

IMPACTS COMPUTER SIMULATION USING LS-DYNA PROGRAM

V. Salajka¹, V. Kanický²

Summary: *Buffer ring in the form of a short thin-walled tube is used to damp the impact of the primary circuit cover on the secondary cover of the collector of nuclear power plant steam generator in the case of postulated rupture cover bolts. Dynamic tests have been performed in order to investigate both the energy absorption capability and the dynamic buckling behaviour of typical buffer rings. The presented paper describes the computer simulation of the experiment using a sophisticated computation model and LS-DYNA program. It has been shown, that computer simulation can reduce considerably the extent of expensive experiments.*

1. Úvod

Kolektor primárního okruhu parogenerátoru je ukončen rozebíratelným uzávěrem – víkem upevněným dvaceti svorníky. Hypoteticky v havarijním případě, při přetržení všech dvaceti svorníků vzhledem k přetlaku mezi primárním a sekundárním okruhem, nastane velké urychlení víka. Mezi tímto víkem a víkem sekundárního okruhu se proto vkládá ocelový tlumící kroužek ve tvaru tenkostěnné trubky, který má snížit účinky pohybujícího se víka a tím omezit účinky na víko sekundárního okruhu.

V rámci grantového projektu byly v laboratořích Vojenské akademie v Brně prováděny statické a dynamické zkoušky chování nárazníkových trubek s ohledem na určení kritické a pokritické osové síly. V případě zkoumání dynamické odezvy nárazníkových trubek při velkých rychlostech zatěžování lze velmi složitě realizovat patřičná měření a odečet sledovaných veličin. Proto byly jako doplněk provedeny výpočty dynamického zatěžování vzorků simulující provedené experimenty. Byl sestaven komplexní výpočtový model experimentu s využitím metody konečných prvků. Protože sledovaný dynamický děj je neobyčejně rychlý, probíhající zlomky sekundy a úloha je po všech stránkách nelineární, je nutno použít program řešící dynamické úlohy geometricky a materiálově nelineární s kontakty. V tomto případě standardní běžně dostupné programy pro analýzu dynamických dějů nelze použít. I v případě výkonného systému ANSYS, který umí řešit v plné šíři nelineární úlohy dynamiky, jím používaný implicitní řešič rovnic a formulace kontaktu nedovolují v reálném čase uvedenou úlohu řešit. Z tohoto důvodu byl pro výpočet použit

¹ Ing. Vlastislav Salajka, CSc.: Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, tel.: +420 541 147 365, +420 603 244 458, E-mail: salajka.v@fce.vutbr.cz

² Doc. Ing. Viktor Kanický, CSc.: Kancelář dynamických výpočtů, Hoblíkova 13, 613 00 Brno, tel.: +420 545 572 697, +420 603 258 039, E-mail: kanicky.v@fea.cz

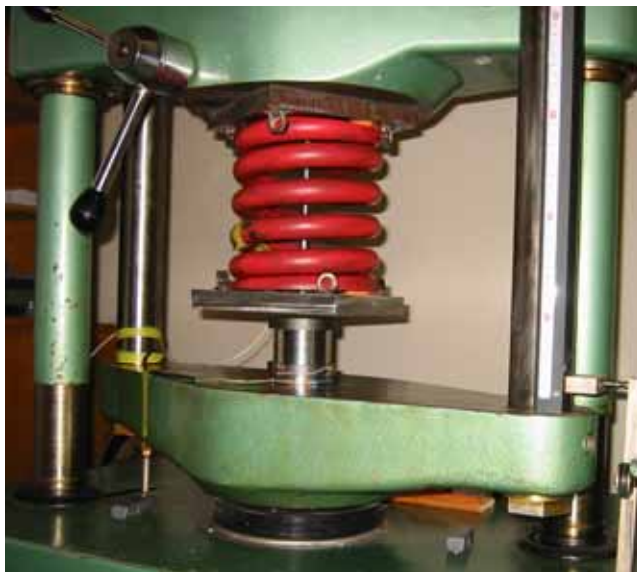
program LS-DYNA vhodný pro řešení rychlých dynamických dějů využívající rychlou formulaci konečných prvků a explicitní speciálně upravený řešič. Program dovoluje velmi jednoduše definovat hranice možných kontaktů. Výsledkem výpočtů na rozdíl od měření jsou pole posunutí, rychlostí, zrychlení, přetvoření a napjatosti ve všech částech modelu. Dají se také vyhodnocovat hodnoty sil v kontaktech, změny energií atd.

2. Výpočtový model

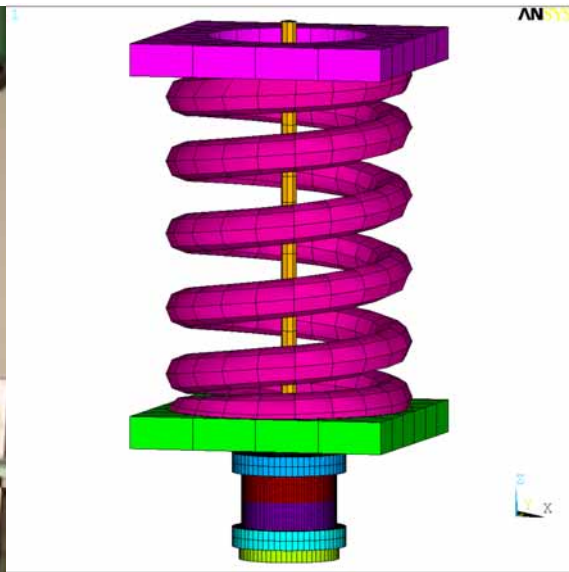
2.1. Části modelu

Na základě náčrtů, popisu experimentu a realizace (viz obr. 1) byl sestaven podrobný výpočtový model (viz obr. 2) zahrnující všechny významné části zkušební sestavy včetně zkoumaného vzorku. Pro model byl použit prostorový osmi uzlový prvek s plnou $2 \times 2 \times 2$ integrací. Prvek s jednobodovou integrací se v této úloze neosvědčil.

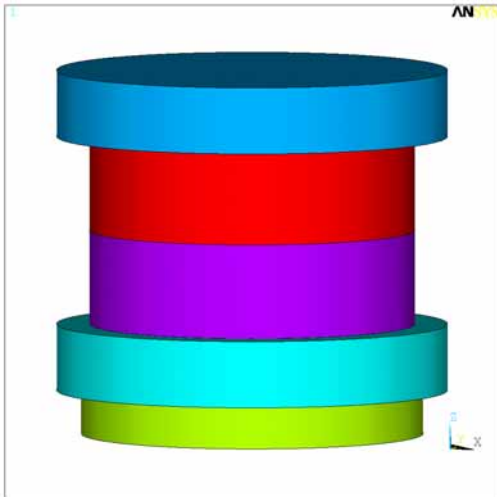
Výpočtový model sestává z devíti částí. První a v pořadí čtvrtá část představuje tlačný přípravek. Jedná se o model kruhové desky průměru 88 mm, max. tloušťky 20 mm a hmotnosti 0,85 kg. Zkušební vzorek, část trubky vnitřního průměru 72 mm, výšky 42 mm a tloušťky 0,6 mm je reprezentován v modelu částmi dvě a tři. Stěna trubky je po tloušťce dělena na čtyři prvky. Jemné dělení modelu trubky si vyžádalo celkem 14400 prvků (viz obr. 4). Část pět reprezentuje pružinu mající tuhost $434,8 \text{ kN.m}^{-1}$ a hmotnost 14,90 kg. Jedná se o pružinu o šesti závitěch (z toho 2 závěrné) používanou pro odpružení železničního vagónu. Geometrické rozměry pružiny byly získány měřením na zapůjčené pružině. Protože dělení na prvky je relativně hrubé (kruhový průřez je nahrazen šestiúhelníkem), byla provedena korekce na hmotnost a tuhost pružiny. Šestá a sedmá část představuje napínací mechanismus. Část šest je čtvercová deska $200 \times 200 \text{ mm}$ tloušťky 25 mm o hmotnosti 8,28 kg. Sedmá část je tyč průměru 12 mm a délky 300 mm. Osmá část představuje pevně uchycenou desku v horní části nad pružinou. Devátá část modelu simuluje tuhost dynamometru. Jedná se o prstenec vnějšího průměru 77 mm, vnitřního průměru 67 mm a tloušťky 9,8 mm. Celkový výpočtový model (viz obr. 2) sestává z 19740 prvků lokalizovaných 27006 uzly.



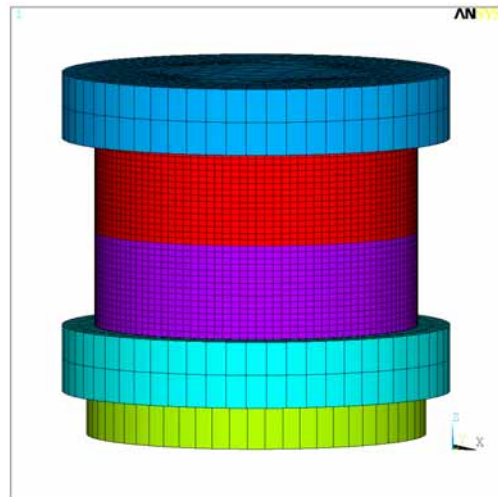
Obr. 1 - Prováděný experiment – zkušební sestava



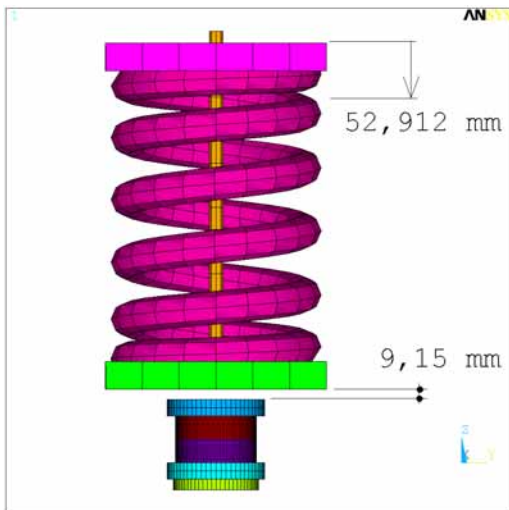
Obr. 2 - Celkový výpočtový model – dělení na prvky



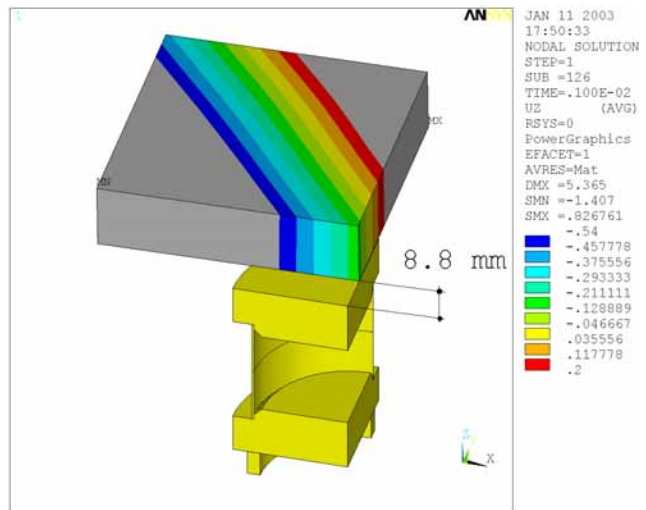
Obr. 3 - Spodní část se vzorkem



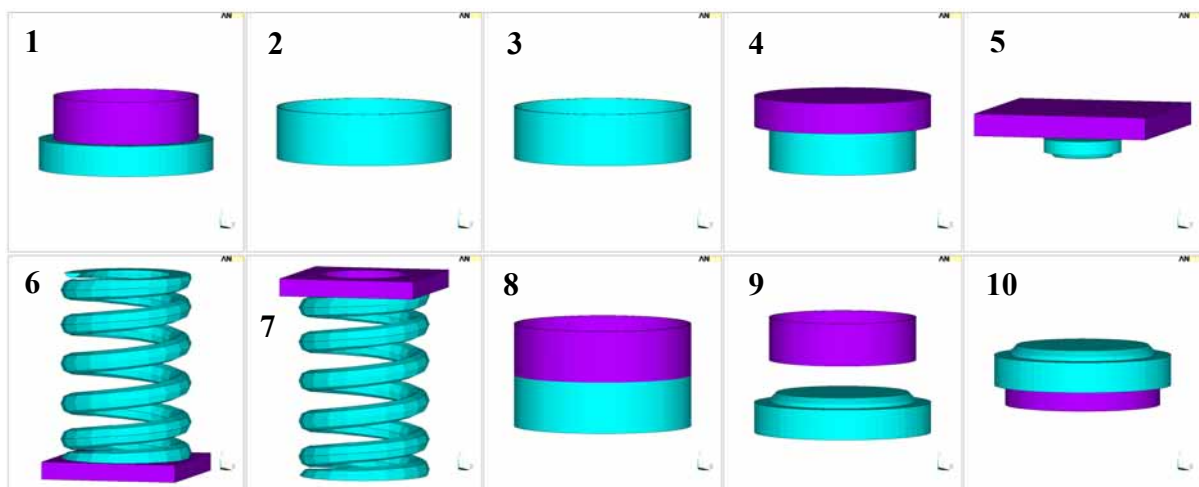
Obr. 4 - Spodní část se vzorkem –
dělení na prvky



Obr. 5 - Požadované stlačení pružiny
a výchozí geometrická poloha



Obr. 6 - Vzdálenost spodní části od stlačující
desky před jejím uvolněním



Obr. 7 - Kontakty mezi částmi sestavy

2.2. Materiálové vlastnosti

Materiálové vlastnosti všech částí modelu vyjma vzorku (trubky) jsou lineárně pružné charakterizované modulem pružnosti, součinitelem příčné kontrakce a hustotou oceli.

Materiálové nelinearity trubky byly zohledněny ve výpočtu zadáním nelineárních charakteristik použitých ocelí a výběrem modelu plastického chování materiálu. Plastické chování je charakterizováno nevratnými okamžitými deformacemi, které vzniknou v materiálu při dosažení určité úrovně napětí. Pro popis pružně-plastického chování je nutno použít podmínku plasticity, zákon plastického přetváření a kritérium zpevnění. Systém LS-DYNA nabízí celou škálu modelů plastického chování materiálu. Vzhledem k nedostatku údajů o chování materiálu při dynamickém namáhání, byl pro daný případ volen nejjednodušší nelineární materiálový model s von Misesovou podmínkou plasticity, s asociovaným zákonem plastického přetváření a s kinematickým zpevněním. Tento model materiálu je v programu LS-DYNA označován BKIN (Classical Bilinear Kinematic Hardening) a nelineární materiálové vlastnosti jsou nahrazeny pomocí bilineárních závislostí. Tyto závislosti jsou aproximací mechanických vlastností ocelí v tahu. Bilineární chování oceli je charakterizováno modulem pružnosti, mezí kluzu a modulem zpevnění. Použité materiálové vlastnosti byly odvozeny z provedených statických tahových zkoušek. Pro přesnější popis materiálu je nutno získat závislosti rychlosti deformace na rychlosti zatěžování.

Útlum pro všechny části modelu byl zaveden do výpočtu pomocí tzv. α tlumení, které je porporcionální matici hmotností. Zadaná hodnota odpovídá 2% poměrného útlumu.

2.3. Kontakty

Ve výpočtovém modelu je definováno 10 kontaktů odpovídající interakci jednotlivých částí, viz obr. 5. Jednotlivé části jsou od sebe oddáleny na 0,01 mm, nulovou vzdálenost program nedovoluje. V nabídce je 22 různých typů kontaktů. Pro danou úlohu, kdy sledujeme interakci mezi jednotlivými částmi modelu, byl vybrán typ kontaktu ASSC (Automatic Surface To Surface Contact). Tření mezi kontakty bylo charakterizováno statickou hodnotou 0,4. Vliv dynamického tření nebyl zohledněn.

2.4. Počáteční a okrajové podmínky a zatížení

Pružina je na počátku výpočtu v napjatém stavu. Tento stav je získán výpočtem v programu ANSYS a přenesen jako „relaxace“ do programu LS-DYNA. Počáteční stlačení (viz obr. 5) odpovídá statické hodnotě 24,5 kN. Pevné okrajové podmínky byly zavedeny v místě desky nad pružinou (horní uzly) a v místě modelu dynamometru (spodní uzly). Ukotvení napínací tyče je chápáno jako zatížení proměnné v čase. Je definováno třemi funkcemi pro parametr u_x , u_z , u_y , které jsou rovny pro všechny časy nule. Tyto funkce byly v čase 0,001 „umrtveny“. Tímto došlo uvolnění konce napínací tyče a k následnému pohybu desky a pružiny. Ve výpočtu bylo zohledněno protažení spouštěcího mechanismu při experimentu, viz obr. 6. Vzdálenost desky od horního tlačného přípravku byla v experimentu v okamžiku po přestřihnutí 8,8 mm.

Pružina nevyvozuje dokonale rovnoměrné zatížení na desku, a tím dochází k jejímu naklání a ohybu tyče. Při experimentu byl tento nedostatek odstraněn vypodložením

pružiny pomocí klínů. Ve výpočtu nebylo prakticky možné vycentrovat polohu desky tak, aby byla při napnutí ve vodorovné poloze.

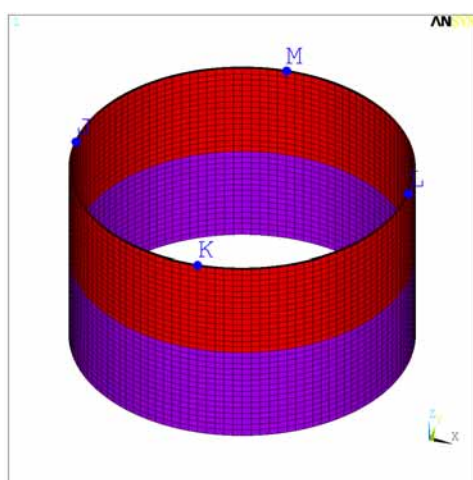
3. Výpočet

Byla provedena celá řada testovacích a ladicích výpočtů. V konečné fázi byly realizovány dva výpočty lišící se materiálovými vlastnostmi. Tyto výpočty jsou označovány jako varianta A a B. Ve variantě B je mez kluzu a materiálové zpevnění oceli vyšší asi o 20% ve srovnání s variantou A. Oblast řešení zahrnovala 0,01 s. Výpočet byl proveden na počítači PC AMD Athlon XP 1700+ s operační pamětí 1250 MB a pevným diskem 120 GB. Bylo uloženo 1250 stavů obsahující pole přemístění, přetvoření a napjatostí a 3000 stavů obsahující údaje o energiích, rychlostech, zrychleních, kontaktech atd. Délka jednoho výpočtu trvala 35 hodin a 24 minut. Umístění pracovních a výsledkových souborů vyžadovalo kolem 20 GB diskového prostoru.

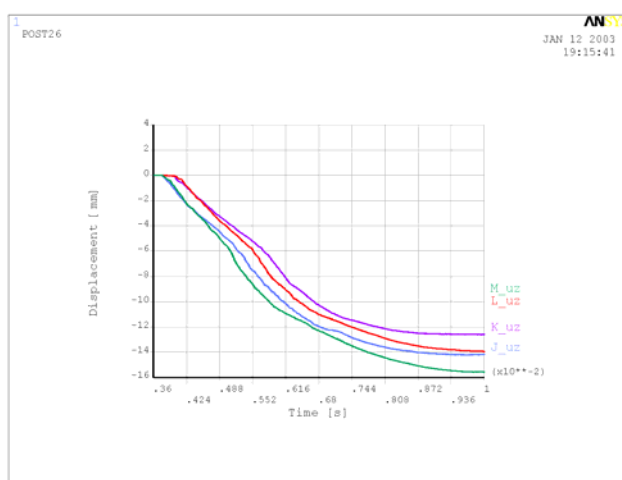
4. Výsledky výpočtů

Výpočtem byla získána pole přemístění, rychlostí, zrychlení, přetvoření a napětí ve 1251 časových okamžicích a silové účinky mezi kontakty, změny energií ve 3000 časových krocích. Vybrané výsledky řešení byly graficky dokumentovány v [1]. Pro ilustraci jsou zde uvedeny průběhy posunutí u_z čtyř bodů zkušební vzorku, viz obr. 8 a 9. Dílčím cílem experimentu bylo zjistit síly působící na zkušební vzorek během rázu. Výpočtem byly získány výslednice silových účinků F_x , F_y , F_z . Pro ilustraci jsou zde uvedeny průběhy výslednice svislých silových účinků mezi částmi 1, 2 (kontakt 1) a mezi částmi 3, 4 (kontakt 4), viz obr. 10. Proces změny polohy tlačných přípravků a změna tvaru trubky jsou ilustrovány graficky v [1]. V těchto okamžicích jsou zobrazena pole posunutí u_z , pole rychlostí v_z , pole srovnávacích napětí σ_{eqv} a pole celkových poměrných deformací ϵ_{tot} . Pro nedostatek místa jsou zde uvedeny posunutí u_z , pole rychlostí v_z , pole napětí σ_{eqv} a pole deformací ϵ_{tot} pouze v čase 0,01 s.

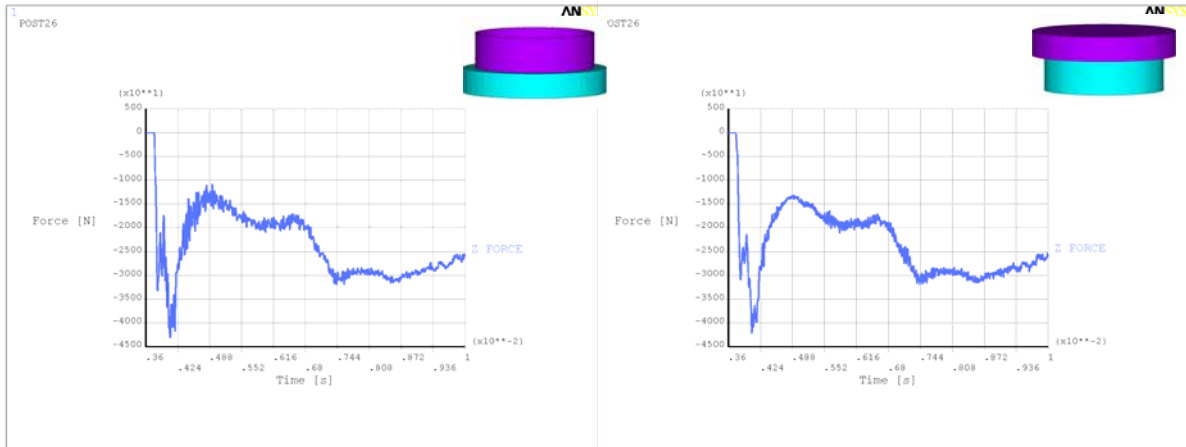
Shoda ve velikosti posunutí, tvaru přetvoření a velikostí kontaktních sil je velmi dobrá, viz obr. 15. Detailní vyhodnocení a porovnání s experimentem nebylo provedeno.



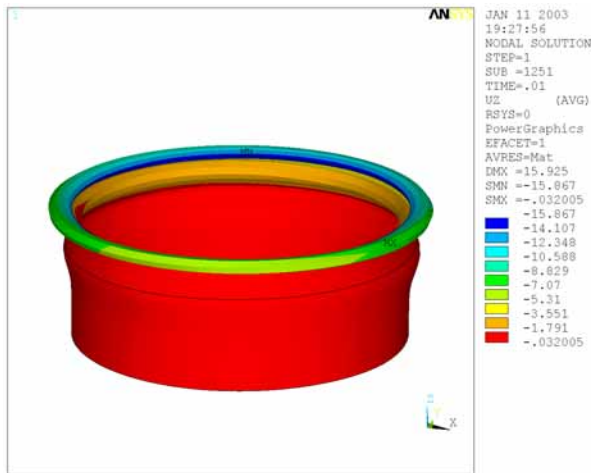
Obr. 8 - Zkušební vzorek



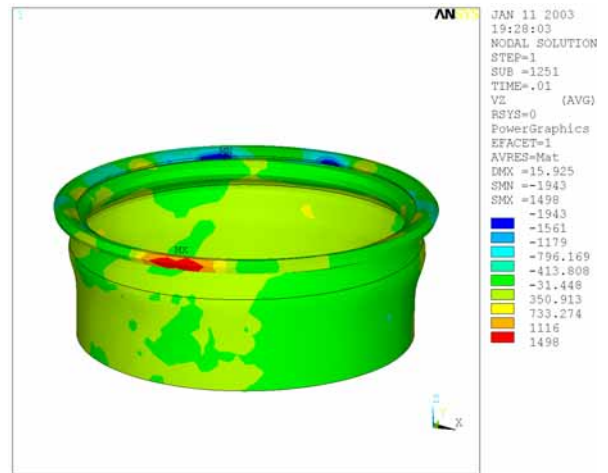
Obr. 9 - Průběh posunutí u_z ve sledovaných bodech



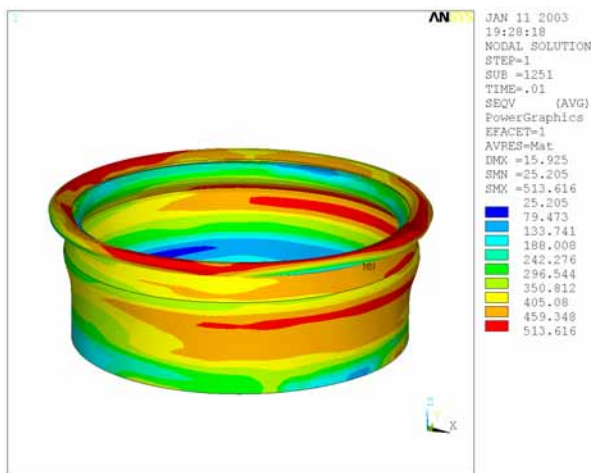
Obr. 10 - Svislá výslednice sil mezi částmi 1, 2 (kontakt 1) a mezi částmi 3, 4 (kontakt 4)



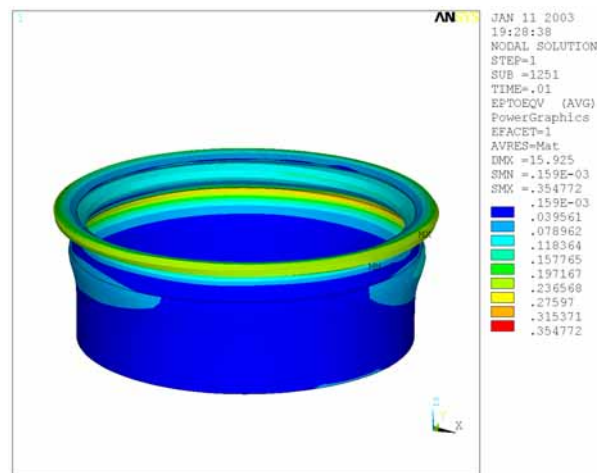
Obr. 11 - Pole posunutí u_z – čas 0,01 s



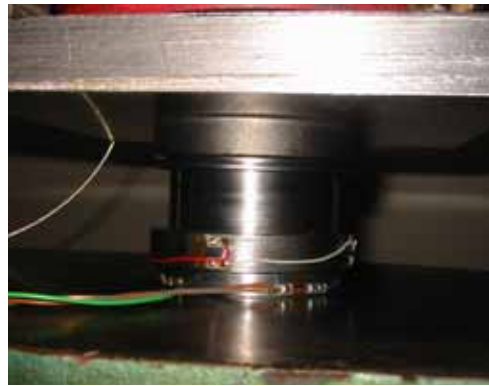
Obr. 12 - Pole rychlostí v_z – čas 0,01 s



Obr. 13 - Pole napětí σ_{eqv} – čas 0,01 s



Obr. 14 - Pole deformací ϵ_{tot} – čas 0,01 s



Obr. 15 - Poloha na počátku a po ukončení experimentu. Deformovaný zkušební vzorek

5. Závěry

Z provedených výpočtů vyplývá, že značně komplikované a nestandardní experimenty lze doplnit, případně i nahradit výpočty. Ve výpočtech se dají prakticky zahrnout všechny typy nelinearit, zvláště kontakty. Výpočtem lze získat dynamickou odezvu při rázové zkoušce, kdy proces zatěžování je neobvykle rychlý. Výpočet nemusí být výrazně zjednodušen, v podstatě lze modelovat všechny významné části mající vliv na odezvu. Zůstává však nedořešena otázka získání nelineárních materiálových vlastností, definování úrovně tlumení, třecích účinků apod.

Výpočty ukázaly užitečnost aplikace systému LS-DYNA při simulaci složitých dynamických dějů.

6. Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory vědeckovýzkumného záměru MŠMT MSM 261100007 „Teorie, spolehlivost a modely porušení staticky a dynamicky namáhaných stavebních konstrukcí“.

7. Literatura

- [1] Salajka, V. (2002) Zkoušky vzorků nárazníkových trubek. Simulace dynamických zkoušek s využitím programu LS-DYNA. Zpráva pro GA ČR, FAST, ÚSTM, VUT V Brně, 40 stran.