

E **A** **N** **apětí** **2003**

FATIGUE LIFE ASSESSMENT OF TEST SPECIMEN ON THE BASE OF FEM CALCULATIONS

ODHAD ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI EXPERIMENTÁLNÍCH VZORKŮ NA ZÁKLADĚ MKP VÝPOČTŮ

Hejman Marek, Jankovec Jiří, Kindelmann Petr, Nemet Jiří¹

The paper deals with method of fatigue damage calculations. Methodology of the ČSN norm is applied for calculations. Lead bar of trolley-bus suspension is chosen for the example. Hot spot stresses are calculated. Field of fatigue damage is determined. Number of cycles to fatigue fracture is calculated in critical point of the joint. The results of fatigue calculations are compared with experimental results obtained in laboratory.

Keywords

ČSN norm, damage, FEM calculation, fatigue, hot spot stress

Úvod

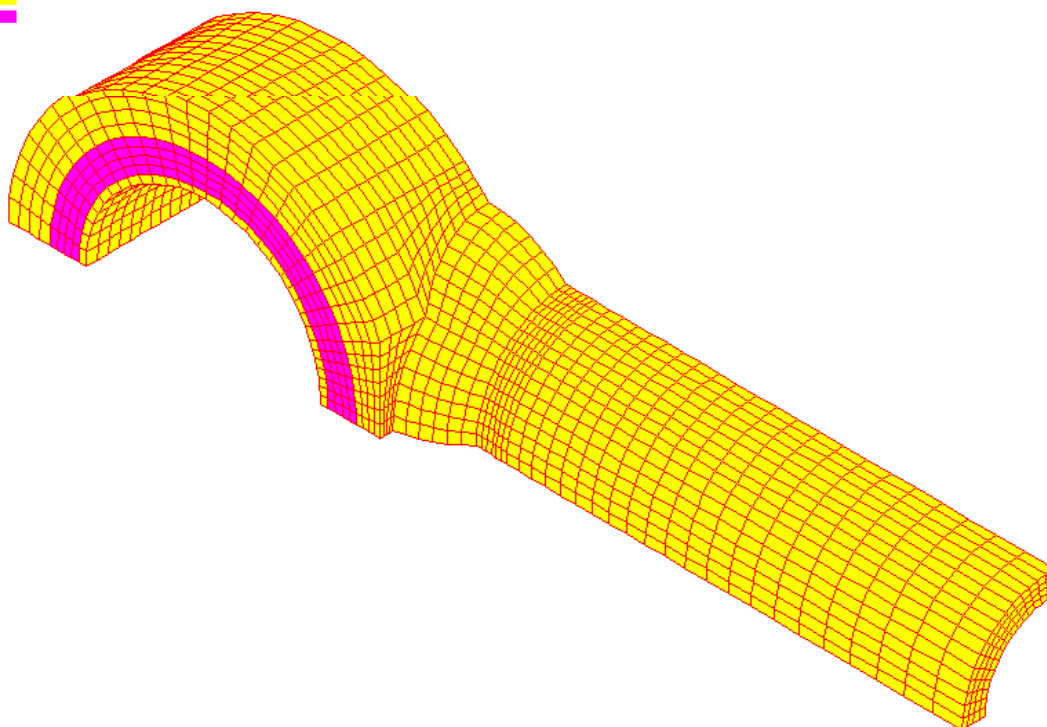
Následující příklad byl proveden pro názornost možného přístupu posouzení svařovaného konstrukčního uzlu dle ČSN 731401 respektive Eurocode 3. Výsledky odhadu únavového poškození jsou dány do relace s již provedenou zkouškou. Pro daný příklad byla vybrána součást "vodící tyč" podvozku trolejbusu ŠKODA 14 Tr, která byla zkoušena na dynamické zkušební společnosti ŠKODA VÝZKUM s.r.o. Únavové posouzení je provedeno na základě výsledků MKP výpočtů ve všech uzlech sítě. Výsledkem je pole poškození posuzované součásti nebo počet cyklů do porušení pro danou hladinu zatížení.

Postup MKP výpočtu

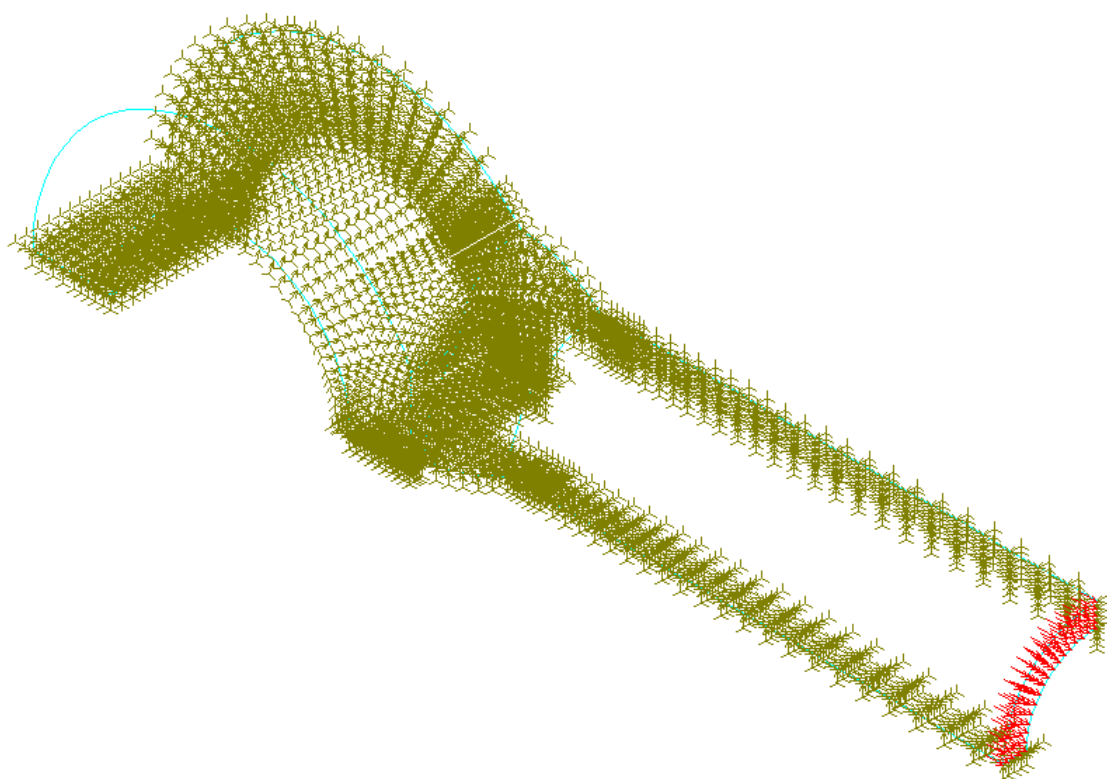
Základem únavového posouzení je opět MKP výpočet. MKP model viz obr. 1. Okrajové podmínky byly zvoleny tak, aby respektovaly roviny symetrie a uchycení vodící tyče ve zkušebním stojanu viz obr. 2. Model obsahuje 6793 prvků typu SOLID. Výpočet byl proveden za předpokladu elastického namáhání. Zvolené materiálové vlastnosti: Ocel - EG1: $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa a $\mu = 0,3$; guma - EG2: $E = 5 \cdot 10^3$ MPa $\mu = 0,49$.

¹ Hejman Marek, Jankovec Jiří, Kindelmann Petr, Nemet Jiří: ŠKODA VÝZKUM s.r.o.; Plzeň Tylova 57, 316 00 Plzeň, tel.: +420-378 132 702, e-mail: marek.hejman@skoda.cz

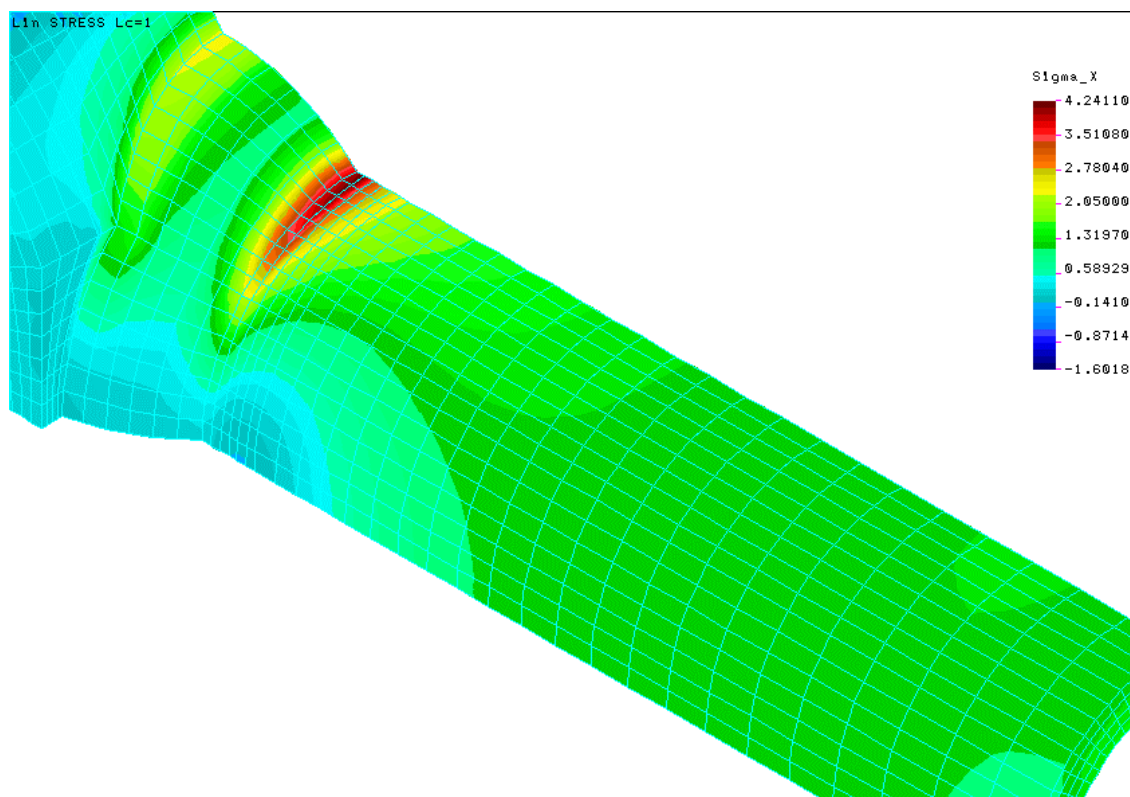
EG CLR
1 
2 



Obr. 1 MKP model, mat EG 1 - ocel, mat. EG 2 - guma



Obr. 2 Okrajové podmínky a zatěžující síly



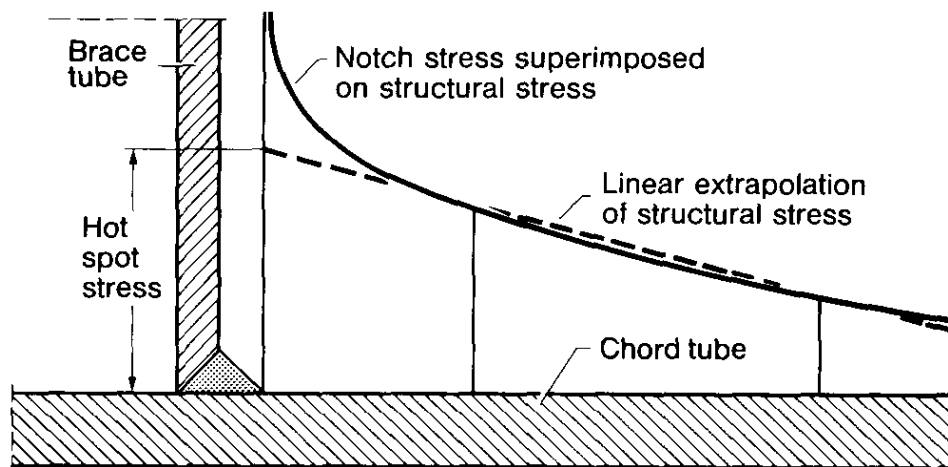
Obr. 3 Velikost složky napětí ve směru osy vodící tyče

Výpočet tvarového napětí

Pro únavové hodnocení dané součásti nebo spoje lze využít dle ČSN 731401 i tzv. tvarové napětí. Toto napětí lze identifikovat např. na základě MKP výpočtů.

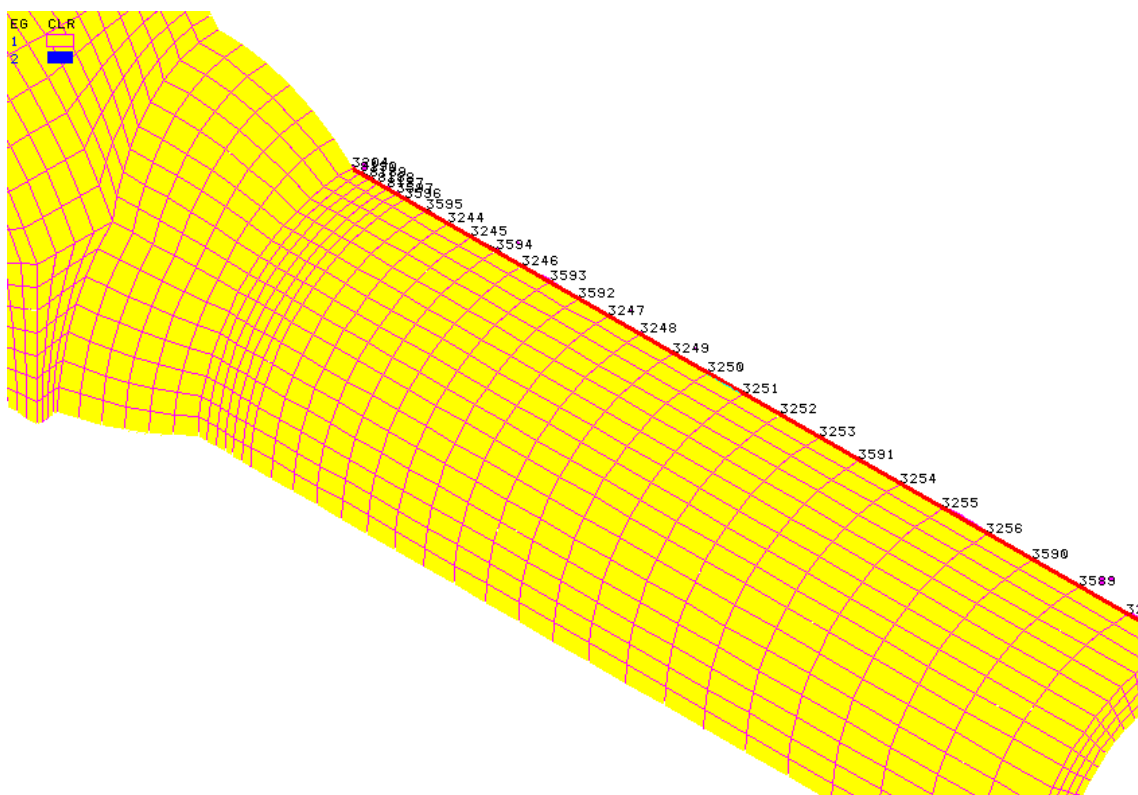
Definice: "Tvarové napětí je maximální hlavní napětí v základním materiálu v blízkosti přechodu svaru do základního materiálu, které zohledňuje koncentraci napětí v důsledku celkové geometrie detailu, ale neuvažuje místní účinky koncentrace napětí od geometrie svaru a vad ve svaru v základním materiálu."

Tvarové napětí je známé jako tzv. "napětí v horkém bodu" (hot spot) viz obr. 4.

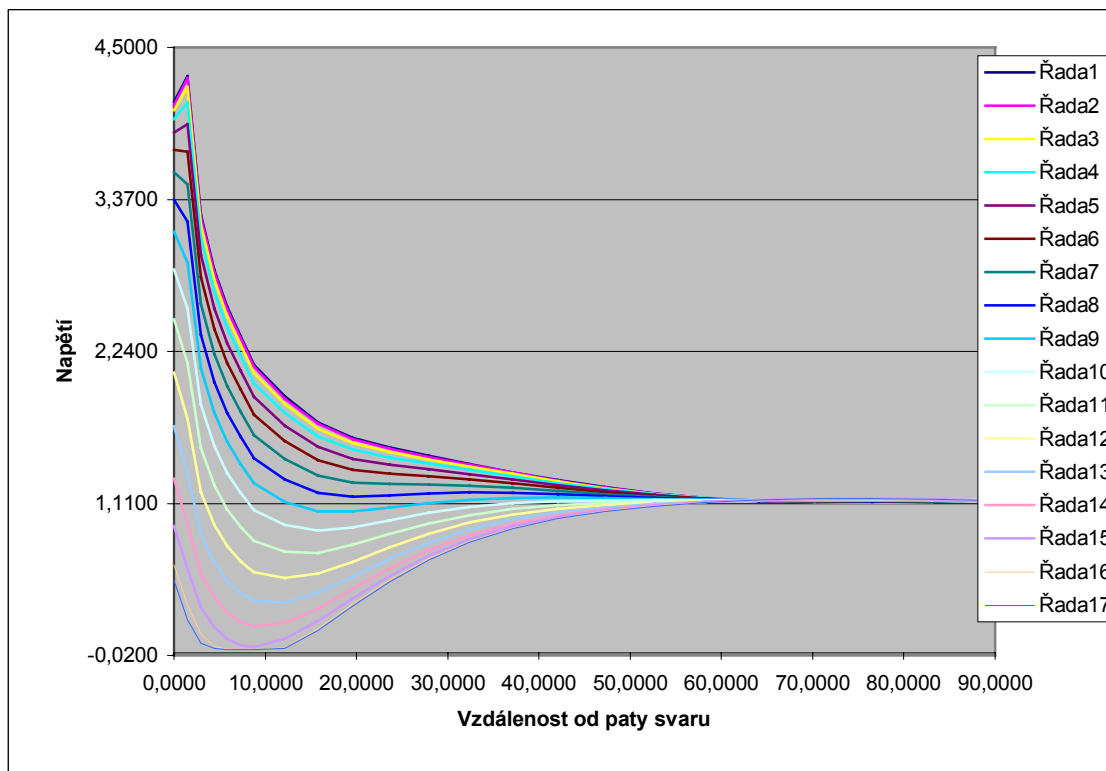


Obr. 4 Extrapolace napětí do místa paty svaru - tvarové napětí, obrázek je převzatý z [1]

Tvarové napětí bylo stanoveno pro každý bod MKP sítě umístěný do paty svaru. Jeho výpočet byl vždy proveden pomocí extrapolace napětí na zvolené "cestě". Daná cesta byla stanovena vždy kolmo ke svaru součástí směrem od paty svaru. Příklad zvolené cesty pro identifikaci extrapolovaného napětí je na obr. 5.

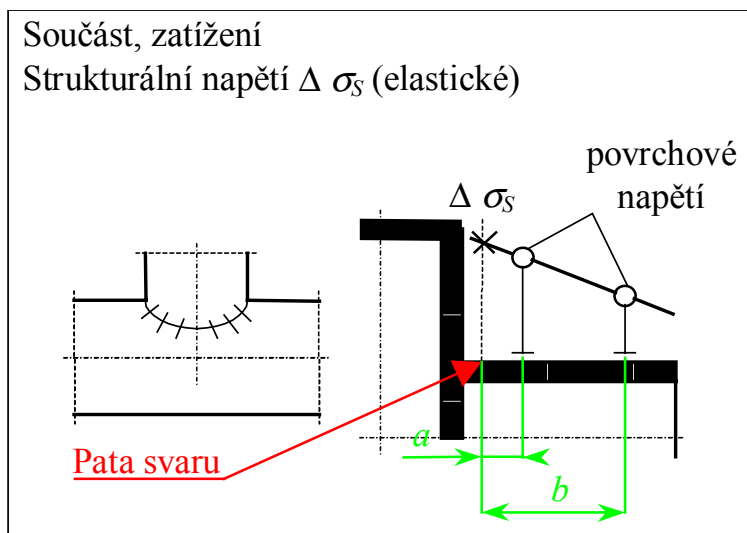


Obr. 5 Jedna ze 17-ti zvolených cest pro odečet napětí na vodící tyči



Obr. 6 Průběhy napětí ve vodící tyči pro jednotlivé zvolené cesty

Stanovené průběhy napětí viz obr. 6 jsou různorodé. Je obtížné najít vždy takovou část křivky, kde je zřetelný lineární nárůst napětí a proložením přímky tak odstranit jeho následné prudké zvýšení vlivem vrubového účinku svaru jako na obr. 4. Tvarové napětí proto bylo vypočteno s využitím empirických vztahů popsaných v [1] viz obr. 7 a obr. 8.



Obr. 7 Schéma pro extrapolaci napětí do paty svaru

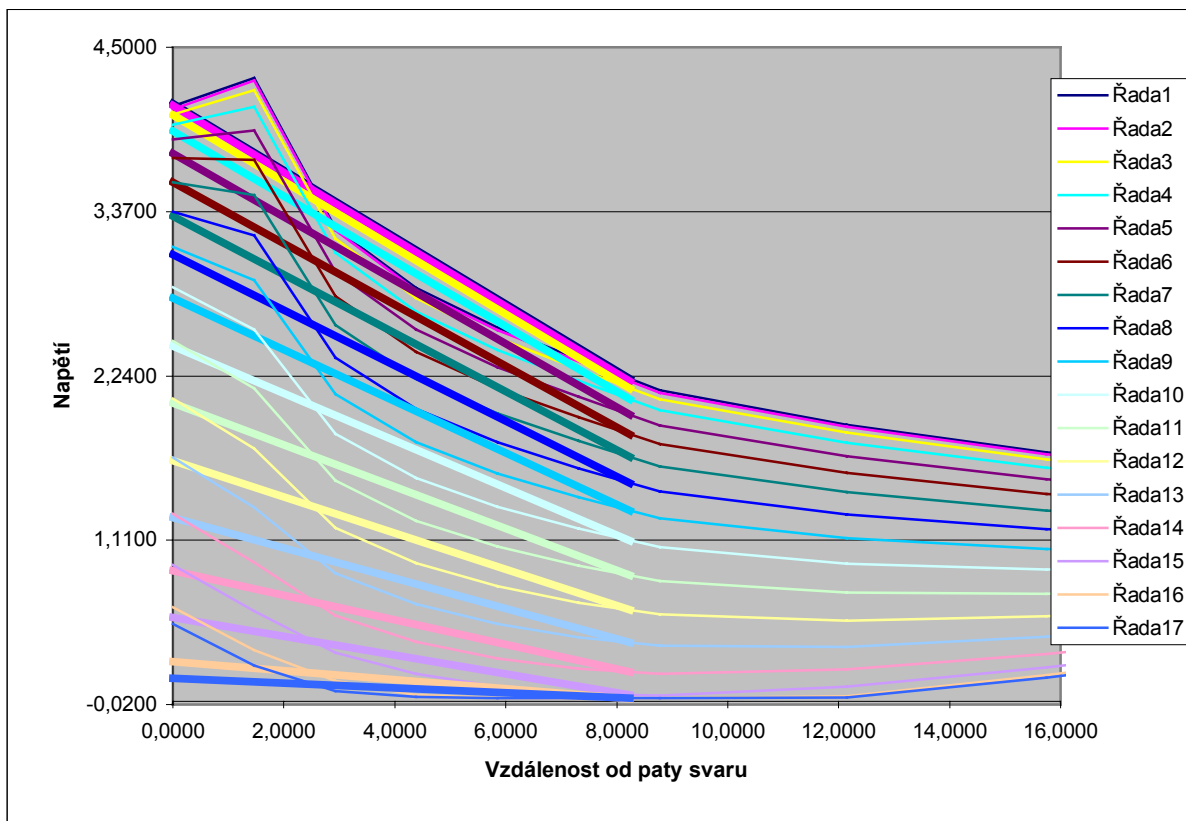
Místo dvou bodů, ve kterých se provede „měření“, je definováno dle v závislosti na

průměru a tloušťce stěny trubky, tedy závisí na geometrických parametrech, které určují pole napětí ve spoji trubek.

$$a = 0,2 \cdot \sqrt{r \cdot t} \quad (1),$$

$$b = 0,65 \cdot \sqrt{r \cdot t} \quad (2),$$

při průměru trubky $\varnothing D = 2r$ a pro tloušťku stěny t .

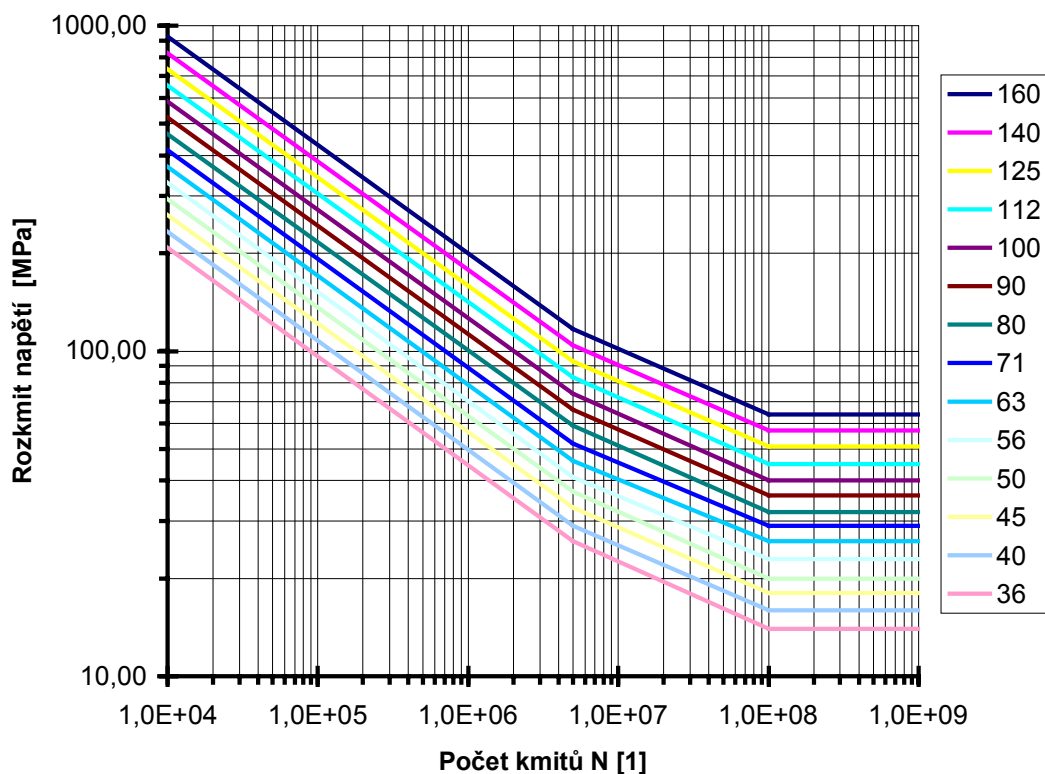


Obr. 8 Detail průběhů napětí v oblasti svaru pro jednotlivé zvolené cesty s vyznačenými extrapolovanými napětími do paty svaru

Výpočet pole poškození D_d

Při výpočtu pole poškození v patě svaru byla využita vypočtená tvarová napětí. Pro ostatní oblasti na vodící tyči bylo uvažováno s hodnotami napětí získaných výpočtem v jednotlivých uzlech MKP sítě. Pro tyto body se nejedná o místo svaru a tedy extrapolace napětí nebyly provedeny.

Pro uzly MKP sítě v patě svaru byla uvažována křivka únavové pevnosti kategorie 36, pro ostatní uzly křivka kategorie 160. Hodnoty meze únavy při konstantní amplitudě při $5 \cdot 10^6$ cyklů $\Delta\sigma_D$ jsou pro jednotlivé kategorie uvedeny v tab. 1.



Obr. 9 Křivky únavové pevnosti pro jmenovitá normálová napětí

Kategorie detailu	log a pro $N < 10^8$		Rozkmit napětí na mezi únavy při konstatní amplitudě a počtu cyklů $N_D = 5 \cdot 10^6$	Prahový rozkmit napětí při počtu cyklů $N_L = 10^8$
	$N \leq 5 \cdot 10^6$ ($m=3$)	$N > 5 \cdot 10^6$ ($m=5$)	$\Delta\sigma_D$ MPa	$\Delta\sigma_L$ MPa
160	12,901	17,036	117	64
36	10,951	13,786	26	14

Tab. 1 Číselné hodnoty odpovídající křivkám únavové pevnosti pro jmenovitá
Výpočet pole poškození je proveden v jednotlivých uzlech MKP sítě podle vztahů 3 až 7.
Je-li splněna podmínka

$$\gamma_{Fi} \Delta\sigma_i \geq \frac{\Delta\sigma_D \varphi_i \varphi_r}{\gamma_{Mf}} \quad (3),$$

pak počet cyklů do porušení pro danou hladinu rozkmitu napětí N_i je definován vztahem

$$N_i = N_D \left(\frac{\Delta\sigma_D \varphi_t \varphi_r}{\gamma_{Mf} \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i} \right)^3 \quad (4).$$

Pro

$$\frac{\Delta\sigma_D \varphi_t \varphi_r}{\gamma_{Mf}} > \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i > \frac{\Delta\sigma_L \varphi_t \varphi_r}{\gamma_{Mf}} \quad (5),$$

je počet cyklů do porušení definován vztahem

$$N_i = N_D \left(\frac{\Delta\sigma_D \varphi_t \varphi_r}{\gamma_{Mf} \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i} \right)^5 \quad (6).$$

Celkové poškození D_d je vypočteno v souladu s teorií Palmgrena - Minera o lineární kumulaci poškození dle vzorce

$$D_d = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (7).$$

Kde je:

$\Delta\sigma_D$ hodnota meze únavy při konstantní amplitudě při $5 \cdot 10^6$ cyklů,
 $\Delta\sigma_i$ rozkmit tvarového napětí v MPa,
 φ_t součinitel vlivu tloušťky materiálu: pro tloušťky menší než 25 mm se uvažuje $\varphi_t = 1$, pro větší tloušťky materiálu $\varphi_t = \sqrt[4]{\frac{25}{t}}$.

φ_R součinitel asymetrie cyklu. Pro svařované detaily nebo detaily nežíhané na odstranění reziduálních pnutí je $\varphi_R = 1$,

γ_{Ff} dílčí součinitel spolehlivosti únavového zatížení, který zahrnuje nepřesnosti plynoucí z:
- uvažovaných úrovní zatížení,
- převodu těchto zatížení na rozkmit napětí,
- určení návrhové doby života konstrukce,
- vývoje únavového zatížení v průběhu návrhové doby života konstrukce.

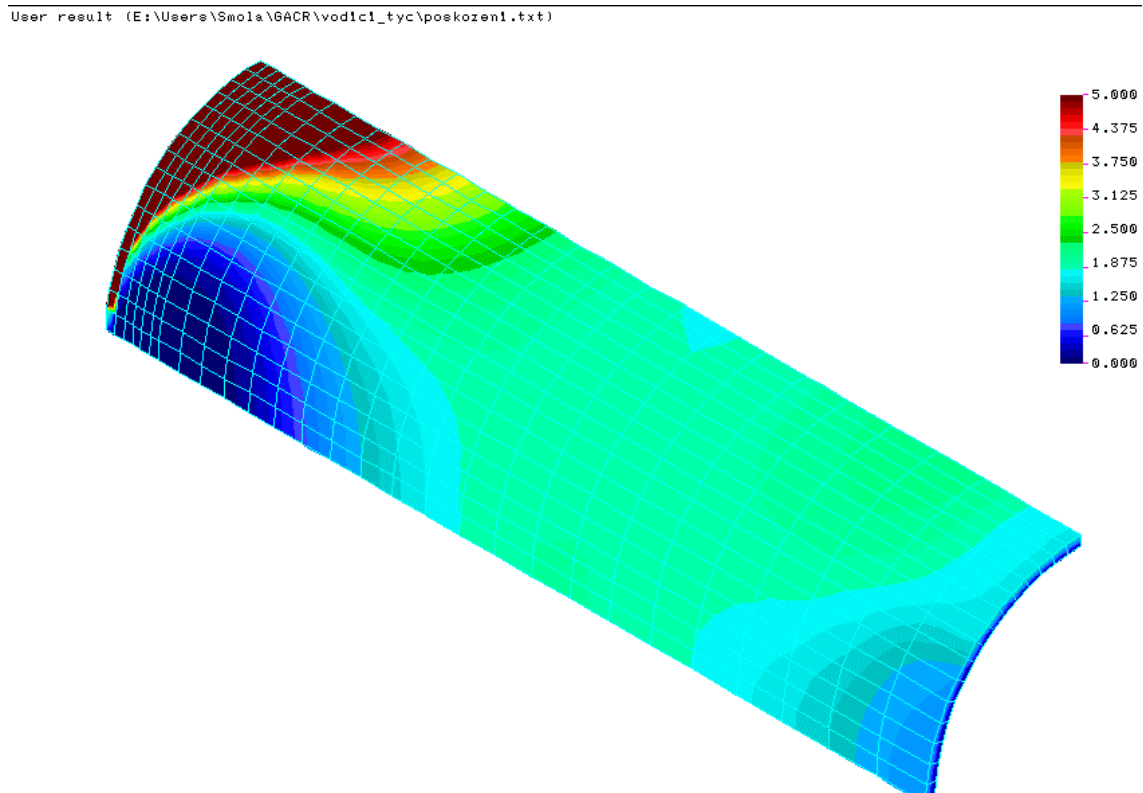
Pokud se zatížení určí podle ČSN 73 0035, je $\gamma_{Ff} = 1$.

γ_{Mf} dílčí součinitel spolehlivosti únavové pevnosti, který zahrnuje nejistoty od vlivu:
- velikosti konstrukce,
- určení typu a rozmístění vad,
- proměnlivosti vlastností materiálu a procesů svařování,
- koncentrace napětí od geom. povrchu svaru, reziduálních napětí a dodatečných úprav, po svařování.

V našem příkladu volíme: $\varphi_t = 1$; $\varphi_R = 1$; $\gamma_{Ff} = 1$; $\gamma_{Mf} = 1.15$.

Zatěžující síly byly voleny stejné velikosti jako při jednotlivých hladinách únavové zkoušky na zkušebním stendu. Výpočetně byl tedy otestován stejný počet virtuálních vzorků.

Příklad výpočtu pole poškození na trubkové části součásti pro jednu hladinu zatížení je na obr. 10.

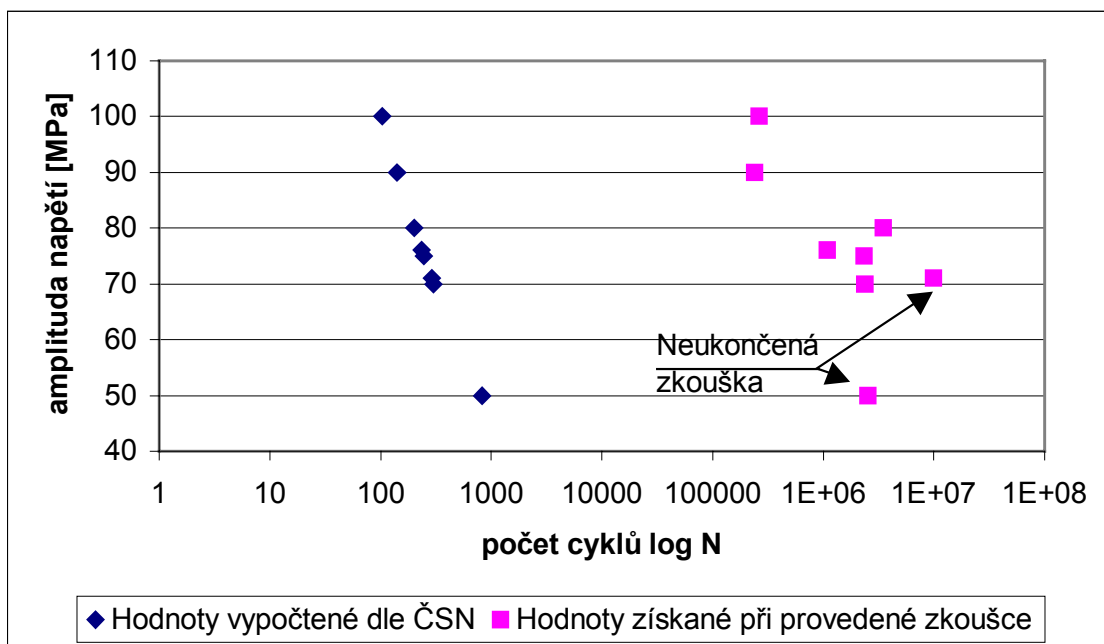


Obr. 10 Pole poškození D_d v uzlech MKP sítě pro jednu hladinu zatížení
(výpis omezen na hodnotu $D < 5$)

Z fraktografického rozboru porušených vzorků vyplývá, že výsledek výpočtu identifikuje místo největšího poškození ve shodě s místem iniciace trhliny při zkoušce.

Výpočet počtu cyklů do porušení

Výpočtem lze hledat dle vzorců 3 až 6 i dosažitelný počet cyklů do porušení pro danou hladinu zatížení. Pak platí, že celkové poškození $D_d = 1$. Postačující je provést výpočet počtu cyklů pro místo s největším poškozením. Výpočet byl proveden opět pro všechny hladiny zatížení použité při únavové zkoušce. Porovnání vypočtených počtů cyklů na jednotlivých hladinách a skutečně dosažených při zkoušce na dynamické zkušebně je na obr. 11.



Obr. 11 Obrázek porovnání zkoušky a výpočtu dle ČSN

Závěr

Uvedený příklad demonstruje využití normy ČSN respektive Eurocode 3 pro hodnocení pevnosti svařovaných konstrukčních uzlů na základě MKP výpočtů. Vypočtené hodnoty jsou dány do vztahu k dosaženým experimentálním výsledkům.

Výpočet pole poškození má shodu s experimentem z hlediska identifikace místa největšího poškození a tedy potenciálního místa vzniku únavové trhliny.

Dle obr. 11 lze konstatovat, že nebyla dosažena shoda mezi výpočtem a experimentálním zjištěním počtu cyklů do porušení. Výpočet však zůstává konzervativní.

Příspěvek vznikl v rámci řešeného grantu GAČR101/02/0141. Autoři proto děkují GA za podporu při řešení tohoto úkolu.

Literatura

- [1] Radaj, D.: Fatigue assesment of welded joints by local approaches, Abington Publ., Cambridge, 1998.
- [2] ČSN 731401, Navrhování ocelových konstrukcí, Český normalizační institut, 2001.
- [3] M. Růžička, J. Papuga, M. Hejman: Metody pro predikci únavové životnosti svarových spojů, sborník konference " Únava a lomová mechanika 2002", Žinkovy, 2002.