ENGINEERING MECHANICS 2009
National Conference with International Participation
Svratka, Czech Republic, May 11 – 14, 2009
pp. 219–226
Paper #243

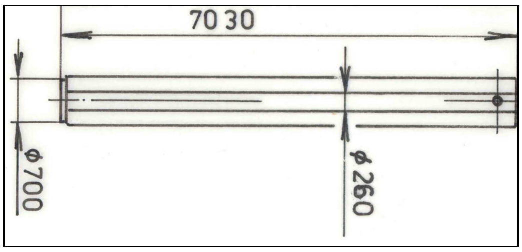
DESIGN DAMPING STRUCTURE BY FINITE ELEMENT METHOD

I. Eisner*, I. Lizoň*, M. Žmindák**

Summary: *The presented contribution describes design of a damping structure, which should prevent destruction of a falling cylindrical body. We present technique of its numerical design and experimental tests, which were carried out on the models. The computational results of real structure are presented too.*

1. Úvod

Konštrukcia na obr.1, musí spĺňať bezpečnostné predpisy pri preprave. Je nutné brať do úvahy jej transport na žeriave a jej prípadný pád z určitej výšky, ktorý by mohol spôsobiť jej poškodenie. Túto požiadavku sme riešili návrhom tlmiacej konštrukcie. Jej úlohou je utlmiť pádajúcu konštrukciu tak, aby nedošlo k jej deštrukcii, prípadne k vzniku trhlín .



Obr.1. Skúmaná konštrukcia

Vstupnými hodnotami sú jej rozmery, hmotnosť a výška nad tlmiacou konštrukciou. Pri páde chránenej konštrukcie na tlmiacu konštrukciu dôjde k ich vzájomnému kontaktu a postupnému pohlteniu kinetickej energie padajúcej konštrukcie tlmiacou konštrukciou .

2. Konštrukčné riešenie

Tlmiaca konštrukcia je tvorená bezšvovými oceľovými rúrkami z materiálu 11 353.1 o priemere 101,6 mm, hrúbky 3,6 mm a dĺžky 1400 mm, ktoré sú uložené v ôsmych radoch

*Igor Eisner, Ing. Ivan Lizoň, WUSAM Engineering, s.r.o. Sokolská 12, 96001 Zvolen eisner@ipmeng.sk lizon@ipmeng.sk
**Prof. Ing. Milan Žmindák, CSc, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 1,010 26 Žilina, milan.zmindak@fstroj.utc.sk

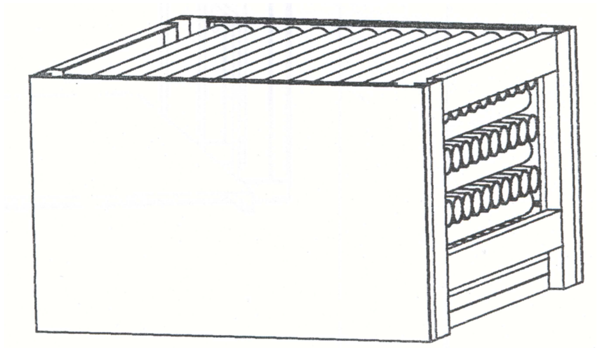
nad sebou. Počet rúrok v jednom rade je 13 a teda celkový počet rúrok je 104 ks. V dolných dvoch radoch sú vložené rúrky o priemere 88,9 mm a hrúbke 7,6 mm, dĺžky 1400 mm. Podklad a súčasť tlmiacej zóny tvorí doska o hrúbke 50 mm.

Rozmery tlmiacej zóny: 1500 x 1500 mm
Výška aktívnej zóny: 810 mm

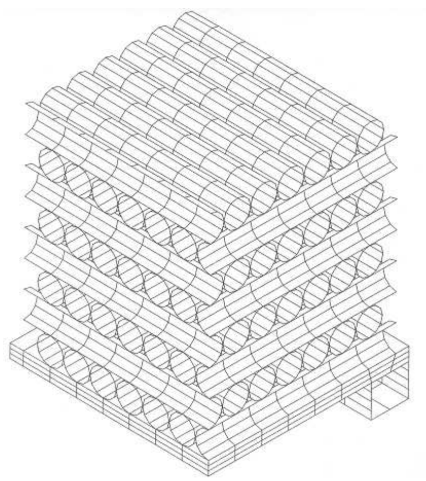
Materiálové vlastnosti tlmiacich rúrok: kvalita materiálu 11 353.1 (normalizačne žíhaný)
Konštrukčné prevedenie tlmiacej konštrukcie je na obr. 2a a śieť MKP na obr. 2b.

3. Postup návrhu konštrukcie

Samotný návrh tlmiacej konštrukcie prebiehal postupným vývojom. Tento začal jednoduchou doskou, ktorá sa postupne zmenila na vrstvenú dosku. Jednotlivé vrstvy boli navrhované z rôzneho typu materiálu (oceľ, hliník a pod.). Numerické analýzy však ukázali, že na pohltenie energie padajúceho telesa je nutné iné riešenie. Toto riešenie vychádzalo z využitia

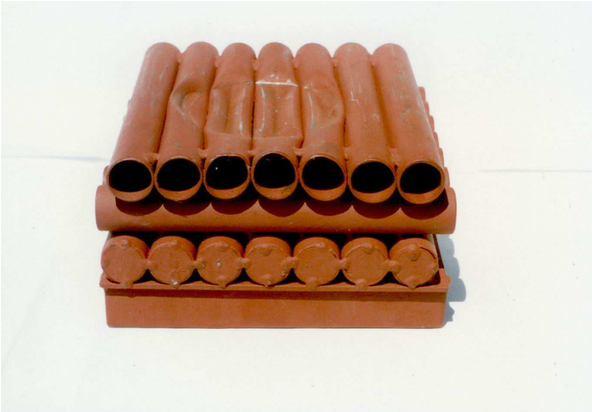


Obr. 2a. Tlmiaca konštrukcia

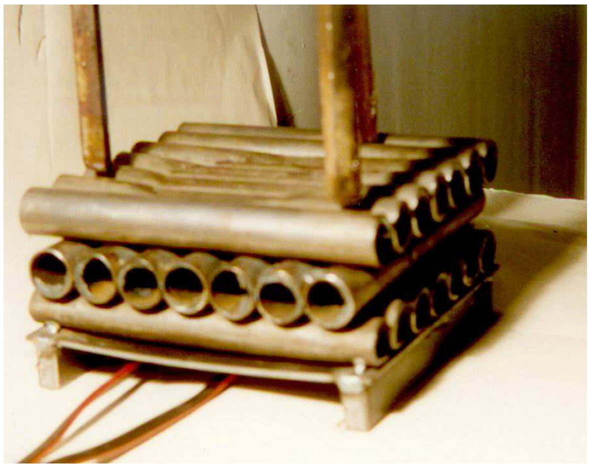


Obr.2b. Rozdelenie konštrukcie na prvky

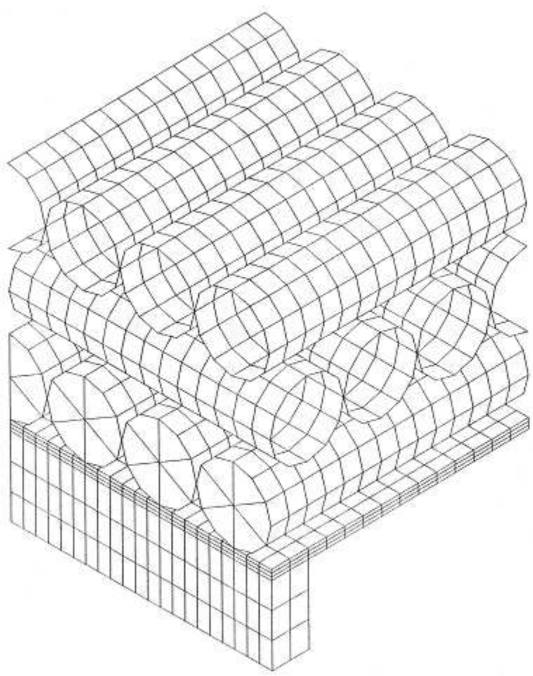
deformačnej energie pohltenej rúrou. Toto bolo vypočítané a experimentálne overené obr.4-7. Na základe takýchto poznatkov bola z vybraných rúr navrhnutá horeuvedená konštrukcia, ktorá mala už pri počiatočnom konštrukčnom návrhu predpoklady pohltiť predpísanú energiu. Pri numerickej analýze sa ukázalo, že rúry v spodnej vrstve konštrukcie sa deformujú najviac. Z tohto dôvodu sme otvory spodnej vrstvy zaslepili. Na overenie numerických výsledkov boli vyrobené dva modely tlmiacej zóny na, ktoré bolo spúšťané závažie hmotnosti 10 kg z výšky 7 m. Tento experiment overil numerické výsledky výpočtu, čo bolo základným predpokladom pri návrhu konečného tvaru tlmiacej konštrukcie.



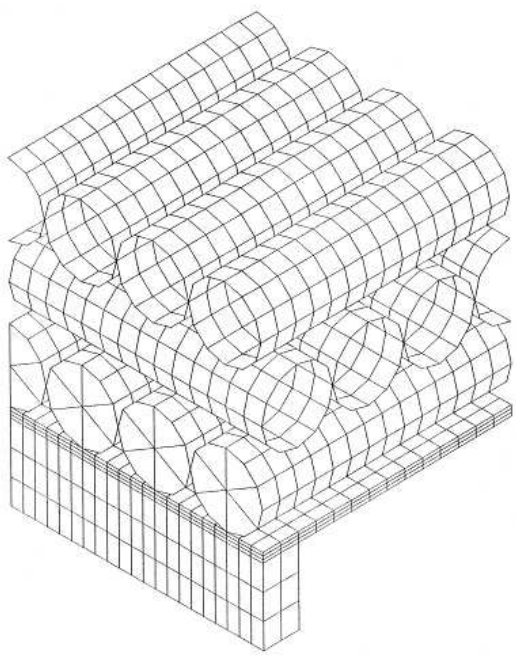
Obr. 3a. Model tlmiacej konštrukcie s uzavretými spodnými rúrami



Obr. 3b. Model tlmiacej konštrukcie s otvorenými rúrami, po zaťažení



Obr.4a. Sieť MKP konštrukcie s uzavretými rúrami



Obr. 4b. Rozdelenie konštrukcie na prvky

4. Postup riešenia

Pri rázovom deji sa kinetická energia padajúceho telesa mení na potenciálnu energiu. V okamihu rázu vznikajú medzi oboma na seba narážajúcimi konštrukciami sily. Rýchlosť narážajúcej konštrukcie v krátkom čase klesá na nulu, padajúca konštrukcia sa zastaví. To znamená, že sa na ňu prenášajú veľké zrýchlenia opačného zmyslu než je jej pohyb, t.j. reakcia ***P*** sa rovná súčinu hmoty narážajúcej konštrukcie a jej zrýchlenia. Ak označíme toto zrýchlenie ***a***, tak môžeme napísať, že reakcia

$$P = \frac{Q}{g} \cdot a \qquad (1)$$

kde: ***Q*** je hmotnosť padajúceho telesa
a je zrýchlenie konštrukcie
g je gravitačná konštanta

Podľa zákona o rovnosti akcie a reakcie sa sila v narážajúcej konštrukcii rovná sile s opačným znamienkom, ktorá pôsobí na konštrukciu, ktorá zachytáva padajúcu konštrukciu. Tieto sily vyvolávajú v obidvoch konštrukciách napätie. Tento problém je v Interaktívnom výpočtovom systéme mechaniky kontinua riešený metódou konečných prvkov.

Pri výpočte sa uvažuje s dynamickými účinkami rázu konštrukcií, pružnoplastickými vlastnosťami materiálu a stabilitou konštrukcie. Výpočet prebieha v cykloch a podmienkou jeho ukončenia je rovnosť kinetickej energie padajúceho telesa a deformačnej energie tlmiacej konštrukcie.

V priebehu výpočtu je možné sledovať priebeh napätí a deformácií vo vybraných uzloch, resp. prvkoch. Použitý algoritmus vedie k rýchlej konvergencii riešenej úlohy.

Základná mechanika nárazu

Uvažujeme náraz telesa hmotnosti ***M***, ktoré sa pohybuje rýchlosťou v_o, do úplne tuhej prekážky o nekonečnej hmotnosti. Kinetická energia telesa je:

$$E_k = \frac{1}{2} M v_o^2 \qquad (2)$$

Táto energia sa v priebehu nárazu mení na energiu deformačnú $\boldsymbol{E_d}$ (***t***), ktorá je funkciou času deformácie. Energetickú bilanciu môžeme napísať v tvare:

$$\frac{1}{2} M v_o^2 = E_d(t) + E_t(t) \qquad (3)$$

Deformačná energia je závislá na deformácii telesa prostredníctvom sily $\boldsymbol{F_d}$ (**Δ**), ktorá deformáciu vyvodzuje:

$$E_d = \int_0^{\Delta} F_t(\Delta) d(\Delta) \qquad (4)$$

Tlmiaca energia je závislá na rýchlosti deformácie $\Delta = \frac{d_\Delta}{d_t}$ prostredníctvom sily $\boldsymbol{F_t}$ (**Δ**) takto:

$$E_t = \int_0^{\Delta} F_t(\Delta) d(\Delta) \qquad (5)$$

Pri využití síl z rovníc (4) a (5) môžeme veľmi dôležitú veličinu, t.j. spomalenie nedeformovanej časti v každom časovom okamihu vyjadriť:

$$|\Delta| = \frac{F_t + F_d}{M(\Delta)} \qquad (6)$$

kde $\boldsymbol{M}$ ($\boldsymbol{\Delta}$) je redukovaná hmotnosť telesa. Zjednodušene môžeme uvažovať, že

$$\boldsymbol{M}\,(\boldsymbol{\Delta}) = \text{konst.} = \boldsymbol{M} \tag{7}$$

Ak predpokladáme, že teleso nemá tlmiacu schopnosť, t.j. $\boldsymbol{E_t}\,(\boldsymbol{t}) = 0$, potom deformačná energia môže byť v extrémoch, alebo energiou potenciálnou (vratnou, kde teleso pôsobí ako pružina), alebo disipačnou energiou (kde teleso je úplne plastické). Reálne konštrukcie sa nachádzajú niekde medzi týmito dvomi stavmi. Zo skúseností vieme, že teleso sa po ráze pohybuje v opačnom smere rýchlosťou $v_{\boldsymbol{k}}$. Táto rýchlosť je u reálnych telies vždy menšia než pôvodná rýchlosť $v_{\boldsymbol{o}}$.

Pomer $\varphi = \dfrac{(V_k)}{v_o}$ nazývame reštitučný koeficient.

Pre ochranu narážajúceho telesa (pri ráze kontajnera do prekážky) je nutné aby $\boldsymbol{\varphi} \rightarrow \boldsymbol{0}$, t.j. aby deformácie boli pokiaľ je to možné úplne plastické a podiel tlmenia bol značný. Pri deformácii štruktúry valcového telesa je podiel energie $\boldsymbol{E_t}$ ($\boldsymbol{t}$) pohlcovanej tlmením zanedbateľný. je významný len v prípade, keď je konštrukcia opatrená tlmiacimi zónami, alebo ak navrhujeme konštrukciu ako tlmiacu zónu.

Ak uvažujeme, že sa teleso deformuje len plasticky, potom pri ráze dvoch telies, ktoré sa pohybujú proti sebe sme schopní zo zákonov zachovania hybnosti a zachovania energie určiť energiu, ktorá sa premení na plastickú deformáciu, podobne ako rýchlosť, ktorou sa bude sústava pohybovať po zrážke:

$$E_d = E_k = \frac{1}{2} m_1\, v_1^2 + \frac{1}{2} m_2\, v_2^2 \tag{8}$$

$$v = \frac{m_1\, v_1 + m_2\, v_2}{m_1 + m_2} \tag{9}$$

kde $\boldsymbol{m_1}$ a $\boldsymbol{v_1}$ je hmotnosť a rýchlosť i - teho telesa pred zrážkou a $\boldsymbol{v}$ je rýchlosť oboch telies po zrážke. Smer pohybu bude zhodný s pohybom telesa, ktoré malo pred zrážkou vyššiu kinetickú energiu. Je zrejmé, že viac bude deformované teleso u ktorého je deformačná charakteristika mäkšia, teda závislosť deformačnej sily na deformácii nižší.

Ako sme už naznačili, závislosť medzi deformačnou silou a deformáciou nazývame deformačná charakteristika. Z hľadiska docielenia maximálnej deformačnej energie na danej dráhe a súčasne minimálneho najvyššieho spomalenia telesa sa ukazuje výhodné, aby $\boldsymbol{F_d}\,(\boldsymbol{\Delta}) = \text{konst.}$ do určitej zvolenej veľkosti deformačnej energie pri medznej deformácii $\boldsymbol{\Delta_k}$.

5. Spôsob modelovania jednotlivých konštrukcií

Valcové teleso

V riešení sme sa sústredili na pevnostné a deformačné vlastnosti valcového telesa pri výpočte jeho pádu na tlmiacu zónu ako i schopnosť konštrukcie absorbovať dynamické vlnenie vzniknuté následkom rázového deja. V tomto riešení bola zohľadnená hmotnosť padajúceho telesa. Matematicko-fyzikálny model bol vytvorený z 15576 prvkov priestorovej napätosti a 21260 uzlových bodov.

Tlmiaca konštrukcia

Matematicko-fyzikálny model tlmiacej zóny bol vytvorený z 12 672 škrupinových prvkov a 12880 uzlových bodov (obr. 1b). Pri výpočte dopadu valcového telesa na tlmiacu zónu predpokladáme:

a) toto dopadne do geometrického stredu tlmiacej konštrukcie,
b) pri dopade je jeho os kolmá na tlmiacu konštrukciu,
c) podložka pod tlmiacu konštrukciou je tuhá – nepoddajná,
d) jednotlivé rúrky sú medzi sebou na dotykových hranách pevne spojené.

Tlmiaca konštrukcia, model 1

Matematicko-fyzikálny model modelu tlmiacej zóny bol vytvorený z 7056 škrupinových Belytschko-Tsay-Lin prvkov a 4032 prvkov priestorovej napätosti a 12904 uzlových bodov (obr. 3b).

Pri výpočte sme predpokladali pád valcového telesa hmotnosti 10.0 kg priemeru 75 mm z výšky 5700 mm do geometrického stredu modelu tlmiacej zóny. Podložku pod konštrukciou sme predpokladali tuhú – nepoddajnú.

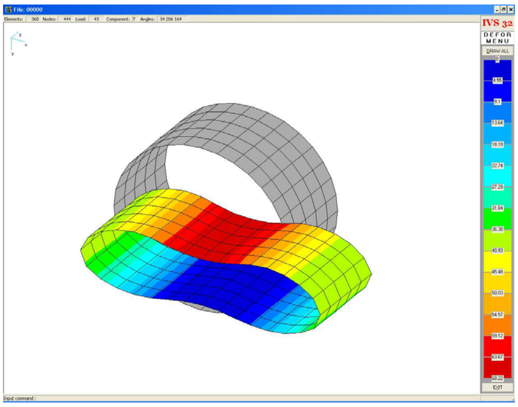
Tlmiaca konštrukcia, model 2

Matematicko-fyzikálny model tlmiacej zóny – model 2, bol vytvorený z 7140 škrupinových prvkov a 4032 prvkov priestorovej napätosti a 12880 uzlových bodov (obr. 3a).

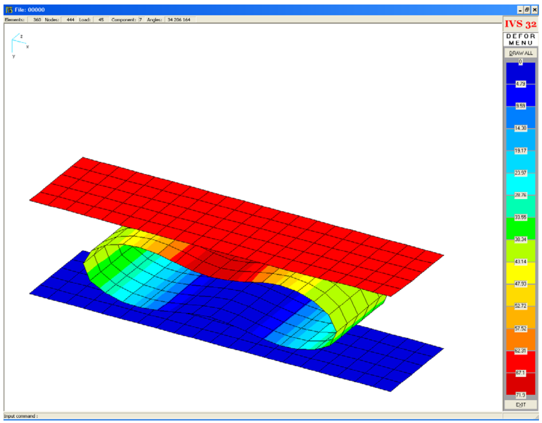
Výpočet predpokladá pád valcového telesa hmotnosti 10,0 kg priemeru 75 mm z výšky 5700 mm do geometrického stredu modelu tlmiacej zóny. Podložku pod konštrukciou sme predpokladali tuhú – nepoddajnú.

Rúra

Matematicko-fyzikálny model rúry bol vytvorený z 360 škrupinových prvkov a 444 uzlových bodov (obr. 4-7). Výpočet predpokladá pád valcového telesa hmotnosti 10 kg, priemeru 75 mm z výšky 5700 mm.

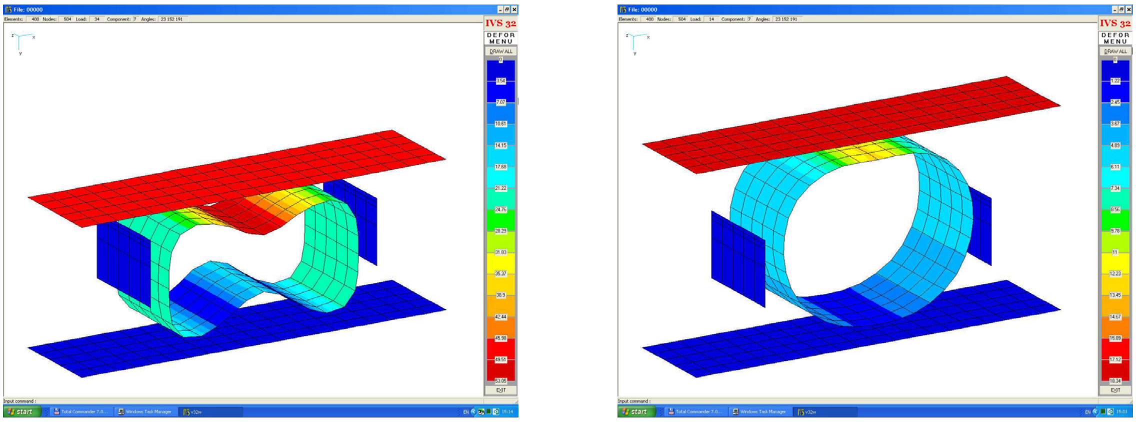


Obr.5a. Voľne uložená rúra pred a po deformácii

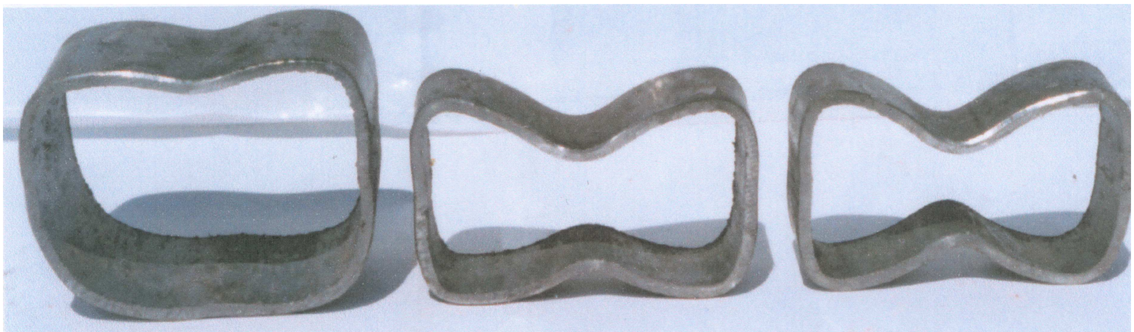


Obr. 5.b Voľne uložená rúra po deformácii

Obr.6. Tvar voľne uloženej deformovanej rúry po experimente.



Obr.7. Rúra s bočným obmedzením po zaťažení rázom.



Obr.8 Deformovaná rúra s bočným obmedzením po skúške (rôzne priemery rúr).

6. Výsledky výpočtu

Valcová rúra

Pri jej dopade na tlmiacu zónu nedôjde deštrukcii ani vzniku trhlín.

Tlmiaca zóna

Kolmý pád valcového telesa na tlmiacu zónu spôsobí celkovú deformáciu tlmiacej zóny 262 mm. Na základe výpočtu je možné konštatovať, že navrhnutá konštrukcia tlmiacej zóny zabráni deštrukcii valcového telesa pri páde z výšky 5000 mm.

Tlmiaca zóna, model 1

Maximálna deformácia tlmiacej zóny, model 1. je 11 mm. Pod maximálnou deformáciou rozumieme súčet elastickej a plastickej deformácie po rázovom deji.

Tlmiaca zóna, model 2

Maximálna deformácia tlmiacej zóny, model 2 je 13,8 mm. Pod maximálnou deformáciou rozumieme súčet elastickej a plastickej deformácie po rázovom deji.

Rúra

Rúru po deformácii vidíme na obr. 4.-7. Maximálna deformácia rúry 30,32 mm.

Porovnanie výsledkov výpočtu s experimentom

	Maximálna deformácia v mm	
	Vypočítaná	Získaná experimentom
Model 1	11	11
Model 2	13,8	13,75
Rúra	30,32	30,5 / 31,0

7. Záver

Riešenie zadanej úlohy Interaktívnym výpočtovým systémom mechaniky kontinua v plnej súčinnosti s výsledkami experimentov potvrdili, ich zhodu a možnosti aplikácie numerických metód pri návrhu takto náročných konštrukcií. Navrhnutá konštrukcia tlmiacej konštrukcie utlmí pád valcového telesa z výšky 5 m a zabráni jeho deštrukcii.

8. Poďakovanie

Autori tohto príspevku ďakujú agentúre na podporu vedy a techniky (APPV) za finančnú podporu tejto práce (projekt č. APVV–0169–07) a Vedeckej grantovej agentúre VEGA-1/0657/09.

9. Literatúra

Bathe, K.J. (2003): On the development of Finite Element methods and Software, *In: Prceedings of 9 th Conference on Numerical Methods in Continuum Mechanics,* 9-12 th September 2003, Zilina.

Eisner, I., Lizoň, I., Melicher, R., Žmindák, M. (2006): Experimental-numerical technique for design of bus structure. *Acta Mechanica Slovaca*, pp.93-100. (in Slovak).

Melicher, R., Žmindák, M., Mazúr, J., Eisner, I., (2006): *Dynamic analysis of gear-box shaft using IVS MKP*. Acta Mechanica Slovaca (in Slovak).

Okrouhlík,M, Pták, S. (2003) *Numerical Modelling of Axially Impacted Rod with a Spiral Groove*. Eng. Mechanics,Vol 10, No 5, 359-374

Žmindák, M., Eisner, I., Lizoň,I. (2007): *Numerical simulation of load-bearing capacity of structures in the areas of large deformations and material plasticity with occurrence of multi-body contact carri*.

Zukas, J.A. (1982) Impact Dynamics, J.Wiley