



## **MODELLING OF TRANSIENT PROCESSES AT PRESSURE PIPES IN THE ABAQUS FE-CODE**

**S. Holý<sup>1</sup>, Z. Hrubý<sup>2</sup>, L. Pečinka<sup>3</sup>**

**Summary:** *Paper focuses on possibilities of transient processes modelling at pressure pipe system of a non-nuclear part of a certain power plant and summarizes the results of related numerical studies. Effect of hardening (isotropic, linear kinematic, Chaboche, Johnson-Cook), various descriptions of tensile diagram (bilinear, multilinear, Krupkowsky), and effect of dynamic load are studied. Demand of usage the proper constitutive model of elastoplasticity is highlighted. Various types of yield surfaces as well as evolution of internal variables of presented models of plasticity are described. Finally, the methodology of pipe whip restraints assessment including material and geometric nonlinearities is presented.*

### **1. Úvod**

Plastické chování materiálu je fenomén, který je možné studovat z velkého množství úhlů pohledu a velkého počtu měřítek. Obecně má jev plasticity fyzikální původ v mikrostruktuře materiálu, kde se vlivem namáhání materiálu šíří bodové (vakance, příměsi), čárové (dislokace) a plošné (hranice zrn) defekty krystalografické mřížky.

Úroveň zkoumání elastoplastického chování lze obecně rozdělit do pěti tříd –atomistické měřítko (molekulární dynamika), soubor dislokací (teorie osamělých dislokací), dislokační substruktury v zrně (teorie spojitě rozložených dislokací), zrno (plasticita monokrystalu) a makroměřítko (tj. klasické teorie mechanika kontinua, plochové modely a různé způsoby zpevnění).

V současné době je již díky rozvinuté teorii a výpočtovým kapacitám pracovních stanic možné řešit problémy plasticity i na nejmenším atomárním měřítku. Je však nutné podotknout že pouze pro jednoduché modelové případy. Z hlediska inženýrsky aplikovatelného modelu elastoplastického chování materiálu má stále v praxi dominující význam fenomenologický přístup, který popisuje chování makroměřítko jako celku a potřebné vstupní informace do tohoto popisu jsou vneseny pomocí experimentálních měření (tahové zkoušky, cyklické zkoušky, apod.)

Klasická teorie plasticity založená na plochových modelech se začala rozvíjet ve čtyřicátých a padesátých letech dvacátého století. Vývoj plochových modelů přešel přes isotropní,

---

<sup>1</sup> Prof. Ing. Stanislav Holý, CSc.: ČVUT v Praze, Fakulta strojní; Technická 4; 166 07 Praha 6; tel.: +420.224 35 25 10, fax: +420.233 32 24 82; e-mail: stanislav.holy@fs.cvut.cz

<sup>2</sup> Ing. Zbyněk Hrubý: ČVUT v Praze, Fakulta strojní; Technická 4; 166 07 Praha 6; tel.: +420.224 35 25 23, fax: +420.233 32 24 82; e-mail: zbynek.hruby@fs.cvut.cz

<sup>3</sup> Ing. Ladislav Pečinka, CSc.: ÚJV Řež a.s.; Husinec-Řež 130, 250 68 Řež; e-mail: pel@ujv.cz

lineární kinematické až k nelineárním kinematickým – zejména model Chaboche (1991) – a různým kombinacím. V současné době se začínají prosazovat modely zpevnění, které zohledňují plastickou anisotropii materiálu s přírůstkem plastických deformací i u materiálů, které byly na počátku isotropní.

V sedmdesátých letech vznikla tzv. endochronní teorie plasticity. Základním tvrzením bylo, že současný stav napětí či deformace v materiálu je funkcí celé předchozí deformační historie a v základní verzi byla velice zdůrazňována nezávislost řešení na existenci plochy kluzu, byť i ta je dnes částečně zpochybňována.

Dalším způsobem řešení jsou modely vycházející z Gursonovy definice plastického potenciálu. Řešení vychází ze zohlednění porézní struktury materiálu a tedy citlivosti na hydrostatický tlak.

Johnsonův-Cookův (Johnson & Cook, 1985) model zpevnění je explicitně navržen pro rychlé adiabatické dynamické děje a patří tedy mezi modely zpevnění, které zohledňují závislosti na teplotě a rychlosti deformace, která je u rychlých rázových dějů klíčová. Původní model nejprve uvažoval pouze závislost na teplotě s uvažováním tranzitní teploty související se změnou mechanických vlastností, modifikace modelu umožnila i zahrnutí rychlosti deformace.

Prezentovaná práce srovnává chování modelů v případě 1D tahového-tlakového namáhání ve statických i dynamických úlohách. Zdůrazňuje volbu korektního geometrického popisu problému a aplikuje závěry na modelový případ švihů potrubí po postulovaném roztržení s uvažováním různých kombinací umístění omezovačů švihů.

## 2. Konstitutivní popis

Pro případ modelování plastického švihů potrubí bylo studováno chování Chabocheova a Johnsonova-Cookova modelu v různých situacích.

Původní definice Johnsonova-Cookova modelu (Johnson & Cook 1985) vychází z nutnosti zahrnout do výpočtu vliv teploty v daném bodě kontinua. Aktuální mez kluzu je definována vztahem

$$\sigma_k = \left[ A_{JC} + B_{JC} (\varepsilon_{ef}^{pl})^{n_{JC}} \right] (1 - \Theta^{m_{JC}}), \quad (1)$$

kde  $A_{JC}$ ,  $B_{JC}$ ,  $n_{JC}$  a  $m_{JC}$  jsou parametry modelu zpevnění a bezrozměrná teplota je definována jako

$$\begin{aligned} \Theta &= 0, & \text{pro } T < T_{tran}, \\ \Theta &= \frac{(T - T_{tran})}{(T_{melt} - T_{tran})}, & \text{pro } T_{tran} \leq T \leq T_{melt}, \\ \Theta &= 1, & \text{pro } T_{melt} < T, \end{aligned} \quad (2)$$

kde  $T$  je teplota,  $T_{tran}$  tranzitní teplota a  $T_{melt}$  teplota tání. Model existuje také v rozšířené podobě obohacený o vliv rychlosti deformace

$$\sigma_k = \left[ A_{JC} + B_{JC} (\varepsilon_{ef}^{pl})^{n_{JC}} \right] \left[ 1 + C_{JC} \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{ef}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_{JC}} \right) \right] (1 - \Theta^{m_{JC}}), \quad (3)$$

kde  $C_{JC}$  a  $\dot{\varepsilon}_{JC}$  jsou parametry modelu související s rychlostí deformace a  $\dot{\varepsilon}_{ef}^{pl}$  je rychlost efektivní plastické deformace. Pokud se Johnsonův-Cookův model zpevnění použije u úlohy bez tepla, je bezrozměrná teplota nulová a tím pádem se model chová bez závislosti na teplotě jenom se závislostí na rychlosti deformace.

Chabocheův model (Chaboche 1991) je aditivní kompozici dílčích evolučních vztahů pro kinematické parametry plochy plasticity, kde dílčí parametry jsou popsány podle původního Armstrongova-Frederickova modelu.

$$\alpha_{ij} = \sum_k \alpha_{ij}^{<k>}, \quad (4)$$

$$d\alpha_{ij}^{<k>} = \frac{2}{3} C^{<k>} d\varepsilon_{ij}^{pl} - \gamma^{<k>} \alpha_{ij}^{<k>} d\varepsilon_{ef}^{pl},$$

kde  $\alpha_{ij}$  je tenzor kinematických parametrů (backstress),  $\varepsilon_{ef}^{pl}$  efektivní plastická deformace,  $C^{<k>}$ ,  $\gamma^{<k>}$  parametry modelu a index  $<k>$  značí dílčí evoluční vztah.

### 3. Tahový diagram – kalibrace modelů zpevnění

Jako materiálová data pro triviální numerický experiment v oblasti prostého tahu a tlaku byla užit materiál 16GS při 289 °C. Elastické konstanty a parametry modelu Krupkowsky

$$\sigma = K (\varepsilon^{pl} + \varepsilon_{k0})^n \quad (5)$$

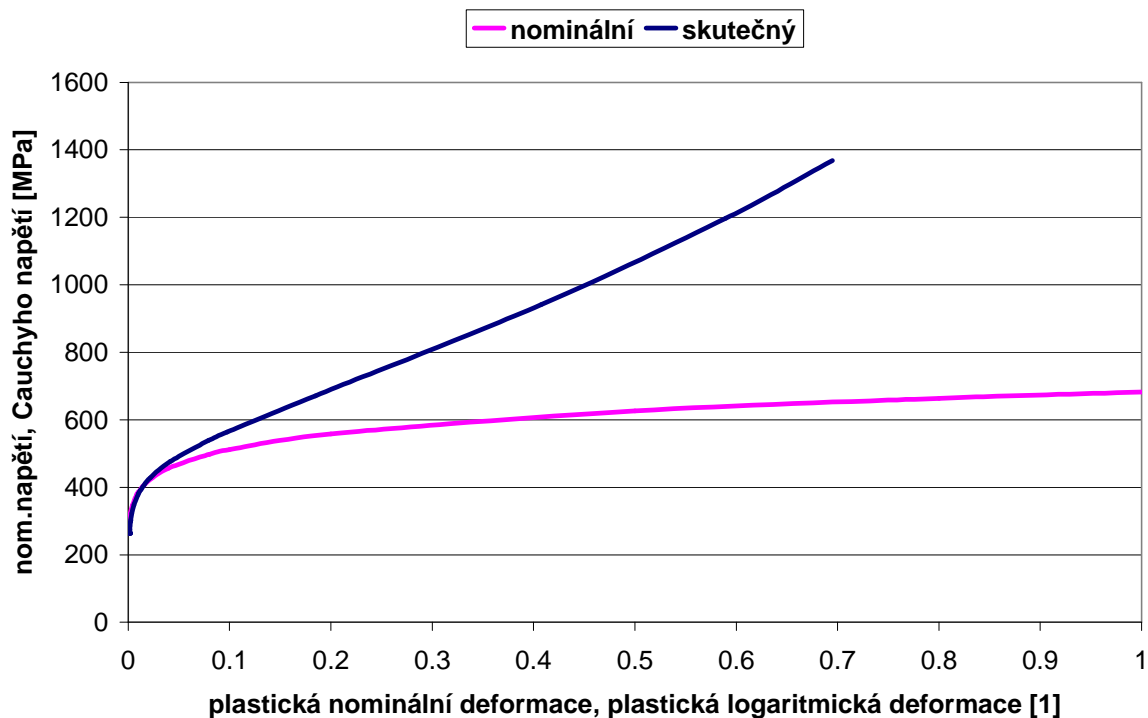
jsou

$$E = 195600 \text{ MPa}, \nu = 0,3, K = 682,62 \text{ MPa}, \varepsilon_{k0} = 4,98 \cdot 10^{-4}, n = 0,125367. \quad (6)$$

Byl použit zjednodušený přepočítání tohoto diagramu na diagram v prostoru Cauchyho napětí a logaritmické deformace (skutečný diagram) podle

$$e = \ln(1 + \varepsilon), \sigma_C = \sigma(1 + \varepsilon). \quad (7)$$

Oba tahové diagramy jsou uvedeny na Obr. 1. Je naprosto zřejmé, že velikost deformací bude ve výpočtech hrát klíčovou roli při užití nominálního či skutečného tahového diagramu. Potenciálním rizikem je přibližný přepočítání nezhledňující vliv krčku při tahové zkoušce a tudíž skutečný diagram končí v nižších hodnotách deformace než nominální.



Obr. 1 Elastoplastická část tahového diagramu materiálu 16GS při 289 °C

Ze zprávy Anděl, J. et al. (2005) jsou převzaty konstanty rychlostně závislého Johnsonova-Cookova modelu zpevnění

$$C_{JC} = 0,18, \tag{8}$$

$$\dot{\epsilon}_{JC} = 1.$$

#### 4. Omezovače švihu

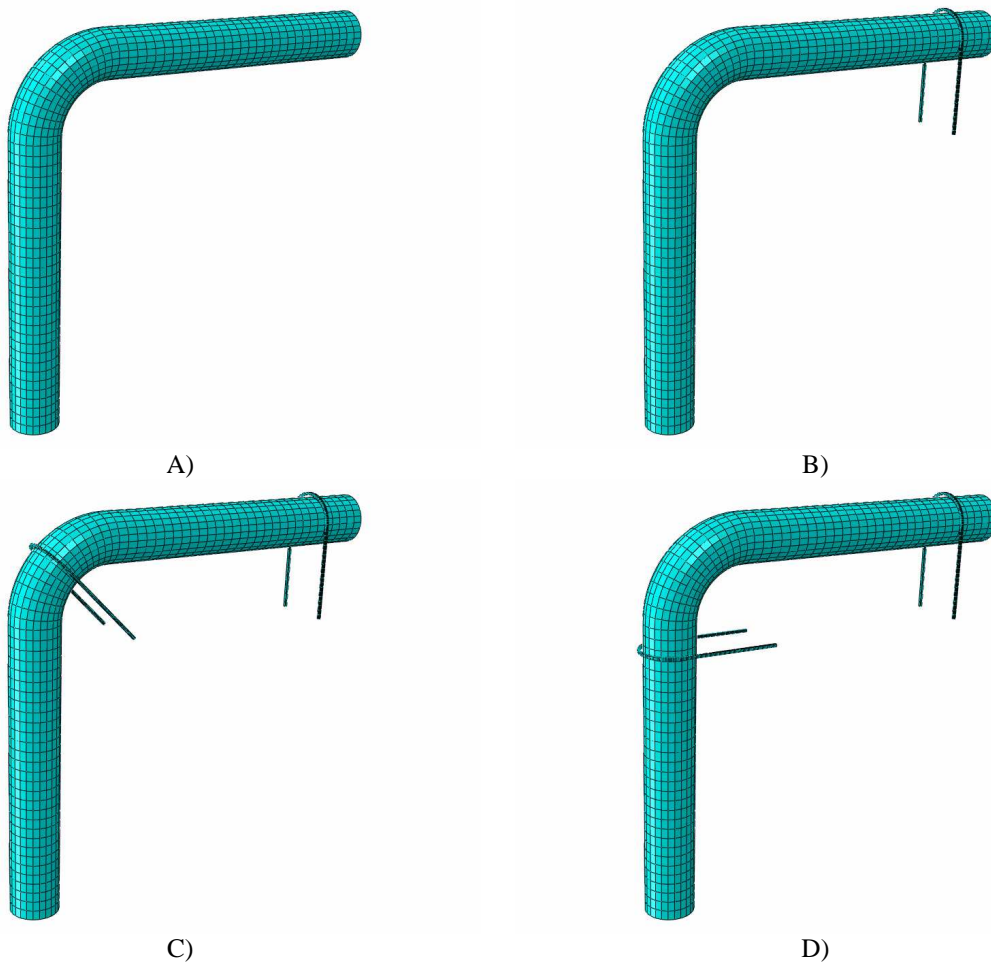
Johnsonův-Cookův i Chabocheův model zpevnění byly testovány na modelových úlohách švihu potrubí. Čtyři výpočetní varianty jsou uvedeny na Obr. 2. Vnitřní přetlak byl zadán jako sekvence podle Tab. 1. Úloha modeluje švih potrubí o vnějším průměru 1000 mm a tloušťce stěny 30 mm z materiálu 16GS po náhlém roztržení. Modelovaná součást je složena ze dvou přímých úseků o délce 6000 mm, které jsou spojeny kolenem o poloměru 1500 mm. Model je uložen v označením místě tak, že je mu umožněno „dýchání“. Potrubí je nejdříve natlakováno na přetlak 7 MPa a poté je postulováno náhlé roztržení potrubí náhlým přerušením v celém průřezu v inkriminovaném místě (horní konec modelované části). V případě modelování omezovačů švihu jsou tyto modelovány jako U-tyče vždy se stejnými materiálovými vlastnostmi a mezi nimi a potrubím je zaveden kontakt na principu penaltové funkce.

Je vidět, že s užitím jednoho omezovače švihu hrozí vyklouznutí potrubí, při dvou, kdy druhý omezovač je umístěn na koleni, také hrozí vlivem sklouznutí ztráta funkčnosti tohoto omezovače, při třetí modifikaci s dvěma omezovači švihu každým na jedné přímé části je teprve funkce z konstrukčního hlediska dostatečná.

Dále je v Tab. 2 a Tab. 3 vynesena maximální hodnota HMH napětí a efektivní plastické deformace pro kritické místo pro všechny modelové úlohy pro užití modely zpevnění.

Průběhy efektivního HMH napětí a efektivní plastické deformace na čase zátěže v místě uzlu 1100, tj. kritického uzlu pro jsou uvedeny na Obr. 4 až Obr. 7.

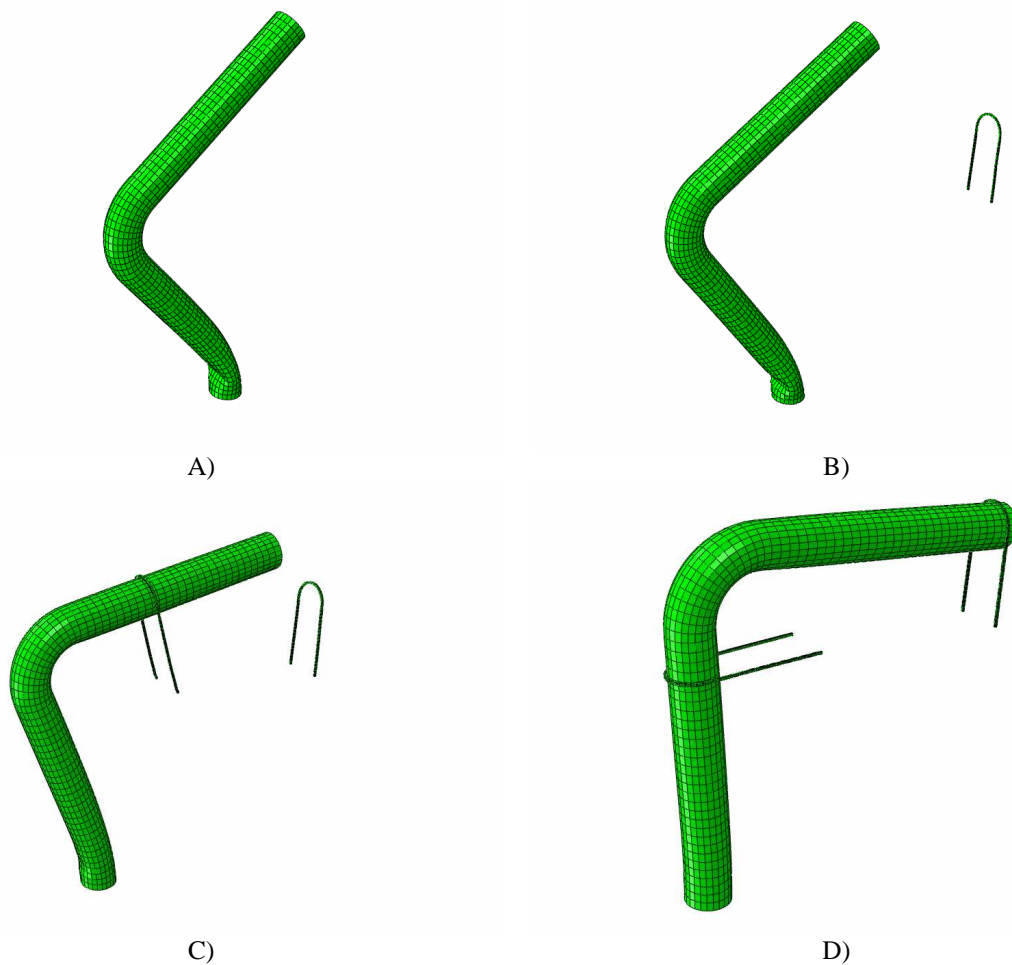
Je paradoxem, že nesprávné užití omezovače švihu B může situaci na potrubí ještě zhoršit.



Obr. 2 Počáteční konfigurace omezovačů při švihu potrubí

Tab. 1 Modelová sekvence zatížení potrubí vnitřním přetlakem

čas [s]	přetlak [MPa]
0,000	7,00
0,025	6,30
0,050	3,50
0,075	4,90
0,100	3,85
0,125	4,55
0,150	3,99
0,175	4,34
0,200	4,20



Obr. 3 Zdeformované sítě na konci výpočetního času – Johnson-Cook

Tab. 2 Výsledky modelových švihů potrubí pro Johnsonův-Cookův model<sup>4</sup>

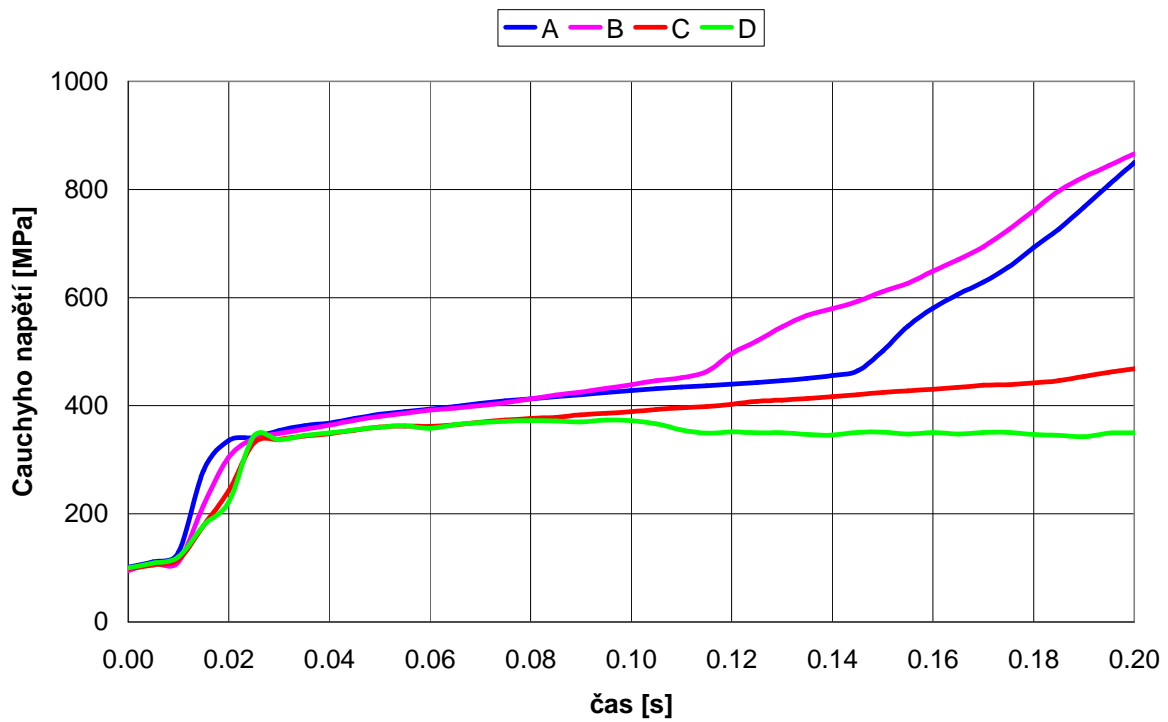
konfigurace	max. efektivní HMH napětí na potrubí [MPa]	max. efektivní plastická deformace na potrubí [1]
Obr. 2 A	849,41	0,18
Obr. 2 B	865,59	0,21
Obr. 2 C	769,30	0,14
Obr. 2 D	460,99	0,05

Tab. 3 Výsledky modelových švihů potrubí pro Chabocheův model<sup>5</sup>

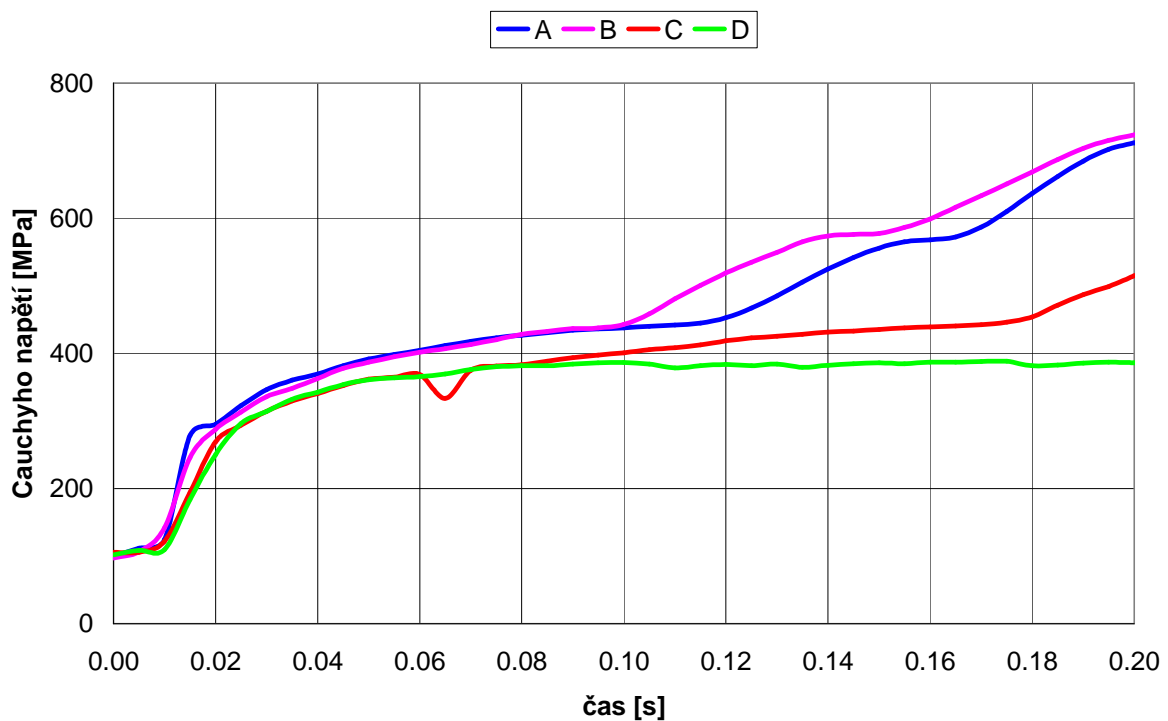
konfigurace	max. efektivní HMH napětí na potrubí [MPa]	max. efektivní plastická deformace na potrubí [1]
Obr. 2 A	715,58	0,25
Obr. 2 B	751,40	0,25
Obr. 2 C	641,70	0,16
Obr. 2 D	496,29	0,05

<sup>4</sup> Cauchyho napětí a logaritmičká plastická deformace

<sup>5</sup> Cauchyho napětí a logaritmičká plastická deformace

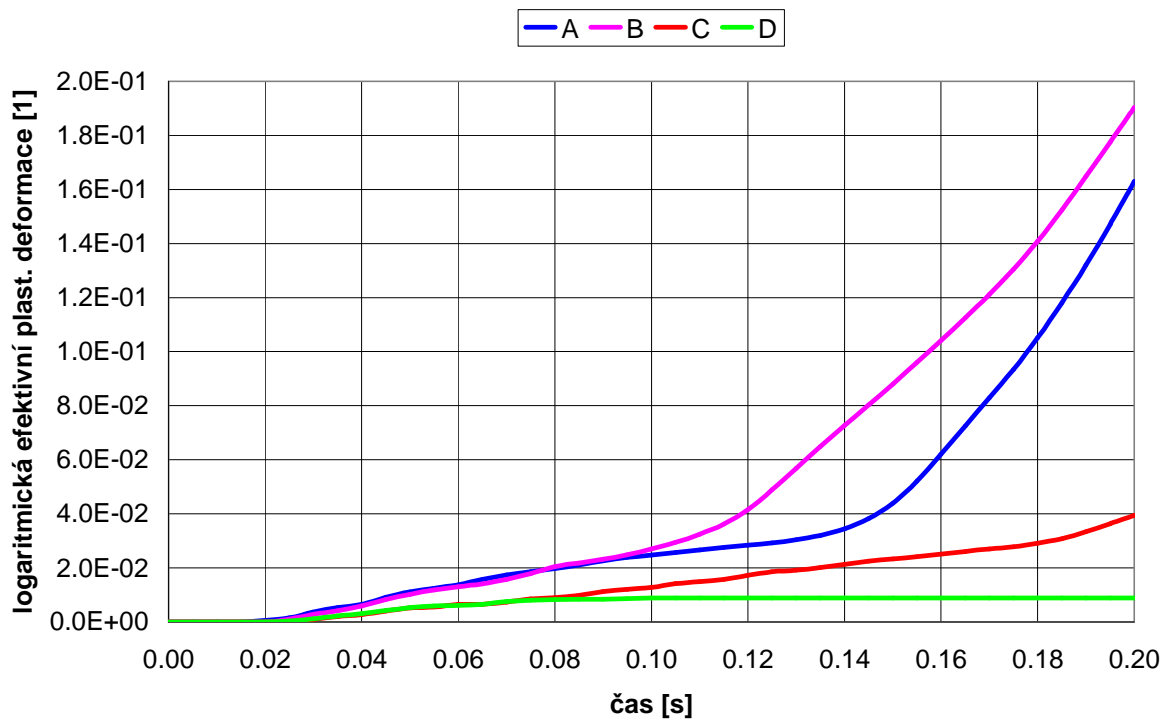


Obr. 4 Výsledky švihů potrubí<sup>6</sup> – Johnson-Cook – HMH napětí – uzel 1100

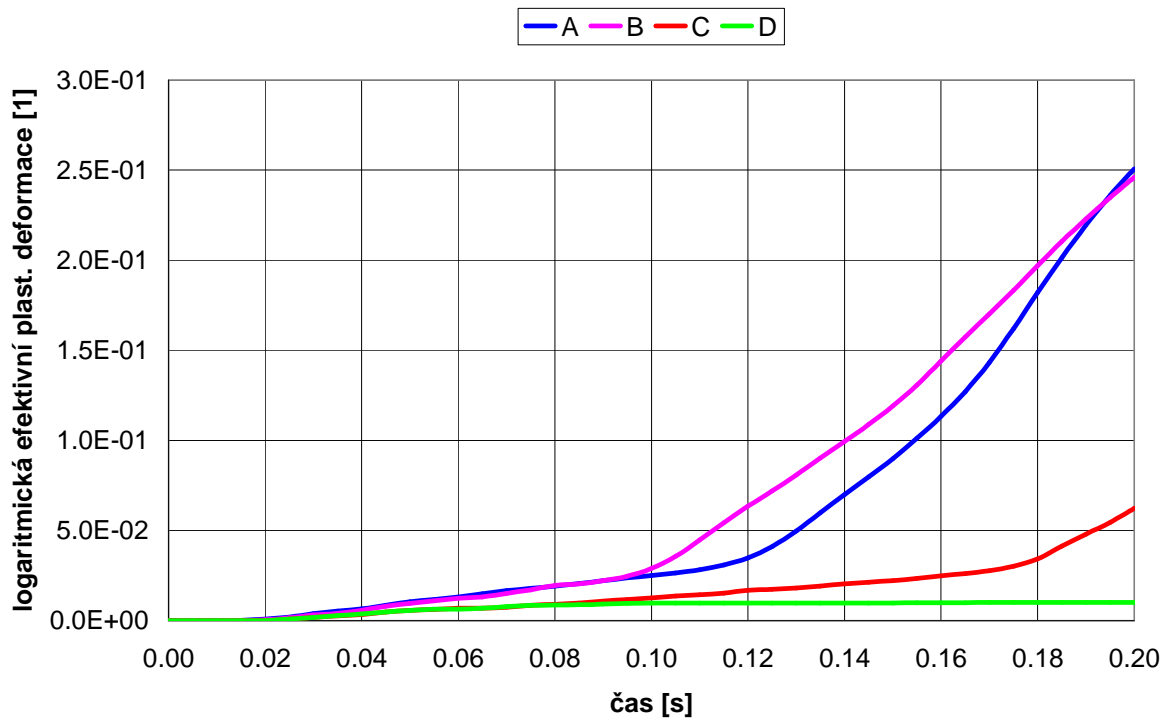


Obr. 5 Výsledky švihů potrubí – Chaboche – HMH napětí – uzel 1100

<sup>6</sup> legenda podle Obr. 2



Obr. 6 Výsledky švihů potrubí<sup>7</sup> – Johnson-Cook – efektivní plastická def. – uzel 1100



Obr. 7 Výsledky švihů potrubí – Chaboche – efektivní plastická def. – uzel 1100

<sup>7</sup> legenda podle Obr. 2



## 5. Souhrn

Ve studii jsou popsány některé užívané modely zpevnění pro modelování elastoplasticity kovů. Na modelových statických i dynamických úlohách byly simulovány různé zátěžné sekvence a ověřeno chování materiálu 16GS pro tyto sekvence.

Materiálová data modelu Krupkowsky byla převedena do oblasti logaritmické deformace a Cauchyho napětí. Tento přepoččet je však limitován a měl by být získáván již při opticky snímaném experimentu. Jinak dochází k nutným chybám ve vstupních datech.

Byla provedena série výpočtů švihu modelového potrubí s několika konfiguracemi omezovačů švihu. Je paradoxem, že nesprávné užití omezovače švihu může situaci na potrubí ještě zhoršit.

Je zde konstatován požadavek na volbu vhodných konstitutivních vztahů platných pro elastoplastické řešení, jejichž výsledek bude možno použít pro výpočet nelineárních dějů při dynamickém namáhání zejména s ohledem na užití míry deformace a napětí.

## 6. Poděkování

Príspevek vznikl za podpory Projektu výzkumu a vývoje FT-TA4/083.

## 7. Literatura

Caboche, J.L. (1991) On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratchetting effects. *Int. J. of Plasticity*, **7**, pp. 661-678.

Johnson, G.R. & Cook, W.H. (1985) Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain rates, Temperatures and Pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, **21**, 1, pp. 31-48.

Armstrong, P.J. & Frederick, C.O. A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. G.E.G.B. Report RD/B/N 731.

ABAQUS Online Documentation (2008) Version 6.8-1. Dassault Systèmes.

Anděl, J. et al. (2005) Elastoplastické výpočty napěťové odezvy potrubí páry tras TX 60 Z01 a TX 80 Z01 JE Temelín na patře +28,8 m v místnosti A 820 na postulovaná roztržení „bubliků“. [Výzkumná zpráva DITI 300/249], ÚJV Řež a.s.