

ZKOUŠKY ZTRÁTY STABILITY PROSTĚ PODEPŘENÝCH KUŽELOVÝCH SKOŘEPINY S MALÝM VZEPĚTÍM ZATĚŽOVANÝCH VNĚJŠÍM PŘETLAKEM

Doubravka STŘEDOVÁ, Petr TOMEK

*Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů, Dopravní fakulta Jana Pernera,
Univerzita Pardubice, Studentská 95, 532 10 Pardubice, ČR, e-mail:
doubravka.stredova@upce.cz, petr.tomek@upce.cz*

Annotation

This paper is devoted to an experimental verification of results of an approximate analytical method used to calculate a limit elastic pressure of researched conical shells. The next aim of this paper is to introduce the test equipment manufactured to perform the experiments of shells buckling. The comparative numerical analyses are performed by FEM computer program COSMOS/M [2].

Úvod

Úvodní část článku je věnována metodě výpočtu limitního zatížení kuželových skořepin s malým vzepětím s okrajovou podmínkou prostého podepření spodního okraje skořepiny. Řešený rozsah okrajového úhlu je $\alpha_c = 5^\circ \div 15^\circ$. Z důvodu kompatibility s postupem uvedeným v evropském doporučení ECCS [1] byl výsledný vztah hledán ve tvaru, který vychází ze vztahu pro kritické napětí válce zatíženého vnějším přetlakem. Tento vztah je ve zkoumaném případě kuželových skořepin s malým vzepětím doplněn o nové konstanty, které zohledňují vliv zvolené okrajové podmínky prostého podepření okraje. Navržená metoda je výsledkem výsledků souborů numerických analýz (typu GNA – geometricky nelineární analýza). Podrobný postup výpočtu limitního elastického přetlaku je uveden v disertační práci [3]

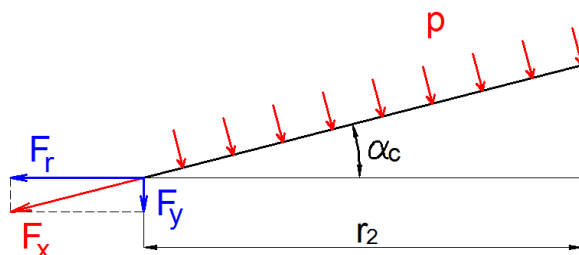
Dále je v článku představeno zkušební zařízení, dostupném na katedře Mechaniky, Materiálů a Částí strojů (na DFJP). Na tomto zařízení probíhají experimenty ztráty stability kuželových skořepin s malým vzepětím a kulových vrchlíků [4].

Navržená metoda výpočtu

Kuželové skořepiny s menším okrajovým úhlem vykazují značně nelineární chování. Není proto možné použít lineární řešení, užívané v doporučení ECCS [1]. Tato nelinearita spočívá v tom, že 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.

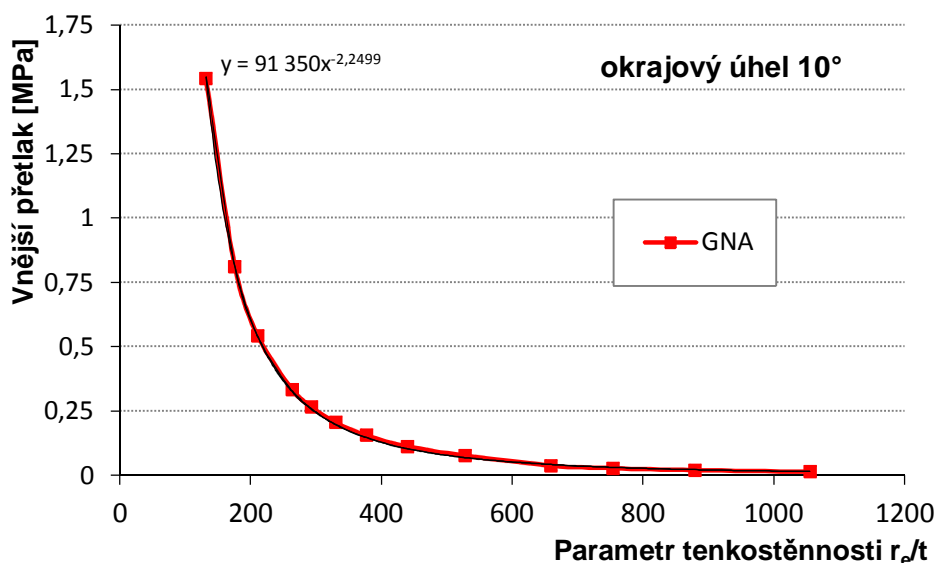
Dalším důvodem je možný posuv spodního okraje skořepiny v radiálním směru (směr kolmý k ose rotace skořepiny), ke kterému dochází při zatěžování

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 1.



Obr. 1: Schematické znázornění sil působících ve stěně kuželové skořepiny zatížené vnějším přetlakem

Závislost elastického limitního přetlaku (výsledky analýz GNA) kuželové skořepiny s velikostí okrajového úhlu $\alpha_c = 10^\circ$ na parametru tenkostěnnosti skořepiny r_e/t je vykreslena na obrázku 2.



Obr. 2: Závislost mezního přetlaku na parametru tenkostěnnosti – prostě podepřená kuželová skořepina s okrajovým úhlem $\alpha_c = 10^\circ$; zobrazena regresní rovnice

Vzhledem k mocninnému charakteru uvedené závislosti, je možné sestavit regresní křivku podle rovnice

$$p_{el} = K \cdot E \frac{1}{\omega} \left(\frac{t}{r_e}\right)^m = K' \cdot \left(\frac{t}{r_e}\right)^m = K'' \cdot \left(\frac{r_e}{t}\right)^{-m} \quad (1)$$

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

$$K' = K \cdot E \frac{1}{\omega} \quad (2)$$

Koeficienty K' a m s uvažováním elastického chování materiálu (analýzy GNA) prostě podepřené skořepiny s okrajovými úhly $\alpha_c = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Koeficienty regresních křivek – prostě podepřený okraj

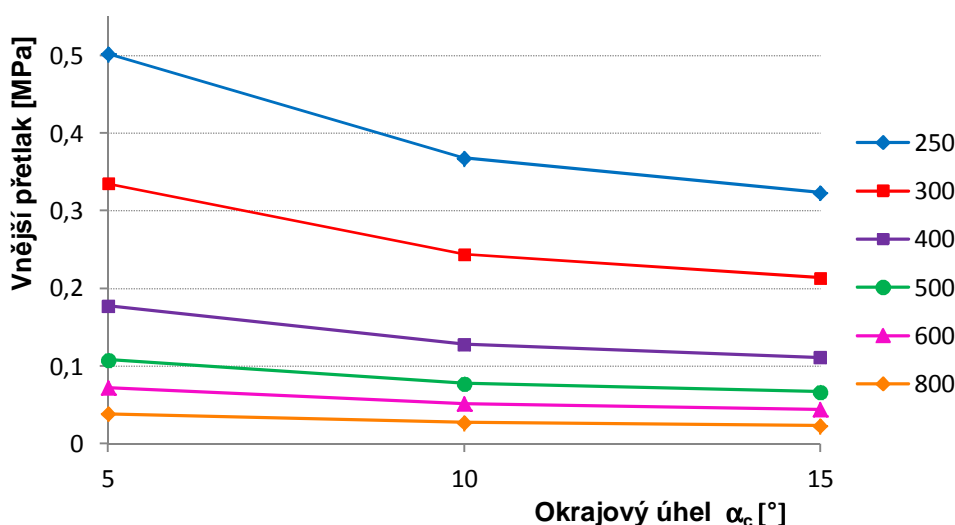
Okrajový úhel α_c [°]	Rozsah r_e/t	Regresní koeficienty	
		K'	m
5	260÷2080	104300	2,2175
10	130÷1050	91350	2,2499
15	90÷890	91858	2,28

Dosažením nalezených koeficientů do rovnice limitního vnějšího přetlaku (1) 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).

Zobecnění výsledků

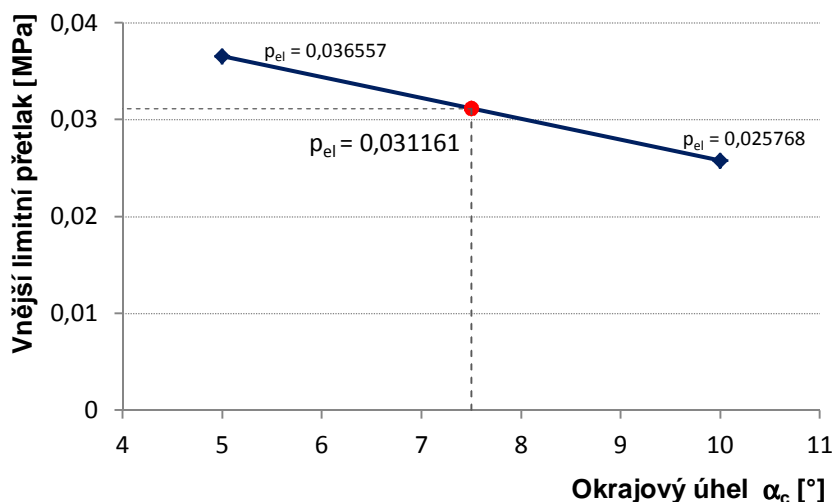
Koeficienty regresních křivek platí pro konkrétní hodnoty okrajových úhlů $\alpha_c = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$. V této kapitole je provedeno zobecnění dosažených výsledků, aby bylo možné vypočítat limitní přetlak kuželové skořepiny s libovolnou hodnotou okrajového úhlu (v rozsahu $\alpha_c = 5^\circ \div 15^\circ$).

V následujícím grafu (obr. 3) jsou uvedeny závislosti limitního přetlaku vypočítané pomocí rovnice (1) s příslušnými koeficienty (z tabulky 1) 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° , 10° a 15° je možné lineárně interpolovat.



Obr. 3: Závislost mezního přetlaku kuželové skořepiny s okrajovou podmínkou prostého podepření na velikosti okrajového úhlu α_c pro různé hodnoty parametru tenkostěnnosti skořepiny r_e/t

Výpočet limitního přetlaku ukázkové kuželové skořepiny s okrajovým úhlem např. $\alpha_c = 7,5^\circ$ a parametrem tenkostěnnosti $r_e/t = 815$ pomocí lineární interpolace je ukázán na obr. 4.



Obr. 4: Limitní přetlak kuželové skořepiny s okrajovým úhlem $\alpha_c = 7,5^\circ$ a parametrem tenkostěnnosti $r_e/t = 815$

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. Vliv pružně-plastického chování materiálu není v navržené metodě zohledněn. Vhodnost navržené metody je třeba dále experimentálně ověřit.

Zkušební zařízení

Zkušební zařízení (obr. 5) 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. 5: Zkušební zařízení s volně položeným vzorkem

Experimenty ztráty stability prostě podepřených kuželových skořepin

Rozměry zkušebních vzorků jsou shodné s rozměry numerických modelů. 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. 6: Zkušební vzorky



Obr. 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. V tabulce 2 jsou uvedeny vypočítané a naměřené hodnoty limitního přetlaku.

Tab. 2 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	0,046

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. 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.

Závěr

Cílem 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 imperfekcím a způsobu uložení okraje kuželové skořepiny. Experimentální vzorky prostě podepřených kuželových skořepin budou dále uloženy přímo na kovové přírubě. Chyba způsobená možným posuvem ve směru osy skořepiny by tímto způsobem uložení měla být odstraněna.

Mezi hlavní cíle dalšího výzkumu patří zohlednění *vlivu pružně-plastického chování materiálu*. Zahrnutím vlivu pružně plastického chování materiálu do navržené metody, bude možné porovnat výsledky experimentů přímo s výsledky vypočítané navrženou metodou. V současné fázi výzkumu, je nutné doplnit výsledky o numerickou analýzu zohledňující i materiálovou nelinearitu. V tabulce 3 je uvedeno srovnání metod výpočtu limitního přetlaku ukázkové skořepiny, je patrna velmi dobrá shoda výsledků navržené metody a srovnávací GNA analýzy a shoda GMNA analýzy a experimentu.

Tab. 3 Porovnání naměřených a vypočítaných 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

Poděkování

Tato práce vznikla v rámci projektu POSTA (CZ.1.07/2.4.00/17.0107)

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] FEM Computer program COSMOS/M, Version 2.95 by SRAC (Structural Research and Corporation), Los Angeles, California.
- [3] Středová, D.: Stabilitní prolomení kuželových skořepin s malým vzepětím. Dizertační práce. Univerzita Pardubice. Pardubice (2012).
Paščenko, P.; Tomek, P.; Středová, D.: Stabilita kulového vrchlíku. Monografie. Univerzita Pardubice. Pardubice (2013). ISBN: 978-80-7395-697-4.