



Záverečná správa projektu IPA

Doba riešenia	jún 2014 – január 2015
Registračné číslo projektu	1/2014
Dátum prijatia správy na VVČ (vyplní IPA)	

Názov projektu	Získanie experimentálnych údajov pre určenie kritickej vzpernej sily rúrok so sploštenými koncami
-----------------------	---

Vedúci projektu

Priezvisko, meno, tituly: Kotšmíd Stanislav Ing.	Potvrdzujem správnosť údajov v správe
Telefónne číslo a e-mail: +421 45 5206 878 stanislav.kotsmid@gmail.com Dátum a podpis vedúceho projektu:

Spoluriešitelia

doc. Ing. Pavel Beňo, PhD. doc. Ing. Daniela Kalincová, PhD. Ing. Marián Minárik, PhD. Peter Výboh



Výsledky riešenia projektu

a.) spôsob, metódy a priebeh riešenia

Zisťovanie hodnôt kritickej vzpernej sily bolo vykonané na oceľových rúrkach s vonkajším priemerom 12 a 14 mm s hrúbkou steny 1 mm. Materiál vzoriek sme volili oceľ triedy 11 523 podľa normy STN 42 0002, ktorá má hodnotu medze pružnosti 343 MPa. Meranie bolo vykonané pre každý priemer na piatich vzorkách pri šiestich štíhlostiach. Medzná štíhlosť prúta pre zvolený materiál je približne 78. Na základe zvolených rozmerov vzoriek sa celý experiment uskutočnil v pružnej oblasti.

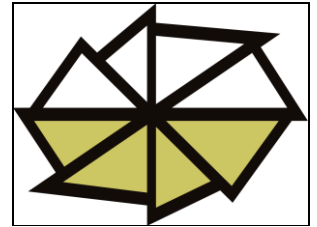
Príprava vzoriek pre meranie spočívala v napílení rúrok na zvolené rozmery pomocou uhlovej brúsky s rezným kotúčom. Následne boli konce rúrok sploštené pomocou hydraulického lisu. Bolo potrebné vyrobiť prípravok (Obr. 1), ktorý pozostával z hranolov a upínacích čeľustí. Na hranách hranolov bolo vyrobené zaoblenie, ktoré slúžilo pre vytvorenie plynulého prechodu sploštenej časti rúrky do jej prechodovej časti (krčku). Sploštenie bolo vykonané na dĺžke 1,5 násobku vnútorného priemeru rúrky.



Obr. 1 Prípravok pre sploštenie rúrok

Po sploštení koncov rúrok nasledovalo vŕtanie dier s priemerom 7 mm pre upnutie na upínací prípravok. Diera bola umiestnená v osi prúta a vo vzdialenosti 0,75 násobku vnútorného priemeru od hranice medzi sploštenou a prechodovou časťou rúrky (Obr. 2).

Ak nestačí predloha, použite kópiu tejto strany.

**Výsledky riešenia projektu (pokračovanie)****Obr. 2 Úprava koncov rúrok**

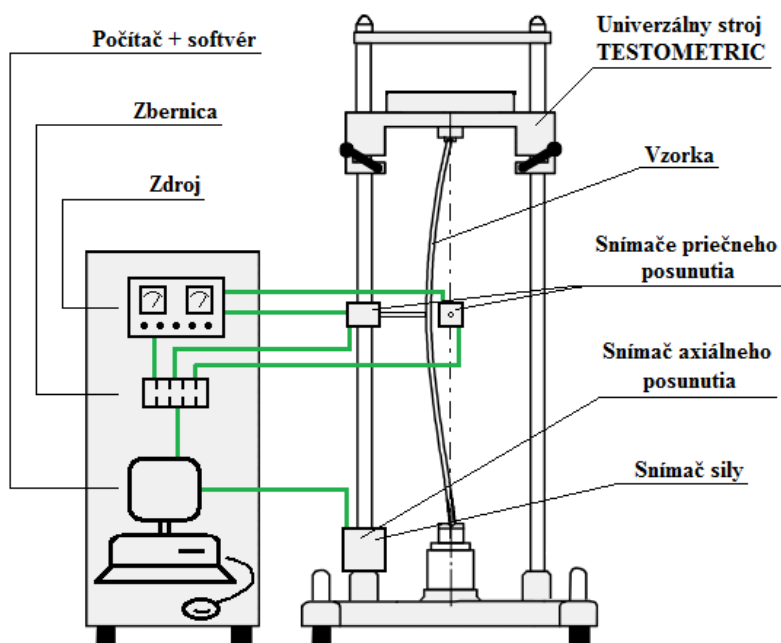
Experimenty prebiehali na univerzálnom trhacom stroji Testometric M500-100 CT, ktorý je umiestnený v dielňach Technickej univerzity vo Zvolene. Merací reťazec (Obr. 3) pozostával z univerzálného stroja, ktorý vplyvom generovania osovej sily stláčal rúrku uchytenú v špeciálnych prípravkoch a táto sa vplyvom zaťaženia deformovala. Jeho priamou súčasťou bol snímač sily a axiálneho posunutia. Stroj bol dodatočne doplnený dvomi snímačmi priečného posunutia GEFTRAN PY2-C, ktoré boli vzájomne pootočené o 90 stupňov z dôvodu zaznamenania vychýlenia vzorky v rovine kyvu, ale aj v rovine kolmej na rovinu kyvu. Tieto snímače boli napájané pomocou stabilizovaného zdroja TESLA BS 525 a ich signály boli zaznamenané cez zbernicu NI 6008 a prostredníctvom počítača spracované softvérom NI LabView SignalExpress a winTest Analysis.

Z experimentálnych dát sme hodnotu kritickej vzpernej sily vyjadrili pomocou asymptotickej metódy, a to odčítaním maximálnej hodnoty z grafu závislosti axiálnej sily a priečného posunutia prúta. Z dôvodu vykonávania statickej skúšky bola rýchlosť pohybu horného priečnika maximálne $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Zo všetkých piatich meraní bol vypočítaný aritmetický priemer kritických vzperných síl a ich smerodajné odchýlky. Pomocou štatistickej metódy Anova sme vyhodnotili vplyv sploštenia na hodnotu kritickej vzpernej sily.

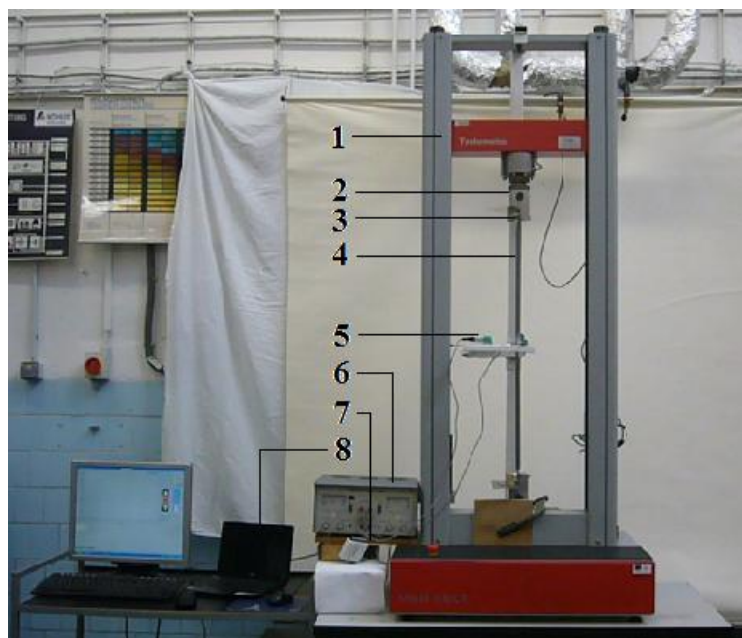
Ak nestačí predloha, použite kópiu tejto strany.



Výsledky riešenia projektu (pokračovanie)



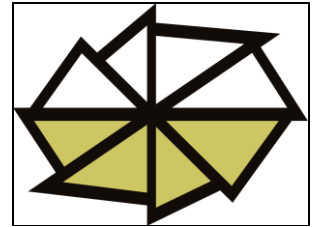
Obr. 3 Merací reťazec



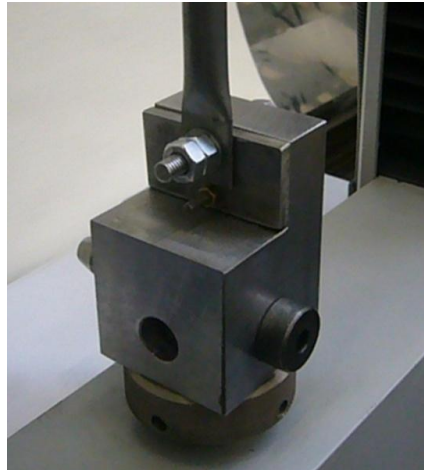
Obr. 4 Realizácia experimentu

- 1 – univerzálny stroj Testometric, 2 – upínací prípravok, 3 – upínacia skrutka, 4 – vzorka,
5 – snímače priečneho posunutia, 6 – stabilizovaný zdroj, 7 – zbernica, 8 – PC

Ak nestačí predloha, použite kópiu tejto strany.



Výsledky riešenia projektu (pokračovanie)



Obr. 5 Upnutie vzorky na upínací prípravok

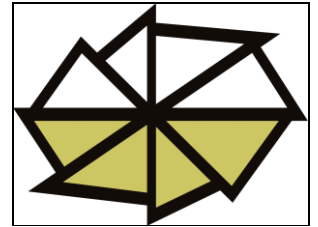
b.) dosiahnuté výsledky a porovnanie s cieľmi projektu

Cieľom projektu bolo na základe experimentálnych meraní získanie údajov potrebných pre návrh vzťahu na výpočet kritickej vzpernej sily kruhovej rúrky so sploštenými koncami.

Ako je možné uviesť výpočtom pomocou Rayleighovej energetickej metódy, táto úprava má teoreticky zanedbateľný vplyv na zmenu kritickej vzpernej sily. Pre priemer 12 mm sa hodnota relatívnej odchýlky pohybuje od $1.9 \cdot 10^{-3} \%$ pri štihlosti 100 až po hodnotu $2.3 \cdot 10^{-4} \%$ pri štihlosti 153. So zväčšujúcou sa štihlosťou sa hodnota relatívnej odchýlky exponenciálne znižuje. Podobný priebeh bol zaznamenaný aj pre priemer 14 mm, kde sa hodnota relatívnej odchýlky pohybuje od $3.7 \cdot 10^{-3} \%$ pri štihlosti 100 až po hodnotu $4.6 \cdot 10^{-4} \%$ pri štihlosti 153.

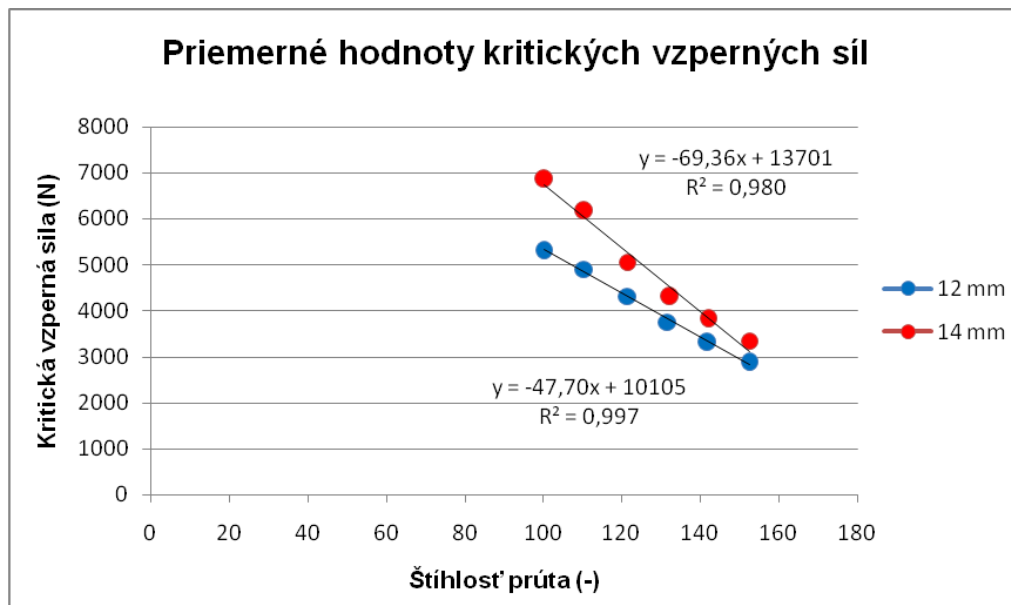
Pôvodná hypotéza znela, že prút sa začne pôsobením osového zaťaženia deformovať v rovine kyvu. Keďže sa jednalo o skrutkový spoj s jednou skrutkou na každom konci, predpokladali sme obojstranné kĺbové uchytenie. Pre tento typ uchytenia platí vzperný súčiniteľ $\beta = 1$. Podľa vykonaných experimentov sa však významná väčšina prútov deformovala v rovine kolmej na rovinu kyvu (55 vzoriek zo 60), čo znamená, že uchytenia musíme považovať za votknuté. Pri tomto type uchytenia platí vzperný súčiniteľ $\beta = 0,5$ podľa Eulera, $\beta = 0,65$ podľa odporúčaní z praxe a $\beta = 0,866$ podľa energetickej metódy.

Ak nestačí predloha, použite kópiu tejto strany.



Výsledky riešenia projektu (pokračovanie)

Podľa nášho predpokladu sa so zvyšujúcou štíhlosťou znižovala kritická vzperná sila. Ďalej sme predpokladali, že sa kritická vzperná sila bude znižovať s rastúcou štíhlosťou lineárne. Zhodu môžeme potvrdiť pri priemere 12 mm na 99,7 % a pri priemere 14 mm na 98 % (Obr. 6).

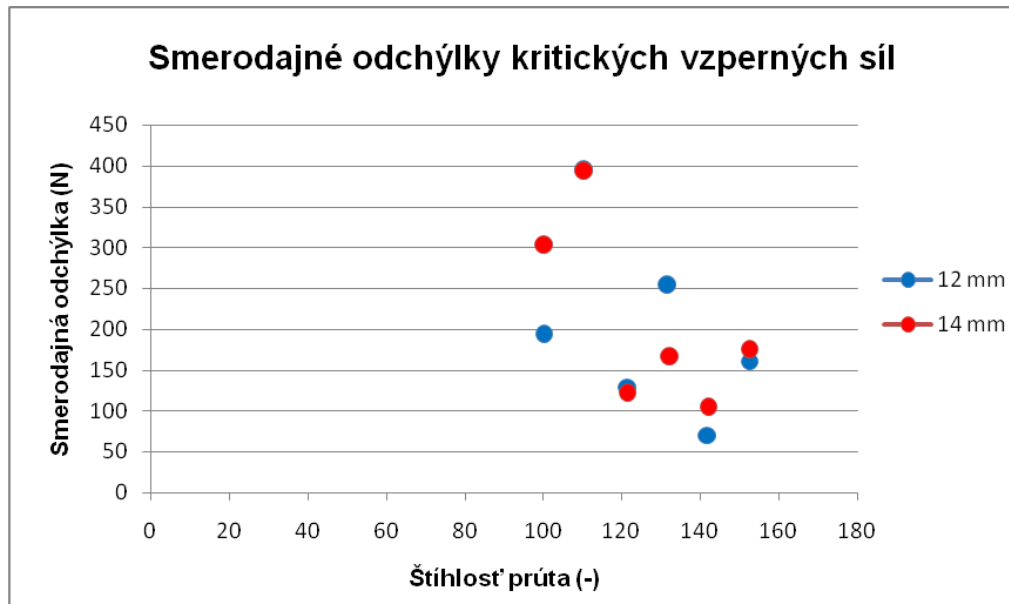


Obr. 6 Priemerné hodnoty kritických vzperných síl

Čo sa týka smerodajnej odchýlky, nenachádzame žiadnu závislosť tejto hodnoty na štíhlosti prúta. Hodnoty smerodajných odchýlok sa pri oboch priemeroch správali kolísavo. Pri oboch priemeroch sme najvyššiu smerodajnú odchýlku zaznamenali pri štíhlosti 110, konkrétne pre priemer 12 mm hodnotu 394,32 N a pre priemer 14 mm hodnotu 392,8 N. Najnižšie hodnoty smerodajných odchýlok boli zaznamenané pre oba priemery pri štíhlosti 142, konkrétne pre priemer 12 mm hodnota 70,05 N a pre priemer 14 mm hodnota 104,17 N (Obr. 7).



Výsledky riešenia projektu (pokračovanie)



Obr. 7 Smerodajné odchýlky kritických vzperných síl

V prvom rade bolo potrebné zistiť, ako sa líšia namerané údaje od vypočítaných. Z nášho pohľadu sa najjednoduchšou metódou výpočtu javila Rayleighova energetická metóda. Zvolili sme si funkciu priehybovej čiary

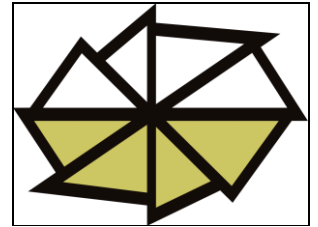
$$w(x) = \frac{w_0}{2} \cdot \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l} \right),$$

ktorá najlepšie vystihovala deformovaný tvar prúta a numerickými výpočtami sme získali hodnotu kritickej vzpernej sily pre rúrku s konkrétnymi parametrami. Pre porovnanie sme zvolili prút s rovnakou dĺžkou, pričom sme neuvažovali so sploštením. Vzniknuté rozdiely sú zanedbateľné. Vzhľadom k tomu, že sploštenie nemá teoreticky vplyv na hodnotu kritickej vzpernej sily, môžeme výpočet realizovať aj pomocou Eulerovho vzťahu

$$F_{krit} = \frac{\pi^2 EJ_{min}}{(\beta l)^2},$$

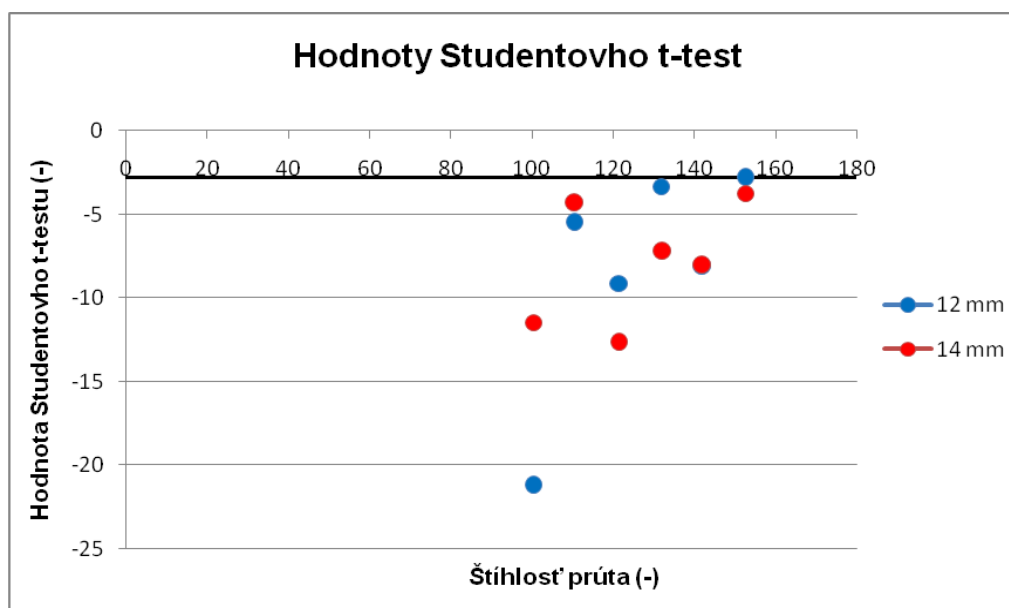
avšak musíme upraviť vzperný súčiniteľ z $\beta = 0,5$ na $\beta = 0,866$. Výpočet s použitím $\beta = 0,866$ sa javí ako najpresnejší vzhľadom na namerané hodnoty.

Ak nestačí predloha, použite kópiu tejto strany.



Výsledky riešenia projektu (pokračovanie)

Pre namerané hodnoty sme vykonali Studentov jednovýberový t-test, podľa ktorého môžeme potvrdiť významne odlišné hodnoty vo všetkých prípadoch. Kritická hodnota Studentovho t-testu je $\pm 2,776$. Pri našich experimentoch sme zaznamenali hodnoty od -21,225 po -2,811 (Obr. 8). Znovu nemôžeme jednoznačne povedať, že tieto hodnoty závisia od štihlosti prúta.



Obr. 8 Hodnoty t-testu

Pri hodnotení dvojpárového pravdepodobnostného testu sa pri všetkých štihlostiach a obidvoch priemeroch dostávame nad hranicu 95 % čo znamená, že pravdepodobnosť výberu takých súborov, ktorých priemerná hodnota sa bude rovnať našej vypočítanej je menšia ako 5%. Zároveň môžeme potvrdiť fakt, že pomocou našej metódy výpočtu dostaneme vždy väčšie hodnoty sily, ako sú namerané. Pravdepodobnosť, že by sa tak nestalo je menšia ako 1,5 %.

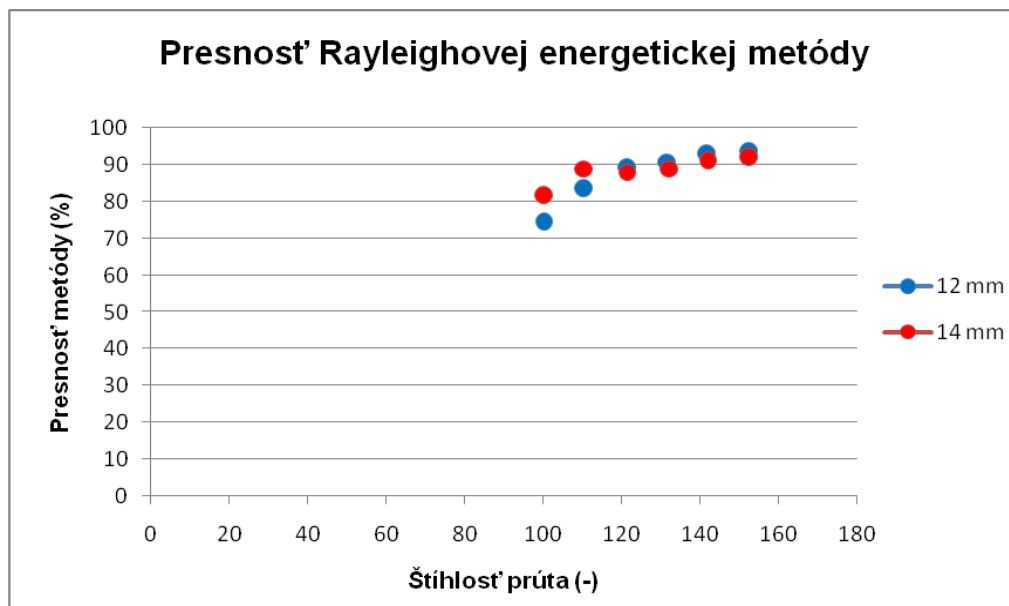
Vzhľadom k tomu, že sme experimenty vykonávali na piatich vzorkách, každej priemernej hodnote kritickej vzpernej sily prislúcha relatívna chyba, ktorá sa pre priemer 12 mm pohybuje v rozsahu od 3,72 % do 9,99 %. Pri priemer 14 mm je to od 2,98 % do 7,9 %, čo považujeme za dostatočnú presnosť a teda aj výber piatich vzoriek za dostatočný.

Ak nestačí predloha, použite kópiu tejto strany.



Výsledky riešenia projektu (pokračovanie)

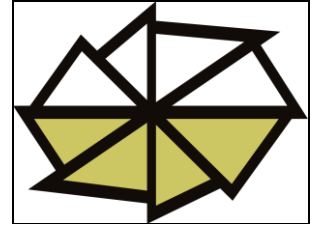
Pokiaľ hodnotíme presnosť výpočtu podľa Eulerovej metódy s $\beta = 0,866$, môžeme povedať, že so zväčšujúcou sa štihlosťou stúpa aj presnosť výpočtu. Pri štihlosti 100 uskutočňujeme výpočet s takmer 26 % chybou výpočtu, čo je nezanedbateľná hodnota. Pri štihlosti 110 je to takmer 17 %. Pokiaľ uvažujeme o chybe výpočtu približne 10 %, tak túto dosiahneme iba pri štihlostiach vyšších ako 121. Podobné výsledky sme zaznamenali aj pri priemere 14 mm. Najmenšiu chybu výpočtu zaznamenáme pri priemer 12 mm a štihlosti 153, a to konkrétne 6,5 % (Obr. 9). Z nášho pohľadu sa to javí ako prijateľná hodnota, avšak našou snahou do budúcnosti bude navrhnuť presnejší vzťah.



Obr. 9 Presnosť Rayleighovej energetickej metódy

Sme teda toho názoru, aby sa na základe experimentov dočasne zachovala hodnota vzperného súčiniteľa $\beta = 0,866$. Z doposiaľ vykonaných experimentov môžeme určiť vzperný súčiniteľ pri najmenších odchýlkach od priemerov nameraných hodnôt síl. Na základe minimálneho súčtu štvorcov rozdielov vypočítanej hodnoty a priemernej experimentálnej hodnoty bol pri rúrkach so sploštenými koncami určený vzperný súčiniteľ $\beta = 0,938$, čo je už blízke hodnote súčiniteľa pre kĺbové uchytenie. Vyvodzujeme domnienku, že oslabenie rúrkového prierezu sploštením má za následok zmenu charakteru upínania prúta, a to z votknutého na kĺbové.

Ak nestačí predloha, použite kópiu tejto strany.

**Výsledky riešenia projektu (pokračovanie)****c.) uplatnenie výsledkov a ich prínos v riešenej problematike**

Úspora materiálu a energie je dôležitým aspektom v priemysle a konštruktárskej praxi. Aby mohla byť táto požiadavka splnená, materiál súčiastok musí byť využitý efektívne. Znižovanie nákladov na výrobu konštrukcií úzko súvisí s ich hmotnosťou. Nízka hmotnosť ale neznamená len nízke náklady na materiál, ale aj jednoduchšiu prepravu a jednoduchšiu manipuláciu. Na základe nameraných hodnôt môžeme stanoviť vhodnejší vzperný súčiniteľ, a tým spresniť proces dimenzovania konštrukčných prvkov.

Namerané hodnoty kritických vzperných síl budú slúžiť ako podklady k riešeniu dizertačnej práce, ktorej cieľom je na základe experimentálnych meraní zistiť kritickú vzpernú silu priameho prúta s premenlivým prierezom a navrhnúť analytické a približné vzťahy pre jej výpočet. Navrhovanie analytických vzťahov na základe diferenciálnych rovníc bude predmetom ďalšieho výskumu, kde budú riešené matematické modely kontinuálne porovnávané s experimentmi. Na základe týchto vzťahov bude možné realizovať výpočet rýchlejšie, prípadne podať určité odporúčania pre prax.

Otázkam straty stability sa v súčasnosti na univerzitách venuje len malá pozornosť. Sú preberané len jednoduché príklady a vysvetľovaný je len základný princíp. Informácie na internete riešia iba ten, či onen konkrétny prípad, ktorý väčšinou nezodpovedá riešenému prípadu. Matematické modely a ich riešenia by mohli byť dobrým námetom pre napísanie textu s teoretickými závislosťami, kde by sa komplexnejšie rozobrala táto problematika a prispela by k väčšej informovanosti študentov a odbornej verejnosti. Okrem iného by sa tieto poznatky mohli rozšíriť aj do oblasti programovania. Návrh algoritmov pre riešenie diferenciálnych rovníc takého typu, aký plánujeme v ďalšom procese výskumu riešiť by určite prispel k rozšíreniu základných balíkov viacerých matematických a konštruktérskych softvérov.

Namerané hodnoty kritických vzperných síl môžu byť taktiež využité vo výučbovom procese, či v ďalšom výskume realizovanom v tejto oblasti.

Ak nestačí predloha, použite kópiu tejto strany.



Zoznam výstupov, ktoré vznikli na základe výsledkov projektu

a) publikované výstupy

- [1] KOTŠMÍD, S., MINÁRIK, M., BEŇO, P., Strata stability prúta definovaného tvaru pri rôznych hodnotách štíhlostí. In *Trendy lesníckej a environmentálnej techniky a jej aplikácie vo výrobnom procese*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2014, pp. 57 - 62. ISBN 978-80-228-2695-2.

AED - Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

b) zoznam výstupov odovzdaných do tlače v roku 2014

c) iné výstupy

KOTŠMÍD, S., MINÁRIK, M., BEŇO, P., Effect of a Tube Flattening on the Value of the Critical Buckling Force. pp. 9.

Predpokladané zaslanie do:

Structural Engineering and Mechanics (An International Journal) ISSN: 1225-4568

**Čerpanie bežných výdavkov spojených s riešením výskumného projektu:**

Cestovné náhrady	0 €
Konferencie, sympóziá, semináre	0 €
Sieťové odvetvia - Komunikácie	0 €
Literatúra	0 €
Vzorkový materiál	0 €
Drobný hmotný majetok	14,71 €
Materiál, pracovné nástroje	565,28 €
Rutinná a štandardná údržba	0 €
Mzdové náklady (max. 15 %)	0 €
Dohody o vykonaní práce (max. 10 %)	0 €
Spolu	579,99 €

Rozpis čerpania pridelených finančných prostriedkov na riešenie projektu:

Položka	Suma
Lineárny snímač dráhy GEFTRAN PY2-C-50	152,4 €
Lineárny snímač dráhy GEFTRAN PY2-C-100	182,4 €
Konektor CON011 2ks	38,4 €
Doprava + balné (lineárne snímače)	18 €
Rúrky oceľové bezšvíkové O12x1 7ks + O14x1 10ks	106,92 €
Brúsne kotúče 8ks	10,08 €
Kancelárske potreby (papier, fixky, lepiaca páska, lepidlo, euroobaly)	14,71 €
Náradie (Nitovacie kliešte, skrutkovač)	44 €
Materiál (skrutky, matice, nity, vrtáky)	13,08 €

Ak nestačí predloha, použite kópiu tejto strany.

IPA
TUZVO

Interná projektová agentúra TUZVO

Technická univerzita vo Zvolene
Referát vedeckovýskumnej činnosti
T.G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen, Slovensko
tel:045/5206 416, <http://www.tuzvo.sk>



<p>Názov a adresa pracoviska:</p> <p>Katedra mechaniky, strojnictva a dizajnu Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky Technická univerzita vo Zvolene Študentská 26, 960 53 Zvolen</p>	<p>Vyjadrenie fakulty, resp. org. súčasťi TUZVO (prodekan pre VVČ, resp. ním poverený zástupca, riaditeľ org. súčasťi)</p> <p>.....</p> <p>Dátum a podpis:</p>
--	--