

**UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA**

**VLIV POČÁTEČNÍCH
IMPERFEKČÍ NA PEVNOST A
STABILITU TENKOSTĚNNÝCH
SKOŘEPINOVÝCH KONSTRUKCÍ**

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

2012

Ing. Petr Tomek

Doktorand: Ing. Petr Tomek

**Studijní program: P3710 Technika technologie
v dopravě a spojích**

**Studijní obor: 3706V005 Dopravní
prostředky a infrastruktura**

Název dizertační práce:

**VLIV POČÁTEČNÍCH IMPERFEKČÍ NA PEVNOST A
STABILITU TENKOSTĚNNÝCH SKOŘEPINOVÝCH
KONSTRUKČÍ**

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

Dizertační práce vznikla na školícím pracovišti:

Katedra Mechaniky Materiálů a Částí strojů

Obsah

1	Úvod	6
2	Současný stav řešení ztráty stability kulového vrchlíku	7
2.1	Vliv počátečních imperfekcí na únosnost kulového vrchlíku dle ECCS [2] (author W. Wunderlich).....	8
2.1.1	Charakteristická amplituda imperfekce	8
2.1.2	Redukční součinitel pružné imperfekce.....	10
3	Definice cílů disertační práce na základě analýzy současného stavu.....	11
4	Příprava experimentu – vývoj zkušebního zařízení.....	12
4.1	Zkušební zařízení.....	13
4.2	Numerický model	14
4.3	Experimentální model.....	17
4.4	Vyhodnocení.....	17
5	Stanovení redukčního faktoru α pro kulový vrchlík vyztužený obvodovým prstencem.....	19
6	Závěr.....	24
6.1	Stručný souhrn disertační práce.....	24
6.2	Vědecko – technický přínos disertační práce	25
6.3	Uplatnění výsledků v praxi.....	26
6.4	Cíle budoucího výzkumu.....	26
7	Seznam použité literatury	28
8	Uvedení vlastních publikací disertanta souvisejících s tématem disertační práce.....	30
	ANOTACE.....	32
	ANNOTATION.....	32

Tab. 1: Seznam použitých fyzikálních veličin.

<i>Veličina</i>	<i>Popis</i>	<i>Jednotka</i>
A	Plocha průřezu obvodového prstence vrchlíku	mm ²
D	Průměr základní kružnice kulového vrchlíku	mm
E	Modul pružnosti v tahu (tlaku)	MPa
E_{tan}	Tangenciální modul zpevnění	MPa
l_g	Délka šablony pro měření imperfekcí	mm
p	Vnější přetlak	MPa
p_{Rcr}	Kritický přetlak při boulení	MPa
p_{cr}^{GNIA}	Kritický vnější přetlak imperfektního vrchlíku.	MPa
p_{cr}^{GNA}	Kritický vnější přetlak ideálního vrchlíku	MPa
R	Rádus zakřivení kulového vrchlíku	mm
$R_{p0,2}$	Mez kluzu materiálu	MPa
r	Poloměr základní kružnice kulového vrchlíku.	mm
t_c	Tloušťka stěny pláště kulového vrchlíku	mm
t_r	Tloušťka obvodového prstence	mm
u_y	Posuv bodu ve středu vrchlíku ve směru osy y	mm
w	Šířka obvodového prstence vrchlíku	mm
Δw_k	Charakteristická amplituda imperfekce	mm
Δw	Hloubka prohlubně	mm
α	Redukční součinitel pružné imperfekce (Redukční faktor)	---
Γ	Parametr vlivu radiální tuhosti prstence	---
δ	Relativní chyba	%
ε	Poměrná deformace	---
μ	Poissonovo číslo	---
ξ	Parametr vlivu hloubky prohlubně	---

Φ	Poloviční úhel kulového vrchlíku	°
σ_{RCr}	Kritické normálové napětí	MPa
χ	Součinitel boulení pro pružně plastické účinky	---

1 Úvod

Tenkostěnné skořepinové konstrukce se často používají v různých odvětvích průmyslu (chemický, energetický, dopravní, stavební, potravinářský, atd.). Jejich hlavní výhodou je vysoká únosnost při nízké hmotnosti konstrukce. Jeden z možných mezních stavů u těchto typů konstrukcí je ztráta stability. Ztráta stability může být výrazně ovlivněna počátečními imperfekcemi konstrukce. Počáteční imperfekce zpravidla snižují únosnost konstrukce. V některých případech dochází i ke změně tvaru ztráty stability.

Za počáteční imperfekce lze považovat nedokonalosti geometrie, uchycení a zatížení konstrukce, počáteční napětí, či nerovnoměrně rozložené mechanické vlastnosti materiálu, apod. Nejvýznamnější jsou nedokonalosti tvaru (geometrické počáteční imperfekce).

Disertační práce pojednává o vlivu počátečních imperfekcí na ztrátu stability tenkostěnných kulových vrchlíků. Zkoumaná oblast je omezena na prostě podepřený kulový vrchlík, vyztužený obvodovým prstencem. Zkoumaný kulový vrchlík představuje střechu (přepážku) nádrže. Uvažovaný obvodový prstenec působí jako konečná tuhost okraje vrchlíku v radiálním směru. Vrchlík je zatížen rovnoměrným vnějším přetlakem. Počáteční imperfekce jsou uvažovány ve formě nedokonalostí tvaru.

Cílem disertační práce je stanovit nové redukční faktory a vztahy, které by mohly nalézt uplatnění při běžném konstrukčním návrhu kulového vrchlíku v praxi. Redukční faktory by měly vyjádřit vliv nedokonalostí tvaru na ztrátu stability kulového vrchlíku s konečnou tuhostí v radiálním směru.

2 Současný stav řešení ztráty stability kulového vrchlíku

V této kapitole je uveden přehled významných autorů, kteří se věnovali výzkumu ztráty stability tenkostěnných konstrukcí. Přehled je doplněn o stručný souhrn výsledků výzkumu jednotlivých autorů. Disertační práce z větší části navazuje na výzkum W. Wunderlicha a P. Paščenka.

D. Bushnell [8] se okrajově zabýval numerickým popisem chování kulových vrchlíků vyztužených obvodovým prstencem. Ve své knize uvádí menší citlivost kulových vrchlíků na počáteční imperfekce. Tento jev odůvodňuje samotnou podstatou konstrukce kulového vrchlíku, která obsahuje výrazný ohybový stav. Autor uvádí, že vliv takto vytvořeného ohybového stavu na ztrátu stability může být vyšší než vliv ohybového stavu od počáteční imperfekce.

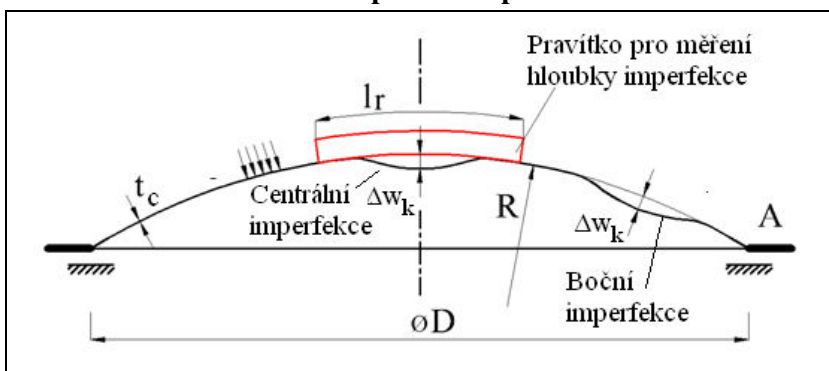
M. Esslinger a B. Geier [7] provedli sérii pokusů ztráty stability úplné kulové skořepiny. Zjistili, že úplná kulová skořepina je velmi citlivá na počáteční imperfekce. Autoři přirovnali citlivost úplné kulové skořepiny k citlivosti osově tlačené válcové skořepiny. Ve své knize [7] podrobně analyzují tvar hroucení při ztrátě stability. Potvrdili, že jednomu kritickému zatížení může příslušet více vlastních tvarů ztráty stability.

P. Paščenko ve své habilitační práci [4] zkoumal ztrátu stability tenkostěnných kulových vrchlíků s malým vzepětím. Do svých úvah zahrnul i kulové vrchlíky s konečnou tuhostí v radiálním směru. K vyjádření vlivu počátečních imperfekcí na ztrátu stability použil redukční faktor, odvozený pro osově tlačení válec. Sám autor označuje tento přístup s vysokou pravděpodobností za konzervativní. Zároveň doporučuje další výzkum redukčního faktoru, který bude vyjadřovat vliv počátečních imperfekcí na ztrátu stability kulového vrchlíku vyztuženého obvodovým prstencem.

W. Wunderlich v článku [3] zkoumal ztrátu stability kulových vrchlíků z hlediska okrajových podmínek, polovičního úhlu kulového vrchlíku, nelineárního chování materiálu (plasticity) a vlivu počátečních imperfekcí. Autor dospěl k jednoduchým vztahům určeným k návrhu kulového vrchlíku pro dané rovnoměrné zatížení. Své poznatky shrnul v evropském doporučení ECCS (stabilita ocelových konstrukcí) [2]. Ve svém výzkumu však nesledoval vliv obvodového prstence na ztrátu stability kulového vrchlíku. Popis výsledků výzkumu, zakotveného v ECCS [2], je uveden v následující kapitole 2.1.

2.1 Vliv počátečních imperfekcí na únosnost kulového vrchlíku dle ECCS [2] (author W. Wunderlich)

2.1.1 Charakteristická amplituda imperfekce.



Obr. 1: Prostě podepřený kulový vrchlík vyztužený obvodovým prstencem.

Charakteristická amplituda imperfekce Δw_k vyjadřuje maximální povolenou hloubku prohlubně. Její hodnota závisí na třídě přesnosti výroby a na geometrických rozměrech kulového vrchlíku. U reálných vrchlíků je hodnota charakteristické amplitudy imperfekce měřena pomocí šablony pro měření geometrických počátečních imperfekcí (Obr. 1).

Charakteristická amplituda imperfekce je dána vztahem:

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{R * t_c} \quad (1)$$

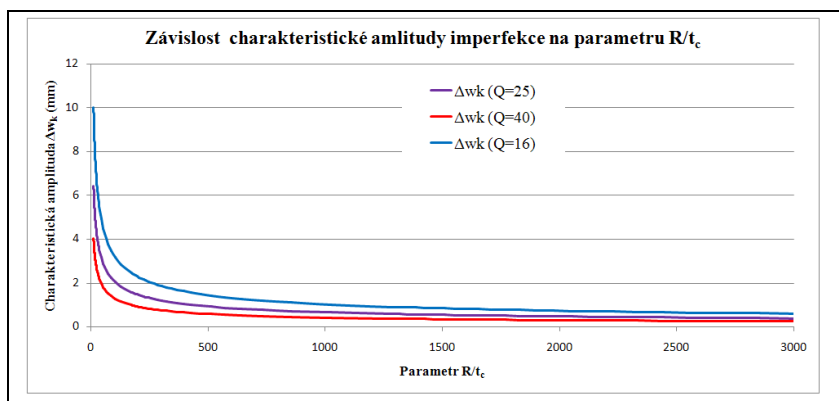
kde

Q - součinitel vlivu jakosti výroby z Tab. 2.

Tab. 2: Hodnoty součinitele vlivu jakosti výroby dle jednotlivých tříd.

<i>Třída jakosti výroby</i>	<i>Popis třídy</i>	<i>Q</i>
1	Speciální	40
2	Vysoká	25
3	Základní	16

Závislost maximální dovolené charakteristické amplitudy imperfekce pro jednotlivé třídy přesnosti výroby zobrazuje křivka na Obr. 2. Je zřejmé, že maximální dovolená hloubka prohlubně roste s klesajícím parametrem tenkostěnnosti R/t_c .



Obr. 2: Průběh charakteristické amplitudy imperfekce pro jednotlivé třídy přesnosti.

2.1.2 Redukční součinitel pružné imperfekce

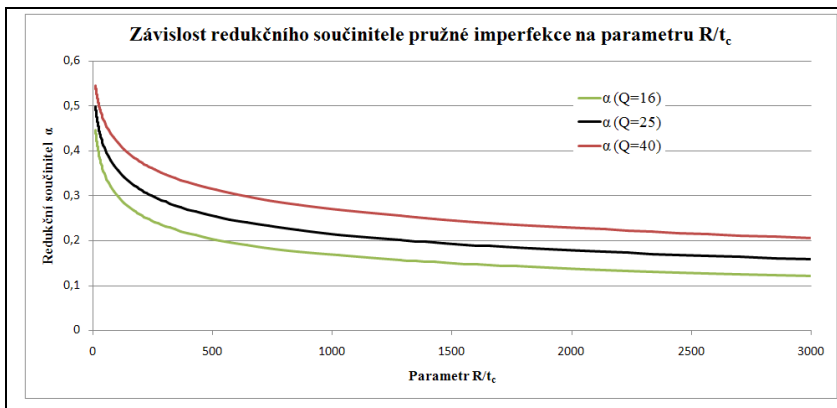
Vliv geometrické počáteční imperfekce na únosnost skořepinového vrchlíku je vyjádřen redukčním součinitelem pružné imperfekce α . Pro výpočet redukčního součinitele pružné imperfekce α je v ECCS [2] určený vztah:

$$\alpha = \frac{0,70}{1 + 1,90 * \left(\frac{\Delta w_k}{t_c}\right)^{0,75}} \quad (2)$$

kde

Δw_k – charakteristická amplituda imperfekce.

Příklad průběhu redukčního součinitele pružné imperfekce α je zobrazený na Obr 3. Ze závislosti vyplývá zvýšená citlivost na počáteční geometrické imperfekce pro vyšší parametr tenkostěnnosti R/t_c . Se zvyšujícím se parametrem tenkostěnnosti R/t_c hodnota redukčního součinitele pružné imperfekce α klesá.



Obr. 3: Průběh redukčního součinitele pružné imperfekce.

3 Definice cílů disertační práce na základě analýzy současného stavu

Disertační práce navazuje na soudobé poznatky vědy a techniky ohledně navrhování ocelového kulového vrchlíku. Tyto poznatky jsou zpracovány do norem, předpisů a doporučení [1], [2], [18]. Výpočet kulového vrchlíku s konečnou tuhostí v radiálním směru není uveden v evropském doporučení ECCS [2] ani v normě ČSN EN 1993-1-6 [1].

V habilitační práci [4] autor zkoumal mezní zatížení vrchlíku s konečnou tuhostí v radiálním směru. Vliv geometrických počátečních imperfekcí na ztrátu stability kulového vrchlíku zde však není v dostatečné míře zohledněn. Autor použil redukční faktor α stanovený pro osově tlačný válec.

Redukční faktor α uvedený v ECCS [2] (rovnice 2) byl stanoven W. Wunderlichem pro kloubově uložený vrchlík. U kloubově uloženého vrchlíku je podíl membránového napětí vyšší než u prostě podepřeného vrchlíku. Z toho vyplývá, že citlivost na počáteční imperfekce je vyšší u kloubově uloženého vrchlíku. Lze předpokládat, že redukční faktor α závisí u prostě podepřeného vrchlíku na tuhosti v radiálním směru.

Cílem disertační práce je stanovit nové redukční faktory a vztahy, které by mohly nalézt uplatnění při běžném konstrukčním návrhu kulového vrchlíku v praxi. Redukční faktory by měly vyjádřit vliv nedokonalostí tvaru na ztrátu stability kulového vrchlíku s konečnou tuhostí v radiálním směru.

Základem jsou poznatky a výsledky numerických analýz typu GNA, GMNA, GNIA a GMNIA. Analýzy jsou provedeny v programovém vybavení COSMOS/M [5] a CosmosWorks [6].

Dalším cílem disertační práce je připravit experimentální zkoušky ztráty stability zkušebních vzorků. Zkušební vzorky imitují

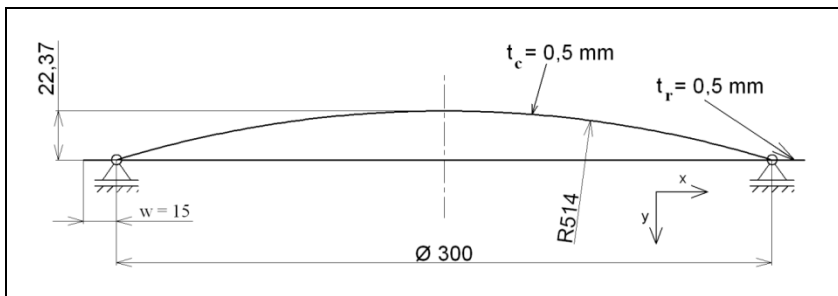
reálné kulové vrchlíky vyztužené obvodovým prstencem. Cílem provedených experimentů je ověřit výsledky numerických analýz.

4 Příprava experimentu – vývoj zkušebního zařízení

Výsledky numerických analýz budou ověřeny pomocí experimentů. V této kapitole jsou stanoveny geometrické rozměry zkušební vzorku. Dále je popsána první etapa vývoje zkušebního zařízení pro zkoušky ztráty stability tenkostěnných kulových vrchlíků. Zkušební zařízení bylo vyvinuto v rámci této disertační práce a je k dispozici na Katedře Mechaniky, Materiálů a Částí Strojů. Během vývoje zkušebního zařízení byla provedena první série zkoušek ztráty stability. První série zkoušek měla za úkol otestovat funkčnost zkušebního zařízení, zvolenou tloušťku obvodového prstence a způsob výroby zkušebních vzorků.

Rozměry kulového vrchlíku jsou uvedeny na Obr. 4. Tloušťka stěny pláště vrchlíku je $t_c=0,5 \text{ mm}$. Vrchlík je vyztužen obvodovým prstencem o šířce $w=15 \text{ mm}$. Tloušťka prstence je $t_r=0,5 \text{ mm}$. Geometrické rozměry jsou voleny s ohledem na možnosti zkušebního zařízení (parametry vývěvy). Tloušťka prstence je v první sérii testů shodná s tloušťkou pláště vrchlíku. Obvodový prstenec o tloušťce $t_r=0,5 \text{ mm}$ vzniká při výrobě samotného zkušební vzorku. Zkušební vzorek je proto snadněji vyrobitelný a levnější než vrchlík s odlišnou tloušťkou prstence a pláště.

První série experimentů měla za úkol pouze ověřit geometrické rozměry zkušebních vzorků a funkčnost zkušebního zařízení. Numerický model a ani zkušební vzorky první série experimentů neobsahovaly úmyslně vložené počáteční imperfekce.



Obr. 4: Rozměry experimentálního modelu kulového vrchlíku.

4.1 Zkušební zařízení

Zkušební zařízení (Obr. 6) je vyrobeno z válcové skořepiny (trubky) o délce 300 mm, vnějším průměru $\text{Ø } 273 \text{ mm}$ a tloušťce stěny 7,5 mm. Válec je na konci uzavřen víkem o tloušťce 20 mm. Na druhý konec válce je přivařena příruba o vnějším průměru $\text{Ø } 345 \text{ mm}$ a tloušťce 18 mm. Na přírubu je přilepeno pryžové těsnění o tloušťce 5 mm.

Do pláště válce jsou přivařeny vývody pro připojení vývěvy, analogového manometru a škrťacího ventilu. Velikost vnějšího přetlaku (podtlaku) je postupně zvyšována pomocí škrťacího ventilu až do limitní hodnoty vnějšího přetlaku vrchlíku. Velikost limitního vnějšího přetlaku (podtlaku) je odečítána z manometru.



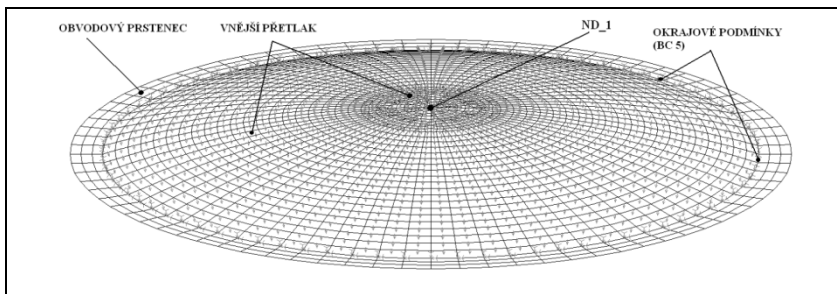
Obr. 5: Experimentální model vrchlíku.



Obr. 6: Zkušební zařízení.

4.2 Numerický model

Před samotnou výrobou zkušebního zařízení byla provedena numerická analýza zkušebního vzorku. Rozměry numerického modelu jsou uvedené na Obr. 4. Numerický model je zobrazen na Obr. 7. Při numerické analýze je uvažován von Misesův bilineární model pružně plastického chování materiálu s předpokládanou mezí kluzu $R_{p0,2}=180\text{ MPa}$. V elastické oblasti je předepsán modul pružnosti $E=2\cdot 10^5\text{ MPa}$ a v plastické oblasti je z důvodu konvergence úlohy předepsáno nepatrné zpevnění v podobě tangenciálního modulu $E_{tan}=20\text{ MPa}$.

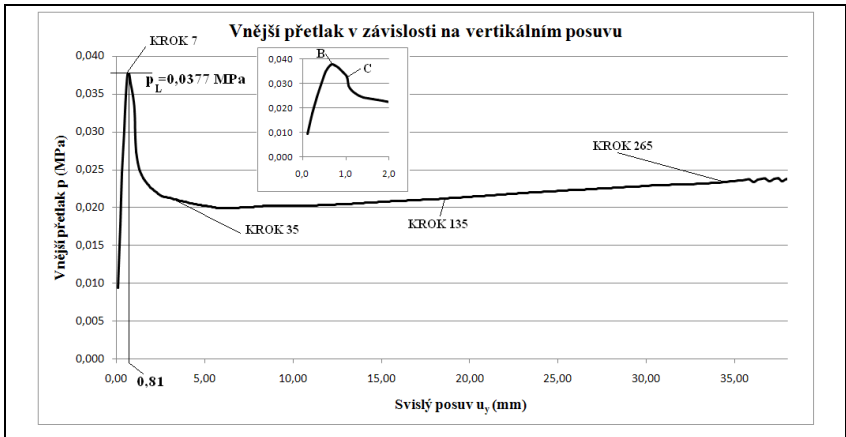


Obr. 7: Numerický model kulového vrchlíku.

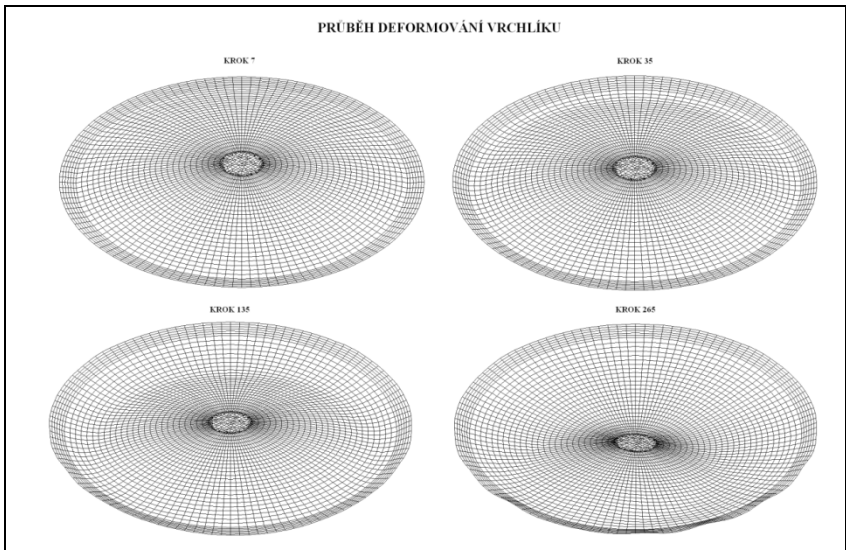
Mapovaná síť byla vytvořena čtyřuzlovými skořepinovými elementy SHELL4T, viz Obr. 7. Výpočet byl proveden nelineární numerickou analýzou typu GMNA, která zohledňuje materiálovou nelinearitu (plasticitu) a geometrickou nelinearitu (velké posuvy). Pro řízení iteračního procesu byla použita strategie řízení přírůstku oblouku zatěžovací křivky (Arc Length Control). Vliv počáteční geometrické imperfekce na ztrátu stability nebyl zahrnut do numerické analýzy. Numerický model nezohledňoval pryžové těsnění a neobsahoval GAP elementy pro simulaci vzájemného kontaktu. Vliv tření mezi pryžovým těsněním a prstencem vrchlíku byl zanedbán.

Rovnovážná křivka (závislost zatížení na vertikálním posuvu u_y středu vrchlíku ND_1 (Obr. 7) je zobrazena na Obr. 8. Z rovnovážné křivky je patrné, že při hodnotě posuvu $u_y=0,81 \text{ mm}$ (výpočtový krok 7) dochází ke ztrátě stability vrchlíku (hodnota limitního zatížení $p_{lim}=0,0377 \text{ MPa}$). Průběh deformování numerického modelu vrchlíku je zobrazen na Obr. 9.

Ztráta stability zpočátku probíhala v osově symetrickém tvaru (nelineární kolaps). V bodě C (viz Obr. 8) došlo k nelineárnímu bucklingu, tedy ke ztrátě stability v asymetrickém tvaru. Při deformování vrchlíku došlo k viditelnému natočení a zvlnění obvodového prstence.



Obr. 8: Rovnovážná křivka.



Obr. 9: Průběh deformování numerického modelu (osově nesymetrický tvar deformace).

4.3 Experimentální model

Rozměry reálného vzorku jsou ukázány na Obr. 4. Zkoušený vzorek reálného kulového vrchlíku je zobrazen na Obr. 10. Vzorek zatím není opatřen umělou imperfkcí v podobě prohlubně. Na Obr. 11 je zachycen volně položený vrchlík na zkušebním zařízení. Při experimentu byl zaznamenán limitní vnější přetlak, při kterém došlo ke ztrátě stability vrchlíku, viz Tab. 3. Deformovaný tvar zkušebního vzorku před a po provedení pokusu je zobrazen na Obr. 10.



Obr. 10: Původní a deformovaný experimentální vzorek vrchlíku.

Obr. 11: Experimentální vzorek vrchlíku umístěný na zkušebním zařízení.

4.4 Vyhodnocení

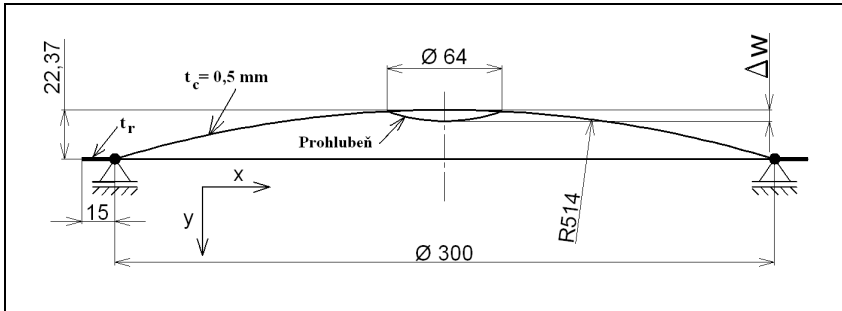
Z porovnání výsledků numerických analýz a zkoušek reálných vzorků kulového vrchlíku vyplývá, že průběh deformování experimentálního modelu odpovídá způsobu deformování numerického modelu. Limitní vnější přetlak experimentálního modelu je menší než u numerického modelu. Tento jev lze vysvětlit zanedbáním vlivu počátečních imperfkcí, které zřejmě vznikly při výrobě (nestejněměrná tloušťka pláště vrchlíku, okrajové podmínky, zbytková napětí, apod.).

Tab. 3: Limitní vnější přetlak pro jednotlivé vzorky vrchlíků s šířkou prstence $w = 15 \text{ mm}$.

Experimentální vzorek číslo:	1	2
Limitní vnější přetlak p_L [MPa]	0,024	0,022
Relativní chyba δ (%) <i>Num. model vs experiment</i>	57 %	71 %

Relativní chyba mezi limitním tlakem stanoveným numerickou analýzou a limitním tlakem zjištěným experimentálně je poměrně vysoká (Tab. 3). Vysvětlení vysoké hodnoty relativní chyby lze nalézt v průběhu redukčního faktoru α (např. Obr. 14, kap. 5). Redukční faktor velmi rychle klesá již pro malé hloubky imperfekcí. Zabránění vytvoření takto malých imperfekcí během výroby zkušební vzorku je složité. Ke snížení únosnosti zkušebních vzorků zřejmě došlo právě zanedbáním malých imperfekcí vzniklých při výrobě vzorků.

5 Stanovení redukčního faktoru α pro kulový vrchlík vyztužený obvodovým prstencem



Obr. 12: Geometrické rozměry modelu střechy.

Vliv geometrické imperfekce na ztrátu stability kulového vrchlíku je vyjádřen redukčním faktorem α . Redukční faktor je poměr kritického zatížení imperfektního vrchlíku ke kritickému zatížení ideálního vrchlíku (rovnice 3). Pro výpočet kritických zatížení byly provedeny numerické analýzy typu GNA a GNIA.

$$\alpha = \frac{p_{cr}^{GNIA}}{p_{cr}^{GNA}} \quad (3)$$

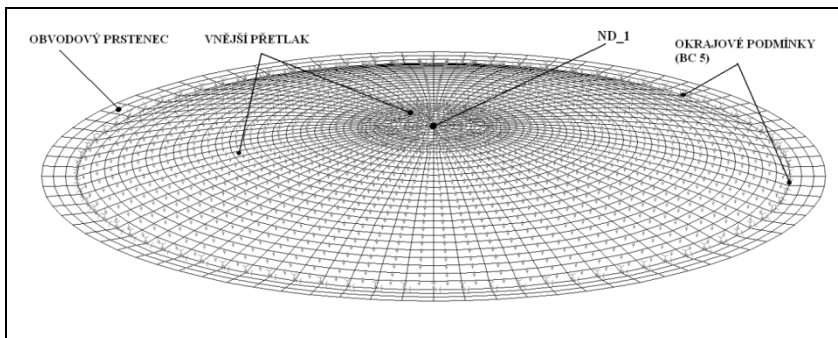
kde

p_{cr}^{GNIA} - kritický vnější přetlak imperfektního vrchlíku,

p_{cr}^{GNA} - kritický vnější přetlak ideálního vrchlíku.

Ztráta stability skutečné střechy či přepážky odpovídá numerickému modelu prostě podepřeného kulového vrchlíku se zamezenou tangenciální rotací okraje (viz kap. 6 disertační práce). Výsledky numerických analýz pro prostě podepřený vrchlík se zamezenou tangenciální rotací okraje vrchlíku budou ověřeny experimentálně.

Kulové vrchlíky jsou vyztuženy obvodovým prstencem a šířce $w=15$ mm. Výpočty jsou provedeny pro čtyři obvodové prstence o různých velikostech ploch průřezu ($A_1=7,5 \text{ mm}^2$; $A_2=15 \text{ mm}^2$; $A_3=30 \text{ mm}^2$; $A_4=60 \text{ mm}^2$).

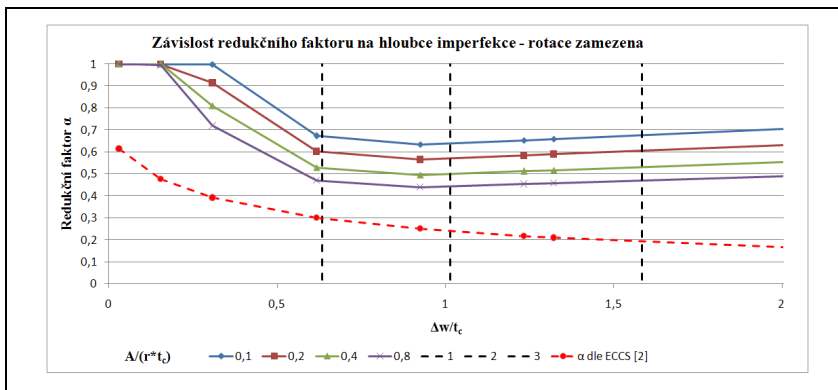


Obr. 13: Numerický model.

Redukční faktor je stanoven na základě provedených numerických analýz. Při výpočtu je uvažována geometrická imperfekce (prohlubeň) ve středu vrchlíku. Hloubka imperfekce je postupně zvyšována až do hranice platnosti doporučení ECCS [2]. Pro každou vybranou hloubku imperfekce jsou provedeny čtyři nelineární analýzy (typ GNIA).

Při výpočtu redukčního faktoru α není uvažován vliv materiálové nelinearity (plasticity). Vliv plasticity na ztrátu stability kulového vrchlíku lze vyjádřit dodatečně součinitelem boulení pro pružně plastické účinky χ (viz kap. 2.3.6 disertační práce).

Bezrozměrné parametry $\Delta w/t_c$ a $\Gamma=A/(r * t_c)$ jsou odvozeny v kap. 9 disertační práce. Bezrozměrné parametry jsou založeny na teorii podobnosti. Na základě těchto bezrozměrných parametrů je možné použít redukční faktor α odvozený pro model střechy také pro návrh reálné střechy nádrže.

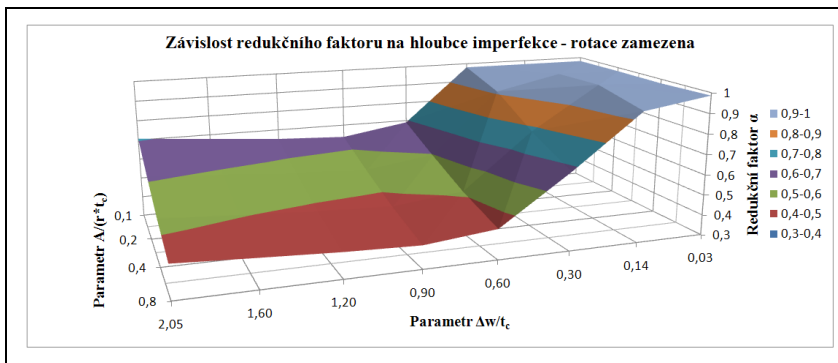


Obr. 14: Stanovení redukčních faktorů.

Průběhy redukčního faktoru α jsou zobrazeny na Obr. 14. Graf je navíc doplněn o redukční faktor α dle ECCS [2] (viz rovnice (2)). Z porovnání křivek na Obr. 14 vyplývá, že použití redukčního faktoru α dle ECCS [2] je u prostě podepřeného vrchlíku vyztuženého obvodovým prstencem příliš konzervativní.

Svislé hranice 1, 2, a 3 představují maximální přípustné hloubky imperfekce pro třídy přesnosti (1, 2, 3) dle ECCS [2]. Závislosti průběhů redukčního faktoru α na bezrozměrných parametrech je zobrazena ve 3D grafu v závěru této kapitoly (Obr. 15).

Centrální imperfekce o hloubce větší než $\Delta w = 0,4 \text{ mm}$ není afinní ke tvaru hroucení vrchlíku a začíná působit jako výztuha. Tím lze vysvětlit, že průběh redukčního faktoru α po překročení hloubky imperfekce $\Delta w = 0,4 \text{ mm}$, má v podstatě neklesající charakter.

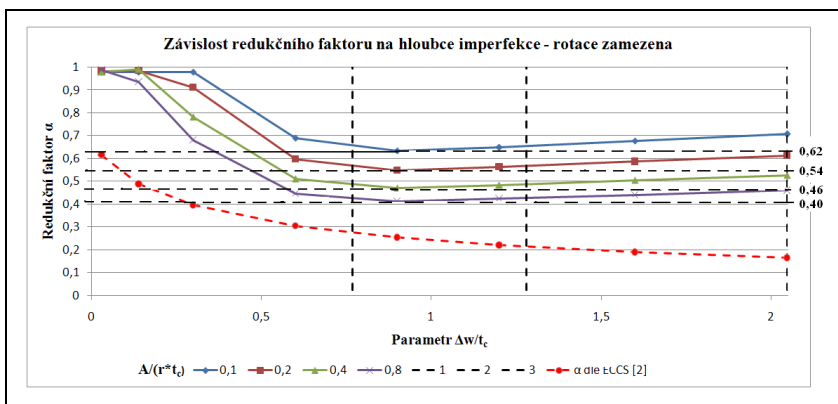


Obr. 15: Závislost redukčního faktoru na hloubce imperfekce – tangenciální rotace okraje zamezena.

Tab. 4: Redukční faktor α stanovený pro model střech – tangenciální rotace okraje zamezena.

$\Delta w/t_c \quad \Gamma = \frac{A}{r \cdot t_c}$	0,1	0,2	0,4	0,8
0,03	0,98	0,98	0,98	0,99
0,14	0,98	0,98	0,99	0,94
0,30	0,98	0,91	0,78	0,68
0,60	0,69	0,60	0,51	0,45
0,90	0,63	0,55	0,47	0,41
1,20	0,65	0,56	0,48	0,42
1,60	0,68	0,59	0,50	0,44
2,04	0,71	0,61	0,53	0,46

Pro využití výsledků v technické praxi je výhodné stanovit pro jednotlivé plochy průřezu prstence obálky. Redukční faktor α nikdy neklesne pod hodnotu danou obálkou. Použití obálky je proto konzervativní a tudíž na straně bezpečné. Graf z Obr. 14 doplněný o obálky je zobrazen na Obr. 16. Jako obálky byly použity přímky rovnoběžné s osou hloubky imperfekce (osa x). Každá obálka je charakterizována konstantní hodnotou redukčního faktoru α . Hodnoty redukčního faktoru pro jednotlivé obálky jsou uvedeny v Tab. 5.



Obr. 16: Stanovení redukčních faktorů pro využití v technické praxi.

Tab. 5: Stanovení redukčních faktorů pro využití v technické praxi – obecný parametr Γ .

$\Gamma = \frac{A}{r * t_c}$	$\Gamma=0,1$	$\Gamma=0,2$	$\Gamma=0,4$	$\Gamma=0,8$
Redukční faktor α	0,62	0,54	0,46	0,40

6 Závěr

6.1 Stručný souhrn disertační práce

Disertační práce je zaměřena na vliv počátečních geometrických imperfekcí na ztrátu stability kulových vrchlíků vyztužených obvodovým prstencem. Zkoumaná oblast je omezena na prostě podepřený kulový vrchlík s konečnou tuhostí v radiálním směru. Popsaný problém je z velké části řešen numerickými výpočty v prostředí programů COSMOS/M [5] a CosmosWorks [6].

V úvodní části disertační práce byl podrobně rozebrán současný stav problematiky řešení ztráty stability kulového vrchlíku včetně popisu řešeného problému. Cílem rešerše bylo ukázat na oblast řešení, která nebyla doposud prozkoumána. Vliv počátečních geometrických imperfekcí na ztrátu stability vrchlíku s konečnou tuhostí v radiálním směru není v současné době zcela popsán.

Součástí disertační práce je rozbor vlivu umístění geometrické imperfekce (prohlubně) na ztrátu stability kulového vrchlíku. Předmětem disertační práce je zkoumat konstrukce typu střecha válcové nádrže, nebo přepážka autocisterny. V kap. 6 disertační práce jsou určeny okrajové podmínky numerického modelu tak, aby výsledky numerického výpočtu co nejvíce odpovídaly zkoumaným typům konstrukcí (střechy nádrží a přepážky autocisteren).

Výpočet redukčního faktoru α (součinitele) byl proveden numerickou analýzou výpočtového modelu prostě podepřeného vrchlíku vyztuženého obvodovým prstencem se zamezenou tangenciální rotací okraje. V disertační práci je stanoven nový redukční faktor (viz Obr. 16; Tab. 4 a Tab. 5), který by mohl nalézt uplatnění při běžném konstrukčním návrhu kulového vrchlíku v praxi. Hodnotu redukčního faktoru pro reálnou střechu lze určit z Tab. 5. V této tabulce jsou uvedeny hodnoty obálek redukčního

faktoru pro jednotlivé hodnoty bezrozměrného parametru Γ . Výsledky v Tab. 5 jsou konzervativní a tudíž na straně bezpečné.

Ověření výsledků numerických analýz provedením experimentu v současné době stále probíhá. V disertační práci je popsána příprava experimentů a vývoj zkušebního zařízení. Na zkušebním zařízení byly provedeny první zkoušky ztráty stability zkušebních vzorků. Výsledky z provedených experimentů sloužily k modifikaci zkušebního zařízení a způsobu výroby zkušebních vzorků.

6.2 Vědecko – technický přínos disertační práce

Vliv počátečních geometrických imperfekcí na ztrátu stability vrchlíku s konečnou tuhostí v radiálním směru není v současné době zcela popsán. V evropském doporučení ECCS [2] je uveden redukční faktor α , který vyjadřuje vliv počáteční imperfekce na ztrátu stability kulového vrchlíku. Redukční faktor uvedený v ECCS [2] je stanoven pro kloubově uložený kulový vrchlík. Použití tohoto faktoru pro výpočet ztráty stability kulového vrchlíku s konečnou tuhostí v radiálním směru může být příliš konzervativní.

Výsledky uvedené v disertační práci vhodně doplňují současný stav poznání vědy a techniky. Redukční faktor α (Obr. 16) stanovený v disertační práci vyjadřuje vliv počáteční geometrické imperfekce na ztrátu stability kulového vrchlíku s konečnou tuhostí v radiálním směru. Problém stanovení redukčního faktoru není ještě úplně vyřešen. Je nutné dokončit ověření výsledků numerických analýz provedením experimentů.

Výsledky uvedené v disertační práci je potřeba podrobit analýze odborné veřejnosti. Po splnění všech kritérií je možné usilovat o zakotvení redukčního faktoru α uvedeného v Tab. 5 do doporučení ECCS a normativních předpisů.

6.3 Uplatnění výsledků v praxi

Konstrukce typu kulový vrchlík nacházejí uplatnění v různých odvětvích průmyslu například chemický, energetický, potravinářský, automobilní, atd. V disertační práci jsou řešeny konstrukce typu střecha válcové nádrže, přepážka cisterny, apod. Materiály používané pro výrobu zařízení v chemickém, energetickém a potravinářském průmyslu mohou být velmi drahé. Redukční faktor α stanovený pro kulový vrchlík vyztužený obvodovým prstencem umožňuje bezpečné snížení tloušťky pláště vrchlíku t_c . Snížením tloušťky pláště dojde ke snížení hmotnosti a ke snížení výrobních nákladů.

Pro bezpečné použití redukčního faktoru α (Obr. 16 a Tab. 5) při návrhu skutečné střechy nádrže nebo přepážky je nutné splnit další body.

- Ověření výsledků numerických analýz provedením experimentů.
- Ověření správnosti bezrozměrných parametrů pro vrchlíky s rozdílným polovičním úhlem Φ .
- Stanovení rozsahu platnosti výpočtů redukčního faktoru (Poloviční úhel Φ ; Parametr tenkostěnnosti R/t_c).

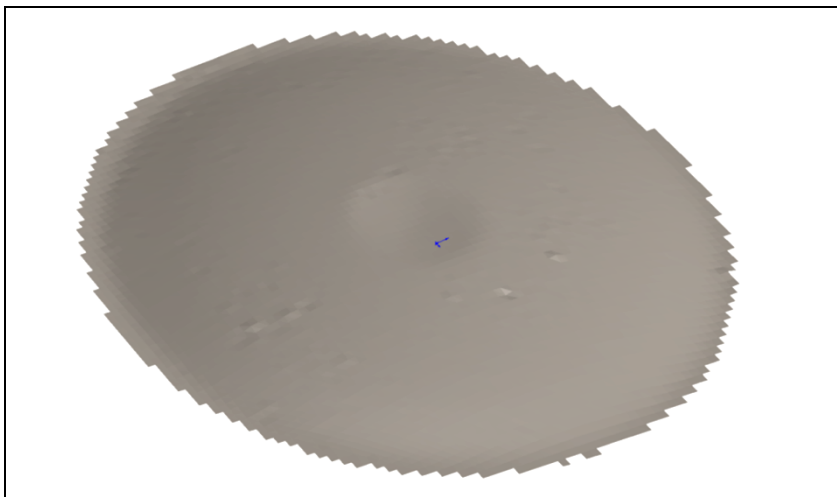
Zmiňované další body budou předmětem dalšího výzkumu. Výsledky uvedené v této disertační práci jsou dalším krokem pro uvedení redukčního faktoru α (Obr. 16 a Tab. 5) pro návrh kulových vrchlíků s konečnou tuhostí v radiálním směru do technické praxe.

6.4 Cíle budoucího výzkumu

Hlavní cíle budoucího výzkumu jsou naznačeny v předešlém textu. Provedené experimenty budou spojeny s bezkontaktním snímáním změny geometrie zkušební vzorku v průběhu ztráty stability.

Bezkontaktní měření změny geometrie je zajištěno systémem ARAMIS, který pracuje na principu optického snímání nepravidelné sítě bodů. Na základě měření systémem ARAMIS bude možné sestavit přesný model kulového vrchlíku s geometrickou počáteční imperfekcí (viz Obr. 17).

V budoucím výzkumu je nutné vyřešit otázku vlivu způsobu spojení obvodového prstence a kulového vrchlíku. Pro první zkoušky ztráty stability byly prstence bodově přivařeny k plášti zkušebního vzorku vrchlíku. Spojení svařováním zkreslovalo výsledky provedených experimentů. V současné době jsou obvodové prstence k plášti zkušebního vzorku vrchlíku lepeny.



Obr. 17: Přesný model sestavený na základě měření systémem ARAMIS.

7 Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 1993-1-6. Navrhování ocelových konstrukcí – Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí. Český normalizační institut, 2008.
- [2] ECCS Buckling of Steel Shells. European Design Recommendations. Fifth edition, Published by ECCS, 2008, ISBN 92-9147-000-92.
- [3] Wunderlich, W., Albertin, U.,: *Buckling behaviour of imperfect spherical shells*. International Journal of Non – Linear Mechanics 37, s. 589-604. Elsevier Science Ltd., 2002.
- [4] Paščenko P.: *Stabilita tenkostěnných skořepinových konstrukcí v dopravní technice*. Habilitační práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, DFJP, 2009.
- [5] FEM Computer program COSMOS/M, version 2.95, 2010.
- [6] FEM Computer program COSMOSWorks 2010 - Advanced Professional. SolidWorks Corporation.
- [7] Esslinger, M., Geier, B.: *Postbuckling Behavior of Structures*. Springer-Verlag, Wien-New York. ISBN 3-211-81369-1. Udine, 1975.
- [8] Bushnell D.: *Computerized buckling analysis of shells*. Martinus Nijhoff Publishers. Dordrecht 1985. ISBN 90-247-3099-6.
- [9] Vestergren P. & Samuelson A.: *Analysis of Axially Loaded Stringer Stiffened Circular Cylinders*. The Aeronautical Research Institute of Sweden – FFA HU-2134, Stockholm, 1979.

- [10] Blaschut J. & Galletly G.D.: *Buckling Strength of Imperfect Steel Hemispheres. Thin-Walled Structures*, Volume 23, Special Issue on Buckling strength of Imperfection-Sensitive Shells. ISSN 0263-8231, Elsevier Applied Science, 1995.
- [11] Kloppel, K., Jungbluth, O.: *Beitrag zum Durchschlagproblem dünnwandiger Kugelschalen*. Der Stahlbau, Band 22, 1953, s. 121-130.
- [12] Volmir, A. C.: *Gibkie plasticky a obolocky*. Gosudarstvennoe izdastel'stvo tekhniko – reoreticheskoj literatury. Moskva, 1957.
- [13] FEM Computer program ANSYS 11. Ansys Corporation.
- [14] Volmir, A. C.: *Ustojčivost' uprigich sistem*. Gosudarstvennoe izdastel'stvo fiziko – matematičeskoj literatury. Moskva, 1963.
- [15] Křupka, V.: *Buckling and limit carrying capacity of saddle loaded shells*, Ghent University, Colloquium on Stability of Plate and Shell Structures, 1987, pp.617-622
- [16] European Recommendation for Steel Construction Section 20 Saddle or ring supported cylindrical shells, ECCS TC8 TWG 8.4, 2008, pp. 371-382
- [17] European Recommendation for Steel Construction Section 10 Cylindrical shells of constant wall thickness under general loading, ECCS TC8 TWG 8.4, 2008, pp. 167-216
- [18] ČSN EN 13445-3. Netopené tlakové nádoby: část 3 – konstrukce a výpočet. Český normalizační institut, 2011.

8 Uvedení vlastních publikací disertanta souvisejících s tématem disertační práce

- [19] 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).
- [20] 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).
- [21] Paščenko P. & Tomek P. (2010). *Vývoj zkušebního zařízení k testování stability kulových vrchlíků*. Výzkumná zpráva (MŠMT č. C56/2010).
- [22] Paščenko P. & Tomek P. (2010). *Ztráta stability příčně zatížené válcové skořepiny*. Výzkumná zpráva (MŠMT č. C56/2010).
- [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., Paščenko, P.: *Loss of stability of laterally loaded cylindrical shell*. Proceedings of 12th International Scientific Conference Applied Mechanics 2010, Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-586-0. Liberec (2010).
- [25] Tomek, P., Středová, D.: *Příčné zatěžování válcové skořepiny*. Sborník konference TechMat 2009, ISBN 978-80-7395-046-0. Svitavy (2009).

- [26] 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).
- [27] Tomek, P., Paščenko, P.: *Influence of boundary conditions on the loss of stability of imperfekt spherical caps*. Proceedings of 13th Conference Applied Mechanics 2011, pp. 223-226. Ústav fyziky materiálů AV ČR, Brno, 2011. ISBN 978-80-87434-03-1
- [28] Středová, D., Tomek, P.: *Experimental Model Of Conical Shell Under External Pressure*. Perner's contacts, Special Issue 2, Vol. VI, May 2011, pp. 174-176. University of Pardubice. ISSN 1801-674X
- [29] Tomek P.: *Ověření možností numerické simulace degradačního procesu povrchových vrstev kol se zahrnutím vlivu lokální plasticity a kumulativního charakteru dějů*. Výzkumná zpráva (A10-01/2010-UPa), 2011.

ANOTACE

Tato práce se zabývá vlivem počátečních imperfekcí na ztrátu stability tenkostěnných skořepinových konstrukcí. Zkoumaný případ je omezen na prostě podepřený kulový vrchlík zatížený rovnoměrným vnějším přetlakem. Kulový vrchlík je vyztužen obvodovým prstencem.

KLÍČOVÁ SLOVA

kulový vrchlík, ztráta stability, imperfekce, numerická analýza, MKP

ANNOTATION

This work deals with influence of the initial imperfections on the loss of stability of thin - walled structures. The problem is limited on the simply supported spherical cap subjected to external pressure. The spherical cap is stiffened by a circumferential ring.

KEYWORDS

Spherical cap, loss of stability, imperfections, numerical analysis, FEM

Petr TOMEK, Ing., Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera, katedra mechaniky, materiálů a částí strojů, email: petr.tomek@upce.cz