

TUBE BENDING SIMULATIONS, WHEN USING THE FINITE ELEMENT METHOD

M. Příbyl*, Z. Kuliš*, M. Španiel*, K. Vítek*

Summary: *The paper deals with a possibility of a use of the finite elements method (FEM) for tube bending simulations. The created FEM models of the bending assembly and a tube used for tube bending simulations, when using a process of winding the tube on a formative segment without a supporting thorn, are described here and the selected results obtained from the realized tube bending simulations, including the tube unloading, are displayed and commented here.*

1 Úvod

Ohýbání trubek je svým charakterem tvářecí technologie. Tvářením vznikají ve tvářeném materiálu tak velké deformace, že jimi vyvolaná (elasticko-plastická) napětí po odlehčení sice poklesnou, ale nevymizí zcela. Experimentální zjišťování hodnot zbytkových napětí v ohnuté trubce není vůbec snadné a téměř vždy je spojené s destrukcí měřeného vzorku.

V souvislosti s pokrokem v rozvoji matematické simulace tvářecích procesů, založené na teorii plasticity a numerických výpočtech metodou konečných prvků (MKP), se nabízí myšlenka nahradit složité a víceméně bodové experimentální zjišťování velikostí zbytkových napětí v ohnuté trubce právě jejich výpočty pomocí MKP. Takto by mohly být získány obsáhlejší, byť méně věrohodné výsledky mnohem rychleji a levněji. Aby to bylo možné, je třeba pro každý způsob ohýbání a materiál:

1. vytvořit MKP modely sestavy ohýbacího stroje s trubkou pro různé hodnoty parametrů ohybu (vedle materiálu trubky hlavně její rozměry a požadovaný poloměr ohybu),
2. kalibrovat MKP modely pomocí experimentů,
3. nalézt spojitosti mezi jednotlivými MKP modely a
4. vytvořit univerzální MKP model.

I pak bude mít výsledný MKP model význam pouze pro trubky, které byly po výrobě zbaveny zbytkových napětí normalizačním žiháním.

* Ing. Martin Příbyl, Doc. Ing. Zdeněk Kuliš, CSc., Ing. Miroslav Španiel, CSc., Ing. Karel Vítek, CSc.: ČVUT, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, Odbor pružnosti a pevnosti; Technická 4; 166 07 Praha 6 – Dejvice; tel.: +420 224 352 523; e-mail: vitek@fsid.cvut.cz

2 Vytvořené MKP modely

V programu ABAQUS63/CAE byly vytvořeny dva prostorové MKP modely sestavy ohýbačky s trubkou pro simulace ohybů trubek navíjením na tvarový segment bez opěrného trnu. Modely se liší jen použitým ohýbadlem. Tím je v prvním případě váleček (viz obr. 1) a ve druhém smýkadlo (viz obr. 2). Zatímco váleček je s ramenem spojen tak, že se může otáčet kolem své osy, smýkadlo je s ramenem spojeno pevnou vazbou znemožňující jakékoli vzájemné pohyby mezi vázanými součástmi.

Vedle dokonale tuhého ohýbadla je sestava ohýbačky tvořena ještě rovněž dokonale tuhým segmentem a poddajným ramenem. Segment a váleček jsou modelovány jako analytické dokonale tuhé povrchy, které netřeba síťovat, smýkadlo je z důvodu složitější geometrie modelováno jako diskretní dokonale tuhý povrch, který je nutno síťovat.

Rameno je jako poddajné těleso modelováno jenom pro to, aby bylo možné definovat jeho spojení s ohýbadlem pomocí vazeb a nikoli pomocí spojovacího (*connector*) prvku. Materiál ocelového ramena je tudíž modelován jako izotropní lineárně-elastický.

Elasticko-plastický materiál ocelové trubky, ohýbané zastudena, je modelován dle Prandtlovy-Reusovy teorie plastického tečení s podmínkou plasticity HMM (viz Španiel či ABAQUS) a izotropním zpevněním. Elastická část materiálového modelu je lineární izotropní. Plastická část modelu kovového materiálu, tvářeného zastudena, musí být v programu ABAQUS63 zadána tabulkou hodnot $[\sigma; \varepsilon_{pl}]$, kde značí σ skutečné napětí v řezu napříč tyčkou tahové zkoušky a ε_{pl} plastickou složku logaritmické deformace ε této tyčky. V řešeném příkladě byla tato tabulka získána z aproximace plastické části tahového diagramu $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ modelovaného materiálu pomocí splinu proloženého body odpovídajícími mezi pružnosti modelovaného materiálu, smluvní mezi kluzu v tahu modelovaného materiálu a okamžiku začátku tvoření krčku na tyčce tahové zkoušky.

Síť skořepinového modelu trubky je tvořena lineárními 4-uzlovými prvky S4R typu *shell*, u nichž je nastaven *offset* tak, aby definiční plocha modelu trubky představovala její vnější povrch. Tloušťka jejich stěny může během výpočtu měnit svou velikost. Síť MKP modelu smýkadla je tvořena 4-uzlovými prvky R3D4 typu *rigid body*. Síť nosíkového modelu ramena je tvořena jedním lineárním 2-uzlovým prvkem B31 typu *beam*, u něhož je kvůli snadnějšímu výpočtu definován mezikruhový průřez.

Oba MKP modely obsahují definice kontaktů vnějšího povrchu trubky s povrchy segmentu a ohýbadla. Oba kontakty jsou typu *master-slave* s konečným posunutím, tzv. *finite sliding*, kontaktních povrchů. *Slave* povrchem je pokaždé vnější povrch trubky. V normálovém směru jsou oba kontakty definovány jako *hard* neboli tvrdé kontakty. Jejich chování v tangenciálním směru je popsáno Coulombovským modelem tření charakterizovaným v obou případech stejnou hodnotou součinitele tření.

Vazbovými rovnicemi ve tvaru

$$\begin{aligned} -(u_i)_O + (u_i)_R &= 0 \wedge \\ \wedge O = V &\Rightarrow i = 1,2,3,4,5 \\ \wedge O = S &\Rightarrow i = 1,2,3,4,5,6 \end{aligned} \quad (1)$$

je svázán referenční uzel ohýbadla s neuloženým uzlem ramena. V uvedených rovnicích značí $(u_i)_O$ i -tý stupeň volnosti referenčního uzlu ohýbadla a $(u_i)_R$ i -tý stupeň volnosti neuloženého uzlu ramena. Referenční uzel válečku je s neuloženým uzlem ramena svázán v prvních pěti stupních volnosti a referenční uzel smýkadla je s neuloženým uzlem ramena svázán ve všech geometrických stupních volnosti.

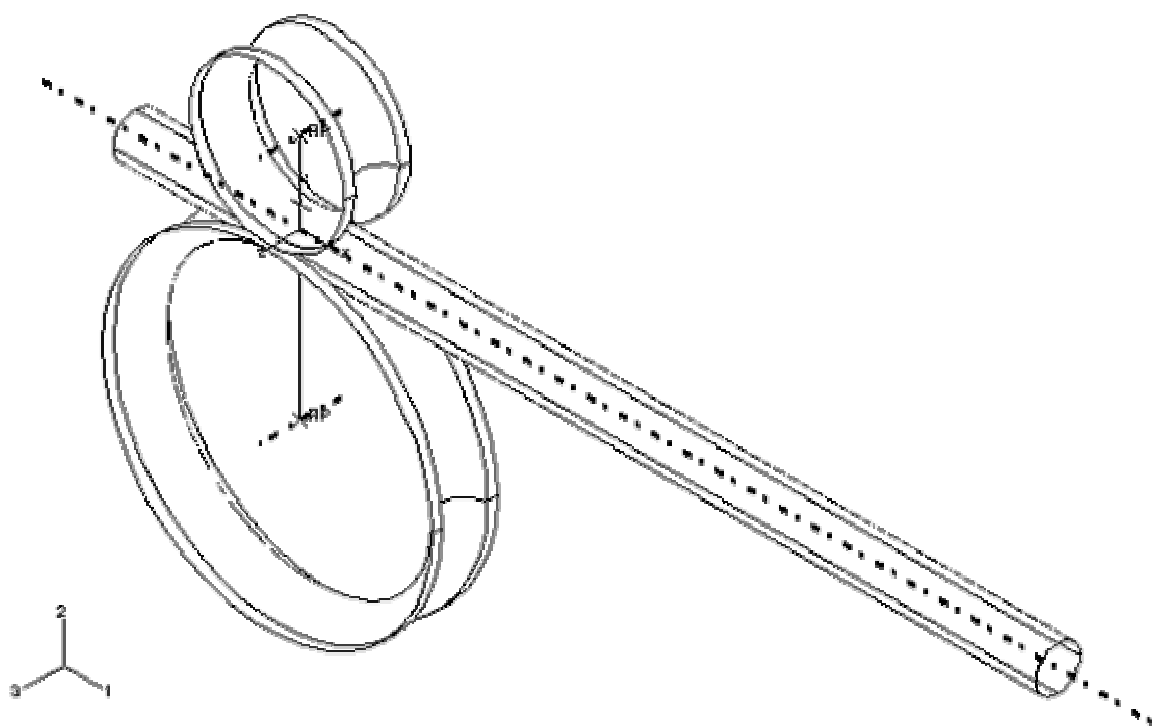
Proces ohybání trubky navíjením na tvarový segment bez opěrného trnu je simulován ve dvou krocích. První krok představuje ohyb trubky a druhý její odlehčení. Při ohybu je trubka zatěžována deformačně posuvem ohýbadla, který je vyvozen předepsaným natočením ramena spojovacího ohýbadla se segmentem. Odlehčení trubky je realizováno deaktivací kontaktu mezi ní a ohýbadlem.

Model materiálu trubky je nelineární elasticko-plastický, MKP modely obsahují definice kontaktů a při ohýbání vznikají v trubce velké deformace. To jsou důvody, proč jsou výpočty nelineární. Do výpočtů nejsou zahrnuty setrvačné síly. Výpočty jsou tudíž kvazistatické.

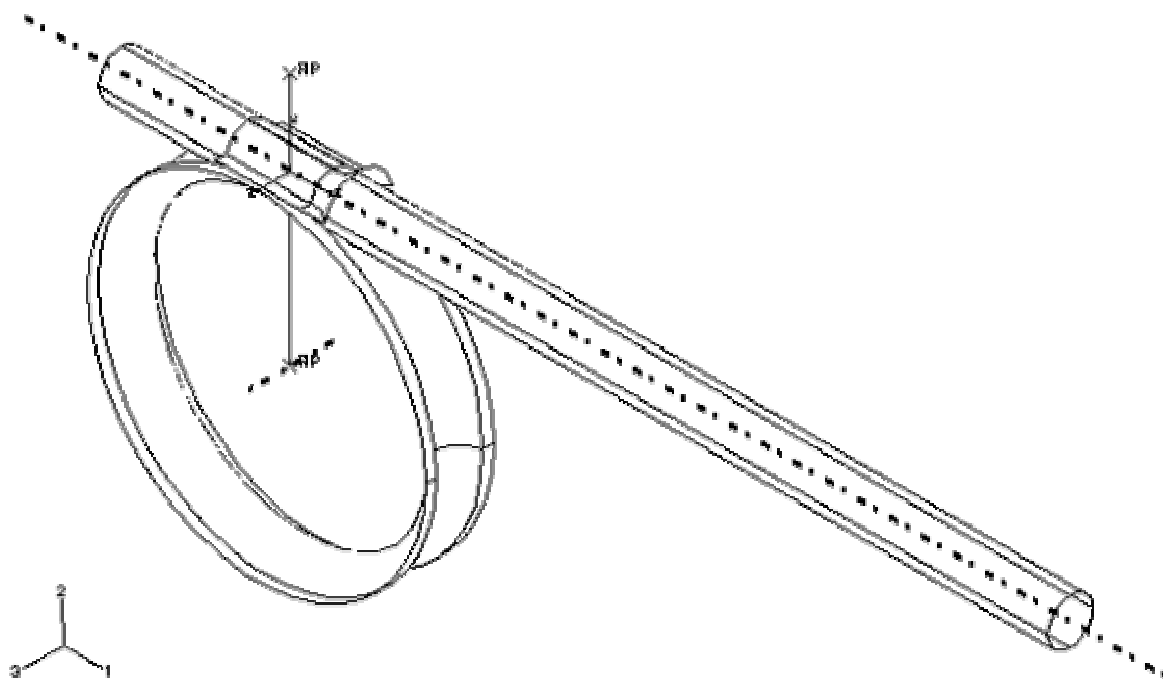
3 Obdržené výsledky

Z obdržených výsledků jsou v grafu na obr. 3 znázorněny průběhy napětí, které je značeno σ_o jako ohybové napětí, v řezu napříč trubkou, který prochází po odlehčení v obou simulovaných případech přibližně polovinou ohybu. Jako σ_o je značeno normálové napětí směřující v tom základním směru prvku, který byl před ohybem rovnoběžný s osou trubky, a je tak značeno pro to, že je vyvoláno především ohybovým namáháním. V grafu na obr. 3 jsou znázorněny průběhy napětí σ_o v okamžicích bezprostředně po skončení ohybu a po odlehčení. Napětí σ_o v deformované trubce jsou zobrazena na nedeformovaném tvaru trubky. Od očekávaných průběhů napětí uvedených např. ve Vítkovi (1966) se průběhy napětí σ_o z grafu na obr. 3 liší především mírným poklesem napětí σ_o v krajních vláknech trubky na vnější straně ohybu v okamžiku bezprostředně po skončení ohybu a s tím spojeným pozvolnějším poklesem napětí σ_o v těch samých vláknech po odlehčení. Tyto odlišnosti jsou zřejmě způsobeny zploštěním původně kruhových příčných řezů trubky, k němuž při obou simulacích dochází v oblasti ohybu a které má za následek, že nejvíce tažena nejsou krajní vlákna trubky na vnější straně ohybu, nýbrž právě vlákna nacházející se v oblasti, kde mají v grafu na obr. 3 průběhy napětí σ_o v okamžiku bezprostředně po skončení ohybu svá lokální maxima. Tato domněnka je podpořena i polohou míst s nejtenčí stěnou na ohnuté trubce (viz obr. 4 a 5). Velikost úhlu natočení ramena byla zvolena tak, aby maximální redukovaná napětí, stanovená dle teorie pružnosti HMM, nedosáhla v žádném ze simulovaných případů hodnoty skutečné meze pevnosti v tahu materiálu trubky.

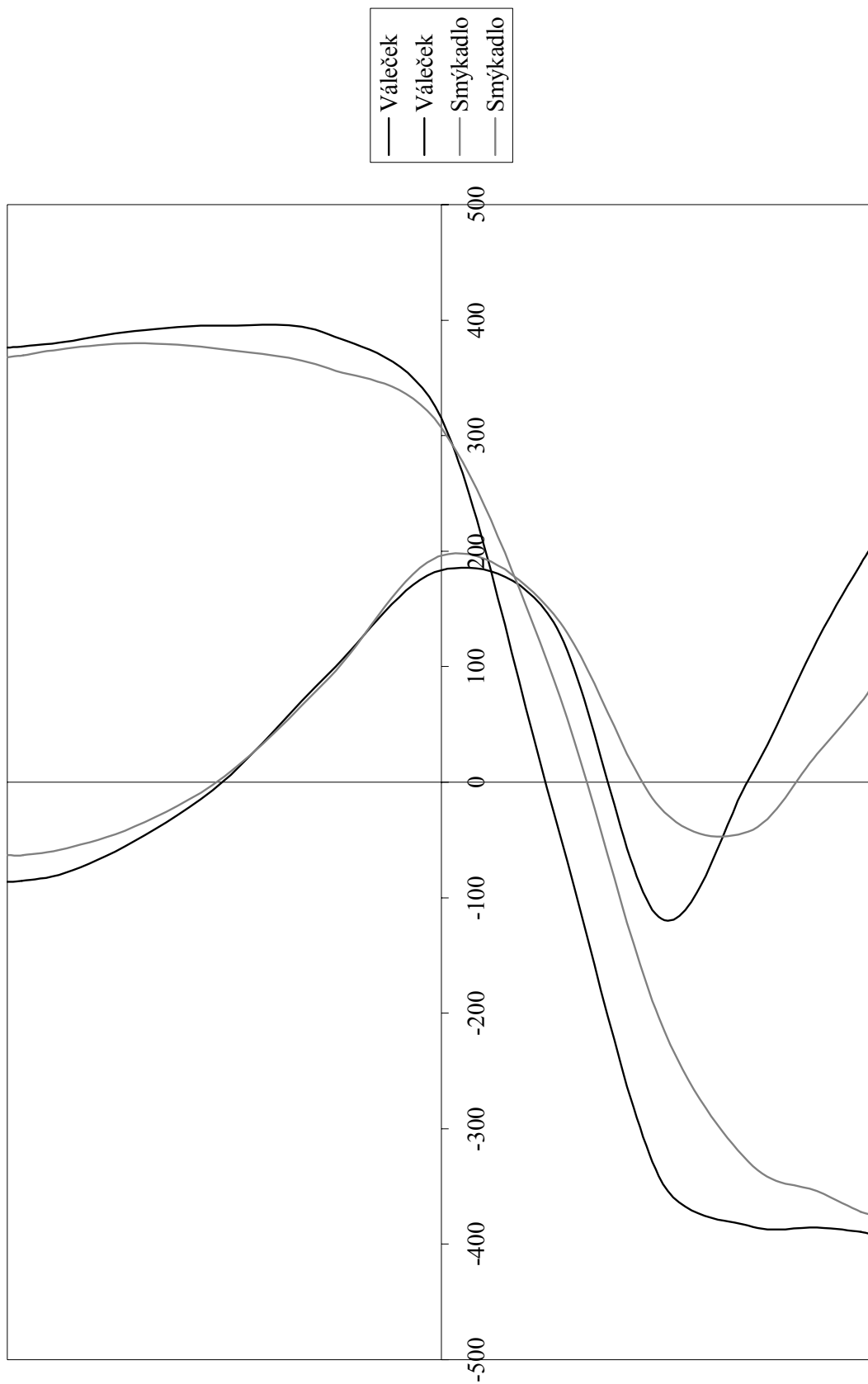
Při obou simulacích se před ohýbadlem na trubce utvářel více či méně zřetelný „zpětný ohyb“, který zapříčinil, že v žádném z modelovaných případů nedosáhl úhel ohybu volného konce trubky bezprostředně po skončení ohybu velikosti úhlu natočení ramena. Příčinou vzniku „zpětného ohybu“ může být vedle pěchování materiálu též kontakt typu *master-slave* vnějšího povrchu trubky s povrchem ohýbadla, který umožňuje penetraci *master* povrchu ohýbadla *slave* povrchem trubky. Ve skutečnosti by pak zpětný ohyb nebyl tak výrazný.



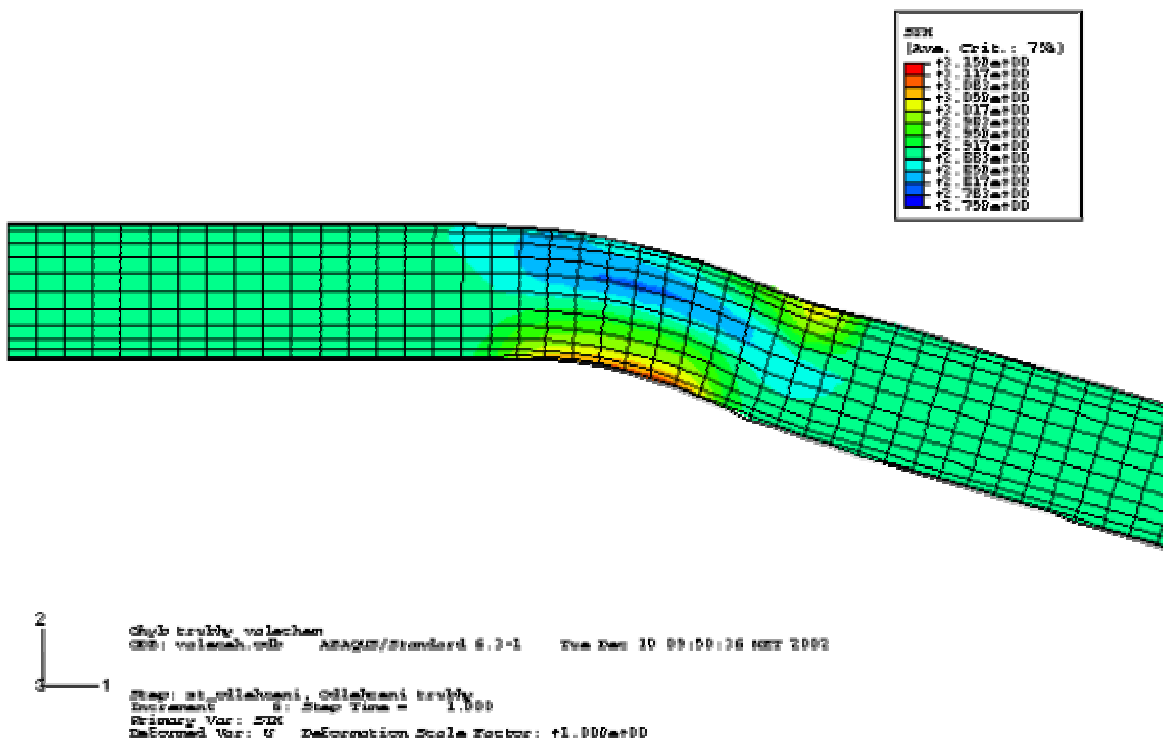
Obr. 1 Geometrický model ohybu trubky pomocí válečku.



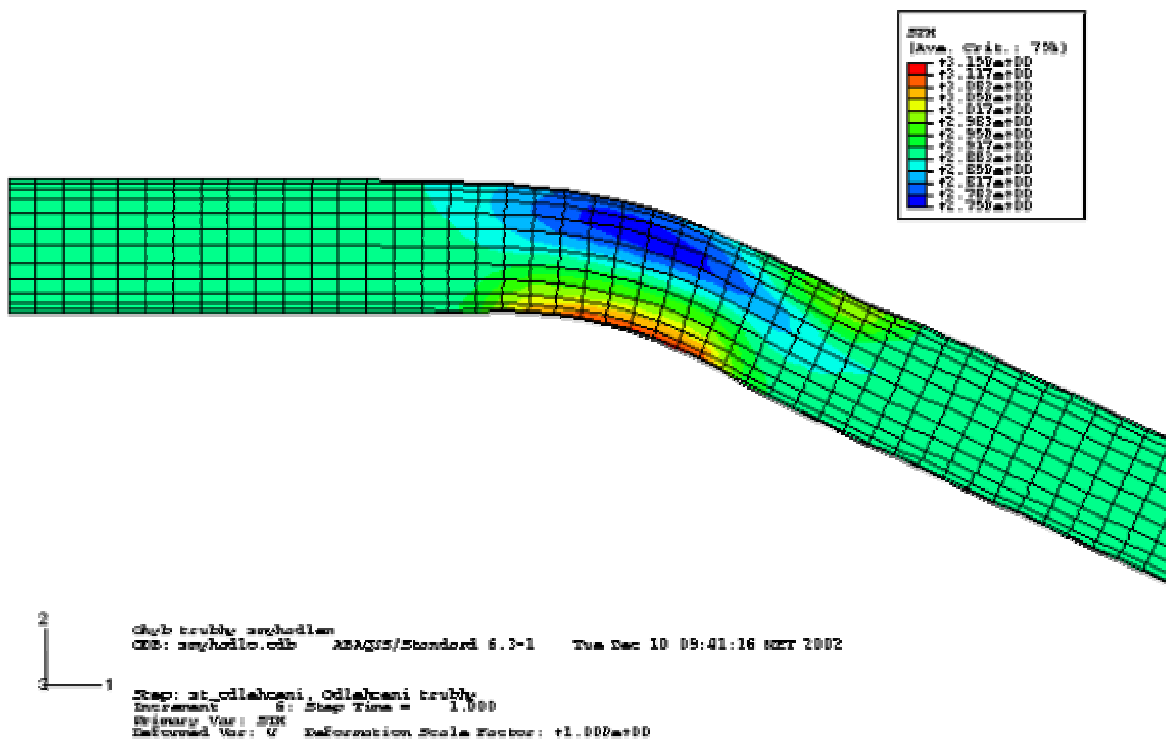
Obr. 2 Geometrický model ohybu trubky pomocí smýkadla.



Obr. 3 Průběhy napětí σ_0 v řezu napříč trubkou v okolí poloviny ohybu.



Obr. 4 Ohyb trubky pomocí válečku – mapa tloušťky stěny trubky po odlehčení.



Obr. 5 Ohyb trubky pomocí smykadla – mapa tloušťky stěny trubky po odlehčení.

4 Závěr

Vytvořené MKP modely, popsané v části 2, představují konec teprve první fáze práce na tématu Simulace ohybů trubek pomocí MKP. Cílem první fáze práce nebylo nutně získat správné výsledky, nýbrž vůbec se naučit vytvářet MKP modely sestavy ohýbačky s trubkou použitelné pro simulace ohybů trubek. Z tohoto důvodu a také kvůli absenci experimentálního ověření dosažených výsledků je nutno brát obdržené výsledky, zobrazené a okomentované v části 3, s rezervou. Z tohoto hlediska je skutečným výsledkem první fáze práce zjištění, že je možné vytvářet MKP modely sestavy ohýbačky s trubkou použitelné pro simulace ohybů trubek. V dalších fázích práce se počítá mimojiné i s experimentálním ověřením dosažených výsledků.

5 Poděkování

Tato práce vznikla za podpory grantu GAČR 106/02/0612.

6 Literatura

Storožev, M. V. & Popov, J. A. (1978) *Téoria tvárnenia kovov*. ALFA/SNTL, Bratislava.

Španiel, M. *Přednášky z předmětu MKP*.

Šuta, J. & Petruška, J. & Janíček, L. *Predikce porušování kovů při tváření*. Příspěvek z konference APPLIED MECHANICS 2002, Ostrava.

Valenta, F. & kolektiv (1995) *Pružnost a pevnost III (Vybrané partie z PP)*. ČVUT, Praha.

Vítek, A. (1966) *Ohýbání trubek*. SNTL, Praha.

Manuály MKP programu ABAQUS (HKS).