

VLIV ŠÍŘKY SEDLOVÉ PODPORY NA STABILITNÍ ÚNOSNOST PŘÍČNĚ ZATĚŽOVANÉ VÁLCOVÉ SKOŘEPINY S POČÁTEČNÍ IMPERFEKČÍ

SADDLE SUPPORT WIDTH INFLUENCE ON THE CARRYING CAPACITY OF Laterally LOADED CYLINDRICAL SHELL WITH INITIAL IMPERFECTIONS

Ondřej Voltr, Petr Jilek

Abstrakt

Článek se zabývá posouzením vlivu šířky sedlové podpory na stabilitní únosnost příčně zatěžované válcové skořepiny s počáteční imperfekcí. Posuzovanou konstrukcí je zjednodušená varianta válcové skořepiny (cisterny), která je uložena na dvou sedlových podporách. Počáteční tvarové imperfekce jsou vytvořeny vtlačením sedlové podpory do skořepiny. Nový deformovaný tvar skořepiny je následně použit jako výchozí imperfektní model pro nelineární numerické analýzy. Účelem analýz je stanovit redukční faktor α v závislosti na měnících se geometrických parametrech numerického modelu (úhel opásání 2θ , šířka sedlové podpory b). Numerické analýzy jsou provedeny v počítačovém programu COSMOS/M [1] založeném na metodě konečných prvků (MKP).

Klíčová slova: počáteční imperfekce, válcová skořepina, MKP, sedlová podpora, ztráta stability

Abstract

The article is devoted to saddle support width influence on the carrying capacity of laterally loaded cylindrical shell with initial imperfections. The examined structure is a simplified version of the case of cylindrical shell (road tank) located on two saddle supports. The initial shape imperfections are created by pushing the saddle support into the shell. The new deformed shape is used as default an imperfect model in the following nonlinear analysis. The main purpose of the analysis is to determine the reduction factor α depending on the change of geometric parameters of the numerical model (embracing angle 2θ , width of saddle support b). Numerical analysis is carried out by means of a computer program COSMOS/M [1] based on the finite element method (FEM).

Key words: initial imperfections, cylindrical shell, FEM, saddle support, loss of stability

1 ÚVOD

Tento článek se zabývá oblastí tenkostěnných skořepinových konstrukcí, konkrétně výzkumem ztráty stability stěny válcové automobilové cisterny uložené na dvou sedlových podporách (zkráceně sedlech). Předmětem zkoumání je zjednodušená varianta v podobě válcové skořepiny, která je příčně zatěžována prostřednictvím jednoho tuhého pevně připojeného sedla. Hlavní pozornost je věnována vlivu počátečních imperfekcí tvaru na stabilitní únosnost příčně zatěžované válcové skořepiny. V této fázi výzkumu jde o řešení ztráty stability pouze v elastické oblasti chování materiálu.

Počáteční tvarové imperfekce do skořepiny zavádí přídavný ohybový stav [2]. Následkem je většinou pokles její stabilitní únosnosti [4, 5]. Nicméně někdy je tento efekt zcela opačný a únosnost skořepiny narůstá. V tom případě může mít imperfekce výztužný efekt. Pro účely tohoto výzkumu je počáteční imperfekce uvažována jako stav předzatižení sedla od vlastní

tíhy skořepiny a tíhy jejího obsahu. Imperfekce je vytvořena pomocnou lineární analýzou, kde se sedlo vtlačuje o přesně definovanou hodnotu do pláště skořepiny. Tento nový deformovaný model je poté použit jako výchozí model pro následné nelineární analýzy.

Zatímco v [3] byla hloubka přesně definovaného vtlačení konstantní pro všechny varianty imperfektních modelů, konkrétně o hodnotě $\Delta w = 2 \text{ mm}$. Tak v tomto článku se již neuvažuje hloubka počáteční imperfekce Δw jako konstantní, ale je vyjádřena v závislosti na tloušťce stěny skořepiny t . Tedy jako bezrozměrný parametr hloubky imperfekce $\Delta w/t$, který je zkoumán na rozsahu $\Delta w/t \in \langle 0,1; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 \rangle$. Ze znalosti tloušťky stěny t a vybrané hodnoty poměru $\Delta w/t$ se vypočítá hloubka imperfekce Δw , která je poté použita pro vytvoření počáteční imperfekce příslušného numerického modelu pro nelineární analýzu.

Pro účely numerických analýz jsou použity modely s běžně používanými variantami úhlu opásání $2\theta = 60, 90, 120^\circ$ a měnící se šířkou sedla reprezentovanou parametrem b/R v rozsahu $b/R \in \langle 0,07; 0,67 \rangle$. Cílem je určit změny hodnot redukčního faktoru α v závislosti na změně šířky sedla b . V rámci tohoto článku se jedná o první vyhodnocení této části výzkumu.

2 NUMERICKÝ MODEL

Základem numerického modelu je tenkostěnná válcová skořepina (Obrázek 1) o konstantní délce $L = 300 \text{ mm}$ a konstantním poloměru $R = 75 \text{ mm}$ [3]. Skořepina je na obou koncích opatřena víky o tloušťce $t_1 = 30 \text{ mm}$. Tloušťka t_1 zajišťuje dostatečnou tuhost vík, znemožňující jejich nadměrnou deformaci, a tím nežádoucí ovlivnění výsledků výpočtových analýz. V polovině délky skořepiny je pevně připojeno sedlo o šířce b a úhlech opásání sedla 2θ ($60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$). Tloušťka stěny sedla $t_2 = 20 \text{ mm}$ je opět uvažována natolik velká, aby nebyly ovlivněny výsledky výpočtových analýz. Ukázka výchozího nedeformovaného numerického modelu s úhlem opásání $2\theta = 120^\circ$ je na Obrázku 2.

Vliv šířky sedla je posuzován v šesti různých hodnotách. Nicméně pro potřeby lepší práce s výsledky je zaveden bezrozměrný parametr b/R , kterým budou dále popisovány příslušné varianty (viz Tabulka 1).

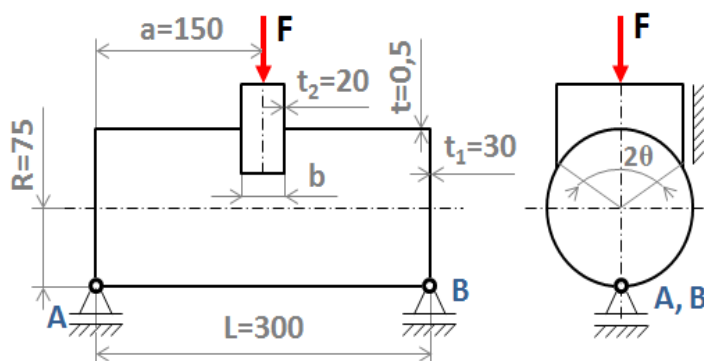
$b \text{ [mm]}$	5	10	20	30	40	50
$b/R \text{ [-]}$	0.07	0.13	0.27	0.4	0.53	0.67

Tabulka 1 Zavedení parametru b/R .

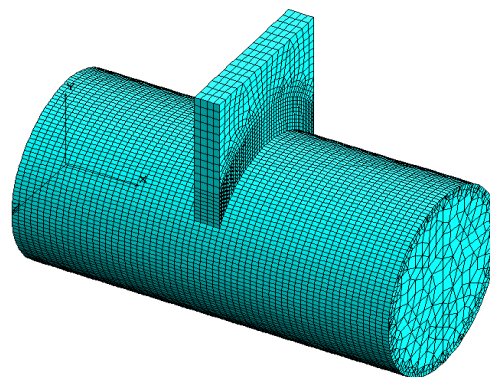
Z kapacitních a praktických důvodů nebyl do vstupních parametrů zahrnut parametr tenkostěnnosti R/t v původním rozsahu [3]. Byla vybrána pouze varianta $R/t = 150$ (tloušťka stěny pláště skořepiny $t = 0,5 \text{ mm}$), která odpovídá plánovanému reálnému zkušebnímu modelu a je brána jako stěžejní. Hlavní pozornost je tak věnována vlivu měnící se šířky sedla b .

Okrajovými podmínkami byla zvolena kombinace prostého podepření ve dvou krajních uzlech prvkové sítě (body A, B na Obrázek 1) a současné zamezení vybočení sedla z vertikálního směru. Při ztrátě stability tak může skořepina vykazovat symetrickou i nesymetrickou deformaci vzhledem ke svislé rovině, která prochází osou válcového pláště. Numerický model je zatížen svislou silou F působící na válcovou skořepinu prostřednictvím sedla.

Materiál použitý na všechny části modelu (plášť, víka, sedlo) má stejné mechanické hodnoty, konkrétně modul pružnosti v tahu $E = 1,9 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, Poissonovo číslo $\mu = 0,3$.



Obrázek 1 Geometrické parametry numerického modelu pro parametr b/R .



Obrázek 2 Výchozí nedeformovaný model s úhlem opásání $2\theta=120^\circ$

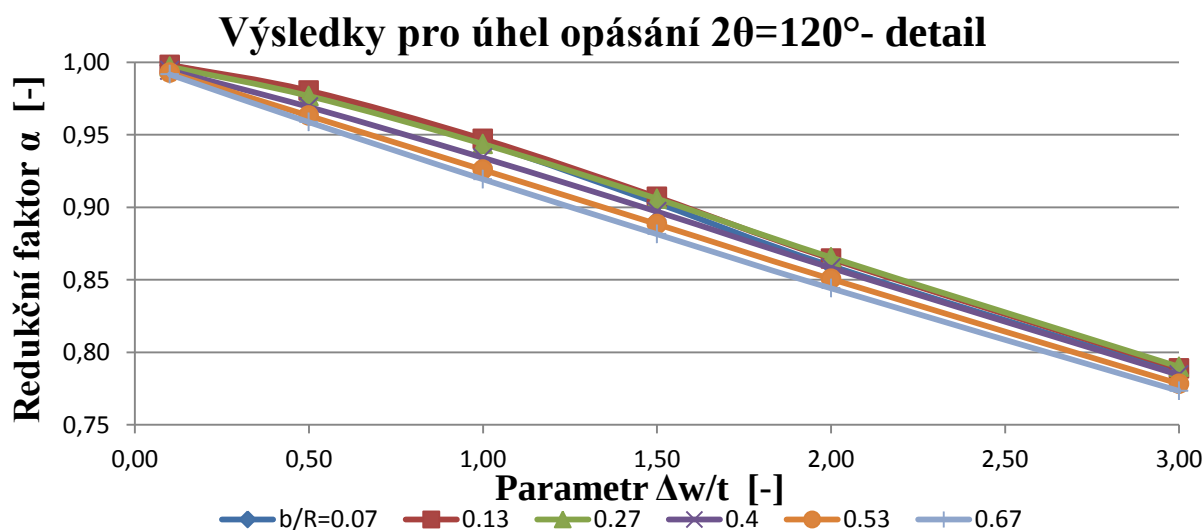
3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÝCH ANALÝZ

Provedené numerické analýzy jsou pro příslušné variace geometrických parametrů reprezentovány křivkami redukčních faktorů α . Pro konstantní parametr tenkostěnnosti $R/t = 150$ a jednotlivé varianty parametrů $\Delta w/t$ je s měnícím se parametrem b/R vždy vyneseno celkem 6 křivek (Obrázek 3, Obrázek 4 a Obrázek 5).

Při vyhodnocování byl pozorován stejný mechanismus deformování skořepiny podrobněji popsany v [3]. Tedy, že zpočátku zatěžování docházelo k symetrickému vtláčování sedla do pláště skořepiny. Poté se začalo projevovat vybočování válcové skořepiny do strany a následně došlo ke ztrátě její stability. Skořepina má tedy i v tomto případě tendenci stavět se na vybočené straně na hranu sedla. Proto není v rámci tohoto článku takřka věnována pozornost popisu deformování skořepiny.

3.1 Výsledky pro modely s úhlem opásání $2\theta=120^\circ$ s ohledem na parametr b/R

Pro lepší viditelnost byla v tomto případě zvolena interpretace výsledků na Obrázku 3 v podobě detailu, se stupnicí svislé osy nezačínající od 0, ale od hodnoty 0,75. Z pohledu na Obrázek 3 je patrné, že hodnoty redukčních faktorů α mají s rostoucím parametrem $\Delta w/t$ klesající charakter. Vždy jde však o pokles maximálně o 23% oproti ideální skořepině, které odpovídá hodnota $\alpha=1$. Nicméně dosažené hodnoty, resp. křivky, jsou si i tak velice blízké a to bez ohledu na hodnotu parametru b/R . Z uvedeného lze vyvodit závěr, že u modelů s úhlem opásání $2\theta=120^\circ$ má šířka sedla minimální až takřka žádný vliv.



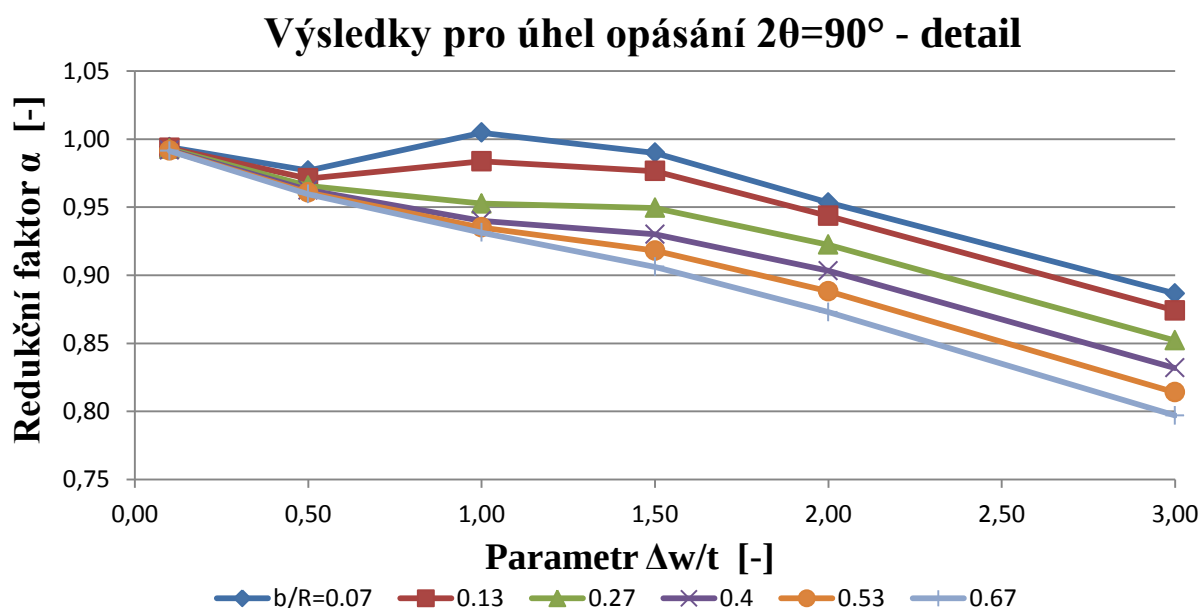
Obrázek 3 Detail závislosti redukčního faktoru α na parametru $\Delta w/t$ pro $2\theta=120^\circ$ - vliv b/R .

3.2 Výsledky pro modely s úhlem opásání $2\theta=90^\circ$ s ohledem na parametr b/R

Pro názornější vyhodnocení výsledků je i u této varianty modelů zvolen detail grafu na Obrázku 4, se stupnicí svislé osy začínající od hodnoty 0,75. Pro začátek je provedeno porovnání výsledků varianty $2\theta=90^\circ$ (Obrázek 4) s předcházející variantou úhlu opásání $2\theta=120^\circ$. Porovnáním je patrný očekávaný podobný charakter křivek redukčních faktorů. Počátek grafů (pro $\Delta w/t=0,1$ a $0,5$) je u obou variant úhlu opásání téměř identický (uvažováno z hlediska poměrových hodnot α).

Poté se průběhy začínají mírně lišit, kde u varianty úhlu opásání $2\theta=90^\circ$ lze pozorovat následující změny. V závislosti na rostoucím parametru $\Delta w/t$ jsou pro b/R v rozmezí $\langle 0,27 \div 0,67 \rangle$ i nadále viditelné mírně klesající křivky redukčního faktoru α . Ve zbylých případech ($b/R=0,07$ a $0,13$) došlo po počátečním poklesu těchto křivek k mírnému nárůstu hodnot α . Konkrétně pro $\Delta w/t=1,0$ došlo k nepatrnému zpevnění skořepiny a v jednom případě až nad hranici $\alpha=1$. Avšak poté, již všechny křivky klesají obdobným způsobem jako výše uvedené varianty parametru $b/R=\langle 0,27 \div 0,67 \rangle$. Příčina těchto vyšších hodnot není z průběhu tvarů deformování rozpoznatelná. Přesto je nutné poznamenat, že hodnoty α vykazují pokles maximálně o 21% vzhledem ke vztažné úrovni $\alpha=1$.

Viditelné jsou však určité rozdíly ve stabilitní únosnosti skořepiny mezi jednotlivými variantami parametru b/R . Již nejde o blízké (takřka totožné) křivky, jako u varianty $2\theta=120^\circ$, ale mezi křivkami je jistá malá difference. Z výše uvedeného lze shrnout, že šířka sedla u modelů s úhlem opásání $2\theta=90^\circ$ již má určitý vliv, i když tento vliv není v celkovém měřítku příliš významný.



Obrázek 4 Detail závislosti redukčního faktoru α na parametru $\Delta w/t$ pro $2\theta=90^\circ$ - vliv b/R .

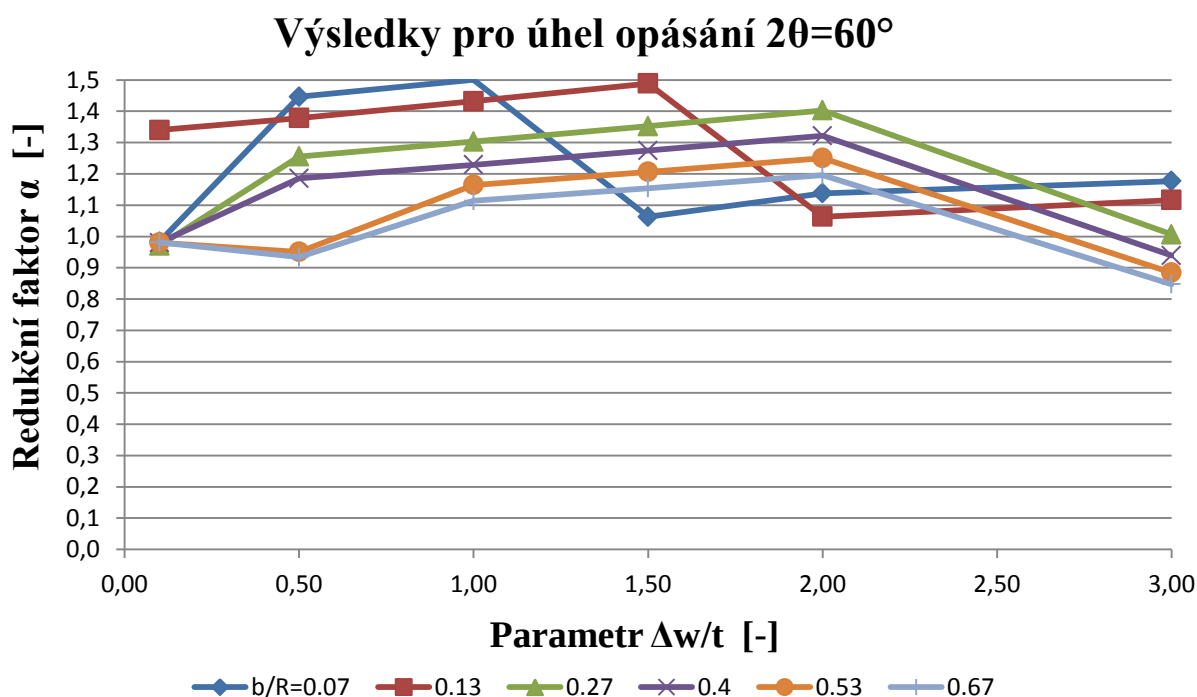
3.3 Výsledky pro modely s úhlem opásání $2\theta=60^\circ$ s ohledem na parametr b/R

Z porovnání výsledků numerických analýz modelů s úhlem opásání $2\theta=60^\circ$ s ostatními variantami vyčnívá odlišnost hodnot dosažených pro nejvyšší variantu tohoto úhlu. Výstupy jednotlivých variant parametru b/R , vystavené různým hloubkám počáteční imperfekce $\Delta w/t$, se nezdálo účelné rozebírat každou řadu parametru b/R zvlášť. Místo toho byl zvolen obecnější přístup k popisu chování sledovaných modelů jako celku.

Křivky reprezentující hodnoty redukčního faktoru α pro jednotlivé varianty parametru b/R ukazuje graf na Obrázek 5. Porovnáním grafů všech tří variant úhlu opásání je na první

pohled zřejmé, že varianta s úhlem opásání $2\theta=60^\circ$ vykazuje vyšší hodnoty redukčního faktoru α , než zbylé varianty. Což je ve shodě s dříve dosaženými výsledky [3]. Značné zpevnění konstrukce prakticky na celém rozsahu mají pravděpodobně za následek kombinace úzkého sedla a vliv počátečních imperfekcí. Objasnění těchto výsledků bude věnována větší pozornost při dalším výzkumu.

Obecně je možné tuto situaci popsat následovně. Se zvyšující se hloubkou imperfekce (reprezentované parametrem $\Delta w/t$) mají uvedené křivky převážně rostoucí charakter. Poté při dosažení určité hloubky počáteční imperfekce (postupně v rozmezí $\Delta w/t < 1,0 \div 2,0 >$) dochází k poklesu únosnosti do oblasti hodnot okolo hladiny $\alpha=1$, resp. mírně pod tuto hranici. Ovšem je nutno zmínit, že nikdy nedochází k poklesu únosnosti skořepiny o více než 16% oproti únosnosti ideální skořepiny bez počáteční imperfekce (vztažná úroveň $\alpha=1$).



Obrázek 5 Závislost redukčního faktoru α na parametru $\Delta w/t$ pro $2\theta=60^\circ$ - vliv b/R .

4 ZÁVĚR

V tomto článku byl sledován vliv šířky sedla (parametr b/R) na stabilitní únosnost příčně zatěžované válcové skořepiny při různých úrovních hloubky počáteční imperfekce (parametr $\Delta w/t$). Po vyhodnocení a porovnání jednotlivých numerických analýz a tímto způsobem dosažených hodnot redukčního faktoru α (viz Obrázek 3, Obrázek 4 a Obrázek 5) lze formulovat níže uvedené závěry:

- U varianty modelů s úhlem opásání $2\theta=120^\circ$ byl sledovaný vliv šířky sedla prakticky zanedbatelný. Výsledné křivky si jsou velmi podobné a pohybují se i v přibližně stejných hodnotách (viz Obrázek 3). Rozdíly jsou v relacích pár procent, pokud vůbec.
- Pro model s úhlem opásání $2\theta=90^\circ$ je situace podobná. Výsledky vyjádřené prostřednictvím křivek redukčních faktorů α mají podobný průběh (viz Obrázek 4), ale již se hodnotově mírně liší. Nicméně výsledky všech šesti sledovaných parametrů b/R se nacházejí ve společném pásmu širokém přibližně 10%.
- U zbývajících modelů s úhlem opásání $2\theta=60^\circ$ je situace odlišná a maximální rozdíly mezi výsledky variant parametru b/R jsou přibližně 35-40% (viz Obrázek 5). Ovšem, vlivem značného zpevnění sledované skořepiny u velké části variant, se spodní

hranice tohoto pásma stále nachází na nebo nad úrovni $\alpha=1$. Tudiž vliv šířky sedla, na únosnost jako takovou, nakonec není tak značný.

- Závěrem je třeba poznamenat, že ve všech případech posuzovaných v této kapitole byl zavedenou počáteční imperfekcí způsoben pokles únosnosti sledované skořepiny maximálně o 23% oproti ideální skořepině $\alpha=1$ (u $2\theta=120^\circ$), resp. o 21 % u $2\theta=90^\circ$, resp. o 16% u $2\theta=60^\circ$.

Z vyhodnocení plyne, že šířka sedla hraje určitou roli. Ovšem její vliv není tak velký, aby byl významnější než vliv úhlu opásání (2θ), vliv tenkostěnnosti konstrukce (R/t) či vliv hloubky počáteční imperfekce ($\Delta w/t$).

Poděkování

Tato práce vznikla v rámci Studentské grantové soutěže University Pardubice, projekt č. SGS_2017_009.

Použitá literatura

1. FEM Computer program COSMOS/M, version 2.95, 2010.
2. VOLMIR, A.C. *Ustojčivost' uprugich system*. Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1963. Moskva.
3. VOLTR, O., PAŠČENKO, P.: *Initial imperfections of horizontal cylindrical shells on saddle supports*. Colloquium Hungary 2013, Visegrád 22. - 24. 5. 2013, Proceedings of 30th International Colloquium on "Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry", 2013, s. 77-82. ISBN 978-963-313-079-7.
4. WUNDERLICH, W., ALBERTIN, U. *Analysis and load carrying behavior of imperfection sensitive shells*. International journal for numerical methods in engineering 47, 2000. s. 255-273.
5. WUNDERLICH, W., DEML, M. *Direct evaluation of the worst imperfection shape in shell buckling*. Computer methods in applied mechanics and engineering 149, 1997. s. 201-222.

Kontaktní údaje

Ing. Ondřej Voltr
Univerzita Pardubice
Studentská 95, 532 10 Pardubice
Tel: 466 036 463
email: ondrej.voltr@upce.cz