mm)



Obr. 5.1 Numerické modely celého a komolého kužele

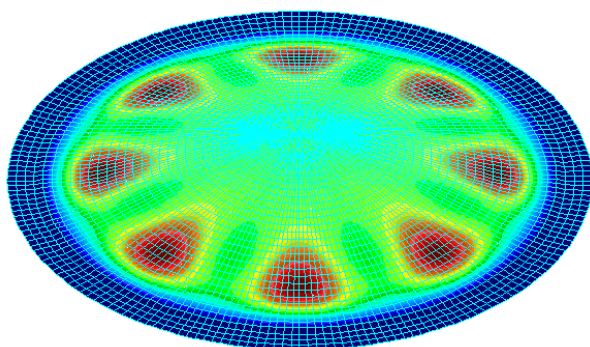
Vliv geometrie je porovnáván napříč spektrem řešených modelů s různou tloušťkou stěny, okrajového prstence, typem uložení, přítomností počátečních imperfekcí apod. Vybrané

případy jsou uvedeny v tab. 5.1. U všech modelů je poloměr spodního okraje $r_2 = 150\text{mm}$, komolý kužele mají horní okraj o poloměru $r_1 = 20\text{mm}$

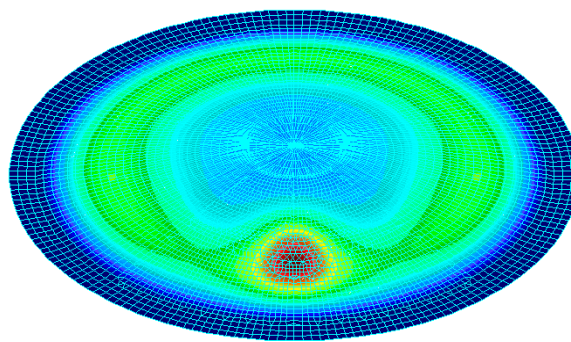
Tab. 5.1 Porovnání vlivu geometrie kužele na hodnotu limitního přetlaku

Parametry modelu	Limitní přetlak [MPa]		
	Celý kužel	Komolý bez zpevnění	Komolý se zpevněním
$\alpha_c = 5^\circ, t = 1,6\text{mm}, t_r = 0\text{mm}, \text{BC3}, p_{GMNA}$	0,06814	0,06728	0,06801
$\alpha_c = 10^\circ, t = 0,8\text{mm}, t_r = 4\text{mm}, p_{GMNA}$	0,09914	0,09754	0,09907
$\alpha_c = 15^\circ, t = 0,6\text{mm}, t_r = 1\text{mm}, p_{GNA}$	0,07980	0,07961	0,07987
$\alpha_c = 10^\circ, t = 1,0\text{mm}, t_r = 1\text{mm}, p_{GMNIA}$	0,10682	0,10621	0,10668
$\alpha_c = 10^\circ, t = 1,0\text{mm}, t_r = 1\text{mm}, p_{GNIA}$	0,14451	0,143378	0,14407
$\alpha_c = 10^\circ, t = 0,8\text{mm}, t_r = 0\text{mm}, \text{BC3}, p_{GMNA}$	0,0329	0,03195	0,03248
$\alpha_c = 10^\circ, t = 0,8\text{mm}, t_r = 0\text{mm}, \text{BC1}, p_{GMNA}$	0,1243	0,12182	0,1223
$\alpha_c = 15^\circ, t = 4\text{mm}, t_r = 10\text{mm}, p_{GMNA}$	1,5992	1,5991	1,5991

Z uvedených výsledků vyplývá, že únosnost kuželových skořepin *není nijak výrazně ovlivněna zvolenou geometrií*. Maximální chyba se pohybuje okolo hodnoty 2%, což je naprosto přijatelné. Je tedy možné usoudit, že *vliv výroby zkušebních vzorků z hlediska geometrie je zanedbatelný*. Vzhledem k tomu, že ve všech zkoumaných případech dochází při ztrátě stability k deformování v oblasti blíže ke spodnímu okraji kužele (viz příklady na obrázcích 6.2 a 6.3), byl tento výsledek předpokládán. Na následujících obrázcích je zobrazen tvar deformace při ztrátě stability ideálního celého kužele (6.2) a imperfektního komolého kužele s prohlubní umístěnou v blízkosti spodního okraje (6.3).



Obr. 6.2 Tvar deformace ideálního celého kužele (parametry $\alpha_c = 15^\circ, t = 0,6\text{mm}, t_r = 1\text{mm}, p_{GNA}$)



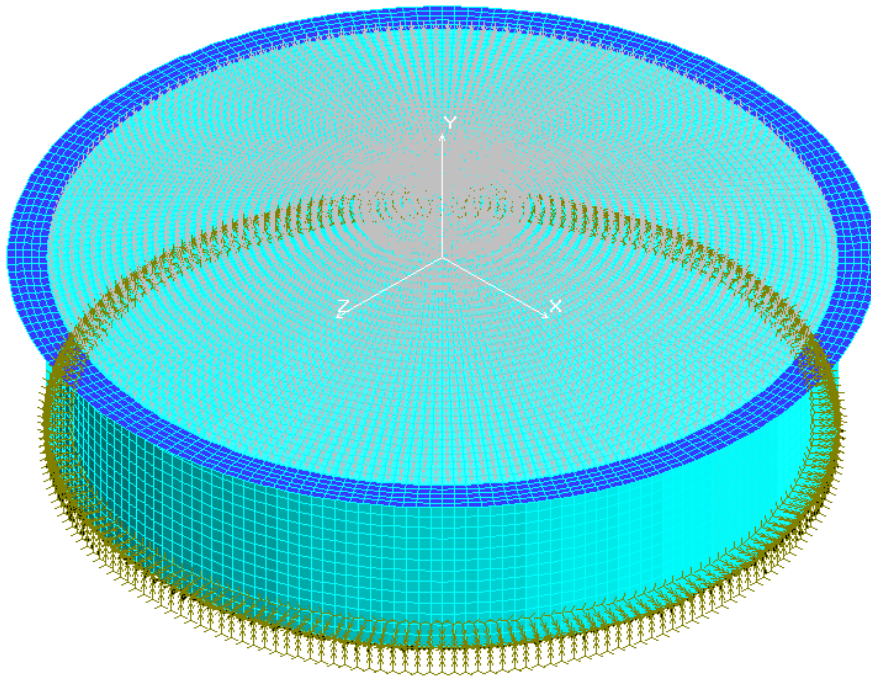
Obr. 6.3 Tvar deformace imperfektního komolého kužele (parametry $\alpha_c = 10^\circ, t = 1,0\text{mm}, t_r = 1\text{mm}, p_{GMNIA}$)

Se závěry této kapitoly rovněž souvisí umístění geometrické imperfekce (prohlubně). Již v této fázi výzkumu je možné předpokládat, že na únosnost bude mít největší vliv prohlubeň umístěná v blízkosti spodního okraje kuželové skořepiny. Tento předpoklad je nutné důkladně numericky a experimentálně ověřit. Analyzování vlivu počátečních imperfekcí na stabilitní únosnost kuželových skořepin je součástí dalšího výzkumu.

5.2 Vliv natočení okrajového prstence

Při zatěžování kuželových skořepin dochází nejen k posuvu okrajového prstence v radiálním směru, ale i k jeho natočení (moment má směr tečny k okraji kužele). Otázkou je, jak toto natočení ovlivňuje celkovou únosnost kuželové skořepiny. U některých konstrukcí může vliv natočení převládat nad radiálním posuvem (např. ČSN EN 13445-3 – dimenzování klenutých vík). V případě kuželových skořepin je možné předpokládat, že vliv radiálního posuvu poddajných prstenců bude převládat nad vlivem jejich natočení. Tento předpoklad je třeba ověřit. V této kapitole jsou porovnávány tři modely kuželových skořepin, které se liší typem okrajových podmínek.

- Prostě podepřená kuželová skořepina se zamezeným natočením prstence - **I**.
- Prostě podepřená kuželová skořepina s povoleným natočením prstence - **II**.
- Model kuželové skořepiny s částí válcového pláště, jehož spodní okraj je vetknut (obr. 5.4) – **III**. Tento model představuje např. skutečnou nádrž s kuželovou střechou, nebo válcovou nádobu s kuželovým dnem.

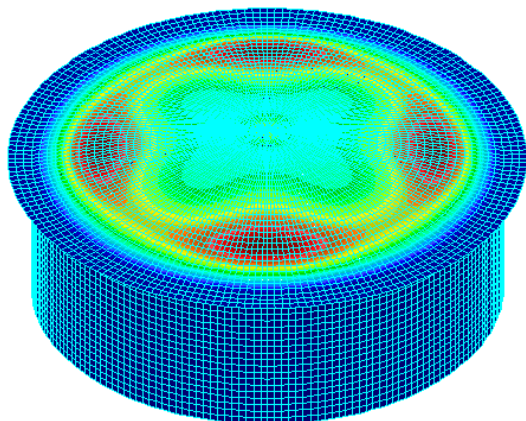


Obr. 5.4 Numerický model kuželové skořepiny s válcovým pláštěm – model III

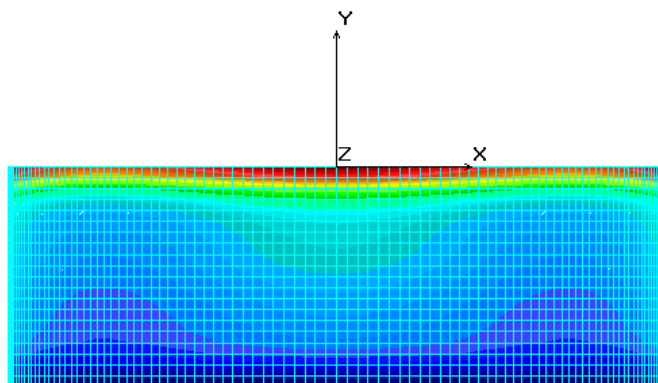
Modely jsou tvořeny skořepinovými prvky SHELL4. Poloměr spodního okraje kuželové skořepiny je $r_2 = 150\text{mm}$, tloušťka kuželové skořepiny a válcového pláště je $t = 0,8\text{mm}$. Tloušťka prstence o šířce $b = 15\text{mm}$ se mění v rozsahu $t_r = 0,4 \pm 20\text{mm}$ (tzn. průřezová plocha prstence je v rozsahu $A_r = 6 \pm 300\text{mm}^2$). Numerické analýzy jsou typu GNA. Numerické modely jsou zatíženy vnějším jednotkovým přetlakem.

Při ztrátě stability dochází k deformování kuželové skořepiny v blízkosti spodního okraje (viz obr. 5.5). Tvar ztráty stability kuželové skořepiny (4 vlny) ovlivňuje válcový plášť modelu III. Dochází zde k nepatrnému zvlnění válcového pláště v osové a radiálním směru (celková posunutí válcového pláště viz obr. 5.6). Toto zvlnění s velkou pravděpodobností

ovlivňuje únosnost celého modelu kuželové skořepiny s válcovým pláštěm. Aby bylo možné v dalším textu porovnávat výsledky numerických analýz s experimenty, je třeba zamezit přenosu deformací z kuželové skořepiny do válcového pláště. Z tohoto důvodu je předepsána dodatečná okrajová podmínka (model III/A). Uzlům v oblasti spojení pláště a kužele je zamezeno svislé posunutí. Touto podmínkou není ovlivněno natočení prstence modelu s válcovým pláštěm, nedojde však ke zvlnění válcového pláště v osovém směru. U výpočtu stability skutečných konstrukcí je však tento vliv třeba zohlednit příslušným redukčním součinitelem C_r (viz dále). Je tedy zřejmé, že zkoumané modely samotných kuželových skořepin (I a II) zcela přesně nevystihují skutečnost.

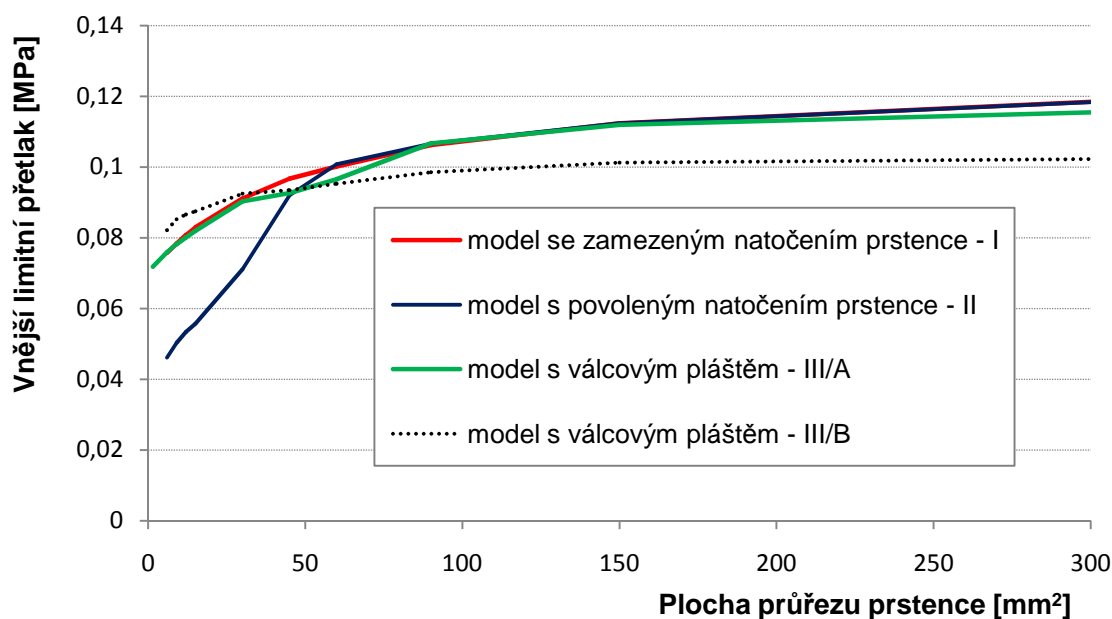


Obr. 5.5 Celková posunutí numerického modelu skutečné střechy



Obr. 5.6 Zvlnění válcového pláště numerického modelu skutečné střechy

Hodnoty limitního přetlaku pro jednotlivé numerické modely jsou uvedeny v grafu (obr. 5.7) v závislosti na ploše průřezu prstence a v tabulce 5.2. V grafu je také zakreslena závislost limitního přetlaku modelu s válcovým pláštěm, bez výše zmíněné dodatečné okrajové podmínky (model III/B).



Obr. 5.7 Průběh limitního přetlaku modelů kuželových skořepin s tloušťkou stěny $t = 0,8\text{mm}$ a okrajovým úhlem $\alpha_c = 10^\circ$ v závislosti na ploše průřezu okrajového prstence

Tab. 5.2 Výsledky analýz typu GNA

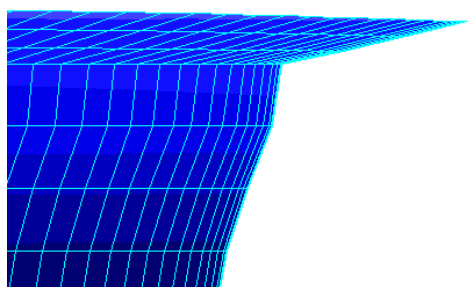
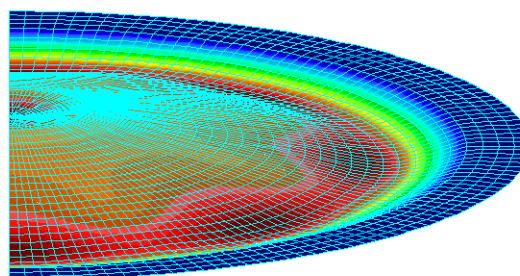
t_r [mm]	0,4	0,6	0,8	1	2	3	4	6	10	20
A_r [mm ²]	6	9	12	15	30	45	60	90	150	300
Γ [-]	3750	2500	1875	1500	750	500	375	250	150	75
Model I	0,07574	0,07836	0,08077	0,08292	0,09107	0,0967	0,10018	0,10624	0,11232	0,11841
Model II	0,04608	0,05026	0,05336	0,0557	0,07112	0,09201	0,1008	0,10661	0,11237	0,11833
Model III	0,07586	0,07818	0,08005	0,08195	0,09031	0,09266	0,09648	0,1067	0,1119	0,11547

Z průběhu křivek vyplývá, že vhodnější náhradou modelu kuželové skořepiny s připojeným válcovým pláštěm (III/A) je model kuželové skořepiny se *zamezeným natočením prstence* (I). V tomto případě se model samotné kuželové skořepiny chová velmi podobně jako model III/A, maximální chyba je 4,4%, což je přijatelné. Model s povoleným natočením prstence (II) se přibližuje hodnotám limitního přetlaku modelu III/A až v oblasti tužších prstenců (cca od $A_r = 60\text{mm}^2$).

Jak již bylo zmíněno, únosnost modelu III bez dodatečné okrajové podmínky (tedy III/B) je zřejmě ovlivněna přenosem deformace z kuželové skořepiny do válcového pláště. Maximální relativní chyba modelů I a III/A vůči modelu III/B je 12%. Tuto chybu bude nutné po provedení dalších sérií numerických analýz a ověřovacích experimentů zohlednit prostřednictvím vhodného redukčního součinitele $C_r = 0,85$.

V dalším textu je model kuželové skořepiny s připojeným válcovým pláštěm (III) nahrazen modelem *kuželové skořepiny se zamezeným natočením prstence* (I). Touto náhradou je docíleno značného zjednodušení ověřovacích experimentů. V rámci dalšího výzkumu, který však není předmětem této dizertační práce, je třeba dokázat, zda je tato náhrada skutečně správná. Bude nutné provést řadu experimentů s modelem kuželové skořepiny s částí válcového pláště. Pro experimenty ztráty stability kuželových skořepin s částí válcového pláště bude nutné provést úpravu zkušebního zařízení. V současné době je zkušební zařízení navrženo pro experimenty ztráty stability vzorků samotných kuželových skořepin a kulových vrchlíků, které jsou na zařízení volně položeny (vzorkům s okrajovým prstencem je zamezeno natočení prstence).

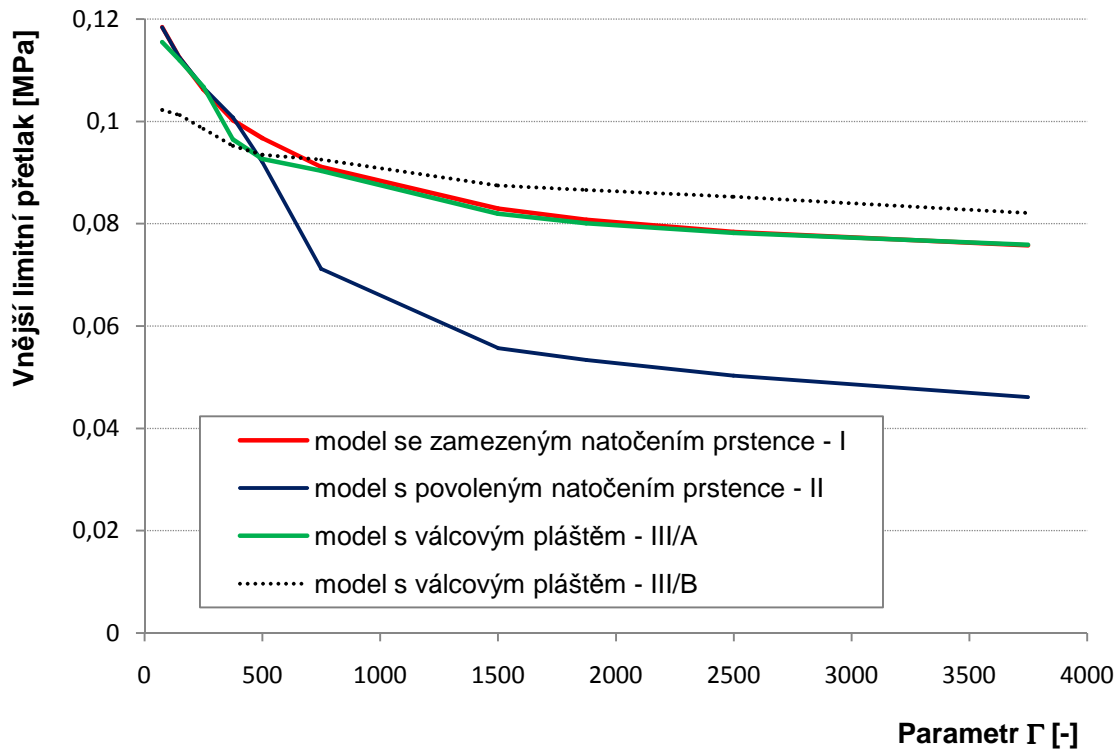
Na obrázcích 5.8 a 5.9 jsou uvedeny detaily okraje porovnávaných modelů. U modelu s válcovým pláštěm III/A dochází k natočení prstence.

**Obr. 5.8** Detail natočení prstence modelu skutečné střechy**Obr. 5.9** Deformování modelu se zamezeným natočením prstence

Z důvodu zobecnění výsledků je na obr. 5.10 uvedena závislost vnějšího limitního přetlaku z předchozího grafu (na obr. 5.7) vykreslena v závislosti na bezrozměrném parametru Γ .

$$\Gamma = \frac{r_2^2}{A_r}$$

Tento parametr zohledňuje radiální tuhost prstence. Odvození a ověření správnosti tohoto parametru je provedeno v kapitole 8.



Obr. 5.10 Průběh limitního přetlaku modelů kuželových skořepin s tloušťkou stěny $t = 0,8\text{mm}$ a okrajovým úhlem $\alpha_c = 10^\circ$ v závislosti na bezrozměrném parametru Γ

Z grafu na obr. 5.10 je rovněž patrné, že náhrada modelu kuželové skořepiny s válcovým pláštěm (III) modelem se zamezeným natočením prstence (I) je vhodnější. V oblasti tenčích prstenců (parametr $\Gamma \in \langle 400; 3750 \rangle$) je model s povoleným natočením výrazně méně únosný oproti ostatním zkoumaným modelům.

V oblasti tenčích prstenců, kde bezrozměrný součinitel $\Gamma \in \langle 400; 3750 \rangle$ je náhrada modelu skutečné konstrukce (model III/B) modelem samotné kuželové skořepiny se zamezeným natočením prstence (I) na *straně bezpečné*. V této oblasti je hodnota redukčního součinitele $C_r = 1,00$. V oblasti tužších prstenců je chyba vůči modelu skutečné konstrukce cca 12% a proto je zde zvolena hodnota redukčního součinitele $C_r = 0,85$. Hodnoty navrženého redukčního součinitele, který zohledňuje chybu způsobenou zabráněním přenosu deformací z kužele do válcového pláště u skutečné konstrukce (model III/B), jsou uvedeny v tab. 5.3.

Tab. 5.3 Redukční součinitel C_r

Rozsah Γ	0+400	400+∞
Redukční součinitel C_r	0,85	1,00

6 KUŽELOVÉ SKOŘEPINY BEZ VÝZTUŽNÉHO PRSTENCE

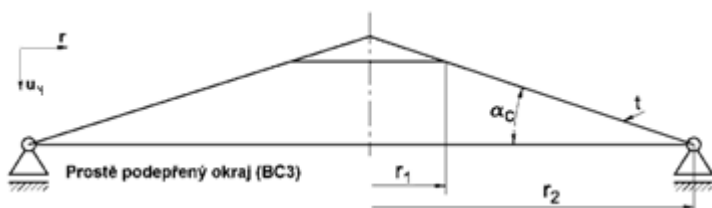
Hlavním cílem této kapitoly je navržení metody výpočtu stabilitní únosnosti kuželových skořepin s malým vzepětím s dvěma krajními případy uložení spodního okraje skořepiny. Jedná se o okrajové podmínky prostého podepření a kloubového uložení. Okraji kuželové skořepiny je v případě podmínky prostého podepření umožněn neomezený radiální posuv. V případě kloubového uložení je radiální posuv zcela zamezen. Z důvodu kompatibility s postupem uvedeným v evropském doporučení ECCS je výsledný vztah hledán ve tvaru, který vychází ze vztahu pro kritické napětí válce zatíženým vnějším přetlakem (2.17).

V úvodní části kapitoly je ukázáno numerické řešení ztráty stability konkrétního modelu. Tento model má shodné rozměry s experimentálním vzorkem kuželové skořepiny (dále viz kapitola 9). V další části je na ukázkách závislosti vnějšího limitního přetlaku na parametru tenkostěnnosti předveden vliv geometrie (velikost okrajového úhlu), materiálové nelinearity a uložení okraje kuželové skořepiny.

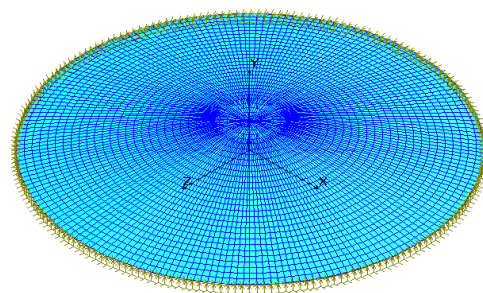
Hlavní část této kapitoly je věnována sérii numerických analýz kuželových skořepin s okrajovými úhly $\alpha_c = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ a různou tloušťkou pláště skořepiny (resp. bezrozměrném parametru tenkostěnnosti r_e/t). Zvolený rozsah parametru tenkostěnnosti vystihuje elastickou a částečně i pružně-plastickou oblast ztráty stability kuželových skořepin (viz tab. 2.2). Pomocí výsledků numerických analýz jsou nalezeny vztahy, pomocí kterých je možné vypočítat limitní elastický vnější přetlak konkrétní skořepiny.

6.1 Ukázka numerického řešení ztráty stability

Schéma kuželové skořepiny a vysíťovaný model jsou uvedeny na obrázcích 6.1 a 6.2. Poloměr spodního okraje kužele s okrajovým úhlem $\alpha_c = 10^\circ$ je $r_2 = 150\text{mm}$. Tloušťka pláště modelu skořepiny je $t = 0,8\text{mm}$. Okraj kuželové skořepiny je prostě podepřen.

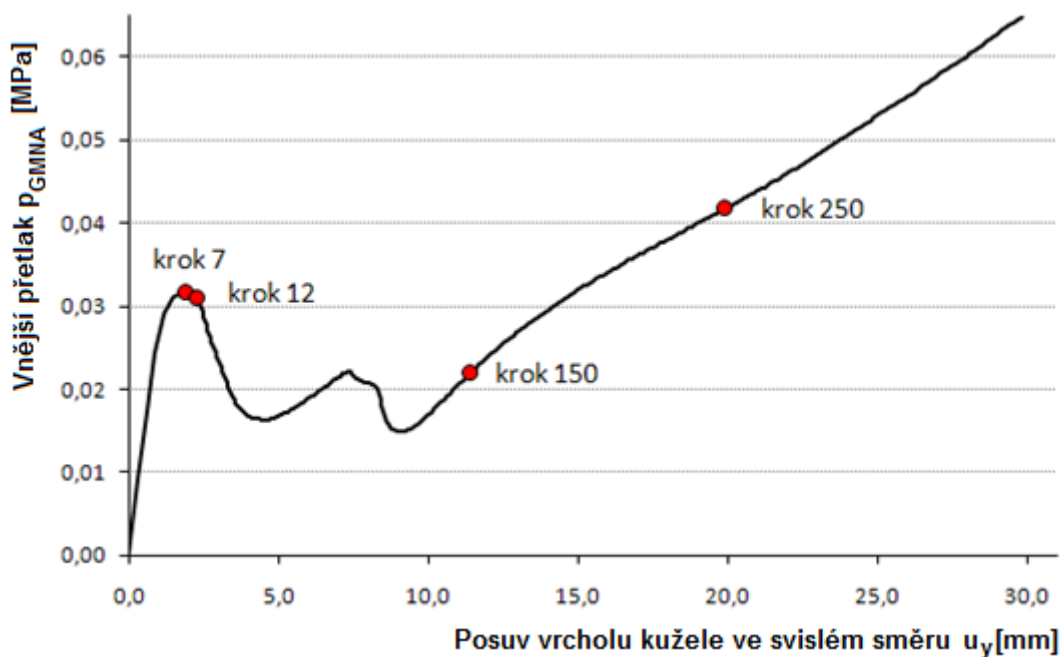


Obr. 6.1 Schéma prostě podepřené kuželové skořepiny



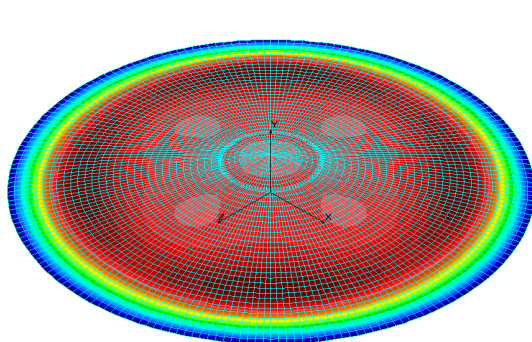
Obr. 6.2 Numerický model s okrajovou podmínkou prostého podepření

Z důvodu porovnání výsledku s experimentem je provedena numerická analýza typu GMNA s použitím von Misesova bilineárního modelu chování materiálu. V elastické oblasti je předepsán modul pružnosti $E = 2 \cdot 10^5 \text{MPa}$, v plastické oblasti tangenciální modul $E_T = 2 \text{MPa}$. Poissonovo číslo je $\mu = 0,3$, mez kluzu $f_{y,k} = 180 \text{MPa}$. Na obr. 6.3 je uvedena zatěžující charakteristika reprezentující závislost vnějšího přetlaku na posuvu vybraného uzlu konstrukce (uzel ve vrcholu kužele č. 6209).

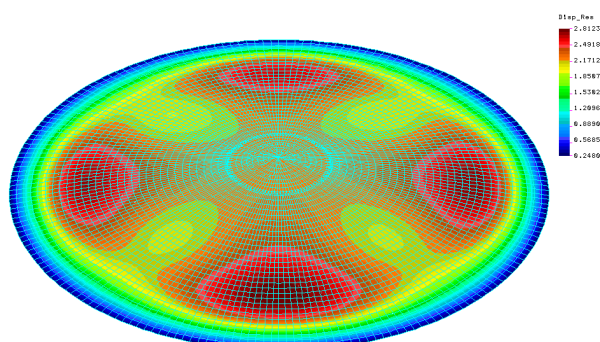


Obr. 6.3 Zatěžovací charakteristika – GMNA analýza

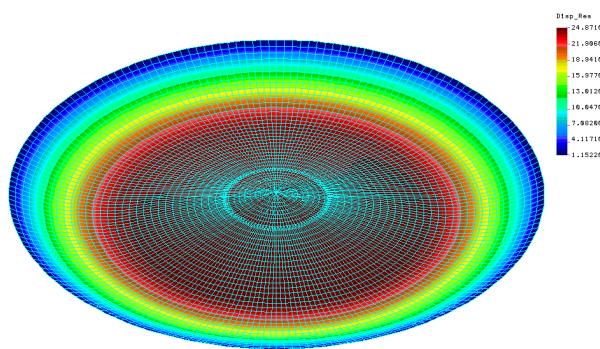
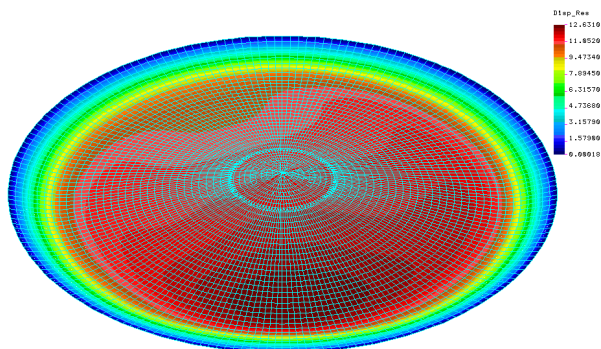
V průběhu zatěžování došlo postupně k několika ztrátám stability. Ve výpočtovém kroku 7 dochází k vytvoření čtyř osově symetrických vln (nelineární kolaps - viz odst. 2.1). Tvar deformované konstrukce s vykreslenými posuvy je uveden na obr. 6.4. Ke ztrátě stability došlo při posuvu vrcholu kužele ve svislém směru $u_y = 1,88 \text{ mm}$ a velikosti mezního zatížení $p_{GMNA} = 0,03195 \text{ MPa}$. V kroku 12 dochází k další ztrátě stability v podobě osově nesymetrického boulení – nelineárního bucklingu (tvar se čtyřmi obvodovými vlnami viz obr. 6.5). V průběhu dalšího zatěžování dochází k následným ztrátám stability. Postupně se deformování skořepiny vrací přes asymetrický tvar (obr. 6.6) k osově symetrickému tvaru deformování kužele v inverzní poloze (obr. 6.7 – krok výpočtu 250).



Obr. 6.4 Výsledná posunutí - krok výpočtu 7



Obr. 6.5 Výsledná posunutí - krok výpočtu 12



Obr. 6.6 Výsledná posunutí - krok výpočtu 150

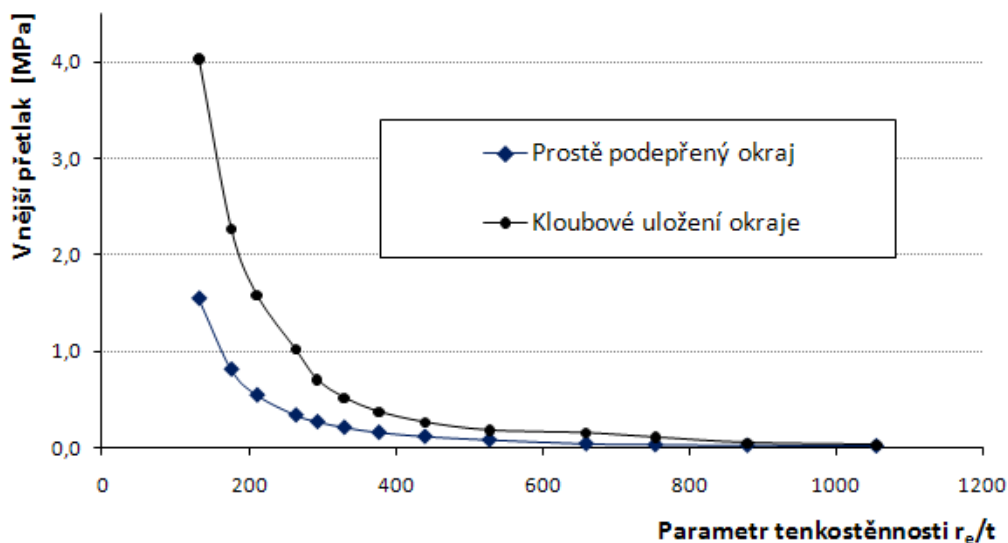
Obr. 6.7 Výsledná posunutí - krok výpočtu 250

6.2 Obecné poznatky

Kompletní výsledky numerických analýz (GNA, GMNA) kuželových skořepin s okrajovými úhly $\alpha_c = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ zatěžované vnějším přetlakem jsou uvedeny v tabulkách 6.1 a 6.5. Tabulka 6.1 navíc obsahuje výsledky analytického řešení podle rovnice (2.11).

Vliv okrajové podmínky

Z výsledků je zřejmý velký vliv zvolené okrajové podmínky (viz obr. 6.8) na stabilitní únosnost. Možný posuv okraje v radiálním směru způsobí značné snížení stabilitní únosnosti konstrukce.

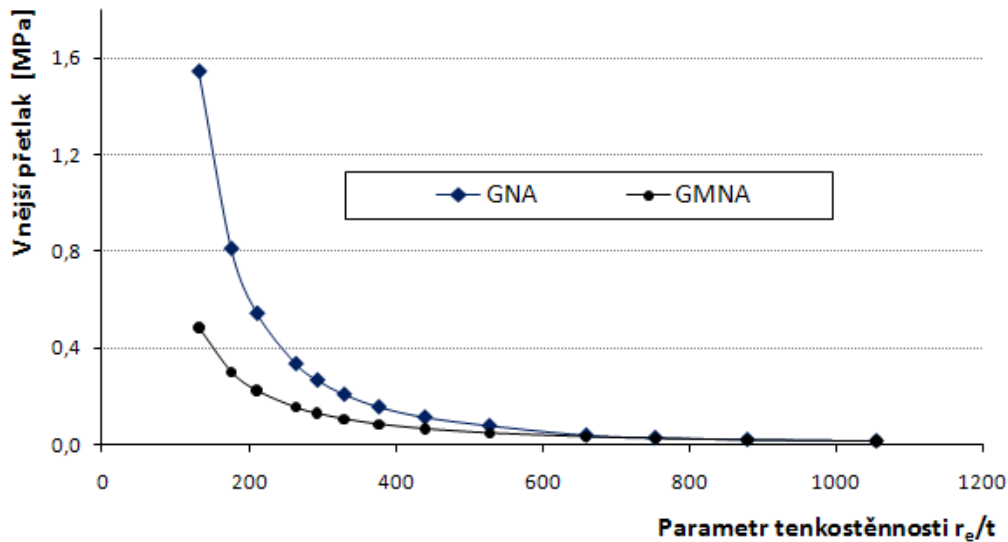


Obr. 6.8 Porovnání vlivu okrajových podmínek na únosnost kuželové skořepiny ($\alpha_c = 10^\circ$, analýza GNA)

Vliv pružně-plastického chování materiálu

Na obrázku 6.9 je uvedeno porovnání výsledků numerických analýz typu GNA a GMNA kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 10^\circ$ s volně podepřeným okrajem. Vliv plasticity materiálu je výrazný u skořepin s nižším parametrem tenkostěnnosti (větší tloušťka stěny). Ztráta stability skořepin s vyšším parametrem tenkostěnnosti probíhá v elastické oblasti. U skořepin s nižším parametrem tenkostěnnosti dochází ke ztrátě stability v pružně-

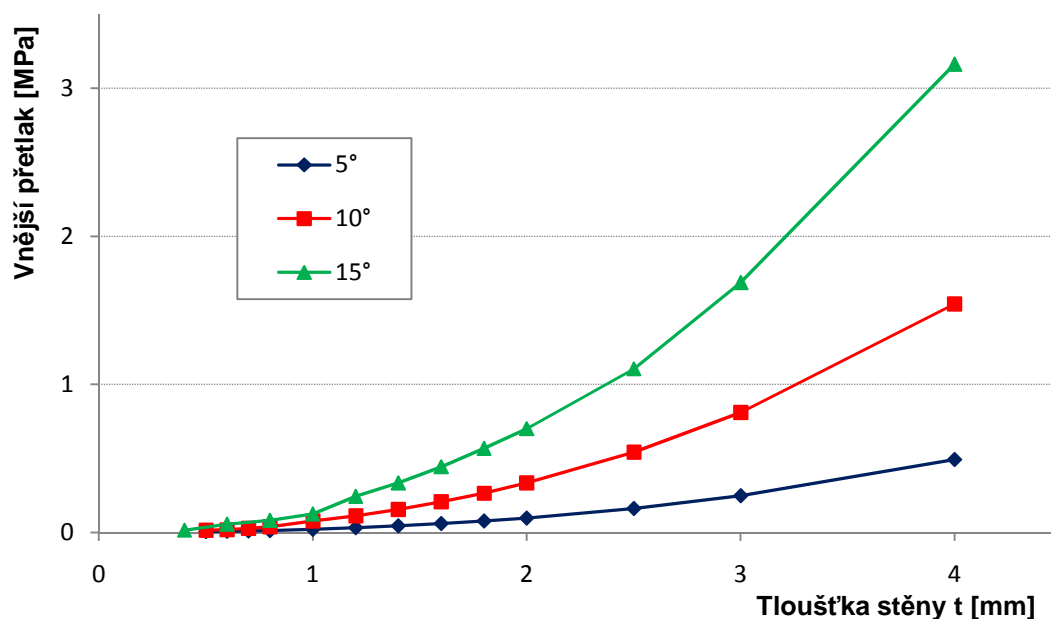
plastické oblasti. Vliv plasticity materiálu zohledňuje v evropském doporučení součinitel χ (viz obr. 2.11 a tab. 2.2). Předmětem dizertační práce je navržení metody výpočtu elastického limitního přetlaku, stanovení vlivu nelineárního chování materiálu je jedním z cílů dalšího výzkumu.



Obr. 6.9 Porovnání výsledků numerických analýz typu GNA a GMNA (prostě podepřená kuželové skořepina s okrajovým úhlem $\alpha_c = 10^\circ$)

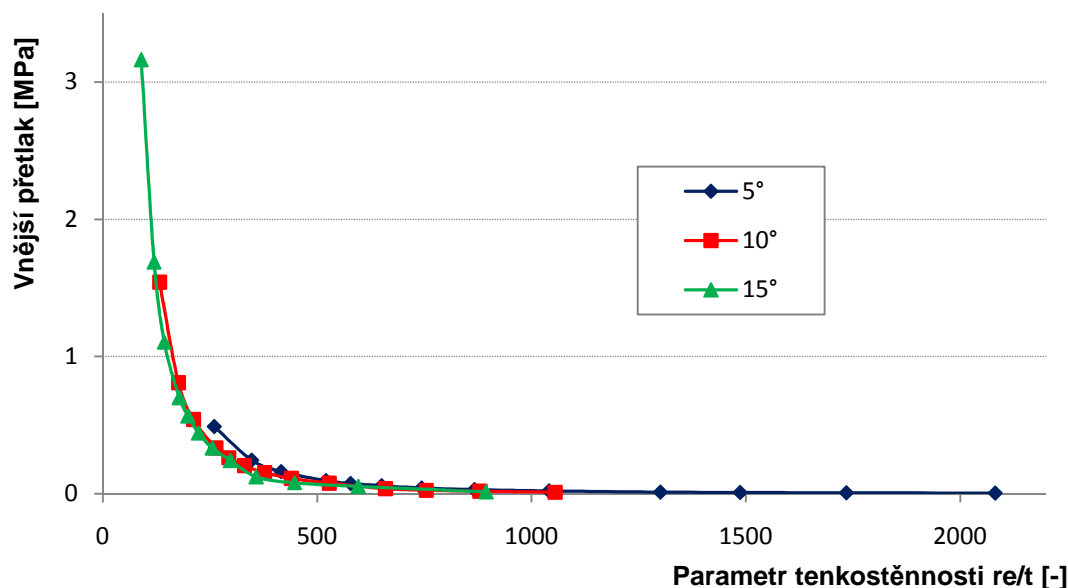
Vliv velikosti okrajového úhlu

Aby bylo možné porovnat vliv okrajového úhlu na stabilitní únosnost, je v grafu na obr. 6.11 uvedena závislost limitního přetlaku kuželových skořepin s různým okrajovým úhlem α_c na tloušťce pláště skořepiny. Z průběhů křivek je dobře patrné, že kuželová skořepina s větším okrajovým úhlem při stejné tloušťce stěny pláště má větší únosnost.

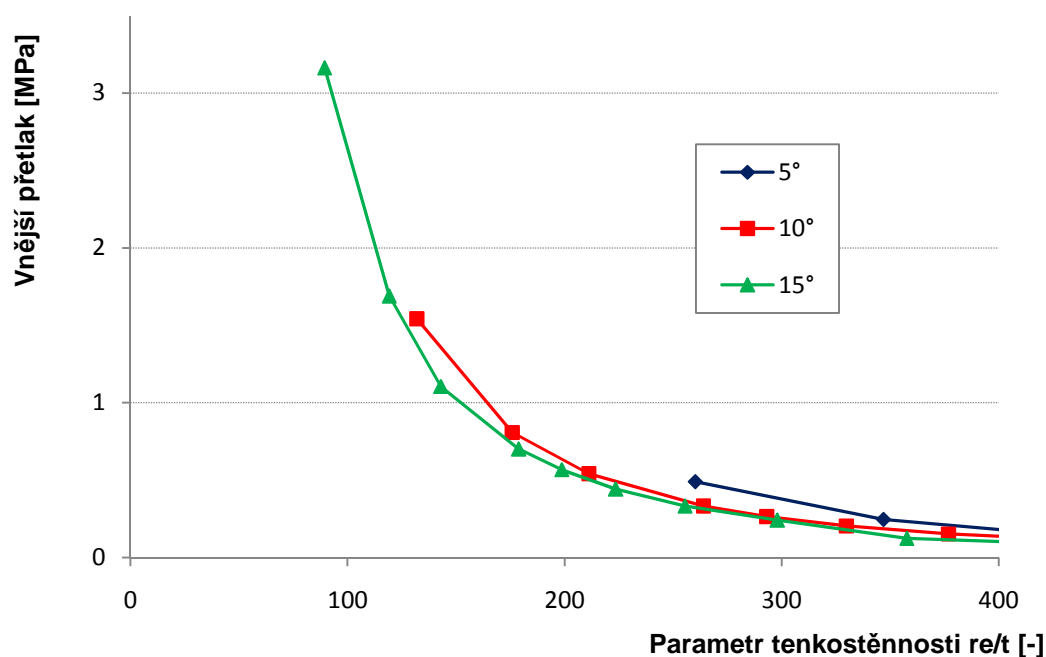


Obr. 6.11 Vliv velikosti okrajového úhlu kuželové skořepiny na stabilitní únosnost; analýza GNA, prostě podepření okraje

Na obrázku 6.12 jsou uvedeny závislosti hodnot limitního přetlaku p_{GNA} z předchozího grafu na parametru tenkostěnnosti r_e/t . Z grafů na obrázcích 6.12 a 6.13 je patrné, že skořepiny s menším okrajovým úhlem se stejným parametrem tenkostěnnosti jsou únosnější. Poloměr oskulačního válce je podle rovnice (2.2b) větší pro kuželové skořepiny s nižším okrajovým úhlem. Z tohoto důvodu je u kuželové skořepiny s menším okrajovým úhlem se stejnou tloušťkou stěny větší i bezrozměrný parametr tenkostěnnosti r_e/t . Tzn., aby měly dvě kuželové skořepiny stejný parametr tenkostěnnosti r_e/t , musí mít skořepina s menším okrajovým úhlem větší tloušťku stěny. Z tohoto důvodu je potom kuželová skořepina s menším okrajovým úhlem na první pohled překvapivě únosnější.



Obr. 6.12 Závislost limitního přetlaku p_{GNA} prostě podepřených kuželových skořepin s různým okrajovým úhlem na parametru tenkostěnnosti



Obr. 6.13 Závislost limitního přetlaku p_{GNA} prostě podepřených kuželových skořepin s různým okrajovým úhlem na parametru tenkostěnnosti - detail

6.3 Kloubově uložený okraj kuželové skořepiny

V této kapitole jsou zkoumány kuželové skořepiny okrajovou podmínkou kloubového uložení, která reprezentuje nekonečně velkou radiální tuhost. Výsledky limitního přetlaku kuželových skořepin s různými okrajovými úhly a parametrem tenkostěnnosti jsou uvedeny v tabulce 6.1. V tabulce jsou navíc uvedeny hodnoty kritického přetlaku p_{kr} vypočítaného pomocí vztahů uvedených v ECCS. V tabulce jsou zvýrazněny oblasti elastické ztráty stability (viz odst. 2.3.3). V této oblasti by nemělo docházet k ovlivnění únosnosti pružně-plastickým chováním materiálu. Kuželové skořepiny s vyšší tloušťkou stěny (nad zkoumaným rozsahem) se pohybují v plastické oblasti ztráty stability (viz odst. 2.3.3)

Tab. 6.1 Výsledky numerických analýz kloubově uložené kuželové skořepiny

r_1 [mm]	α_c [°]		α_c [rad]	h [mm]	l [mm]	l_e [mm]	r_e [mm]		E [MPa]				
150	5		0,087266	13,1233	150,573	107,726	1040,67		2,00E+05				
t [mm]	4,0	3,0	2,5	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5
r_e/t	260,2	346,9	416,3	520,3	578,2	650,4	743,3	867,2	1040,7	1300,8	1486,7	1734,5	2081,3
p_{GNA} [MPa]	1,041	0,576	0,399	0,254	0,206	0,163	0,125	0,091	0,064	0,0334	0,0239	0,0169	0,0116
p_{GMNA} [MPa]	0,654	0,415	0,309	0,212	0,177	0,147	0,116	0,087	0,0629	0,034	0,024	0,0168	0,0116
p_{kr} [MPa]	1,628	0,793	0,503	0,288	0,221	0,165	0,118	0,080	0,0509	0,029	0,0209	0,0142	0,009
r_1 [mm]	α_c [°]		α_c [rad]	h [mm]	l [mm]	l_e [mm]	r_e [mm]		E [MPa]				
150	10		0,174533	26,4490471	152,314	107,310	527,675		2,00E+05				
t [mm]	4,0	3,0	2,5	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5
r_e/t	131,9	175,9	211,1	263,8	293,2	329,8	376,9	439,7	527,7	659,6	753,8	879,5	1055,4
p_{GNA} [MPa]	4,028	2,266	1,578	1,015	0,706	0,516	0,373	0,263	0,1795	0,091	0,0637	0,04788	0,0287
p_{GMNA} [MPa]	1,3399	0,920	0,721	0,5328	0,4603	0,3898	0,321	0,247	0,1742	0,091	0,0634	0,0475	0,0289
p_{kr} [MPa]	4,527	2,205	1,398	0,80	0,615	0,458	0,328	0,223	0,1415	0,081	0,058	0,0394	0,025
r_1 [mm]	α_c [°]		α_c [rad]	h [mm]	l [mm]	l_e [mm]	r_e [mm]		E [MPa]				
150	15		0,261799	40,19238	155,2914	107,714	357,6212		2,00E+05				
t [mm]	4,0	3,0	2,5	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,4
r_e/t	89,4	119,2	143,0	178,8	198,7	223,5	255,4	298,0	357,6	447,0	510,9	596,0	894,1
p_{GNA} [MPa]	8,947	4,669	2,82	1,6500	1,325	0,994	0,715	0,472	0,312	0,1749	0,1234	0,0837	0,0316
p_{GMNA} [MPa]	1,922	1,346	1,0725	0,816	0,71	0,6103	0,513	0,406	0,294	0,175	0,124	0,0837	0,0316
p_{kr} [MPa]	8,083	3,937	2,496	1,4288	1,098	0,818	0,586	0,398	0,253	0,1446	0,1036	0,0704	0,0256

Z uvedených hodnot je patrný zajímavý fakt, že v případě kloubově uložených kuželových skořepin (zcela zamezen radiální posuv) není výrazný rozdíl mezi hodnotami kritického přetlaku vypočítaného analyticky a numericky (v případě numerické analýzy se jedná o limitní přetlak). Na nelinearitě problematiky stabilitní únosnosti kuželových skořepin s malým vzepětím zřejmě bude mít výraznější podíl možný posuv okraje kuželové skořepiny v radiálním směru (prostě podepřené kuželové skořepiny a kuželové skořepiny s okrajovým prstencem) než hodnota okrajového úhlu.

Závislost mezního přetlaku (výsledky analýz GNA a GMNA) na parametru tenkostěnnosti skořepiny r_e/t jsou vykresleny na obrázcích 6.13 ÷ 6.15. Křivky závislosti mezního přetlaku s uvažováním materiálové nelinearity, jsou na obrázcích uvedeny informativně. Otázka vlivu pružně-plastického chování materiálu na stabilitní únosnost je předmětem dalšího výzkumu.

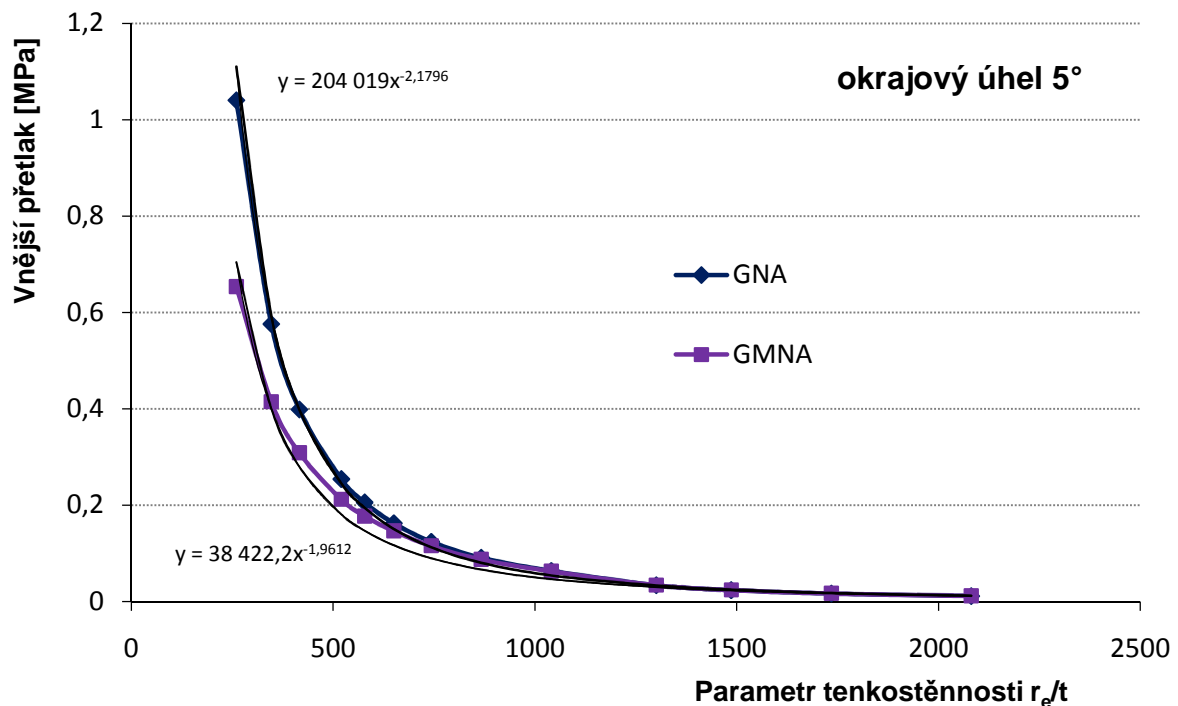
Vzhledem k mocninnému charakteru uvedených závislostí, je možné sestavit regresní křivky podle rovnice (2.21).

$$p_{el} = K \cdot E \frac{1}{\omega} \left(\frac{t}{r_e} \right)^m$$

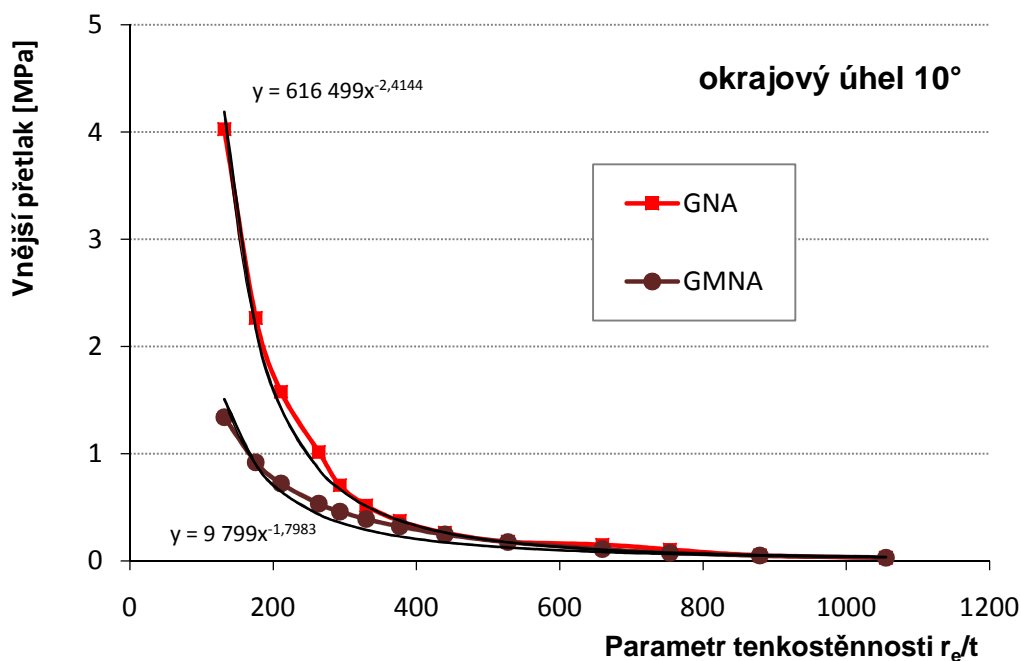
kde

$$\omega = \frac{l_e}{r_e} \sqrt{\frac{r_e}{t}} \quad (6.1)$$

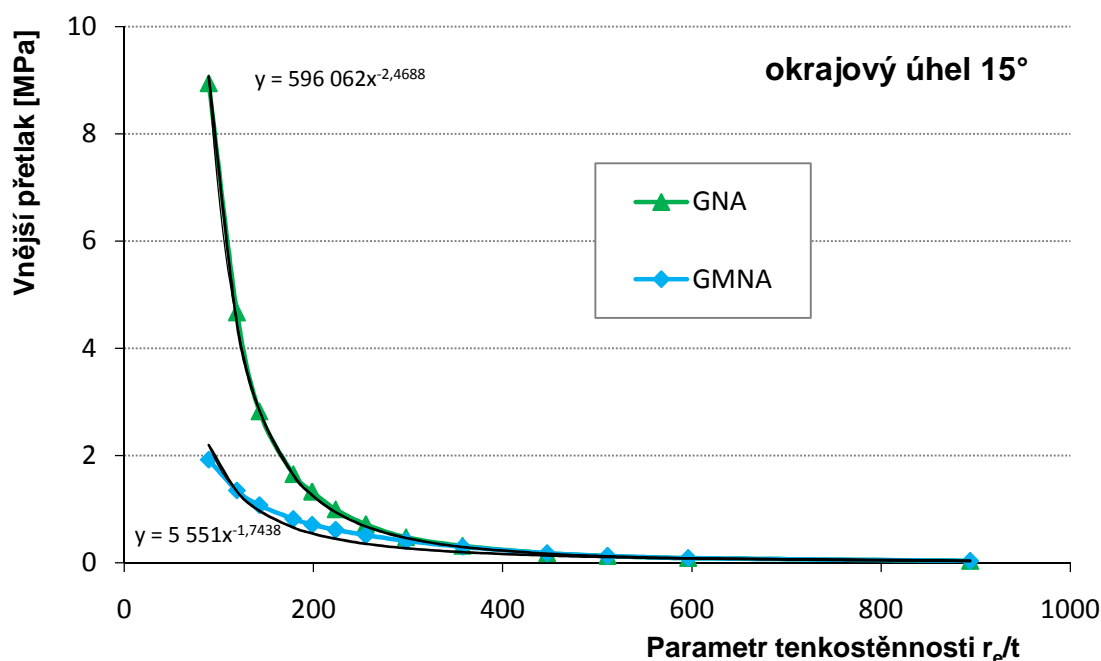
Na obrázcích 6.13 ÷ 6.15 jsou také zakresleny regresní křivky s rovnicemi.



Obr. 6.13 Závislost mezního přetlaku na parametru tenkostěnnosti – kloubově uložená kuželová skořepina s okrajovým úhlem $\alpha_c = 5^\circ$; zobrazeny regresní rovnice



Obr. 6.14 Závislost mezního přetlaku na parametru tenkostěnnosti – kloubově uložená kuželová skořepina s okrajovým úhlem $\alpha_c = 10^\circ$; zobrazeny regresní rovnice



Obr. 6.15 Závislost mezního přetlaku na parametru tenkostěnnosti – kloubově uložená kuželová skořepina s okrajovým úhlem $\alpha_c = 15^\circ$; zobrazeny regresní rovnice

Z uvedených průběhů závislostí vnějšího přetlaku na parametru tenkostěnnosti a jejich regresních křivek je patrna velmi dobrá shoda u křivek mezního přetlaku počítaného bez uvažování pružně-plastického chování materiálu (analýzy GNA). Pro stanovení vhodných regresních křivek výsledků analýz GMNA by bylo potřeba zvětšit rozsah parametru tenkostěnnosti kuželové skořepiny dále do pružně-plastické oblasti ztráty stability (viz tab. 2.2

a obr. 2.11). Uvedené křivky výsledků analýz GMNA platí pouze pro konkrétní materiál (mez kluzu $f_{y,k} = 180\text{MPa}$). Z tohoto důvodu není možné výsledky zobecnit a vliv plasticity musí být zohledněn jiným způsobem. Přes uvedené nedostatky jsou výsledky analýz GMNA dobrým základem pro další výzkum pružně-plastického chování kuželových skořepin s malým vzepětím.

Rovnice regresních křivek mají tvar mocninné funkce

$$p_{el} = K' \cdot \left(\frac{t}{r_e}\right)^m = K' \cdot \left(\frac{r_e}{t}\right)^{-m} \quad (6.2)$$

kde K' je koeficient mocninné křivky, v němž je již zahrnut vliv materiálu a geometrie skořepiny prostřednictvím modulu pružnosti E a bezrozměrného parametru ω (6.1)

$$K' = K \cdot E \frac{1}{\omega} \quad (6.3)$$

Koeficienty K' a m s uvažováním elastického chování materiálu (analýzy GNA) kloubově uložené skořepiny jsou uvedeny v tabulce 6.2.

Tab. 6.2 Koeficienty regresních křivek – kloubově uložený okraj

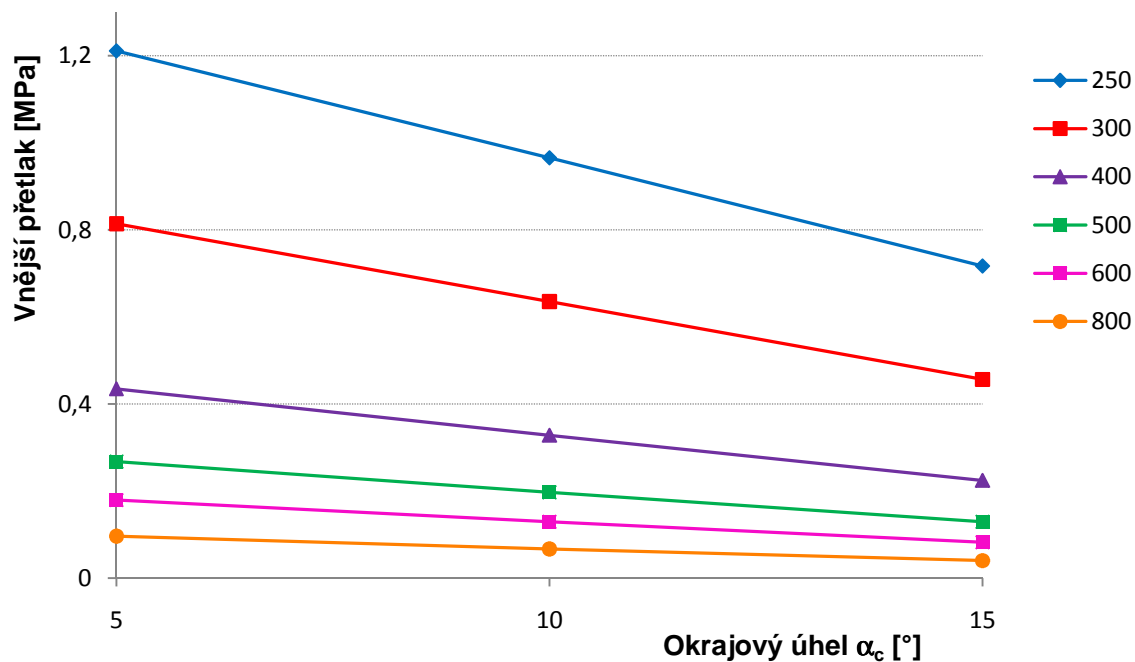
Okrajový úhel α_c [°]	Rozsah r_e/t	Regresní koeficienty	
		K'	m
5	260÷2080	204019	2,1796
10	130÷1050	616499	2,4144
15	90÷890	596062	2,4688

Dosažením nalezených koeficientů do rovnice vnějšího přetlaku (6.2) je možné vypočítat limitní přetlak kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ a konkrétním parametrem tenkostěnnosti (z uvedeného rozsahu)

6.3.1 Zobecnění výsledků

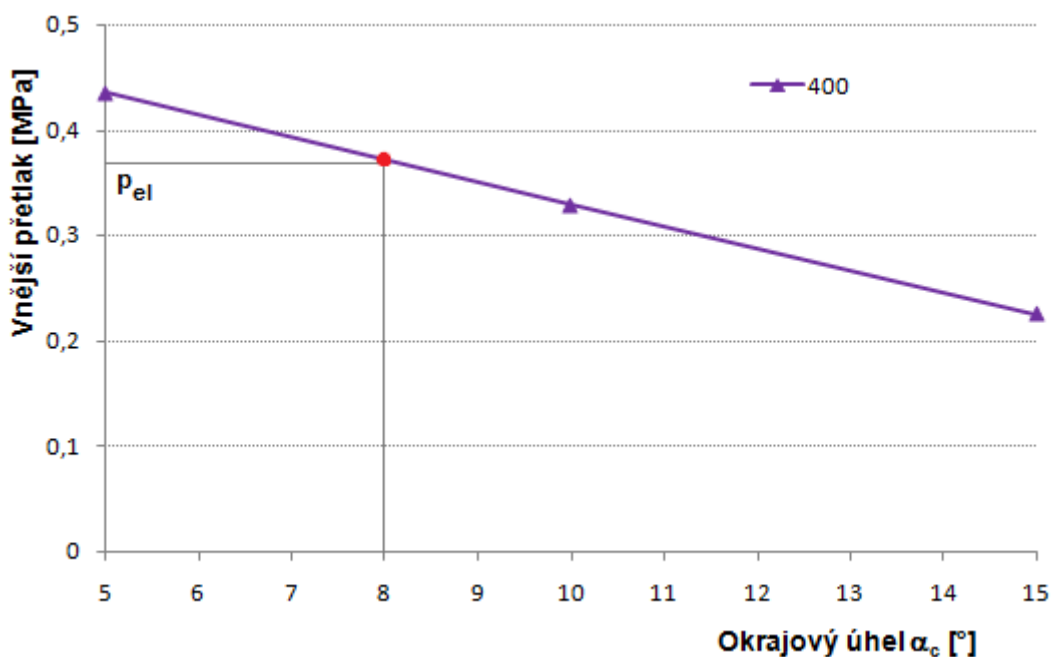
Koeficienty regresních křivek platí pro konkrétní hodnoty okrajových úhlů. V této kapitole je provedeno zobecnění dosažených výsledků, aby bylo možné vypočítat limitní přetlak kuželové skořepiny s libovolnou hodnotou okrajového úhlu (v rozsahu $\alpha_c = 5^\circ \div 15^\circ$).

V následujícím grafu (obr. 6.16) jsou uvedeny závislosti limitního přetlaku vypočítané pomocí rovnice (6.2) s příslušnými koeficienty (z tabulky 6.2) na velikosti okrajového úhlu. Jednotlivé křivky přísluší konkrétnímu parametru r_e/t . Z průběhu závislostí je zřejmé, že hodnotu limitního přetlaku kuželové skořepiny s velikostí okrajového úhlu mezi hodnotami $5^\circ, 10^\circ$ a 15° je možné lineárně interpolovat.



Obr. 6.16 Závislost mezního přetlaku na velikosti okrajového úhlu α_c pro různé hodnoty parametru tenkostěnnosti skořepiny r_e/t ; kloubové uložení

Výpočet limitního přetlaku kuželové skořepiny s okrajovým úhlem např. $\alpha_c = 8^\circ$ a parametrem tenkostěnnosti $r_e/t = 400$ pomocí lineární interpolace je ukázán na obr. 6.17.



Obr. 6.17 Limitní přetlak kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 8^\circ$ a parametrem tenkostěnnosti $r_e/t = 400$

6.3.2 Kontrola výsledků – ukázkový případ

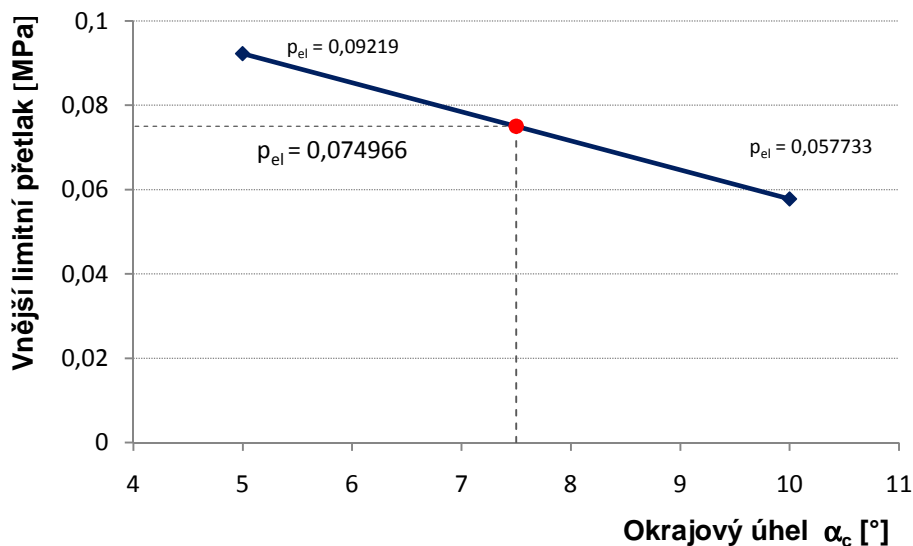
V následujícím textu jsou provedeny výpočty mezního zatížení kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 7,5^\circ$, poloměrem spodního okraje $r_2 = 2100\text{mm}$ a tloušťkou stěny $t = 12\text{mm}$. Je provedena numerická analýza typu GNA. Mezní přetlak vypočítaný numericky je porovnán s hodnotou získanou lineární interpolací mezi hodnotami limitního přtlaku pro kuželové skořepiny s okrajovým úhlem 5° a 10° (viz obr. 6.17) se stejným parametrem tenkostěnnosti. V tabulce 6.3 jsou uvedeny rozměry zkoumané kuželové skořepiny, poloměr náhradního válce r_e je vypočítán podle rovnice (2.2b)

$$r_e = 0,71r_2 \frac{1-0,1\beta_c}{\cos\beta_c}$$

Tab. 6.3 Parametry kuželové skořepiny ukázkového případu

$\alpha_c [^\circ]$	$t [mm]$	$r_2 [mm]$	$r_e [mm]$	$r_e/t [-]$
7,5	12	2100	9778,2	814,85

Na obrázku 6.18 je uvedena hodnota limitního přtlaku kuželové skořepiny. V grafu jsou navíc uvedeny hodnoty limitního přtlaku kuželových skořepin s okrajovým úhlem 5° a 10° se stejným parametrem tenkostěnnosti.



Obr. 6.18 Lineární interpolace limitního přtlaku kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 7,5^\circ$

Výsledek numerické analýzy GNA a vypočítaná hodnota limitního přtlaku jsou uvedeny v tabulce 6.4, v posledním řádku tabulky je uvedena relativní chyba výsledku.

Tab. 6.4 Porovnání hodnot limitního přtlaku vypočítaných numericky a pomocí lineární interpolace

$p_{GNA} [MPa]$	$p_{el} [MPa]$
0,07481	0,074966
0,2%	

6.4 Prostě podepřený okraj kuželové skořepiny

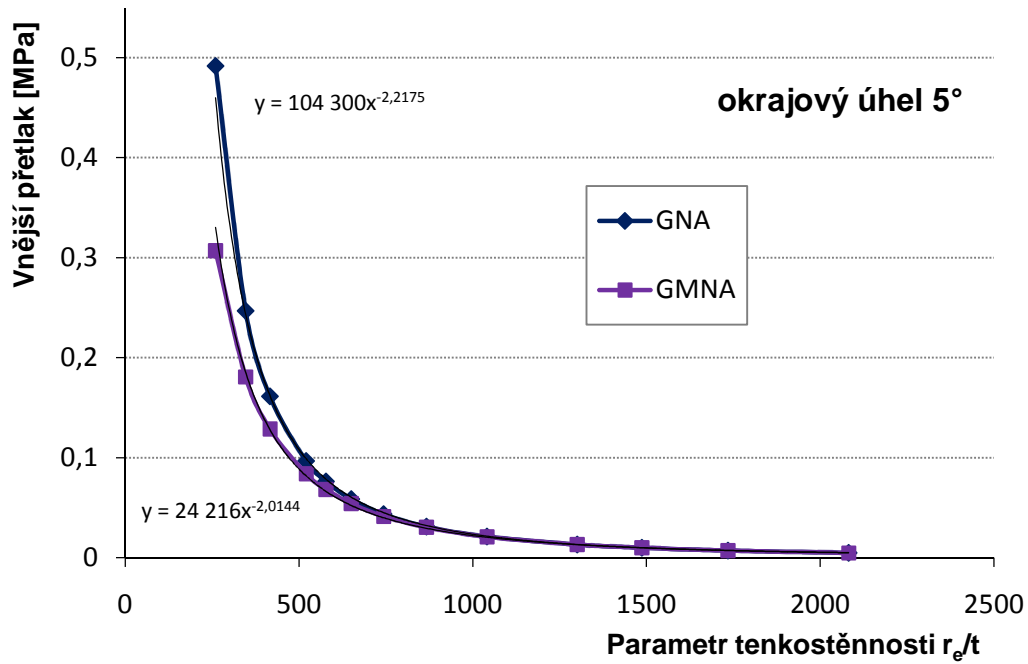
V této kapitole jsou zkoumány kuželové skořepiny okrajovou podmínkou prostého podepření, která reprezentuje nulovou radiální tuhost. Výsledky limitního přetlaku kuželových skořepin s různými okrajovými úhly a parametrem tenkostěnnosti jsou uvedeny v tabulce 6.5.

Tab. 6.5 Výsledky numerických analýz prostě podepřené kuželové skořepiny $\alpha_c = 10^\circ$

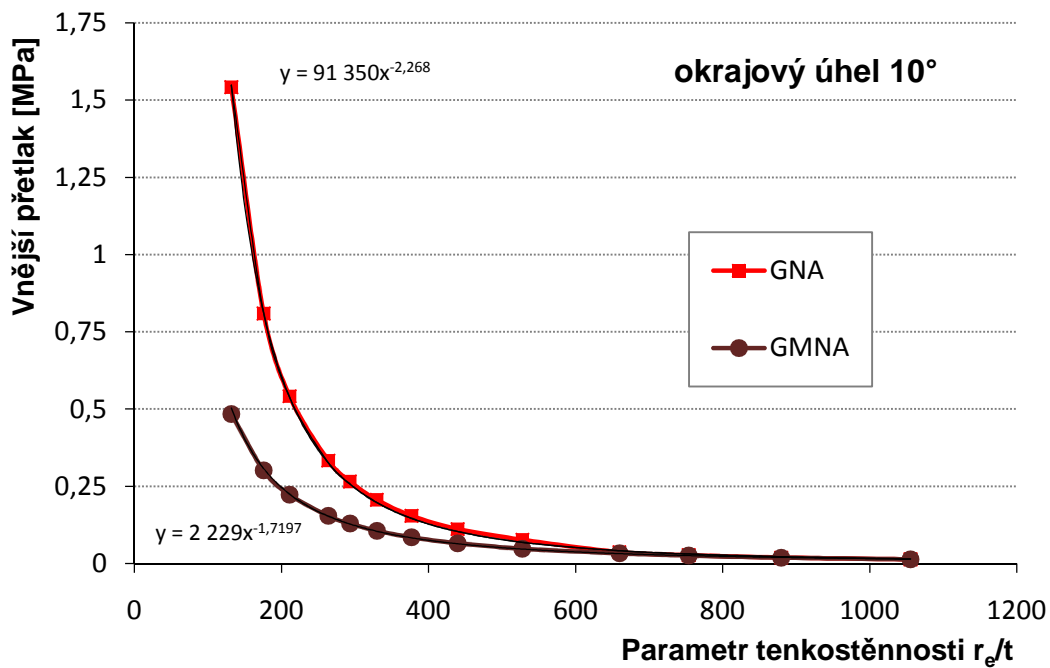
r_1 [mm]	α_c [°]		α_c [rad]		h [mm]		l [mm]		l_e [mm]		r_e [mm]		E [MPa]
150	5		0,087266		13,1233		150,573		107,726		1040,67		2,00E+05
t [mm]	4,0	3,0	2,5	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5
r_e/t	260,2	346,9	416,3	520,3	578,2	650,4	743,3	867,2	1040,7	1300,8	1486,7	1734,5	2081,3
p_{GNA} [MPa]	0,492	0,2467	0,161	0,0967	0,0762	0,0586	0,0436	0,031	0,0209	0,0129	0,0097	0,0070	0,0048
p_{GMNA} [MPa]	0,307	0,1809	0,1286	0,0837	0,068	0,0539	0,0413	0,0303	0,0207	0,0129	0,0097	0,0070	0,0048
r_1 [mm]	α_c [°]		α_c [rad]		h [mm]		l [mm]		l_e [mm]		r_e [mm]		E [MPa]
150	10		0,174533		26,4490471		152,314		107,310		527,675		2,00E+05
t [mm]	4,0	3,0	2,5	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5
r_e/t	131,9	175,9	211,1	263,8	293,2	329,8	376,9	439,7	527,7	659,6	753,8	879,5	1055,4
p_{GNA} [MPa]	1,543	0,8095	0,542	0,333	0,2655	0,206	0,155	0,112	0,0769	0,03716	0,0272	0,0195	0,0136
p_{GMNA} [MPa]	0,484	0,3013	0,2229	0,1538	0,1289	0,106	0,0847	0,0653	0,0480	0,03195	0,0254	0,0187	0,0132
r_1 [mm]	α_c [°]		α_c [rad]		h [mm]		l [mm]		l_e [mm]		r_e [mm]		E [MPa]
150	15		0,261799		40,19238		155,2914		107,714		357,6212		2,00E+05
t [mm]	4,0	3,0	2,5	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,4
r_e/t	89,4	119,2	143,0	178,8	198,7	223,5	255,4	298,0	357,6	447,0	510,9	596,0	894
p_{GNA} [MPa]	3,162	1,688	1,105	0,7005	0,5675	0,4428	0,3339	0,2429	0,1244	0,081	0,0547	0,0405	0,0148
p_{GMNA} [MPa]	0,592	0,372	0,2777	0,1937	0,1634	0,1349	0,1091	0,0850	0,063	0,0441	0,0277	0,0358	0,015

Závislost mezního přetlaku (výsledky analýz GNA a GMNA) na parametru tenkostěnnosti skořepiny r_e/t jsou vykresleny na obrázcích 6.19 ÷ 6.21. Křivky závislosti mezního přetlaku s uvažováním materiálové nelinearity, jsou v obrázcích uvedeny informativně. Otázka vlivu pružně-plastického chování materiálu na stabilitní únosnost je předmětem dalšího výzkumu, kde bude hledán obdobný součinitel, jako je v ECCS součinitel χ (viz tab. 2.2).

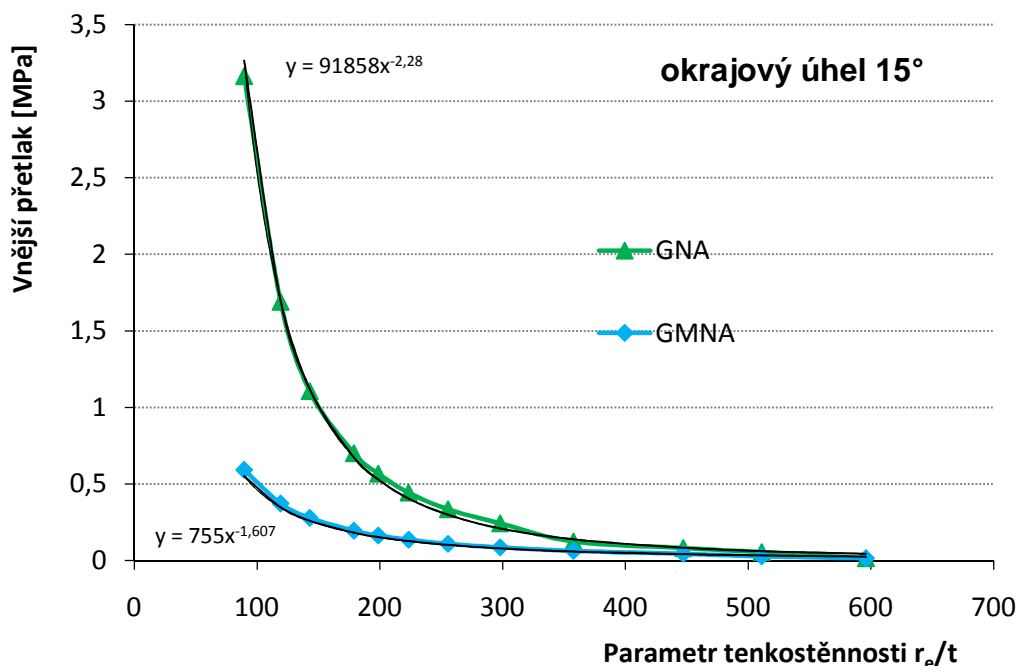
Vzhledem k mocninnému charakteru uvedených závislostí, je možné sestavit regresní křivky podle rovnice (2.21).



Obr. 6.19 Závislost mezního přetlaku na parametru tenkostěnnosti – prostě podepřený okraj kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 5^\circ$; zobrazena regresní rovnice



Obr. 6.20 Závislost mezního přetlaku na parametru tenkostěnnosti – prostě podepřený okraj kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 10^\circ$; zobrazena regresní rovnice



Obr. 6.21 Závislost mezního přetlaku na parametru tenkostěnnosti – prostě podepřený okraj kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 15^\circ$; zobrazena regresní rovnice

Rovnice regresních křivek mají tvar mocninné funkce (6.2)

$$p_{el} = K' \cdot \left(\frac{t}{r_e}\right)^m = K' \cdot \left(\frac{r_e}{t}\right)^{-m}$$

kde K' je koeficient mocninné křivky, v němž je již zahrnut vliv materiálu a geometrie skořepiny prostřednictvím modulu pružnosti E a bezrozměrného parametru ω (6.1)

$$K' = K \cdot E \frac{1}{\omega}$$

Koeficienty K' a m s uvažováním elastického chování materiálu (analýzy GNA) prostě podepřené skořepiny jsou uvedeny v tabulce 6.6.

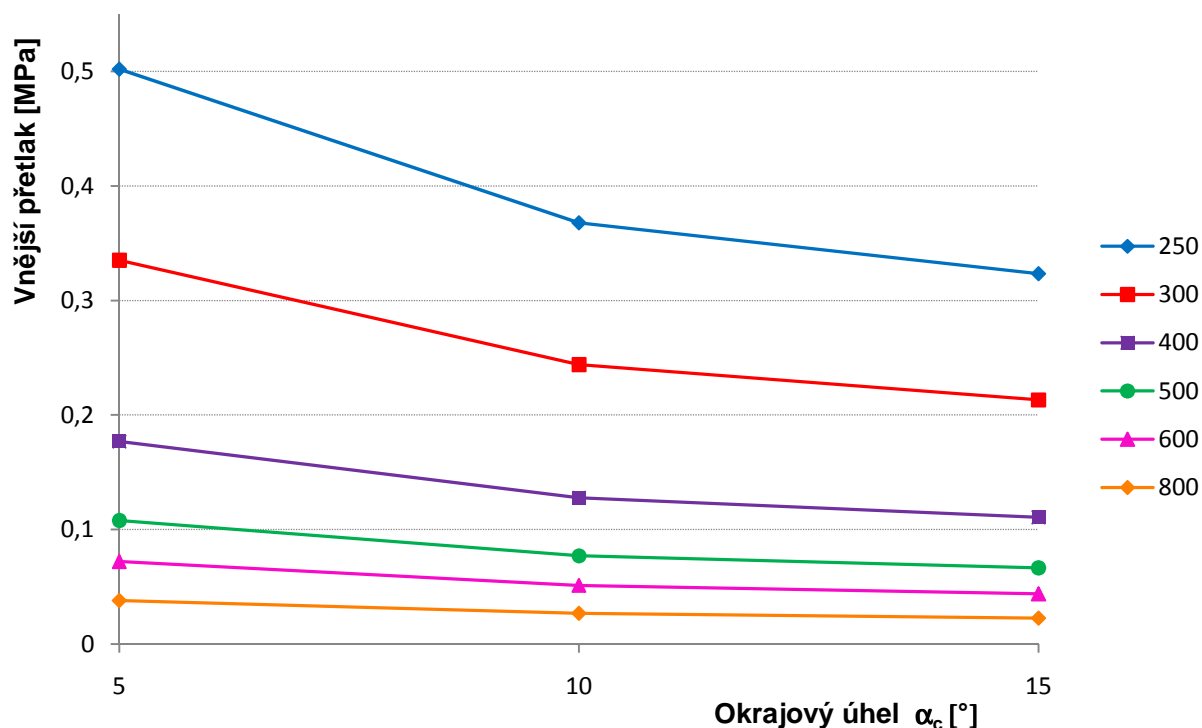
Tab. 6.6 Koeficienty regresních křivek – prostě podepřený okraj

Okrajový úhel α_c [°]	Rozsah r_e/t	Regresní koeficienty	
		K'	m
5	260÷2080	104300	2,2175
10	130÷1050	91350	2,2499
15	90÷890	91858	2,28

6.4.1 Zobecnění výsledků

Koeficienty regresních křivek platí pro konkrétní hodnoty okrajových úhlů. V této kapitole je provedeno zobecnění dosažených výsledků, aby bylo možné vypočítat limitní přetlak kuželové skořepiny s libovolnou hodnotou okrajového úhlu (v rozsahu $\alpha_c = 5^\circ \div 15^\circ$). V následujícím grafu (obr. 6.20) jsou uvedeny závislosti limitního přetlaku vypočítané

pomocí rovnice (6.2) s příslušnými koeficienty (z tabulky 6.6) na velikosti okrajového úhlu. Jednotlivé křivky přísluší konkrétnímu parametru r_e/t . Z průběhu závislosti je zřejmé, že hodnotu limitního přetlaku kuželové skořepiny s velikostí okrajového úhlu mezi hodnotami 5° , 10° a 15° je možné lineárně interpolovat.



Obr. 6.20 Závislost mezního přetlaku na velikosti okrajového úhlu α_c pro různé hodnoty parametru tenkostěnnosti skořepiny; prosté podepření

6.4.2 Kontrola výsledků – ukázkový případ

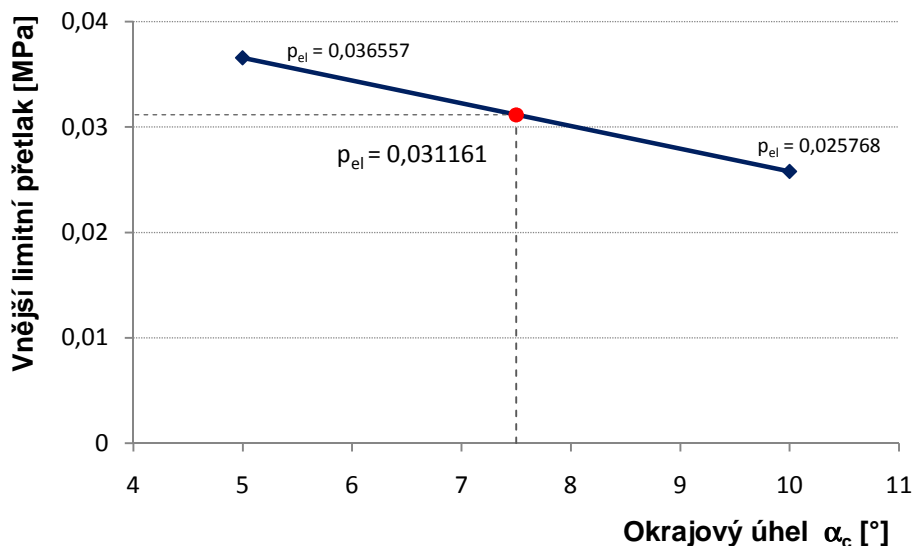
V následujícím textu jsou provedeny výpočty mezního zatížení kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 7,5^\circ$, poloměrem spodního okraje $r_2 = 2100\text{mm}$ a tloušťkou stěny $t = 12\text{mm}$. Je provedena numerická analýza typu GNA. Mezní přetlak vypočítaný numericky je porovnán s hodnotou získanou lineární interpolací mezi hodnotami limitního přetlaku pro kuželové skořepiny s okrajovým úhlem 5° a 10° (viz obr. 6.17) se stejným parametrem tenkostěnnosti. V tabulce 6.7 jsou uvedeny rozměry zkoumané kuželové skořepiny, poloměr náhradního válce r_e je vypočítán podle rovnice (2.2b)

$$r_e = 0,71r_2 \frac{1-0,1\beta_c}{\cos \beta_c}$$

Tab. 6.7 Parametry kuželové skořepiny ukázkového případu

α_c [°]	t [mm]	r_2 [mm]	r_e [mm]	r_e/t [-]
7,5	12	2100	9778,2	814,85

Na obrázku 6.21 je uvedena hodnota limitního přetlaku kuželové skořepiny. V grafu jsou navíc uvedeny hodnoty limitního přetlaku kuželových skořepin s okrajovým úhlem 5° a 10° se stejným parametrem tenkostěnnosti.



Obr. 6.21 Lineární interpolace limitního přetlaku prostě podepřené kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 7,5^\circ$

Výsledek numerické analýzy GNA a vypočítaná hodnota limitního přetlaku jsou uvedeny v tabulce 6.8, v posledním řádku tabulky je uvedena relativní chyba výsledku vztažená k limitnímu přetlaku p_{GNA} .

Tab. 6.8 Porovnání hodnot limitního přetlaku vypočítaných numericky a pomocí lineární interpolace

$p_{GNA}[MPa]$	$p_{el}[MPa]$
0,03215	0,031161
3,07%	

6.5 Vyhodnocení

V této kapitole byla navržena jednoduchá metoda řešení únosnosti kuželových skořepin s okrajovým úhlem z rozsahu $5^\circ \div 15^\circ$ spočívající v lineární interpolaci. Z hodnot limitního přetlaku ukázkového příkladu uvedených v tabulkách 6.4 a 6.8 je patrna dobrá shoda numerických a teoretických výsledků (relativní chyba je v ukázkových příkladech do 3%). Je tedy možné říci, že navržená metoda je vhodná, ovšem výsledky je třeba dále experimentálně ověřit.

Vliv pružně-plastického chování materiálu není v navržené metodě zohledněn. V této kapitole byly nalezeny regresní mocninné křivky s koeficienty pro výsledky GMNA analýz. Tyto výsledky však není možné zobecnit, jelikož platí pouze pro konkrétní materiál s konkrétní mezí kluzu. Otázka vlivu pružně-plastického chování materiálu je předmětem dalšího výzkumu.

7 KUŽELOVÉ SKOŘEPINY S VÝZTUŽNÝMI PRSTENCI

V předchozí kapitole byly uvedeny vztahy a koeficienty pro výpočet únosnosti prostě podepřené a kloubově uložené kuželové skořepiny. Tyto případy uložení reprezentují krajní meze, tedy nekonečnou a nulovou radiální tuhost. V praxi jsou ale využívány skořepiny s okrajovými podmínkami, které se nacházejí mezi těmito dvěma krajními případy uložení. Spodní okraj kuželové skořepiny je opatřen okrajovým prstencem, který reprezentuje konečnou radiální tuhost. V této kapitole je podrobně analyzován vliv konečné radiální tuhosti na stabilitní únosnost kuželových skořepin s malým vzepětím. Cílem je opět sestavení jednoduchých vztahů s příslušnými koeficienty, pomocí kterých bude možné vypočítat vnější limitní přetlak konkrétní kuželové skořepiny. Rozsah parametru tenkostěnnosti byl volen tak, aby byla podrobně popsána elastická oblast ztráty stability (viz součinitel χ v tab. 2.2).

7.1 Ztráta stability kuželových skořepin s okrajovými prstenci

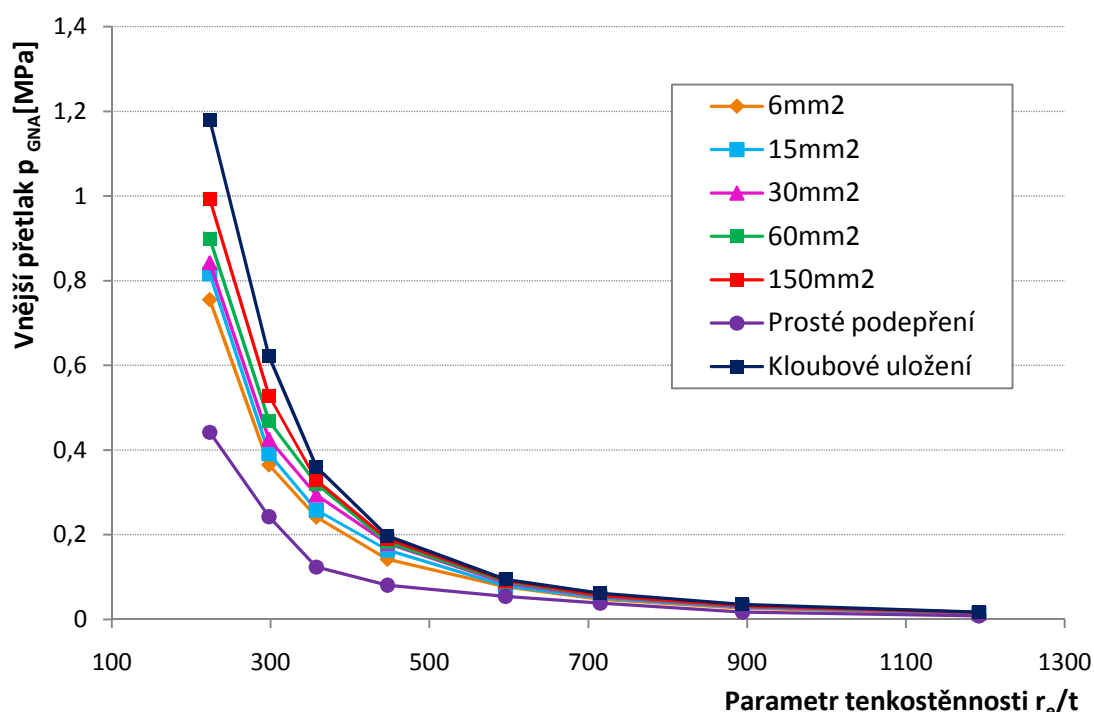
V této kapitole jsou analyzovány kuželové skořepiny s okrajovými úhly $\alpha_c = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$. Průřezová plocha okrajového prstence je měněna v rozsahu $A_r = 6 \div 150 \text{ mm}^2$. V kapitole 5 bylo prokázáno, že stabilitní únosnost kuželové skořepiny není ovlivněna natočením okrajového prstence. Díky této skutečnosti je možné předpokládat, že na únosnost kužele má vliv pouze velikost průřezové plochy okrajového prstence. Numerické modely jsou zatíženy vnějším jednotkovým přetlakem. V tabulce 7.1 jsou uvedeny výsledky numerických analýz typu GNA pro zkoumané rozsahy parametru tenkostěnnosti.

Tab. 7.1 Výsledky numerických analýz kuželových skořepin s okrajovým prstencem

r_2 [mm]		α_c [°]		l_e [mm]		r_e [mm]		E [MPa]		μ [-]
150		5		107,726		1040,67		2,00E+05		0,3
A_r [mm ²]	t [mm]	3,0	2,5	2,0	1,6	1,2	1,0	0,8	0,6	
	r_e/t	346,9	416,3	520,3	650,4	867,2	1040,7	1300,8	1734,5	
6	p_{GNA} [MPa]	0,7551	0,4872	0,2732	0,1681	0,0878	0,0589	0,0367	0,0205	
15		0,7619	0,4933	0,2910	0,1737	0,0923	0,0631	0,0402	0,0232	
30		0,7725	0,5056	0,3002	0,1818	0,0993	0,0691	0,0452	0,0231	
60		0,7965	0,5253	0,3365	0,1966	0,1109	0,0776	0,0472	0,0270	
150		0,8517	0,5709	0,3563	0,2285	0,1323	0,0944	0,5552	0,0289	
r_2 [mm]		α_c [°]		l_e [mm]		r_e [mm]		E [MPa]		μ [-]
150		10		107,310		527,675		2,00E+05		0,3
A_r [mm ²]	t [mm]	2,0	1,6	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	
	r_e/t	264	329,8	439,7	527,7	659,6	879,5	1055,4	1320	
6	p_{GNA} [MPa]	0,3333	0,5640	0,2115	0,1325	0,0730	0,0409	0,0290	0,0168	
15		0,9138	0,5788	0,2333	0,1414	0,0831	0,0435	0,0297	0,0171	
30		0,9506	0,5883	0,2432	0,1512	0,0914	0,0493	0,0320	0,0178	
60		1,0045	0,5933	0,2576	0,1634	0,1005	0,0515	0,0340	0,0182	
150		1,1012	0,6023	0,2791	0,1810	0,1119	0,0565	0,0348	0,0188	
r_2 [mm]		α_c [°]		l_e [mm]		r_e [mm]		E [MPa]		μ [-]
150		15		1,2049		357,6212		2,00E+05		0,3
A_r [mm ²]	t [mm]	1,6	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	
	r_e/t	223,5	298,0	357,6	447,0	596,0	715,2	894,1	1192,1	
6	p_{GNA} [MPa]	0,7802	0,3653	0,2422	0,1555	0,0773	0,0481	0,0270	0,0138	
15		0,8069	0,3920	0,2590	0,1635	0,0799	0,0512	0,0293	0,0150	
30		0,8426	0,4255	0,2941	0,1803	0,0870	0,0537	0,0309	0,0158	
60		0,8993	0,4690	0,3211	0,1822	0,0895	0,0557	0,0321	0,0163	
150		0,9925	0,5284	0,3292	0,1903	0,0922	0,0574	0,033	0,0167	

Na následujícím obrázku (obr. 7.1) jsou vykresleny závislosti mezního přetlaku kuželové skořepiny s okrajovým úhlem 15° . Křivky závislostí mezních přetlaků kuželových skořepin s prstenci jsou doplněny o křivky kuželových skořepin s krajními typy podmínek uložení, které byly uvedeny v předchozí kapitole. Podle očekávání se křivky příslušející skořepinám s prstenci nacházejí mezi oběma krajními případy. Zajímavý je fakt, že i nepatrné zpevnění v podobě velmi tenkého okrajového prstence ($A_r = 6\text{mm}^2$) způsobí poměrně výrazné zpevnění oproti hodnotám prostě podepřených kuželových skořepin. Oblast mezi křivkami prostého podepření a tenkého prstence je již čistě teoretická. Naproti tomu silný prsteneček ($A_r = 150\text{mm}^2$) se svými hodnotami blíží krajní podmínce kloubového uložení. Je možné usoudit, že zvolené hodnoty průřezové plochy okrajových prstenců dostatečně popisují oblast ztráty stability mezi krajními případy okrajových podmínek.

Grafy závislostí mezního přetlaku na parametru tenkostěnnosti pro kuželové skořepiny s okrajovými úhly 5° a 10° jsou uvedeny v příloze 1 na obrázcích P1-1 a P1-2.



Obr. 7.1 Závislost mezního přetlaku kuželových skořepin s různými okrajovými podmínkami na parametru tenkostěnnosti; $\alpha_c = 15^\circ$

Z křivek na obr. 7.1 (a na obrázcích P2-1 a P2-2) je patrný mocninný charakter závislosti mezního přetlaku na parametru tenkostěnnosti. V následujícím textu jsou nalezeny koeficienty K a m rovnice (2.21) pro kuželové skořepiny s okrajovým prstencem.

$$p_{el} = K \cdot E \frac{1}{\omega} \left(\frac{t}{r_e} \right)^m$$

kde

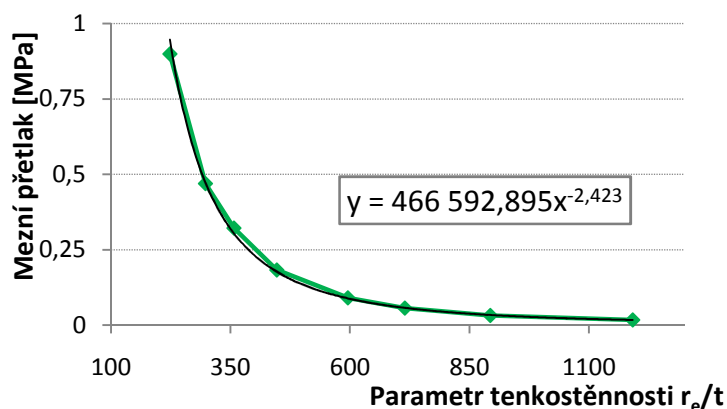
$$\omega = \frac{l_e}{r_e} \sqrt{\frac{r_e}{t}}$$

V grafu na obrázku 7.2 je zobrazena závislost mezního přetlaku pro konkrétní případ kuželové skořepiny s okrajovým úhlem 15° a průřezovou plochou prstence $A_r = 60\text{mm}^2$. V grafu je také zakreslena regresní křivka, která má tvar mocninné funkce

$$p_{el} = K' \cdot \left(\frac{t}{r_e}\right)^m = K' \cdot \left(\frac{r_e}{t}\right)^{-m}$$

kde K' je koeficient mocninné křivky, v němž je již zahrnut vliv materiálu a geometrie skořepiny prostřednictvím modulu pružnosti E a bezrozměrného parametru ω podle vztahu

$$K' = K \cdot E \frac{1}{\omega}$$



Obr. 7.2 Závislost mezního přetlaku kuželové skořepiny s průřezovou plochou okrajového prstence $A_r = 60\text{mm}^2$ na parametru tenkostěnnosti; $\alpha_c = 15^\circ$; zobrazena rovnice regresní křivky

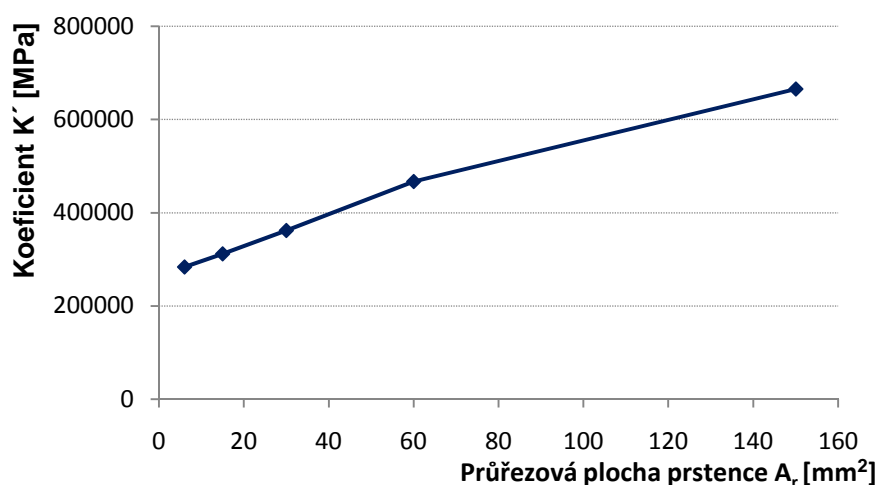
Koeficienty regresních křivek pro všechny zkoumané případy jsou uvedeny v následující tabulce (tab. 7.2). Pomocí regresních křivek s parametry K' a m je možné vypočítat limitní přetlak kuželových skořepin s okrajovými úhly 5° , 10° a 15° pro různé hodnoty průřezové plochy prstence. Hodnoty koeficientů křivek regresních kuželových skořepin s průřezovou plochou prstence mezi vypočítanými hodnotami je možné lineárně interpolovat.

Tab. 7.2 Hodnoty koeficientů regresních křivek kuželových skořepin s okrajovým prstencem

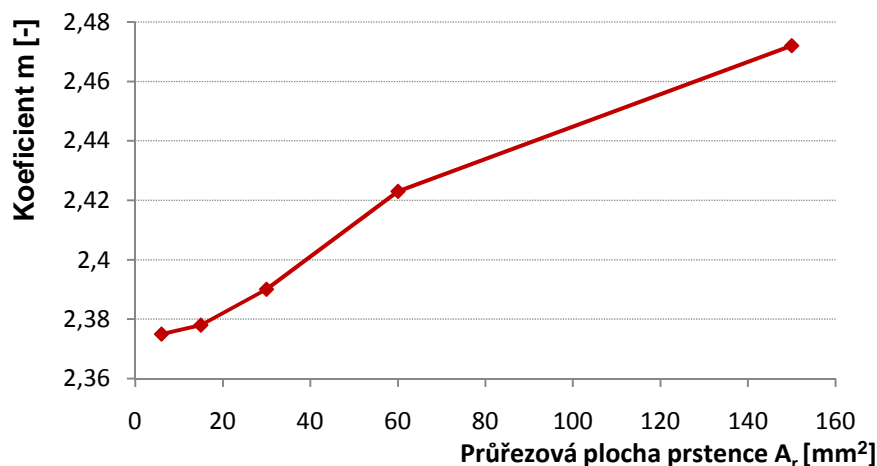
Okrajový úhel α_c [°]	Rozsah r_e/t	Průřezová plocha prstence A_r [mm ²]	Regresní koeficienty	
			K'	m
5	350÷1700	6	378587	2,252
		15	247529	2,18
		30	218420	2,154
		60	171880	2,105
		150	146867	2,063
10	260÷1300	6	768400	2,466
		15	879343	2,479
		30	967585	2,482
		60	1105323	2,494
		150	1335329	2,513

15	220÷1200	6	283563	2,375
		15	312033	2,378
		30	361863	2,39
		60	466593	2,423
		150	665573	2,472

Na obrázcích 7.3 a 7.4 jsou zakresleny hodnoty regresních koeficientů z tabulky 7.2 pro kuželovou skořepinu s okrajovým úhlem 15° . Díky lineární interpolaci hodnot koeficientů regresních křivek, je možné říci, že je oblast kuželových skořepin mezi krajními případy okrajových podmínek je dostatečně zmapována.



Obr. 7.3 Závislost regresního koeficientu K' kuželové skořepiny na s průřezové ploše okrajového prstce; $\alpha_c = 15^\circ$



Obr. 7.4 Závislost regresního koeficientu m kuželové skořepiny na s průřezové ploše okrajového prstce; $\alpha_c = 15^\circ$

7.2 Zobecnění výsledků – okrajový úhel

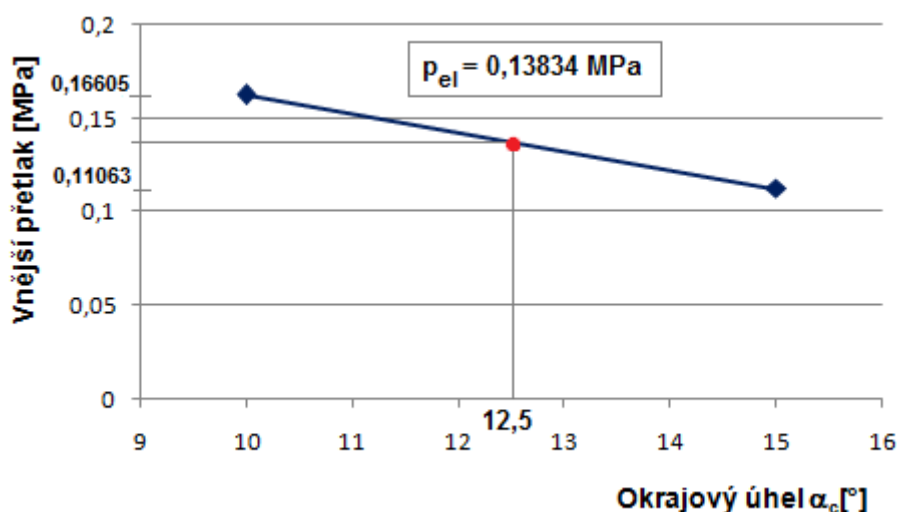
Postup výpočtu limitního přetlaku kuželových skořepin s velikostí okrajového úhlu mezi hodnotami 5° , 10° a 15° je shodný jako v předchozí kapitole (kuželové skořepiny bez okrajového prstce). Spočívá v interpolaci výsledků limitních přetlaků kuželových skořepin

se stejným parametrem tenkostěnnosti. V této kapitole je vypočítán limitní přetlak kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 12,5^\circ$, poloměrem spodního okraje $r_2 = 150\text{mm}$, tloušťkou stěny $t = 0,8\text{mm}$ a průřezovou plochou $A_r = 30\text{mm}^2$

Tab. 7.3 Parametry kuželové skořepiny ukázkového případu

$\alpha_c [^\circ]$	$t [\text{mm}]$	$r_2 [\text{mm}]$	$r_e [\text{mm}]$	$r_e/t [-]$	$A_r [\text{mm}^2]$
12,5	0,8	150	425,5	531,87	30

Na obrázku 7.5 je uvedena hodnota limitního přetlaku kuželové skořepiny. Na svislé ose jsou navíc uvedeny hodnoty limitního přetlaku kuželových skořepin s okrajovým úhlem 10° a 15° se stejným parametrem tenkostěnnosti.



Obr. 7.5 Lineární interpolace limitního přetlaku kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 12,5^\circ$

Výsledek numerické analýzy GNA a vypočítaná hodnota limitního přetlaku jsou uvedeny v tabulce 7.4, v posledním řádku tabulky je uvedena relativní chyba výsledku vztažená k limitnímu přetlaku p_{GNA} .

Tab. 7.4 Porovnání hodnot limitního přetlaku vypočítaných numericky a pomocí lineární interpolace

$p_{GNA} [\text{MPa}]$	$p_{el} [\text{MPa}]$
0,13538	0,13834
2,2%	

7.3 Vyhodnocení

V této kapitole byly nalezeny vztahy a koeficienty pro výpočet limitního přetlaku kuželových skořepin s okrajovým prstencem a okrajovým úhlem z rozsahu $\alpha_c = 5^\circ \div 15^\circ$. Jak bylo dokázáno ukázkovým příkladem výpočtu limitního přetlaku, naznačený postup řešení je možný. Relativní chyba výsledku byla 2,2%, což je velmi dobrá shoda teoretického postupu a numerického řešení. Naznačený postup řešení je třeba dále zobecnit, aby bylo možné navrhovat kuželové skořepiny i s jinou plochou průřezu prstence a poloměrem spodního okraje skořepiny. Tato zobecnění jsou řešena v následující kapitole.

8 ZOBECNĚNÍ VÝSLEDKŮ – RADIÁLNÍ TUHOST PRSTENCE

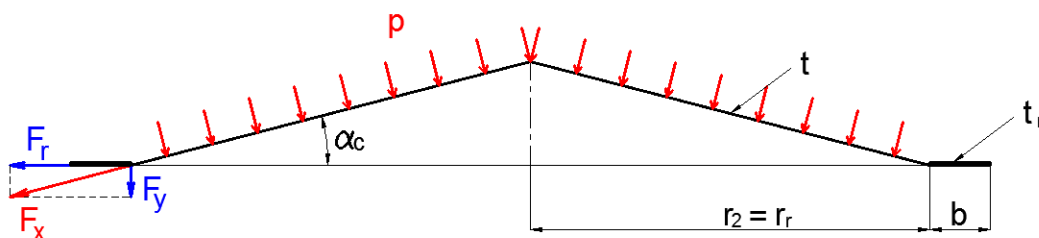
Aby bylo možné výsledky dosažené v této dizertační práci uplatnit v praxi, je nutné výsledné vztahy stanovit v závislosti na bezrozměrných parametrech. Potom lze pomocí podobnostních kritérií navrhovat skutečné konstrukce. V předchozích kapitolách byl již používán bezrozměrný parametr tenkostěnnosti r_e/t . Kromě tohoto parametru je nutné stanovit další, který zohlední konečnou radiální tuhost okraje kuželové skořepiny. V dizertační práci [15] byl s úspěchem zaveden parametr Γ , který zahrnuje nejen vliv radiální tuhosti okraje, ale částečně i geometrie skořepiny. Tato kapitola je tedy věnována stanovení a ověření funkčnosti obdobného bezrozměrného parametru.

V úvodní části této kapitoly je popsáno odvození parametru Γ . V další části je ověřena jeho funkčnost na kuželových skořepinách o rozdílné geometrii. Na závěr je stanovena únosnost ukázkového příkladu kuželové skořepiny s okrajovým prstencem.

8.1 Radiální tuhost prstence – parametr Γ

Je zřejmé, že radiální prstenec o stejné ploše průřezu nebude mít stejný vliv na únosnost kuželových skořepin s rozdílným průměrem spodního okraje. Aby bylo dosaženo stejné únosnosti, musí mít větší kuželová skořepina (se stejným parametrem tenkostěnnosti r_e/t) okrajový prstenec s větší průřezovou plochou.

Při zatěžování kuželových skořepin vnějším přetlakem vzniká ve stěně skořepiny meridiánová síla F_x . Její radiální složka F_r působí na okrajový prstenec (viz obr. 8.1). Působením této síly dochází k posuvu v radiálním směru a tím ke zvětšení obvodu prstence.



Obr. 8.1 Kuželová skořepina s okrajovým prstencem zatížená vnějším přetlakem

Otázkou je, jak ovlivní tuhost prstence (resp. průřezová plocha prstence) celkovou únosnost kuželové skořepiny. K zodpovězení této otázky slouží následující předpoklad.

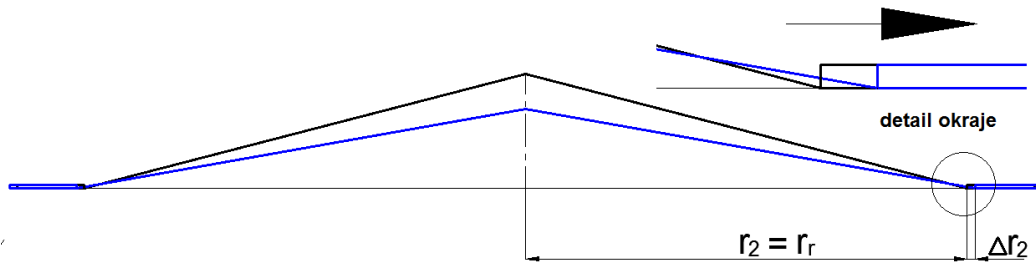
Dva prstence budou mít stejný vliv na únosnost kuželových skořepin s rozdílným poloměrem spodního okraje (ale stejným parametrem tenkostěnnosti r_e/t a okrajovým úhlem α_c), pokud je shodné poměrné prodloužení obvodu prstence.

$$\varepsilon = \frac{2\pi(r_r + \Delta r_r) - 2\pi r_r}{2\pi r_r} = \frac{\Delta r_r}{r_r} = \text{konst.} \quad (8.1)$$

kde r_r je vnitřní poloměr prstence. Platí relace

$$r_r = r_2$$

Na obrázku 8.2 je zakreslena kuželová skořepina před a po zatížení vnějším přetlakem.



Obr. 8.2 Posun okraje kuželové skořepina s okrajovým prstencem – změna vnitřního poloměru okrajového prstence

Radiální síla působící na okrajový prstec je vyjádřena vztahem

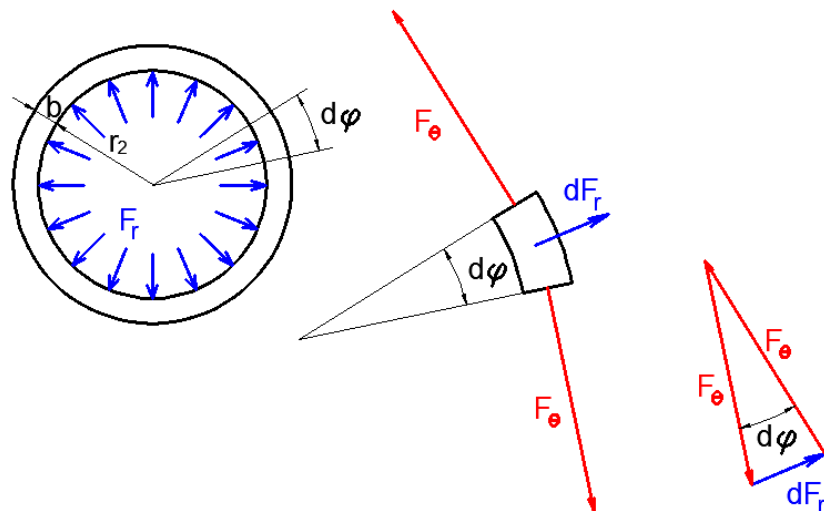
$$F_r = \frac{p\pi r_2^2}{\tan \alpha_c} \quad (8.2)$$

Na obr. 8.3 je uveden element prstence, na který působí elementární síla dF_r

$$dF_r = \frac{p\pi r_2^2 d\varphi}{\tan \alpha_c 2\pi} = \frac{pr_2^2}{2 \tan \alpha_c} d\varphi$$

Aby byl myšlený element v rovnováze, musí účinek síly dF_r vyrovnávat dvě vnitřní obvodové síly F_θ . Pro velikost elementární síly musí platit

$$dF_r = F_\theta d\varphi$$



Obr. 8.3 Rovnováha sil působících na element okrajového prstence

Porovnáním předchozích výrazů vychází velikost vnitřní síly F_θ

$$F_\theta = \frac{pr_2^2}{2 \tan \alpha_c} \quad (8.3)$$

Tato vnitřní síla vyvolá v prstenci tahové napětí

$$\sigma_\theta = \frac{F_\theta}{t_r b} = \frac{F_\theta}{A_r} = \frac{pr_2^2}{A_r 2 \tan \alpha_c} \quad (8.4)$$

Relativní prodloužení prstence je vyjádřeno vztahem

$$\varepsilon = \frac{2\pi(r+\Delta r)-2\pi r}{2\pi r} = \frac{\Delta r}{r} = \frac{\sigma_\theta}{E} = \frac{pr_2^2}{2EA_r \tan \alpha_c} = konst. \quad (8.5)$$

Odtud vychází vztah pro zvětšení poloměru prstence

$$\Delta r = \frac{pr_2^3}{2EA_r \tan \alpha_c} \quad (8.6)$$

Předpokladem je, že na únosnost kuželových skořepin mají shodný vliv prstence, jejichž poměrná deformace je shodná (8.1). Tedy

$$\varepsilon_A = \varepsilon_B = \varepsilon_C = konst.$$

Dosazením vztahu (8.5) vychází

$$\frac{pr_{2A}^2}{2EA_{rA} \tan \alpha_c} = \frac{pr_{2B}^2}{2EA_{rB} \tan \alpha_c} = \frac{pr_{2C}^2}{2EA_{rC} \tan \alpha_c} = konst. \quad (8.7)$$

V tomto vztahu jsou porovnávány kuželové skořepiny o stejném okrajovém úhlu α_c , Youngův modul pružnosti materiálu je také shodný. Limitní přetlak, při kterém dojde ke ztrátě stability, je podle předpokladu také shodný. Je tedy možné psát

$$\frac{r_{2A}^2}{A_{rA}} = \frac{r_{2B}^2}{A_{rB}} = \frac{r_{2C}^2}{A_{rC}} = konst. = \Gamma \quad (8.8)$$

Hledaný bezrozměrný parametr Γ je závislý na poloměru spodního okraje kuželové skořepiny (resp. vnitřní poloměr kruhového prstence) a průřezové ploše. Tímto parametrem je vyjádřen vliv okrajového prstence na únosnost kuželových skořepin, které mají shodný okrajový úhel α_c .

Vztah pro změnu poloměru okrajového prstence (8.6) platí pouze pro samotný prsteneček (bez kuželové skořepiny). Na velikost relativního prodloužení obvodu prstence má vliv připojený plášť kuželové skořepiny. Geometrické parametry pláště jsou obsaženy v bezrozměrném parametru r_e/t . Pokud je u dvou kuželových skořepin s okrajovým prstencem dodržena podmínka *shodného parametru tenkostěnnosti a shodného okrajového úhlu*, není správná funkce parametru Γ ovlivněna kuželovým pláštěm, přestože hodnota relativního prodloužení obvodu prstence ovlivněna je.

8.2 Ověření parametru Γ

Parametr Γ vychází z předpokladu shodného relativního prodloužení obvodu okrajového prstence kuželových skořepin se stejným okrajovým úhlem a parametrem tenkostěnnosti. Správná funkce parametru Γ je v této kapitole ověřena na třech typech kuželových skořepin. Rozměry porovnávaných skořepin jsou uvedeny v tabulce 8.1.

Tab. 8.1 Rozměry porovnávaných kuželových skořepin

Typ kuželové skořepiny	α_c [°]	r_2 [mm]	r_e [mm]	t [mm]	r_e/t [-]	b [mm]	t_r [mm]	A_r [mm ²]	$\Gamma = \frac{r_2^2}{A_r}$ [-]
A	10	150	527,7	0,8	659,6	15	2	30	750
B	10	450	1583,0	2,4		30	9	270	
C	10	2100	7387,4	11,2		250	23,52	5880	

Modely kuželových skořepin jsou tvořeny skořepinovými elementy SHELL4. Vnitřní okraj prstence je volně podepřen a je mu zamezeno natočení. Modely jsou zatíženy jednotkovým přetlakem. Výsledky numerických analýz typu GNA z programu COSMOS/M jsou uvedeny v tabulce 8.2.

Tab. 8.2 Výsledky numerických analýz

Typ kuželové skořepiny	p_{GNA} [MPa]	Δr_2 [mm]	$\Delta r_2/r_2$ [-]
A	0,0911	0,08524	0,000568
B	0,0897	0,2443	0,000543
C	0,0919	1,2022	0,000572

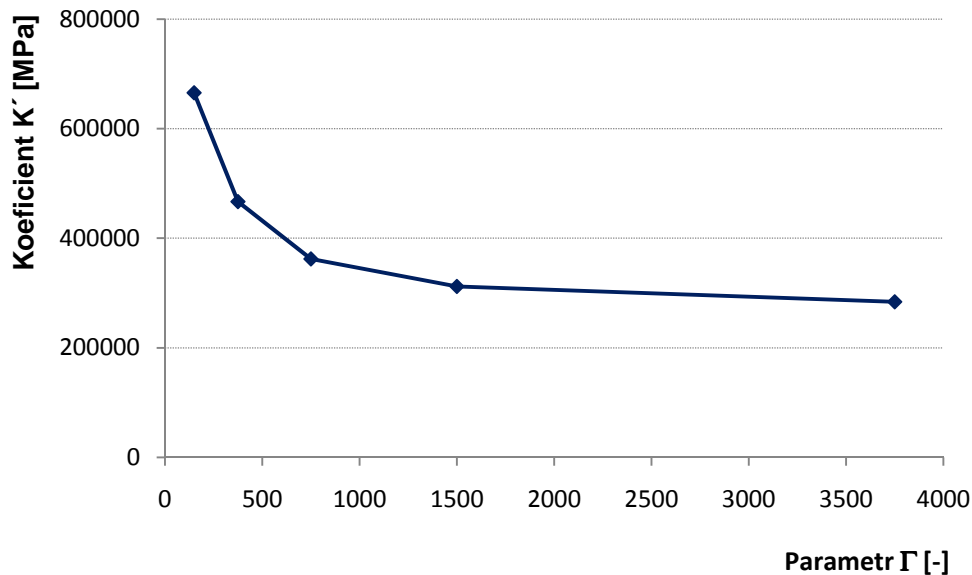
Podle předpokladu, limitní přetlak porovnávaných skořepin je téměř shodný. Hodnoty limitního přetlaku se liší maximálně o 2,5% (mezi modely typu B a C). Stejně tak výsledky relativního zvětšení poloměru prstence (resp. relativní prodloužení obvodu prstence) jsou velmi dobré. Hodnoty této veličiny se liší do 5,5% (opět rozdíl mezi modely B a C).

Dosažené výsledky prokázaly správnou funkci parametru Γ . V tabulce 7.2 je tedy možné nahradit hodnoty průřezové plochy právě tímto bezrozměrným parametrem, který zohledňuje vliv okrajového prstence na únosnost kuželových skořepin. V tabulce 8.3 jsou uvedeny hodnoty koeficientů regresních křivek pro kuželové skořepiny s okrajovými úhly 5° , 10° a 15° a různými hodnotami bezrozměrného parametru Γ .

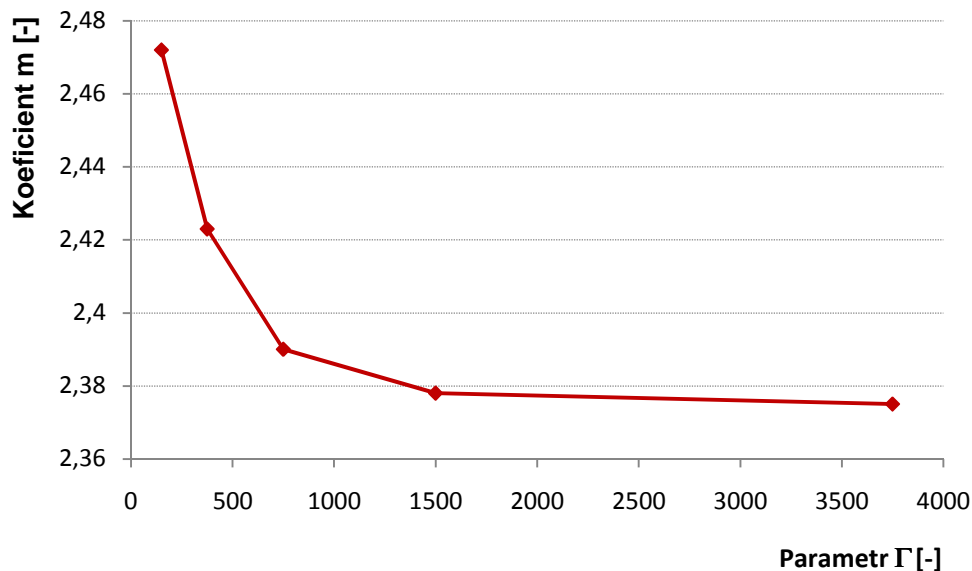
Tab. 8.3 Hodnoty koeficientů regresních křivek kuželových skořepin s okrajovým prstencem

Okrajový úhel α_c [°]	Rozsah r_e/t	Parametr Γ [-]	Regresní koeficienty	
			K'	m
5	350÷1700	3750	378587	2,252
		1500	247529	2,18
		750	218420	2,154
		375	171880	2,105
		150	146867	2,063
10	260÷1300	3750	768400	2,466
		1500	879343	2,479
		750	967585	2,482
		375	1105323	2,494
		150	1335329	2,513
15	220÷1200	3750	283563	2,375
		1500	312033	2,378
		750	361863	2,39
		375	466593	2,423
		150	665573	2,472

V následujících grafech jsou zakresleny hodnoty regresních koeficientů z tabulky 8.3 v závislosti na hodnotě parametru Γ pro kuželovou skořepinu s okrajovým úhlem 15° . Hodnoty koeficientů mezi vypočítanými hodnotami je možné získat pomocí lineární interpolace. Takto je možné vypočítat únosnost kuželové skořepiny s okrajovým prstencem, jehož parametr Γ neodpovídá propočítaným hodnotám z tabulky 8.3. Výpočet únosnosti takovéto kuželové skořepiny je proveden v následující podkapitole (8.3).



Obr. 8.4 Závislost regresního koeficientu K' kuželové skořepiny na parametru Γ ; $\alpha_c = 15^\circ$



Obr. 8.5 Závislost regresního koeficientu m kuželové skořepiny na parametru Γ ; $\alpha_c = 15^\circ$

8.3 Ukázkový příklad – výpočet limitního přetlaku

V následujícím textu jsou provedeny výpočty mezního přetlaku kuželových skořepin o rozměrových parametrech uvedených v tabulce 8.4. Parametr Γ je volen tak, aby bylo nutné

lineárně interpolovat příslušné regresní koeficienty z tabulky 8.3. Parametr tenkostěnnosti r_e/t musí být z rozsahu, který je uveden ve stejné tabulce. Jsou provedeny numerické analýzy typu GNA. Výsledky numerických analýz jsou porovnány s hodnotami mezního přetlaku, které jsou vypočítány podle rovnice

$$p_{el} = K' \cdot \left(\frac{t}{r_e}\right)^m = K' \cdot \left(\frac{r_e}{t}\right)^{-m} \quad (8.9)$$

Tab. 8.4 Rozměry ukázkových kuželových skořepin

Typ kuželové skořepiny	α_c [°]	r_2 [mm]	r_e [mm]	t [mm]	r_e/t [-]	b [mm]	t_r [mm]	A_r [mm ²]	$\Gamma = \frac{r_2^2}{A_r}$ [-]
D	5	866,0	6008,1	6	1001,4	100	15	1500	500
E	10	316,2	1112,3	2	556,2	50	10	500	200
F	15	1732,1	4129,3	8	516,2	150	20	3000	1000

V tabulce 8.5 jsou uvedeny hodnoty koeficientů regresních křivek pro zkoumané případy kuželových skořepin. Tyto hodnoty jsou získány lineární interpolací (viz obr. 8.4 a 8.5).

Tab. 8.5 Koeficienty mocninných regresních křivek

Typ kuželové skořepiny	Regresní koeficienty	
	K'	m
D	187395	2,1214
E	1284217	2,5088
F	345253	2,386

Výsledky numerických analýz spolu s hodnotami vypočítanými pomocí mocninné funkce (8.9) jsou uvedeny v tabulce 8.6. Hodnota relativní chyby výsledků limitního přetlaku je do 10%, což lze považovat u takto výrazně nelineární úlohy za výborný výsledek.

Tab. 8.6 Porovnání hodnot limitního přetlaku vypočítaných numericky a pomocí rovnice (8.9)

Typ kuželové skořepiny	p_{el} [MPa]	p_{GNA} [MPa]	Relativní chyba δ [%]
D	0,080801	0,07521	7,4
E	0,16652	0,15895	4,8
F	0,11624	0,11162	4,1

8.4 Vyhodnocení

V této kapitole byl nalezen parametr Γ , který zohledňuje vliv radiální tuhosti na únosnost kuželových skořepin. Správná funkce parametru byla ověřena pomocí série numerických analýz kuželových skořepin, jejichž rozměry byly různé od modelů počítaných v kapitole 7. Pomocí parametru Γ a rovnice (8.9) je možné vypočítat únosnost kuželové skořepiny s okrajovým prstencem s okrajovými úhly 5°, 10° a 15°. Spolu se zobecněním postupu řešení, uvedeném v předcházející kapitole (kapitola 7), je možné navrhovat libovolné kuželové skořepiny (všechny parametry musí být z uvedeného rozsahu platnosti). V příloze 2 je uveden podrobný postup výpočtu kuželové skořepiny s obecnými parametry.

9 EXPERIMENTY ZTRÁTY STABILITY KUŽELOVÝCH SKOŘEPIN

Důležitost experimentálního ověření výsledků numerických analýz byla již dříve v dizertační práci zmíněna. Experimenty ztráty stability kuželových skořepin s malým vzepětím probíhají na zkušebním zařízení, které je k dispozici na DFJP. Toto zařízení je stručně popsáno v úvodní části této kapitoly. V další části je uvedeno porovnání výsledků numerických výsledků zkoumaných skořepin s výsledky experimentů.

9.1 Zkušební zařízení

Zkušební zařízení (obr. 9.1) je zhotoveno z trubky o vnějším průměru 273mm a tloušťce stěny $7,5\text{mm}$, na trubce je přivařena příruba (vnější průměr 345mm a tloušťka 18mm), na níž je nalepeno pryžové těsnění o tloušťce 5mm . Z druhé strany je trubka opatřena víkem. Z válce (trubky) je pomocí vývěvy odsáván vzduch a vzniká tak vnitřní podtlak (vnější přetlak). Hodnota přetlaku je odečítána na stupnici analogového manometru až do dosažení mezní hodnoty, kdy dochází ke ztrátě stability zkušební vzorku.



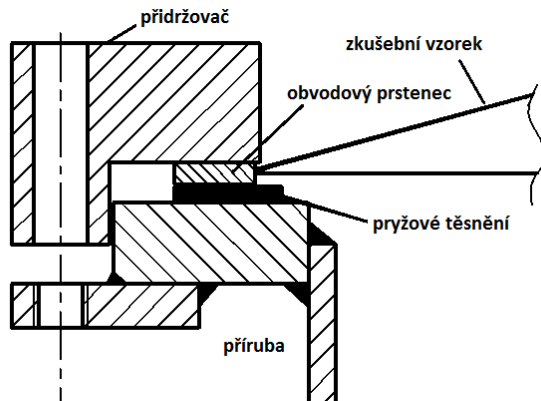
Obr. 9.1 Zkušební zařízení s vývěvou

9.1.1 Úprava zkušebního zařízení

Vzhledem k výsledkům numerických analýz v kapitole 5, je třeba zamezit natočení okrajových prstenců zkušebních vzorků. *Nesmí však být omezen radiální posuv okraje.* Úpravy zkušebního zařízení probíhaly při testování ztráty stability kulových vrchlíků s okrajovým prstencem, tedy s konečnou tuhostí v radiálním směru (viz [15]).

V prvním kroku – 1. modifikace – bylo zařízení doplněno o přidržovač (obr. 9.2). Zkušební vzorek byl opět volně položen na pryžové těsnění. Pomocí vymezovacích šroubů

(obr 9.3) byla vymezena vůle mezi těsněním a přidržovačem, tak aby prstenci zkušebního vzorku nebyl zamezen radiální posuv. Po provedení experimentu bylo zjištěno, že došlo k částečnému natočení prstence, které bylo umožněno nedostatečnou tuhostí pryžového těsnění.

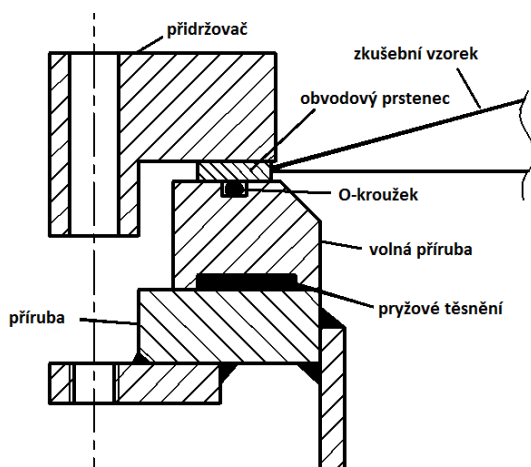


Obr. 9.2 Detail – 1. modifikace



Obr. 9.3 Detail – vymezovací šrouby

Ve druhém kroku úpravy zařízení – 2. modifikace – byla vyrobena další příruba, do které byla vysoustružena drážka pro O-kroužek, který nahradil příliš měkké pryžové těsnění (obr. 9.5). Obvodový prstenec je položen na O-kroužek a následně sevřen v prostoru mezi přidržovačem a druhou přírubou (obr. 9.4). Opět je vůle vymezena šrouby.



Obr. 9.4 Detail – 2. modifikace



Obr. 9.5 Příruba s O-kroužkem

9.2 Experimenty ztráty stability prostě podepřených kuželových skořepin bez okrajového prstence

Rozměry zkušebních vzorků jsou shodné s rozměry numerických modelů uvedených v kapitole 6. Poloměr spodního okraje kužele je $r_2 = 150\text{mm}$, okrajový úhel je $\alpha_c = 10^\circ$ a $\alpha_c = 15^\circ$. Tloušťka stěny kuželové skořepiny je $t = 0,8\text{mm}$. Zkušební vzorek je volně položen na pryžové těsnění. Zkušební vzorky jsou vyrobeny z běžné konstrukční oceli s mezí kluzu $f_{y,k} = 180\text{MPa}$. Vzorky jsou vyráběny technologií svařování.



Obr. 9.6 Zkušební vzorky



Obr. 9.7 Zkušební vzorek po provedeném experimentu

Výsledky experimentů ztráty stability jsou porovnávány s výsledky numerických analýz typu GMNA, kde je kromě geometrické nelinearity uvažováno i pružně-plastické chování materiálu. Numerický model a zatěžovací charakteristika prostě podepřené kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 10^\circ$ byly popsány v kapitole 6.1 (obr. 6.3). Ke ztrátě stability došlo ve výpočtovém kroku 7 při posuvu ve směru osy rotace skořepiny cca $u_y = 1,88\text{mm}$. V tabulce 9.1 jsou uvedeny vypočítané a naměřené hodnoty limitního přetlaku.

Tab. 9.1 Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot limitního přetlaku

č. vzorku	Okrajový úhel α_c [°]	Vypočítaný limitní přetlak p_{GMNA} [MPa]	Naměřený limitní přetlak p_{exp} [MPa]	Relativní chyba δ [%]
1	10	0,03195	0,022	31,1
2			0,024	24,9
3			0,024	24,9
4			0,025	21,8
5			0,026	18,6
6	15	0,04485	0,039	15,0
7			0,040	12,1
8			0,041	9,4
9			0,04672	1,6

Relativní chyba mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami limitního přetlaku je poměrně velká. Možné vysvětlení je možné nalézt, kromě vlivu počátečních výrobních imperfekcí, zejména ve způsobu uložení spodního okraje skořepin. Numerickému modelu byla předepsána okrajová podmínka prostého podepření. V tomto případě je spodnímu okraji zcela zamezen posuv ve směru osy rotace skořepiny. Jelikož je experimentální model volně položen na pryžové těsnění, neodpovídá podmínka nulového posuvu ve směru osy rotace skutečnosti zcela přesně. Okraj skořepiny je při zatěžování vnějším přetlakem vtlačován do těsnění a při ztrátě stability dochází u experimentálních vzorků ke zvlnění okraje (viz obr. 9.7). Tato skutečnost může mít vliv na únosnost experimentálních vzorků.

Experimentální vzorek č. 9 měl z důvodu nepřesnosti výroby nepatrně menší rozměry. Pro tento model také byla vypočítána nová hodnota limitního přetlaku p_{GMNA} . Experimentální model přesně nepasoval na pryžové těsnění, byl proto položen přímo na kovovou přírubu.

Zřejmě z tohoto důvodu nedošlo k ovlivnění hodnoty limitního přetlaku posuvem okraje v osové směru a rozdíl vypočítané a naměřené hodnoty limitního přetlaku je minimální. U takto uložených zkušebních vzorků je náročné docílit dokonalého utěsnění vakuového prostoru, ale přesto budou další experimentální vzorky položeny přímo na kovové přírubě. Jak již bylo zmíněno, tímto bude eliminována chyba vzniklá vlivem možného svislého posuvu okraje zkušebního vzorku.

9.3 Experimenty ztráty stability prostě podepřených kuželových skořepin s okrajovým prstencem

Rozměry zkušebních vzorků jsou shodné s rozměry numerických modelů uvedených v kapitole 7. Poloměr spodního okraje kužele je $r_2 = 150\text{mm}$, okrajový úhel je $\alpha_c = 10^\circ$. Tloušťka stěny kuželové skořepiny je $t = 0,8\text{mm}$. Šířka prstence je $b = 15\text{mm}$ a tloušťka $t_r = 2\text{mm}$, průřezová plocha je $A_r = 30\text{mm}^2$ (bezrozměrný parametr $\Gamma = 750$). Zkušební vzorky jsou vyrobeny z běžné konstrukční oceli s mezí kluzu $f_{y,k} = 180\text{MPa}$. Vzorky jsou vyráběny svařováním, prstencem je k plášti skořepiny přivařen velkým počtem bodových svarů (viz obr. 9.8). Obvodový prstencem je položen na O-kroužek a následně sevřen v prostoru mezi přídržovačem a druhou přírubou (viz obr. 9.4)



Obr. 9.8 Zkušební vzorek s okrajovým prstencem

Výsledky experimentů ztráty stability jsou porovnávány s výsledkem numerických analýz typu GMNA, kde je kromě geometrické nelinearity uvažováno i pružně-plastické chování materiálu. V tabulce 9.2 jsou uvedeny vypočítané a naměřené hodnoty limitního přetlaku. Poměrně velká relativní chyba výsledků je v tomto případě pravděpodobně způsobena přítomností počátečních imperfekcí, kde imperfekce tvaru hrají nejvýznamnější roli (viz ovlivněná oblast meridiánového svaru vzorku). Vliv počátečních imperfekcí nebyl u numerického výpočtu zohledněn. Vliv počátečních imperfekcí na únosnost kuželových skořepin s malým vzepětím je jedním z cílů dalšího výzkumu. V kapitole 10 této dizertační práce je uveden náhled do této rozsáhlé problematiky

Tab. 9.2 Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot limitního přetlaku

č. vzorku	Okrajový úhel α_c [°]	Průřezová plocha prstence A_r [mm ²]	Vypočítaný limitní přetlak p_{GMNA} [MPa]	Naměřený limitní přetlak p_{exp} [MPa]	Relativní chyba δ [%]
10	10	30	0,08125	0,065	19,7

9.4 Vyhodnocení

Cílem prvních sérií experimentů bylo zejména ověření technologie výroby zkušebních vzorků a funkčnosti zkušebního zařízení. Poměrně velkou relativní chybu je s velkou pravděpodobností možné přičíst nepřesnostem výroby, počátečním výrobním imperfkcím a způsobu uložení okraje kuželové skořepiny. Experimentální vzorky prostě podepřených kuželových skořepin bez okrajového prstence budou uloženy přímo na kovové přírubě. Chyba způsobená možným posuvem ve směru osy skořepiny by tímto způsobem uložení měla být odstraněna. Vzorky kuželových skořepin s okrajovým prstencem jsou uloženy na o-kroužku. V tomto případě mají na chybu mezi naměřenou a vypočítanou hodnotou spíše vliv nepřesnosti výroby – počáteční imperfekce.

Výroba zkušebních vzorků technologií svařování je poměrně levná, ale velmi náročná na přesnost. Také oblast svaru je poměrně problematická. Bohužel vlivem chladnutí vzorku kuželové skořepiny po svařování dochází v okolí svaru k mírnému zvlnění stěny, což se projevuje jako počáteční imperfekce tvaru. K počátečním imperfkcím se řadí zajisté i zbytkové napětí po svařování a změna metariálových vlastností v ovlivněné oblasti svaru. Svar také musí být dokonale vybroušen, aby nedocházelo k vyztužení této oblasti, a zároveň nesmí dojít k oslabení stěny skořepiny. Velkou výhodou výroby zkušebních vzorků pomocí svařování je možnost vyrobení vzorků s libovolným okrajovým úhlem. Z výsledků experimentů je zřejmé, že výroba zkušebních vzorků technologií svařování není zcela vhodná. Další zkušební vzorky budou vyráběny technologií lisování. Zkušební vzorky tak nebudou obsahovat problematickou oblast svaru.

10 POČÁTEČNÍ IMPERFEKCE

V předchozích kapitolách byl zmíněn vliv počátečních imperfekcí (nedokonalosti tvaru, uložení, zatěžování, vnitřní pnutí, apod.) na stabilitu tenkostěnných skořepinových konstrukcí. Za nejvýznamnější jsou obecně považovány imperfekce tvaru. Konstrukce, u nichž při zatěžování vzniká převážně membránové napětí (např. válcová skořepina, kulová skořepina), jsou na přítomnost počátečních imperfekcí velmi citlivé. V těchto případech imperfekce reprezentují ohybový stav a únosnost konstrukce je díky jejich přítomnosti značně snížena. Konstrukce typu kužel s malým vzepětím, nebo kulový vrchlík s malým vzepětím vykazují ohybový stav již v počátku zatěžování a to ze samé podstaty konstrukce (geometrie, okrajové podmínky). Ohybové napětí přidané počátečními imperfekcemi, již nemusí u těchto konstrukcí zapříčinit další podstatné snížení únosnosti konstrukce.

Při výzkumu tenkostěnných skořepinových konstrukcí nelze širokou problematiku počátečních imperfekcí opominout. V této kapitole je tedy částečně představen tento důležitý směr dalšího výzkumu. V první části kapitoly je popsán typ počáteční imperfekce a její umístění. V další části je analyzován vliv hloubky prohlubně na stabilitní únosnost kuželové skořepiny na konkrétním modelu.

10.1 Tvar a umístění počáteční imperfekce

Existují dva přístupy k vytvoření počáteční imperfekce tvaru. Touto problematikou se ve svém výzkumu tenkostěnných skořepinových konstrukcí zabýval jeden z předních autorů evropského doporučení ECCS W. Wunderlich. Imperfekce může být uvažována v podobě lokální prohlubně, nebo v podobě vlastního tvaru příslušného ke kritickému zatížení LBA analýzy. W. Wunderlich prokázal, že u kulových vrchlíků mají oba typy imperfekce tvaru při zachování stejné amplitudy w_0 stejný vliv na mezní zatížení. Nejdůležitějším parametrem je tedy hloubka imperfekce. V dalším výzkumu vlivu počátečních imperfekcí je třeba prokázat, zda je možné tyto závěry aplikovat i pro kuželové skořepiny s malým vzepětím.

Při ztrátě stability ideálních kuželových skořepin (tzn. bez imperfekcí) dochází k deformování v oblasti v blízkosti spodního okraje kužele (viz kapitola 5.1). Je tedy možné předpokládat, že imperfekce umístěná v této oblasti bude mít na únosnost skořepiny největší vliv. V dizertační práci [15] navzdory tomuto předpokladu bylo prokázáno, že umístění prohlubně na stabilitní únosnost kulových vrchlíků nemá vliv. Vliv umístění prohlubně u kuželových skořepin s malým vzepětím je tedy nutné v dalším výzkumu důkladně vyšetřit.

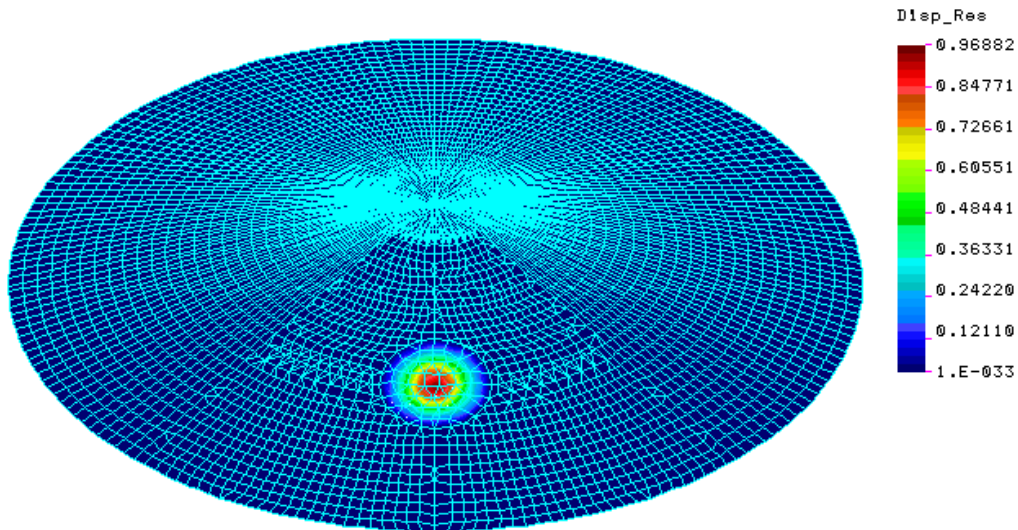
10.2 Numerické analýzy

Vytvoření numerického modelu kuželové skořepiny s lokální prohlubní

Počáteční imperfekce typu prohlubeň je vytvořena ve stěně numerického modelu ve střední oblasti stěny kužele. Tvar prohlubně je kruhový s průměrem $D_{imp} = l_g$ rovnajícím se maximální velikosti pravítka pro měření imperfekcí (2.20) kužele o tloušťce stěny 1mm.

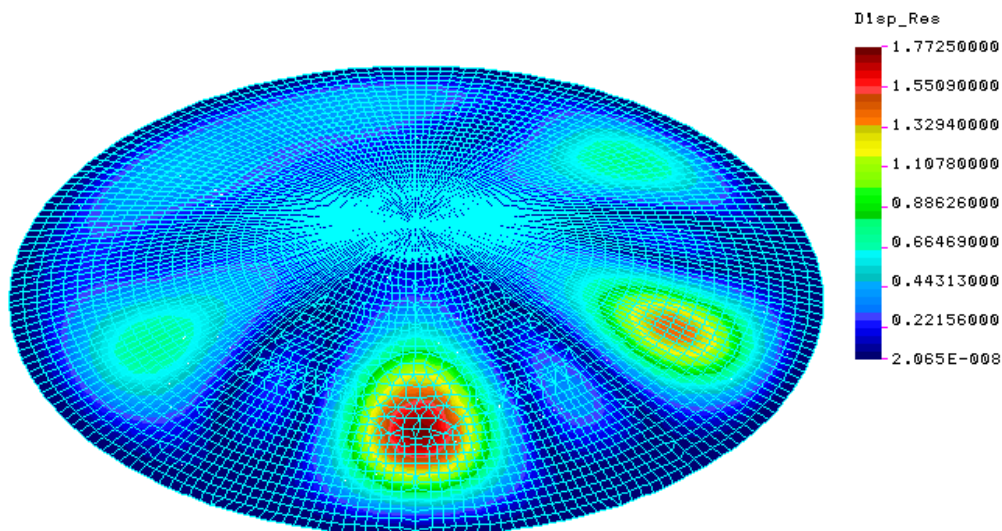
$$l_g = 4\sqrt{rt} = 4\sqrt{150 \cdot 1} = 49\text{mm}$$

Prohlubeň je vytvořena pomocí statické analýzy. Okraj prohlubně je vetknut a pouze oblast prohlubně je zatížena příslušným tlakem p_{imp} . Hodnota tohoto tlaku ovlivňuje hloubku prohlubně w_0 . Numerický model s vykreslenou imperfekcí je zobrazen na obr. 10.1. Deformovaná geometrie je uložena a následující numerické analýzy typu GNIA probíhají na takto upraveném modelu. Zobrazený model má okrajový úhel $\alpha_c = 15^\circ$, tloušťka stěny je $t = 1mm$. Hloubka prohlubně je cca $w_0 = 1mm$. Spodní okraj kuželové skořepiny je vetknut. Numerický model je zatížen vnějším jednotkovým přetlakem $p = 1MPa$. Výpočet je řízen pomocí strategie řízení nelineárního procesu přírůstkem oblouku.



Obr. 10.1 Numerický model s počáteční imperfekcí - prohlubně

Na obrázku 10.2 je zobrazen deformovaný numerický model po ztrátě stability. Došlo k vytvoření 6 vln, největší je v oblasti prohlubně.



Obr. 10.2 Výsledek analýzy GNIA - výsledná posunutí

Poměrem hodnot vypočítaných limitních zatížení p_{GNIA} a p_{GNA} je vyjádřen vliv tvarové imperfekce na stabilitní únosnost. Tento poměr se v evropském doporučení ECCS nazývá redukční součinitel α .

$$\alpha = \frac{p_{GNIA}}{p_{GNA}} \quad (10.1)$$

V tabulce 10.1 jsou uvedeny výsledky numerických analýz ideálních a imperfektních kuželových skořepin s velikostí okrajového úhlu $\alpha_c = 15^\circ$ a různými typy okrajových podmínek.

Tab. 10.1 Výsledky numerických analýz typu GNA, GNIA kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 15^\circ$, poloměrem spodního okraje $r_2 = 150\text{mm}$ pro různé tloušťky pláště skořepiny a různé typy okrajových podmínek (nulová až nekonečná radiální tuhost)

Tloušťka stěny $t[\text{mm}]$	Limitní zatížení a redukční součinitel $\alpha = \frac{p_{GNIA}}{p_{GNA}}$	Typ okrajové podmínky						Vetknutí
		Prosté podepření	Tloušťka okrajového prstence $t_r[\text{mm}]$					
			0,6	1	2	4	10	
0,4	p_{GNA}	0,01812	0,02789	0,02926	0,03087	0,03207	0,03302	0,03379
	p_{GNIA}	0,01801	0,02568	0,02675	0,0280202	0,02926	0,03015	0,03095
	α	0,994	0,921	0,914	0,908	0,912	0,913	0,916
0,6	p_{GNA}	0,05468	0,07744	0,07987	0,08683	0,0895	0,09224	0,09488
	p_{GNIA}	0,05395	0,07225	0,07492	0,0807	0,08532	0,08913	0,0912
	α	0,987	0,933	0,938	0,929	0,953	0,966	0,961
0,8	p_{GNA}	0,08102	0,16301	0,17508	0,17422	0,19759	0,19836	0,2002
	p_{GNIA}	0,0805	0,13598	0,14342	0,15566	0,16705	0,17811	0,1785
	α	0,994	0,834	0,819	0,893	0,845	0,898	0,892
1,0	p_{GNA}	0,12443	0,25083	0,25296	0,28868	0,29348	0,3292	0,38431
	p_{GNIA}	0,12395	0,23683	0,24878	0,26556	0,28081	0,3064	0,3447
	α	0,996	0,944	0,983	0,920	0,957	0,931	0,897

Velikost a hloubka imperfekce numerických modelů byla volena konstantní. Vzhledem k tomu, že maximální velikost (průměr) a hloubka imperfekce je podle vztahu (2.20) závislá na tloušťce skořepiny, jsou hodnoty redukčního faktoru uvedené v předchozí tabulce pouze orientační. Z výsledků přesto vyplývá jeden důležitý poznatek. Pro různé kombinace tloušťky pláště kuželové skořepiny a typu okrajových podmínek **neklesne redukční součinitel pod hodnotu $\alpha = 0,80$** . Dalším zajímavým závěrem je, že pokud je spodnímu okraji povolen neomezený posuv (prosté podepření) má počáteční imperfekce skutečně nepatrný vliv na stabilitní únosnost. Ohybový stav v počátku zatěžování je v tomto případě způsoben nejen geometrií, ale i okrajovou podmínkou. Redukční součinitel je v tomto případě $\alpha = 0,99$.

Jak již bylo zmíněno, výsledky jsou orientační, v dalším výzkumu je potřeba posoudit vlivy zmíněné v kapitole 10.1 a výsledky ověřit experimentálně.

10.3 Vliv hloubky prohlubně

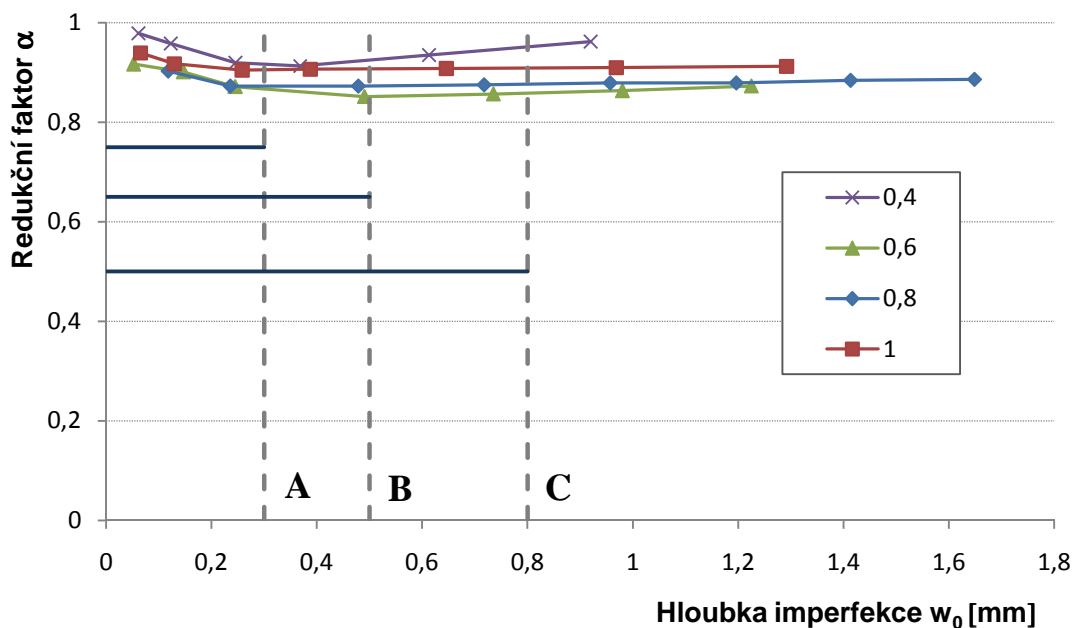
Hloubka prohlubně byla pro všechny zkoumané případy konstantní. Je třeba ověřit, jak se mění hodnota redukčního faktoru v závislosti na proměnné hloubce imperfekce. Při vytváření numerických modelů s rozdílnou hloubkou prohlubně je měněn tlak, který působí na plochu

prohlubně p_{imp} . V tabulce 10.2 je uveden jeden z počítaných případů – okrajový úhel $\alpha_c = 15^\circ$, tloušťka stěny $t = 0,6\text{mm}$, tloušťka prstence $t_r = 2\text{mm}$. Hloubka imperfekce se mění v intervalu $w_0 = 0,05 \div 1,22\text{mm}$. Na obrázku 10.3 jsou zobrazeny závislosti redukčního faktoru kuželových skořepin s různou tloušťkou stěny na hloubce imperfekce w_0 .

Tab. 10.2 Výsledky numerických analýz typu GNA, GNIA pro různé hloubky prohlubně

p_{GNA} [MPa]	t [mm]	t_r [mm]	α_c [°]	p_{imp} [MPa]	w_0 [mm]	w_0/t [-]	p_{GNIA} [MPa]	α [-]
0,08697	0,6	2	15	0,1	0,051769	0,086282	0,07973	0,916753
				0,3	0,14699	0,244983	0,07836	0,901
				0,5	0,24498	0,4083	0,0758	0,871565
				1	0,48996	0,8166	0,074059	0,851542
				1,5	0,73493	1,224883	0,074501	0,856625
				2	0,9799	1,633167	0,075111	0,863643
				2,5	1,2249	2,0415	0,075903	0,872749

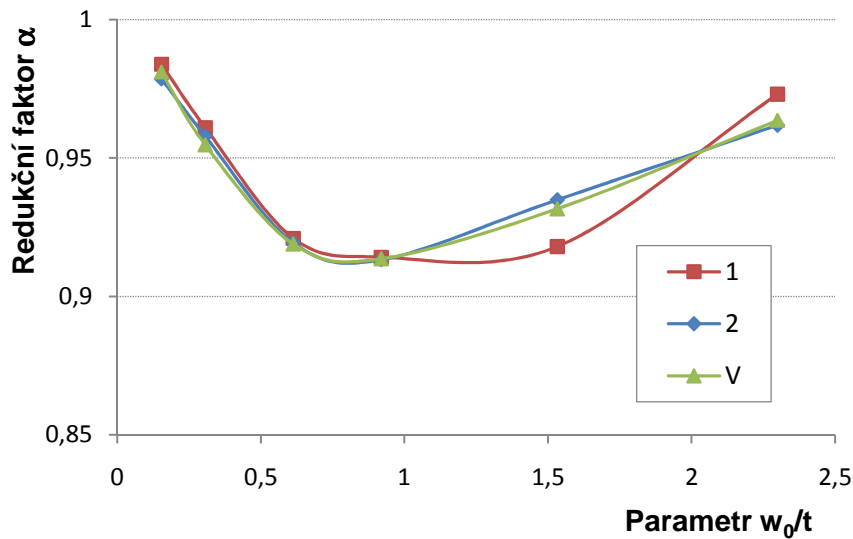
V grafu jsou zaneseny hodnoty, které odpovídají maximální přípustné hloubce prohlubně pro třídy jakosti výroby (svislíce A, B, C; viz tabulka 2.6) a jim příslušné hodnoty redukčních faktorů. Výroba konstrukcí je ve většině případů v základní jakostní třídě – C, té odpovídá redukční faktor $\alpha = 0,50$. Je patrné, že tato hodnota redukčního faktoru je pro kuželové skořepiny s malým vzepětím příliš konzervativní a bylo by možné tuto hodnotu nahradit na $\alpha = 0,80$.



Obr. 10.3 Závislost redukčního faktoru na hloubce imperfekce pro různé tloušťky stěny pro kužel s okrajovým úhlem $\alpha_c = 15^\circ$ a tloušťkou prstence $t_r = 2\text{mm}$

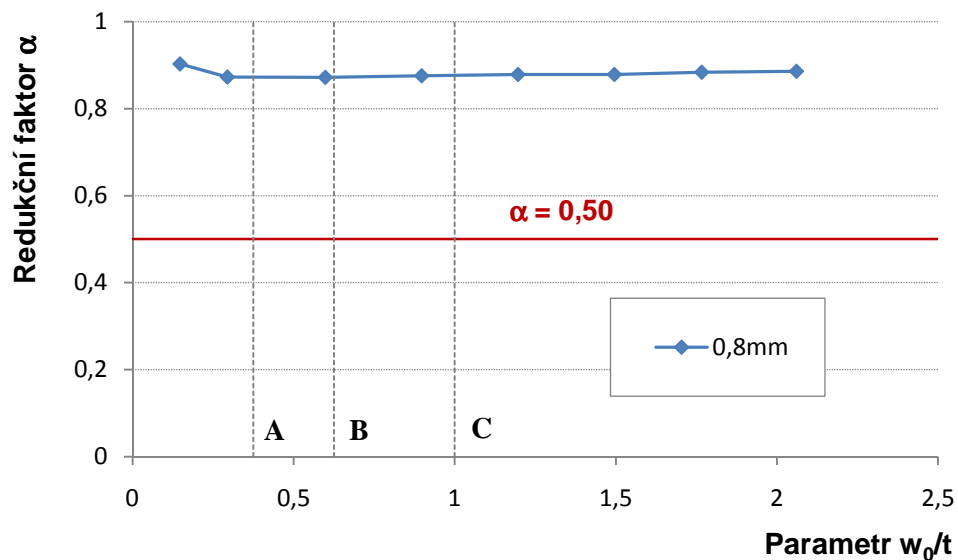
Z průběhu křivek na obr. 10.6 je také patrný zajímavý fakt, že s dalším růstem hloubky imperfekce dochází ke snížení jejího vlivu na únosnost. Průběh redukčního faktoru pak má neklesající charakter. Takováto nestandardní prohlubeň zřejmě začíná působit jako výztuha. Tento trend je velmi dobře patrný na obr. 10.4, kde je zobrazen průběh redukčního faktoru

kuželové skořepiny s tloušťkou stěny $t = 0,4\text{mm}$, vykresleny jsou křivky pro okrajové podmínky vetknutí a tloušťky výztužného prstence $t_r = 1\text{mm}$ a $t_r = 2\text{mm}$. Křivky jsou vykresleny v závislosti na bezrozměrném parametru w_0/t



Obr. 10.4 Závislost redukčního faktoru pro různé okrajové podmínky (prstence, vetknutí) na bezrozměrném parametru hloubky imperfekce w_0/t pro tloušťku stěny $t = 0,4\text{mm}$, kužel s okrajovým úhlem $\alpha_c = 15^\circ$

Z důvodu zobecnění výsledků je třeba vyjádřit závislost redukčního faktoru na bezrozměrném parametru w_0/t . Graf s touto závislostí je na obr. 10.5. V grafu je dále zobrazena konstantní hodnota redukčního součinitele α pro základní jakostní třídu výroby C.



Obr. 10.5 Závislost redukčního faktoru na bezrozměrném parametru hloubky imperfekce kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 15^\circ$ tloušťkou stěny $t = 0,8\text{mm}$ a tloušťkou prstence $t_r = 2\text{mm}$

10.4 Vyhodnocení

Redukční součinitel α vyjadřuje vliv počátečních imperfekcí na stabilitní únosnost skořepinových konstrukcí. Jelikož výpočet stabilitní únosnosti kuželových skořepin vychází z výpočtu únosnosti válcových skořepin (oskulační válec, viz odstavec 2.3), je stejná i hodnota redukčního součinitele pro tyto oba typy konstrukčních uzlů. Na rozdíl od válcové skořepiny je u kuželových skořepin s malým vzepětím výrazný podíl ohybového namáhání. Lze tedy předpokládat, že vliv počátečních imperfekcí, který reprezentuje přídatný ohyb, je zde méně významný. Vzhledem k této skutečnosti je možné předpokládat, že redukční součinitel stanovený pro válcovou skořepinu bude v případě kuželových skořepin s malým vzepětím výrazně konzervativní. Tento předpoklad potvrzují i předběžné výsledky uvedené v této kapitole.

Podle evropského doporučení ECCS je hodnota redukčního součinitele pro kuželové skořepiny zatížené vnějším přetlakem v základní jakostní třídě C stanovena na $\alpha = 0,50$ (další třídy na obr. 10.3). Nová hodnota redukčního součinitele je v této kapitole předběžně stanovena na konstantní hodnotu $\alpha = 0,80$. Pokud by se dalšími nezbytnými analýzami a experimenty podařilo prokázat správnost tohoto předběžného výsledku, mohla by být nová hodnota redukčního součinitele v případě kuželových skořepin s malým vzepětím zavedena do stávajících doporučení.

11 POROVNÁNÍ METOD VÝPOČTU MEZNÍHO PŘETLAKU

V této kapitole je provedeno porovnání návrhu zkoumaných kuželových skořepin podle doporučení ECCS, podle metody navržené v dizertační práci a výsledků numerických analýz. Porovnávány jsou výsledné hodnoty mezního přetlaku kuželových skořepin s různými typy okrajových podmínek. V případě okrajové podmínky prostého podepření a kuželové skořepiny s okrajovým prstencem jsou hodnoty vypočítaného mezního přetlaku doplněny o výsledky experimentu, uvedené v kapitole 9. Hodnoty mezního přetlaku vypočítaného podle navržené metody jsou porovnávány s výsledky numerických analýz bez uvažování nelineárního chování materiálu (GNA). Výsledky experimentů jsou porovnávány s výsledky numerických analýz typu GMNA navíc s uvažováním vlivu počátečních imperfekcí prostřednictvím redukčního součinitele navrženého v předchozí kapitole (10) $\alpha_{DP} = 0,80$.

11.1 Kloubově uložená kuželová skořepina

Rozměry kuželové skořepiny jsou uvedeny v tab. 11.1. Geometrie oskulačního válce, která vychází z geometrie kuželové skořepiny, spadá do oblasti krátkých válcových skořepin (viz tab. 2.4). Z tohoto důvodu vyjadřuje vliv okrajových podmínek součinitel $C_{\theta S}$. Podle vztahů uvedených v odst. 2.3.3 probíhá ztráta stability ukázkové kuželové skořepiny v elastické oblasti, tzn., vliv pružně-plastického chování materiálu se zde neuplatní. Součinitel pružné imperfekce je v doporučení ECCS stanoven na hodnotu $\alpha = 0,50$. V dizertační práci (kapitola 10) je stanovena nová hodnota redukčního součinitele $\alpha = 0,80$ (z důvodu přehlednosti jsou redukční součinitele dále uváděny s příslušnými indexy – DP a ECCS).

Tab. 11.1 Rozměry kuželové skořepiny

α_c [°]	r_2 [mm]	r_1 [mm]	t [mm]	r_e [mm]	r_e/t [-]	$C_{\theta S}$ [-]	α_{ECCS} [-]	α_{DP} [-]
10	150	25	0,8	527,7	659,6	1,52	0,50	0,80

Výpočet dle ECCS

V následujícím textu je proveden výpočet mezního přetlaku dle ECCS. Postup řešení je popsán v kapitole 2.3.3. Kritické napětí oskulačního válce je vyjádřeno vztahem

$$\sigma_{\theta Rcr} = 0,92E \frac{C_{\theta} t}{\omega r_e} = 0,92 \cdot 2E5 \cdot \frac{1,52}{5,22} \cdot \frac{0,8}{527,675} = 81,2MPa$$

Součinitel zohledňující typ okrajové podmínky $C_{\theta S}$ je určen z tab. 2.5 ze vztahu pro krátkou válcovou skořepinu

$$C_{\theta S} = 1,25 + \frac{8}{\omega^2} - \frac{4}{\omega^3}$$

kde

$$\omega = \frac{l_e}{r_e} \sqrt{\frac{r_e}{t}}$$

Hodnota kritického přetlaku je

$$p_{\theta Rcr} = \sigma_{\theta Rcr} \frac{t}{r_e} = 81 \cdot \frac{0,8}{527,7} = 0,123MPa \quad (11.1)$$

Jelikož ztráta stability probíhá v elastické oblasti (viz tab. 2.2; tzn. oblast kde relativní štíhlost $\lambda_\theta \geq \lambda_p$), je charakteristická pevnost při boulení dána vztahem

$$\sigma_{\theta Rk} = \chi_\theta f_{y,k} = \frac{\alpha}{\lambda^2} \cdot f_{y,k} = \alpha_{ECCS} \cdot \sigma_{\theta Rcr} = 0,5 \cdot 81,2 = 40,6 \text{ MPa}$$

Mezní přetlak je potom

$$p_{ECCS} = \sigma_{\theta Rk} \frac{t}{r_e} = 40,6 \cdot \frac{0,8}{527,7} = \mathbf{0,0615 \text{ MPa}}$$

Výpočet pomocí numerické analýzy typu GNA

V následujícím textu je uveden výsledek výpočtu limitního přetlaku kuželové skořepiny s rozměry z tab. 11.1 numerickou analýzou typu GNA. Vliv počátečních imperfekcí je zohledněn novou hodnotou redukčního součinitele $\alpha_{DP} = 0,80$

$$p_{GNA} = 0,09096 \text{ MPa}$$

Výpočet mezního přetlaku s uvažováním vlivu počátečních imperfekcí

$$p_{GNA,\alpha} = \alpha_{DP} \cdot p_{GNA} = 0,8 \cdot 0,09096 = \mathbf{0,07277 \text{ Pa}}$$

Výpočet pomocí navržené metody

Koeficienty regresní křivky kloubově uložené ukázkové kuželové skořepiny jsou uvedeny v tab. 11.2.

Tab. 11.2 Koeficienty regresní křivky

K'	m
616499	2,4144

Výpočet limitního vnějšího elastického přetlaku

$$p_{el} = K' \cdot \left(\frac{t}{r_e}\right)^m = K' \cdot \left(\frac{r_e}{t}\right)^{-m} = 616499 \cdot \left(\frac{0,8}{527,7}\right)^{2,4144} = 0,096 \text{ MPa}$$

Hodnota limitního vnějšího elastického přetlaku s uvažováním vlivu počátečních imperfekcí

$$p_{el,\alpha} = \alpha_{DP} \cdot p_{el} = 0,8 \cdot 0,096 = \mathbf{0,077 \text{ MPa}}$$

Porovnání hodnot limitního přetlaku

Shrnutí předchozích výsledků je uvedeno v tabulce 11.3.

Tab. 11.3 Porovnání hodnot limitního přetlaku

Kloubově uložená kuželová skořepina	ECCS	Analýza GNA	Navržená metoda
Limitní přetlak [MPa]	0,0615	0,073	0,077

Z uvedených výsledků je patrné, že výpočet limitního přetlaku dle ECCS je v případě kloubově uložených kuželových skořepin mírně konzervativní. Příčinou je nízká hodnota redukčního součinitele $\alpha_{ECCS} = 0,50$.

11.2 Prostě podepřená kuželová skořepina

V této kapitole je provedeno porovnání výpočtu limitního přetlaku prostě podepřené kuželové skořepiny s rozměry uvedenými v tab. 11.4. Byla zvolena kuželová skořepina s okrajovým úhlem 15° , jelikož naměřená hodnota limitního přetlaku u tohoto modelu nebyla ovlivněna možným posuvem v osové směru (viz kap. 9; experimentální vzorek byl položen přímo na kovové přírubě).

Tab. 11.4 Rozměry kuželové skořepiny

α_c [°]	r_2 [mm]	r_1 [mm]	t [mm]	r_e [mm]	r_e/t [-]	C_{θ_s} [-]	α_{DP} [-]
15	147	25	0,8	350,5	438	0	0,80

Výpočet dle ECCS

Výpočet dovoleného přetlaku podle ECCS není možný, jelikož velikost součinitele C_{θ_s} je pro podmínku možného posuvu spodního okraje skořepiny v radiálním směru rovna nule (viz tab. 2.5)

Výpočet pomocí numerické analýzy typu GNA

Hodnota limitního vnějšího přetlaku při výpočtu s uvažováním geometrické nelinearity je

$$p_{GNA} = 0,0893 \text{ MPa}$$

Výpočet limitního vnějšího přetlaku s uvažováním vlivu počátečních imperfekcí

$$p_{GNA,\alpha} = \alpha_{DP} \cdot p_{GMNA} = 0,8 \cdot 0,0893 = \mathbf{0,0714 \text{ MPa}}$$

Výpočet pomocí numerické analýzy typu GMNA

Hodnota limitního vnějšího přetlaku při výpočtu s uvažováním geometrické i materiálové nelinearity je

$$p_{GMNA} = 0,04672 \text{ MPa}$$

Výpočet limitního vnějšího přetlaku s uvažováním vlivu počátečních imperfekcí

$$p_{GMNA,\alpha} = \alpha_{DP} \cdot p_{GMNA} = 0,8 \cdot 0,04672 = \mathbf{0,0374 \text{ MPa}}$$

Výpočet pomocí navržené metody

Koeficienty regresní křivky prostě podepřené ukázkové kuželové skořepiny jsou uvedeny v tab. 11.5.

Tab. 11.5 Koeficienty regresní křivky

K'	m
------	-----

Výpočet limitního vnějšího elastického přetlaku

$$p_{el} = K' \cdot \left(\frac{t}{r_e}\right)^m = K' \cdot \left(\frac{r_e}{t}\right)^{-m} = 91858 \cdot \left(\frac{0,8}{350,5}\right)^{2,28} = 0,08715 \text{ MPa}$$

Výpočet limitního vnějšího přetlaku s uvažováním vlivu počátečních imperfekcí

$$p_{el,\alpha} = \alpha_{DP} \cdot p_{el} = 0,8 \cdot 0,08715 = 0,0697 \text{ MPa}$$

Porovnání hodnot limitního přetlaku

Shrnutí předchozích výsledků spolu s výsledkem experimentu je uvedeno v tabulce 11.6.

Tab. 11.6 Porovnání hodnot limitního přetlaku

Prostě podepřená kuželová skořepina	ECCS	Analýza GNA	Navržená metoda	Analýza GMNA	Experiment
Limitní přetlak [MPa]	0	0,0714	0,0697	0,0374	0,046

V případě, kdy není zamezen posuv okraje kuželové skořepiny v radiálním směru, není možné postupovat dle vztahů uvedených v doporučení ECCS. Hodnoty limitního přetlaku vypočítané analýzou GNA a navrženou metodou jsou ve velmi dobré shodě. Vhodnost použití navržené metody byla již ověřena v předchozích kapitolách.

Diskuze k výsledkům experimentu byla provedena v kapitole 9, u výsledku analýzy GMNA dříve nebyl uvažován vliv počátečních imperfekcí. Z porovnání hodnot limitního přetlaku je zřejmé, že počáteční imperfekce u *prostě podepřených* kuželových skořepin mají skutečně nepatrný vliv na stabilitní únosnost a i použití redukčního součinitele $\alpha_{DP} = 0,80$ je poměrně konzervativní. Tato skutečnost byla již předpokládána v kapitole 10. V případě prostě podepřených kuželových skořepin byla uvedena možnost použití redukčního součinitele $\alpha_{DP} = 0,99$. Podíl ohybového namáhání je v případě prostě podepřených kuželových skořepin s malým vzepětím tak výrazný, že další ohybové namáhání způsobené počáteční imperfekcí, se na stabilitní únosnosti již téměř neprojeví.

Na uvedených výsledcích je překvapující jiná skutečnost. Dle ECCS by se díky své geometrii zkoumaná kuželová skořepina měla pohybovat v elastické oblasti, kdy se neprojeví vliv pružně-plastického chování materiálu (viz odst. 2.3.3). V této oblasti je při návrhu hodnota kritického přetlaku (a samozřejmě i p_{GNA} , p_{el} - limitní hodnoty elastického vnějšího přetlaku) vynásobena redukčním součinitelem pružné imperfekce α a vliv nelineárního chování materiálu není jinak zohledněn. Z výsledků uvedených v tab. 11.6 je patrné, že tento postup by byl v případě zkoumaných kuželových skořepin *výrazně na straně nebezpečné*. Vliv pružně-plastického chování materiálu zjevně není možné zanedbat a zkoumané kuželové skořepiny se nacházejí v pružně-plastické oblasti ztráty stability. Hranice mezi těmito oblastmi ztráty stability jsou v ECCS stanoveny na základě součinitelů, platných pro válcovou skořepinu (α , β , η v tab. 2.2). Pro potřeby navrhování kuželových skořepin s malým vzepětím bude nutné stanovit nové hranice. Tento problém je jedním z cílů dalšího výzkumu a není předmětem této dizertační práce.

11.3 Kuželová skořepina s okrajovým prstencem

V této kapitole je provedeno porovnání výpočtu limitního přetlaku kuželové skořepiny s rozměry uvedenými v tab. 11.7.

Tab. 11.7 Rozměry kuželové skořepiny

α_c [°]	r_2 [mm]	r_1 [mm]	t [mm]	r_e [mm]	r_e/t [-]	A_r [mm ²]	Γ [-]	$C_{\theta S}$ [-]	α_{DP} [-]
10	150	25	0,8	527,7	659,6	30	750	0	0,80

Výpočet dle ECCS

Výpočet dovoleného přetlaku podle ECCS není možný, jelikož velikost součinitele $C_{\theta S}$ je pro podmínku možného posuvu spodního okraje skořepiny v radiálním směru rovna nule.

Výpočet pomocí numerické analýzy typu GNA

Hodnota limitního přetlaku při výpočtu s uvažováním geometrické nelinearity je

$$p_{GNA} = 0,0914 \text{ MPa}$$

Výpočet limitního přetlaku s uvažováním vlivu počátečních imperfekcí

$$p_{GNA,\alpha} = \alpha_{DP} \cdot p_{GMNA} = 0,8 \cdot 0,0914 = \mathbf{0,0731 \text{ MPa}}$$

Výpočet pomocí numerické analýzy typu GMNA

Hodnota limitního přetlaku při výpočtu s uvažováním geometrické i materiálové nelinearity je

$$p_{GMNA} = 0,08125 \text{ MPa}$$

Výpočet limitního přetlaku s uvažováním vlivu počátečních imperfekcí

$$p_{GMNA,\alpha} = \alpha_{DP} \cdot p_{GMNA} = 0,8 \cdot 0,08125 = \mathbf{0,065 \text{ MPa}}$$

Výpočet pomocí navržené metody

Koeficienty regresní křivky ukázkové kuželové skořepiny jsou uvedeny v tab. 11.8.

Tab. 11.8 Koeficienty regresní křivky

K'	m
967585	2,482

Výpočet limitního elastického přetlaku

$$p_{el} = K' \cdot \left(\frac{t}{r_e}\right)^m = K' \cdot \left(\frac{r_e}{t}\right)^{-m} = 967585 \cdot \left(\frac{0,8}{527,7}\right)^{2,482} = 0,0973 \text{ MPa}$$

Výpočet limitního přetlaku s uvažováním vlivu počátečních imperfekcí

$$p_{el,\alpha} = \alpha \cdot p_{el} = 0,8 \cdot 0,0973 = \mathbf{0,077 \text{ MPa}}$$

Porovnání hodnot limitního přetlaku

Shrnutí předchozích výsledků spolu s výsledkem experimentu je uvedeno v tabulce 11.9.

Tab. 11.9 Porovnání hodnot limitního přetlaku

Kuželová skořepina s okrajovým prstencem	ECCS	Analýza GNA	Navržená metoda	Analýza GMNA	Experiment
Limitní přetlak [MPa]	0	0,073	0,077	0,065	0,065

Stejně jako v případě prostě podepřených kuželových skořepin není možné při výpočtu vnějšího přetlaku kuželových skořepin s okrajovým prstencem postupovat dle vztahů uvedených v doporučení ECCS. Okrajový prstenec reprezentuje konečnou radiální tuhost okraje.

U kuželových skořepin s okrajovým prstencem již nelze zanedbat vliv počátečních imperfekcí. Při použití navrženého redukčního součinitele $\alpha_{DP} = 0,80$ je dosaženo dokonalé shody výsledku numerické analýzy typu GMNA s výsledkem experimentu. Stejně jako v případě prostě podepřených kuželových skořepin má nelineární chování materiálu vliv na limitní přetlak. Je možné předpokládat, že zkoumaná kuželová skořepina se pohybuje v pružně-plastické oblasti ztráty stability a tedy i v případě kuželových skořepin s malým vzepětím s okrajovým prstencem bude nutné upravit hranice oblastí ztráty stability.

11.4 Diskuze výsledků

Experimentální vzorky jsou vyrobeny z reálného materiálu s mezí kluzu $f_{y,k} = 180\text{MPa}$, zároveň obsahují počáteční výrobní imperfekce. Na celkovou únosnost zkušební vzorku má tedy vliv nejen geometrie skořepiny a způsob jejího uložení, ale i nelineární chování materiálu a počáteční imperfekce. Limitnímu přetlaku zkušebních vzorků by měl nejlépe odpovídat výsledek numerické analýzy typu GMNA (vliv geometrické a materiálové nelinearity) se zohledněním vlivu počátečních imperfekcí. Vliv počátečních imperfekcí na únosnost je zde vyjádřen pomocí redukčního součinitele $\alpha_{DP} = 0,80$. V případě prostě podepřených kuželových skořepin je tato hodnota poměrně konzervativní.

Důležitým závěrem pro další výzkum je skutečnost, že kuželové skořepiny s malým vzepětím, jimž je povolen posuv v radiálním směru, se pohybují v pružně-plastické oblasti ztráty stability a nelze tedy zanedbat vliv nelineárního chování materiálu. Bude tedy nutné upravit rozsahy oblastí ztráty stability. Stávající hranice těchto oblastí jsou stanoveny pro válcovou skořepinu a pro potřeby navrhování kuželových skořepin s malým vzepětím bude nutné rozsahy oblastí ztráty stability upravit.

12 ZÁVĚR

12.1 Stručný souhrn práce

Hlavním cílem dizertační práce bylo navržení vhodné metody výpočtu limitního vnějšího přetlaku kuželových skořepin s okrajovým úhlem z rozsahu $\alpha_c = 5 \div 15^\circ$ a s různými typy uložení spodního okraje skořepiny.

Úvodní část této dizertační práce je věnována podrobné analýze současného stavu problematiky navrhování kuželových skořepin s malým vzepětím. Jedním z nejdůležitějších dokumentů pro navrhování skořepinových konstrukcí je evropské doporučení ECCS. Platnost uvedeného postupu řešení je omezena velikostí okrajového úhlu ($\alpha_c > 25^\circ$) a zvolenou okrajovou podmínkou (zamezení radiálního posuvu okraje kuželové skořepiny). Z uvedeného vyplývá, že postup řešení podle ECCS není pro kuželové skořepiny řešené v této dizertační práci vhodný. Dále je v úvodní části dizertační práce provedena rešerše prací autorů, kteří se touto problematikou zabývali.

Ve **čtvrté kapitole** jsou představeny metody řešení ztráty stability kuželových skořepin použité v dizertační práci. Součástí této kapitoly je ověření správnosti numerických analýz na příkladě souběžného výzkumu příčně zatěžované válcové skořepiny. **Pátá kapitola** je věnována tvorbě numerického modelu a ověření správnosti použitých zjednodušení.

Šestou kapitolou začíná samotný výzkum ztráty stability kuželových skořepin s malým vzepětím. V této kapitole jsou nalezeny vztahy pro řešení elastického limitního přetlaku kuželových skořepin s okrajovým úhlem v rozsahu $\alpha_c = 5 \div 15^\circ$ a dvěma krajními typy okrajových podmínek. Jedná se o okrajové podmínky prostého podepření a kloubového uložení. Okraji kuželové skořepiny je v případě podmínky prostého podepření umožněn neomezený radiální posuv. V případě kloubového uložení je radiální posuv zcela zamezen. Z důvodu kompatibility s postupem uvedeným v evropském doporučení ECCS je výsledný vztah nalezen ve tvaru, který vychází ze vztahu pro kritické napětí válce zatíženým vnějším přetlakem (2.17). Dosažené výsledky jsou zpracovány ve formě přehledných grafů a tabulek. Pomocí podobnostních kritérií (bezrozměrný parametr tenkostěnnosti r_e/t) je možné vypočítat limitní elastický přetlak kuželové skořepiny s libovolnými rozměry (v rámci zkoumaného rozsahu). Výpočet limitního přetlaku kuželové skořepiny s okrajovým úhlem ze zkoumaného rozsahu spočívá v lineární interpolaci vypočítaných hodnot limitního přetlaku kuželových skořepin s okrajovými úhly 5° , 10° a 15° .

V **sedmé kapitole** jsou řešeny prostě podepřené kuželové skořepiny, jejichž spodní okraj je opatřen výztužným prstencem. Tento typ okrajové podmínky reprezentuje konečnou radiální tuhost. V této kapitole jsou opět nalezeny vztahy pro řešení elastického limitního přetlaku zkoumaných kuželových skořepin. V **osmé kapitole** je provedeno zobecnění dosažených výsledků. Pomocí podobnostních kritérií (parametr tenkostěnnosti r_e/t a bezrozměrný parametr zohledňující vliv radiální tuhosti okrajového prstence Γ) je možné vypočítat limitní přetlak kuželových skořepin s libovolnými rozměry (geometrie ovšem musí být v rámci zkoumaného rozsahu). Konečná hodnota limitního elastického přetlaku konkrétní kuželové skořepiny (s libovolným okrajovým úhlem a prstencem) vypočítána pomocí lineární interpolace.

Devátá kapitola je věnována experimentálnímu ověřování dosažených výsledků. Je zde představeno zkušební zařízení a provedeno srovnání naměřených a vypočítaných hodnot limitního přetlaku. Jelikož experimenty probíhají na skutečných modelech, jsou numerické analýzy prováděny s uvažováním pružně-plastického chování materiálu. Metodika výpočtu navržená v dizertační práci je platná pro elastický limitní přetlak. Zkoumání vlivu pružně-plastického chování materiálu je součástí dalšího výzkumu. Výsledky experimentů ztráty stability uvedené v dizertační práci jsou tedy zatím předběžné. Zkušební vzorky byly vyrobeny technologií svařování, další vzorky budou vyráběny lisováním.

V **desáté kapitole** je představen jeden z cílů dalšího výzkumu. Je jím problematika vlivu počátečních imperfekcí na stabilitní únosnost kuželových skořepin. Hodnota redukčního součinitele $\alpha = 0,50$, uvedená v ECCS, je stanovena pro válcovou skořepinu. Jelikož válcová skořepina je na přítomnost počátečních imperfekcí značně citlivá, může být tato hodnota redukčního součinitele pro kuželové skořepiny výrazně konzervativní. Výsledky numerických analýz uvedené v této kapitole prokázaly správnost tohoto předpokladu. Nová hodnota redukčního součinitele pro kuželové skořepiny s malým vzepětím byla předběžně stanovena na $\alpha = 0,80$. Pro stanovení konečné hodnoty redukčního součinitele je třeba ověřit řadu předpokladů a podmínek, které jsou uvedeny v této kapitole.

Jedenáctá kapitola je v podstatě sama o sobě stručným souhrnem výsledků dizertační práce. Jsou zde vzájemně porovnávány hodnoty limitního vnějšího přetlaku kuželových skořepin vypočítané různými metodami (dle ECCS, numerická analýza, navržená metoda). Hodnoty vnějšího přetlaku kuželových skořepin s povoleným posuvem v radiálním směru jsou navíc porovnány s výsledky experimentů. V kapitole je uvedena úvaha o vlivu pružně-plastického chování materiálu na únosnost resp. na výsledky výpočtů.

12.2 Vědeckotechnický přínos dizertační práce

Jak již bylo zmíněno, zkoumaná oblast navrhování kuželových skořepin s malým vzepětím není součástí norem a doporučení. V dizertační práci je navržena metoda výpočtu elastického limitního přetlaku kuželových skořepin s okrajovým úhlem $\alpha_c = 5 \div 15^\circ$ s různými typy okrajových podmínek (kloubové uložení, prosté podepření spodního okraje, kuželové skořepiny s konečnou radiální tuhostí). Tato metoda vychází ze vztahu pro kritické napětí oskulačního válce (2.17). Vztah pro kritický přetlak (2.19) je doplněn koeficienty (K , m), kterými je zohledněna geometrie kuželové skořepiny (velikost okrajového úhlu α_c) a zvolená okrajová podmínka

$$p_{el} = K \cdot E \frac{1}{\omega} \left(\frac{t}{r_e}\right)^m, \text{ resp. } p_{el} = K' \cdot \left(\frac{t}{r_e}\right)^m$$

Hodnoty koeficientů K , m jsou určeny z regresních křivek závislosti limitního přetlaku na parametru tenkostěnnosti (kapitoly 6 a 7, např. obr. 7.2). Po dosazení koeficientů do rovnice limitního přetlaku je vypočítán limitní elastický přetlak. Pomocí podobnostních kritérií (parametr tenkostěnnosti r_e/t a bezrozměrný parametr Γ) je možné vypočítat limitní přetlak kuželové skořepiny s libovolnými rozměry v rámci zkoumaného rozsahu.

Poznatky dosažené v dizertační práci jsou v souladu s evropským doporučením ECCS. Dizertační práce i ECCS v této oblasti vychází z řešení kritického napětí oskulačního válce.

Proto by oblast řešení kuželových skořepin s malým vzepětím mohla být, po nezbytné oponentuře odborné veřejnosti a splnění všech požadavků, zanesena do stávajících předpisů.

Pro možné usilování o zakotvení metod řešení kuželových skořepin s malým vzepětím do stávajících předpisů je třeba řešenou oblast rozšířit a podrobně prozkoumat.

12.3 Uplatnění výsledků v praxi

Výsledky dosažené v dizertační práci by (po výše zmíněné nutné oponentuře a doplnění) mohly být užitečným nástrojem v rukou běžného konstruktéra. V současné době musí být konstrukce kuželových skořepin s malým vzepětím řešeny numericky. Možnost využití normových vztahů při návrhu konstrukce vychází podstatně levněji. Navržená metoda je jednoduchá a má stejný fyzikální základ jako výpočet únosnosti uvedený v normách a doporučení. Výpočet únosnosti vychází ze známého vztahu pro kritické napětí válce. Pro oblast navrhování kuželových skořepin s malým vzepětím je tento vztah doplněn novými koeficienty, které zohledňují okrajové podmínky a geometrii skořepiny. Užitím podobnostních kritérií je možné navrhnout kuželovou skořepinu s libovolnými rozměry.

12.4 Cíle budoucího výzkumu

Problematika stabilitní únosnosti tenkostěnných skořepinových konstrukcí je značně rozsáhlá. V dizertační práci je navržena metodika výpočtu elastického limitního přetlaku kuželových skořepin s okrajovým úhlem z rozsahu $\alpha_c = 5 \div 15^\circ$. V dalším výzkumu je třeba rozšířit rozsah okrajového úhlu až do hodnoty $\alpha_c = 25^\circ$. Potom bude pokryta celá oblast kuželových skořepin, jejichž únosnost není možné vypočítat pomocí stávajících norem a doporučení.

Mezi hlavní cíle dalšího výzkumu patří zohlednění vlivu pružně-plastického chování materiálu. Tento vliv je ve stávajících předpisech dodatečně zohledněn pomocí součinitele vzpěrnosti při boulení χ . Tímto součinitelem je posuzován vliv plasticity na únosnost tenkostěnných skořepinových konstrukcí. Jeho hodnota je závislá na relativní štíhlosti konkrétní skořepiny (viz tab. 2.2). Výstupem výzkumu nelineárního chování materiálu by měl být podobný součinitel, kterým bude upravena hodnota elastického limitního přetlaku.

Další oblast výzkumu byla předběžně představena v závěru této dizertační práce. Je jí problematika vlivu počátečních imperfekcí na stabilitní únosnost kuželových skořepin. Jak již bylo naznačeno, hodnota redukčního součinitele je stanovena pro válcovou skořepinu a pro potřeby navrhování kuželových skořepin s malým vzepětím je tato hodnota konzervativní. Pokud se dalšími numerickými analýzami a experimenty podaří prokázat správnost nové hodnoty redukčního součinitele $\alpha = 0,80$, dojde k výrazné úspoře při navrhování kuželových skořepin s malým vzepětím.

Po splnění naznačených cílů bude možné usilovat o zařazení kompletní metodiky návrhu hladkých kuželových skořepin s malým vzepětím do norem a doporučení. Dalším krokem je podrobný výzkum kuželových skořepin s malým vzepětím vyztužených žebry.

LITERATURA

- [1] ECCS TC8 TWG 8.4 *Buckling of Steel Shells*. European Design Recommendations. 5th Edition. Published by ECCS. (2008). ISBN: 92-9147-000-92.
- [2] DIN 18800, Part 4. *Structural steelwork, Analysis of safety against buckling of shells*. Beuth Verlag GmbH. Berlin. (1990).
- [3] ČSN EN 1993-1-6. *Navrhování ocelových konstrukcí. Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí*. Český normalizační institut. (2008).
- [4] Bushnell D.: *Computerized buckling analysis of shells*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. (1989). ISBN: 9024730996.
- [5] Volmir, A. S.: *Ustojčivost' uprugich sistem*. Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematičeskoj literatury. Moskva (1963).
- [6] Volmir, A. S.: *Gibkie plastinky i oboločky*. Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematičeskoj literatury. Moskva (1957).
- [7] Esslinger, M., Van Impe, R.: *Theoretical buckling loads of conical shells*. ECCS Colloquium on Stability of Plate and Shell Structures. pp. 387-395. Ghent University (1987)
- [8] Wunderlich, W., Albertin U.: *The influence of boundary conditions on the load carrying behavior and the imperfection sensitivity of conical shells*. Proceedings of International Conference on Carrying Capacity of Steel Shell Structures. pp. 98-105. Brno (1997).
- [9] Chryssanthopoulos, M., K., Pariatmono, N., Spagnoli, A.: *Buckling tests of unstiffened and stiffened conical shells in compression*. Proceedings of International Conference on Carrying Capacity of Steel Shell Structures. pp. 16-23. Brno (1997).
- [10] Chryssanthopoulos, M., Spagnoli, A.: *The Influence of Radial Edge Constraint on the Stability of Stiffened Conical Shells in Compression*. Thin-Walled Structures 27(2). pp. 147-163. Elsevier Science Ltd (1997).
- [11] Chryssanthopoulos, M., Poggi, C., Spagnoli, A.: *Buckling design of conical shells based on validated numerical models*. Thin-Walled Structures 31(1-3). pp. 257-270. Elsevier Science Ltd (1998). [doi:10.1016/S0263-8231\(98\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(98)00006-8).
- [12] Poggi, C.: *Numerical analysis of imperfect conical shells*. Proceedings of International Conference on Carrying Capacity of Steel Shell Structures. pp. 317-323. Brno (1997).
- [13] Paščenko P.: *Stabilita tenkostěnných skořepinových konstrukcí v dopravní technice*. Habilitační práce. Univerzita Pardubice. Pardubice (2009).
- [14] Paščenko P.: *Stabilita vyztužených kuželových střech uskladňovacích nádrží*. Doktorská práce. Univerzita obrany. Brno (1998).
- [15] Tomek P.: *Vliv počátečních imperfekcí na pevnost a stabilitu tenkostěnných skořepinových konstrukcí*. Dizertační práce. Univerzita Pardubice. Pardubice (2012).

- [16] FEM Computer program COSMOS/M, Version 2.95 by SRAC (Structural Research and Corporation), Los Angeles, California.
- [17] FEM Computer program COSMOSWorks 2007 Advanced Professional. SolidWorks Corporation.

VLASTNÍ PUBLIKACE DIZERTANTA

- [18] Středová, D., Tomek, P.: *Experimental model of conical shell under external pressure*. Proceedings of 13th International Scientific Conference Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry. (In print) Svitavy (2011).
- [19] Středová, D., Paščenko, P.: *Conical shells under external pressure*. Proceedings of 13th International Scientific Conference Applied Mechanics 2011, (In print). Brno (2011).
- [20] Středová, D., Paščenko, P., Tomek, P.: *Vliv polohy počáteční imperfekce na únosnost kulového vrchlíku zatíženého vnějším přetlakem*. Sborník konference s mezinárodní účastí TechMat 2010, s. 247-250. ISBN 978-80-7395-324-9. Svitavy (2010).
- [21] Tomek, P., Paščenko, P., Středová, D.: *Vývoj experimentálního zařízení pro zkoušky ztráty stability tenkostěnných vrchlíků*. Sborník konference s mezinárodní účastí TechMat 2010, s. 205-210. ISBN 978-80-7395-324-9. Svitavy (2010).
- [22] Středová, D., Paščenko, P.: *Influence of initial imperfections on spherical caps subjected to external pressure*. Proceedings of 12th International Scientific Conference Applied Mechanics 2010, s. 115- 118. Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-586-0. Liberec (2010).
- [23] Paščenko, P., Středová, D., Tomek, P.: *Stability of thin walled structures*. International Journal of Applied Mechanics and Engineering, Vol. 15, s. 483-490. University Press Zielona Góra. ISSN 1425-1655. Zielona Góra (2010).
- [24] Tomek, P., Středová, D.: *Příčné zatěžování válcové skořepiny*. Sborník konference TechMat 2009, ISBN 978-80-7395-046-0. Svitavy (2009).
- [25] Tomek, P., Středová, D.: *Postbuckling behavior of saddle loaded shell* in Scientific Papers of University of Pardubice. Series B, The Jan Perner Transport Faculty. Pardubice (2009).

PŘÍLOHY