

Experimentální Analýza Napětí 2005

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL DETERMINATION OF STRUCTURAL STRESSES IN THE WELDED JOINT

EXPERIMENTÁLNÍ A VÝPOČTOVÉ URČOVÁNÍ TVAROVÝCH NAPĚTÍ VE SVAROVÉM SPOJI

Milan Růžička, Radek Pěnička¹, Václav Kafka²

An assessment of the resistance of welded joints against fatigue is the main topic of the experimental stress investigation in this presented paper. The objective of the research is to develop an expert system as a set of computer programs for this analysis. The contribution describes the project structure based on a computer-aided analysis of the dynamic response of a construction and a localization of welded nodes. The first level of this assessment is a classification of a welded joint into a particular type category. Categories are defined by the used material and by the weld shape arrangement. Using selected flags the Smith's diagrams and fatigue curves are assigned to a node. The next step of the assessment is based on determination of weld node stresses.

Both experimental and computational analyses have been used here. The experimental analysis is based on the strain gauge measurement by strain gauge rosettes and strain gauge chains in the weld toe. Local stresses and stress gradient in the weld locality have been provided. Thermoelastic analysis using the SPATE equipment has been applied to compare strain gauge data. The methods of numerical assessment of welded joints that fully make use of the FE-analyses are based on various philosophies, thus forming versions of local approaches. They differ in techniques, how they respect local stress and local strain and how they define their limit value. The most useful approaches are the nominal and structural stress and strain approach, the stress and strain notch root approach, and the fracture mechanics approach. Criteria based on equivalent stresses according to a strength hypothesis (uniaxial approach) as well as multiaxial fatigue criteria can be used for a more detailed weld joint analysis.

The described evaluation system of thin-walled welded constructions significantly accelerates work in the construction design phase. It allows location of critical places, which are then chosen for further detailed computational analysis or experimental measurement. The limit values of stress ranges in the weld node or its lifetime in the high cycle fatigue region can be determined by means of this system.

Keywords

welded joints, stress analysis, structural stresses, local approach

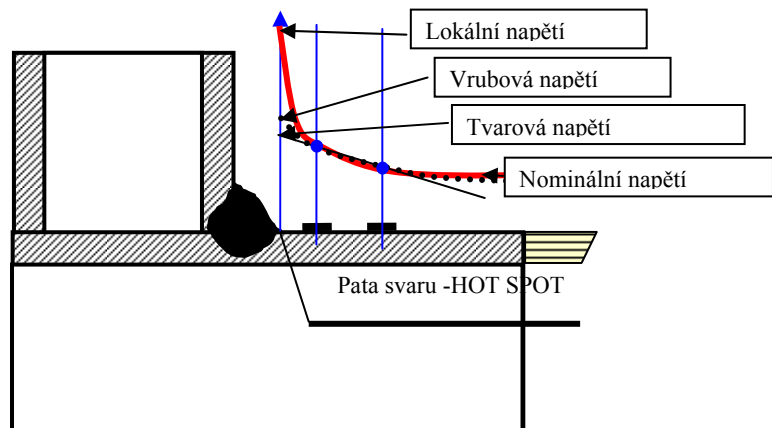
Úvod

Klasické postupy hodnocení pevnosti a životnosti konstrukcí, včetně konstrukcí svařovaných, jsou založeny na *nominálních* přístupech. Tímto přístupem rozumíme takový odhad pevnosti, který vychází přímo z působících sil a momentů a z vypočtených nominálních napětí, tj. za předpokladu konstantního nebo lineárního rozložení napětí. Napětí bývá kategorizováno podle typu namáhání (tahové, tj.membránové, ohybové, smykové atp.). Ukazuje se, že tyto

¹ Doc. Ing. Milan Růžička, CSc, Ing. Radek Pěnička: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Technická 4, 166 07 Praha 6, milan.ruzicka@fs.cvut.cz

² Ing. Václav Kafka, CSc.: Výzkumný a zkušební letecký ústav a.s., Beranových 130, Praha 9 – Letňany, kafka@vzlu.cz

přístupy jsou sice jednoduše aplikovatelné při analytickém způsobu hodnocení konstrukcí, avšak pro využití výsledků MKP a tím i pro přesnější analýzy jsou nevhodné. Vyhodnocení, navazující na výpočty MKP, využívají obvykle různé varianty *lokálních* přístupů. Ty se liší podle způsobu, jak respektují místní napětí a deformace a jak definují jejich mezní hodnoty. Obr. 1 ukazuje základní typy hodnocených lokálních napětí.

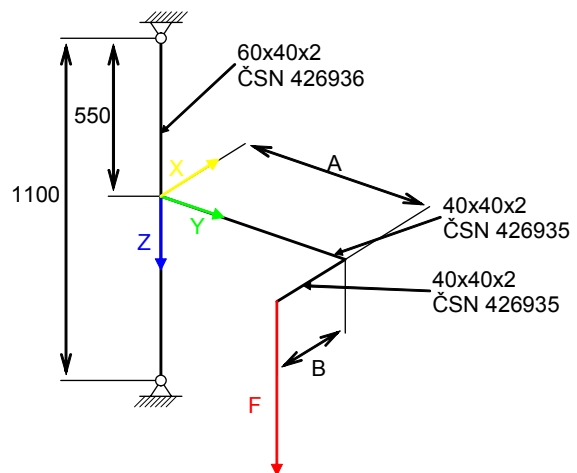


Obr. 1 Vzorek se svarovým uzlem

Nevýhodou lokálních metod je vysoká závislost špiček napětí na konkrétním provedení (resp. modelování MKP) svarového spoje. V normách [1] je kromě nominálních napětí užíván přístup hodnocení tzv. tvarových napětí (structural stresses). Jedná se o smluvní extrapolované hodnoty do tzv. „hot-spot“ bodu v patě svaru. Tato napětí sice nezohledňují lokální (elastické) špičky, ani skutečná vrubová napětí, avšak respektují gradient napětí v blízkém okolí svaru. Experimenty ukázaly, že mohou být vhodným vyjádřením únavové odolnosti svarového spoje. Zmíněný postup byl vyvinut zejména pro hodnocení svařovaných konstrukcí modelovaných makrogeometrickým modelem MKP. Nemusí být tedy modelovány a brány v úvahu detaily geometrie samotného svaru. Prováděná experimentální analýza měla ukázat, do jaké míry jsou naměřené hodnoty využitelné pro aplikaci postupu tvarových napětí.

Tenzometrická analýza na zkušebním vzorku

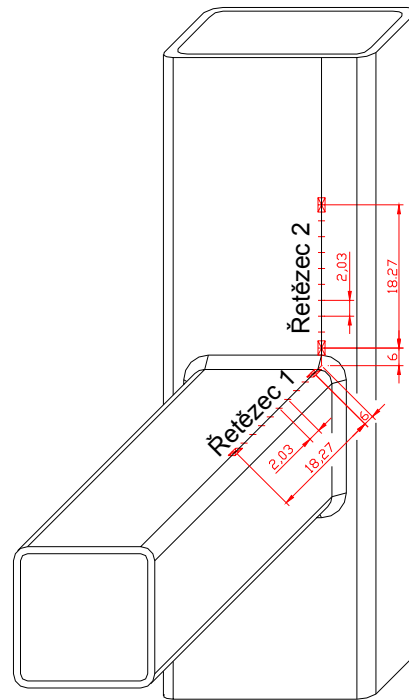
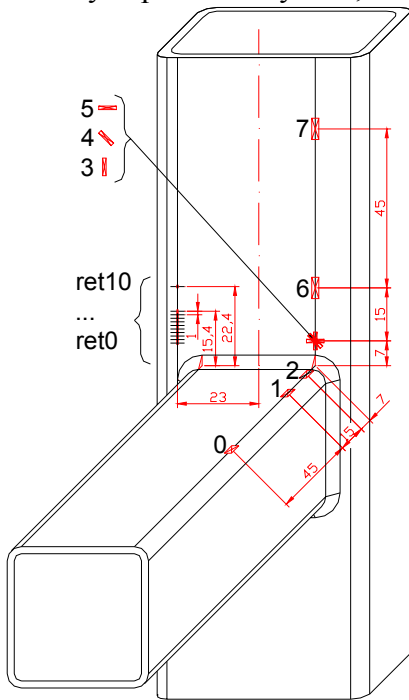
Na vzorku svarového spoje dvou tenkostěnných profilů spojených koutovým svarem byla provedena statická i dynamická měření a únavové zkoušky. Schéma vzorku zobrazuje **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Vzorek byl vyroben z materiálu 11 373.1 a svařen koutovým svarem $a = 5$ mm. V oblasti okolí svaru bylo aplikováno několik samostatných tenzometrů typu HBM 1-LY11-3/350, tenzometrických křížů a růžice 1-KY11-1/120 a 1-RY91-3/120. Jejich umístění je ukázáno na obr. 3. Gradient napětí v podélném směru byl určován na dvou vzorcích pomocí tenzometrických řetězců. Jednalo se o tenzometrický řetězec HBM 1-KY11-1/120, odpor $120 \Omega \pm 0,5\%$, K-faktor 1,69, s roztečí jednotlivých snímačů 1 mm. Další data byla získána za použití řetězců Vishay Micro Measurements typu EA-06-031MF-120, odpor $120 \pm 0,6 \Omega$, K-faktor $2,04 \pm 1\%$, odstup mřížek jednotlivých snímačů byl 2 mm. Těmito řetězci byly hodnoceny cesty gradientu napětí označení podle obr. 3 a *cesta 1* a *cesta 2* na obou svařených profilech. Zapojení jednotlivých tenzometrů bylo do čtvrt mostu.



Obr. 2 Vzorek se svarovým uzlem

Měření byla prováděna při kvazistatickém zatěžování a odlehčování v ohybu a při kombinaci ohybu a krutu zaváděním síly do ramene vzorku, viz obr. 2. Síla byla určována

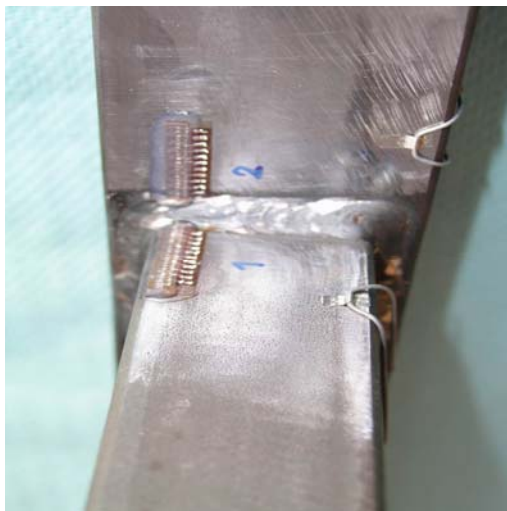
pomocí snímače síly HBM RCS C1/100 (jmenovitá výstupní hodnota 2mV/V, tolerance jmenovité výstupní hodnoty $<\pm 0,25\%$).



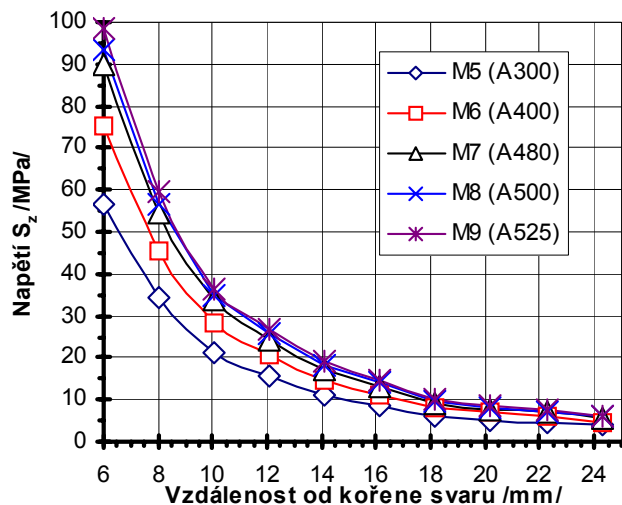
Obr. 3a Vzorek 1 pro kvazistatické měření

Obr. 3b Vzorek 2 pro kvazistatické měření

Před vlastním měřením byla provedena kalibrace snímače, byla odměřena kalibrační křivka k ověření linearitu. Snímač byl zapojen do půl mostu. Pro statické měření byla použita statická tenzometrická ústředna UPM100 firmy HBM, která byla připojena pomocí sběrnice National Instruments NI-488.2™ k PC. Naměřené hodnoty byly shromažďovány v programu Catman 3.0 a následně přeneseny a zpracovány v programu Microsoft Excel. Výsledky poměrných deformací (mV/V) byly přepočteny na hodnoty napětí (MPa), pro přepočet byl uvažován modul pružnosti $E=2,1 \cdot 10^5$ MPa. Příklad průběhů gradientů napětí v okolí paty koutového svaru je vynesena v grafu na obr. 5.



Obr. 4 Instalované řetězce 1, 2



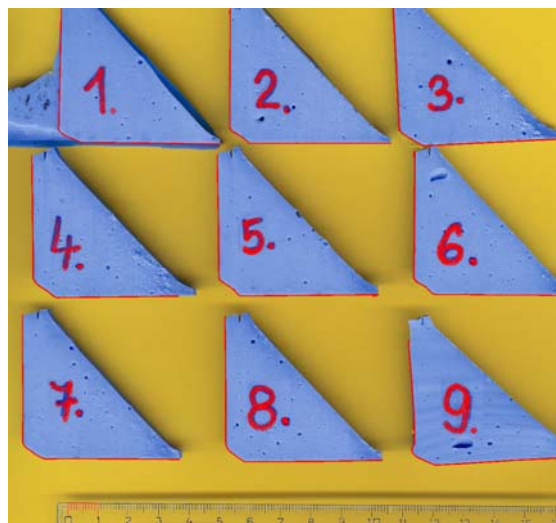
Obr. 5 Průběhy napětí na řetězci (cesta 2)

Rozbor provedení koutového svaru

Při sledování provedení a geometrie svaru byl zjištěn velký rozptyl hodnot skutečně provedené velikosti a tvaru koutového svaru. Proto byly sejmuty odlitky sledované oblasti za použití lukoprenu. V několika provedených řezech sejmutého odlitku byla na scanneru po příslušném zvětšení sledována a určena skutečná velikost koutového svaru na svislé a vodorovné základně profilu a odchylky jeho tvaru. Následně byl spočten průměrný sklon svaru. Provedení odlitků zachycuje obr. 6 a výsledky jejich měření ukazuje tab. 1.

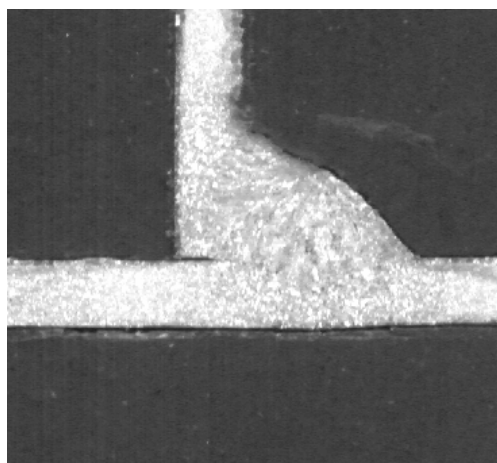
Vzorek	Vodorovný	Svislý	Úhel Svaru
1	6,7	4	30,84°
2	6,4	5,4	40,16°
3	7,5	6	38,66°
4	7,4	6,3	40,41°
5	6,9	6,5	43,29°
6	7	5,3	37,13°
7	6,6	5,4	39,29°
8	5,9	5,8	44,51°
9	6,3	3	25,46°
Průměr	6,74	5,3	37,75°
Směr. odch.	0,49	1,06	5,69°
Max	7,5	6,5	44,51°
Min	5,9	3	25,46°

Tab. 1 Velikosti a sklon svarů



Obr. 6 Odlitky koutového svaru

Z tabulky je vidět, že hodnoty velikosti svaru mají poměrně značně velký rozptyl a že se liší od výkresové dokumentace (svar velikosti 5 mm). Tento aspekt byl zohledněn při modelování svaru pomocí 3 D modelu v MKP, kdy jako střední velikost byla zvolena velikost 6 mm.



Obr. 7 Výbrus v neprovařeném kořenu svaru



Obr. 8 Iniclace povrchové trhliny

Po provedení výbrusu svaru bylo zjištěno nedostatečné provaření kořene. Vzniklá štěrbinu mezi neprovařenými profily je tak základem únavové trhliny, která se zvětšuje v důsledku cyklického zatěžování při únavové zkoušce a významně snižuje životnost svarového spoje.

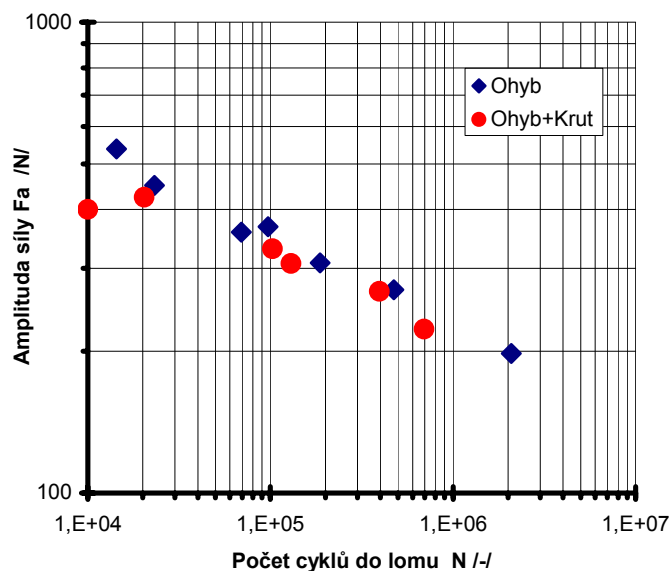
Příklad výbrusu je ukázán na obr. 7. Okamžik pozorovatelné povrchové trhliny potom zachycuje obr. 8.

Únavové zkoušky svarového uzlu

Pro určení únavové křivky při prostém ohybu pro svarový spoj bylo zkoušeno celkem 7 vzorků, vzorek číslo 1 nebyl porušen ani po 2 milionech cyklů. Vzorky 2-7 praskly na vodorovném (40x40x2) prutu v oblasti přechodu svaru, jak ukazuje obr. 8. Vzorky byly zatěžovány mechanickým zařízením s využitím excentru s nastavitelným zdvihem, pulzující silou s asymetrií kmitu $R=0,15$ a s frekvencí 10-15 Hz. Vzorkovací snímací frekvence dynamických tenzometrických měření a měření síly byla 300 Hz.

Pro určení únavové křivky pro proporcionální kombinaci ohybu a krutu (realizovanou vyosením zatěžovací síly) bylo proměřeno 6 vzorků, u vzorků 1, 4, 6 se objevila únavová trhlina v přechodu svaru na vodorovném prutu, u vzorků 2, 3, 6 došlo k odtržení svaru na svislém prutu. Zatěžovací i vzorkovací frekvence byly shodné jako v předchozím případě.

Získané body únavových S-N křivek pro oba typy zatěžování porovnává obr. 9.



Obr. 9 Experimentální body S-N křivek

Měření napjatosti termoelastickou metodou zařízením SPATE

Pro porovnání rozložení napjatosti v okolí svaru bylo provedeno měření bezkontaktní termoelastickou metodou zařízením SPATE. Měření bylo provedeno ve spolupráci s VZLÚ a.s. Praha, která je vlastníkem použitého měřicího zařízení, a proběhlo v laboratořích Ústavu mechaniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. Bezkontaktní metoda je založena na měření termoelastického jevu objeveného Kelvinem (1853). V tělese s tahovým nebo tlakovým napětím v elastické oblasti (vyvolávajícím změny objemu) probíhá vratná přeměna mezi mechanickou a tepelnou formou energie. Za předpokladu dodržení adiabatických podmínek je vztah mezi vratnou změnou teploty a odpovídající změnou součtu hlavních napětí lineární a nezávislý na zatěžovací frekvenci. Teorie v literatuře uvádí pro isotropní homogenní materiály vztah:

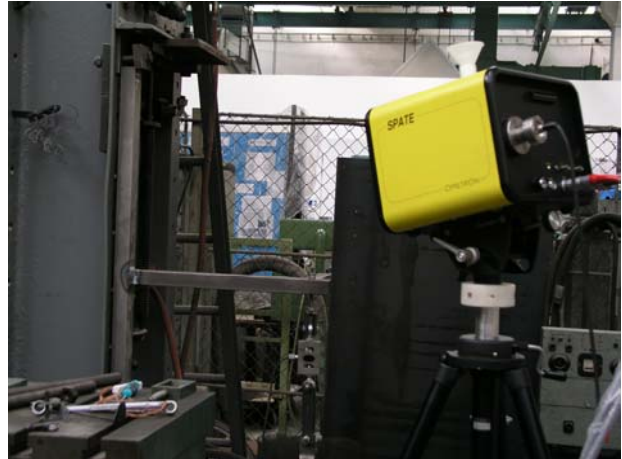
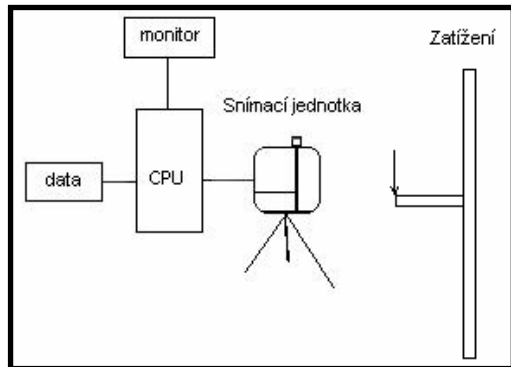
$$\Delta T = \frac{-\alpha T \Delta \sigma}{\rho C \sigma} = -K_m T \Delta \sigma \quad (1)$$

Většina strojírenských materiálů má kladné hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti α a termoplastické konstanty materiálu K_m . Potom při tahu teplota povrchu klesá a při působícím tlaku naopak stoupá. Protože normálové napětí na volném povrchu je nulové, bude:

$$\Delta T \approx \Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 \quad (2)$$

Zařízení SPATE 4000 dosahuje teplotní rozlišení ΔT běžně lepší než 10^{-3} K. Výsledné hodnoty změn napětí měřitelné při pokojové teplotě jsou potom pro ocel cca jeden MPa. Povrch měřené součásti je skenován bod po bodu rastrovacím způsobem s počítačovým řízením a právě měřený bod je vyznačen na povrchu pomocí stopy laserového paprsku a

viditelný pomocí vizuálního kanálu s CCD kamerou. Zatížení působící na zkušební těleso musí být cyklické s konstantní amplitudou. Standardní rozsah provozní frekvence přístroje je 0,5 Hz – 50 kHz. Do korelátoru systému musí být přiveden referenční signál s frekvencí působícího zatěžování. Tento signál může být vyveden například z generátoru funkce zatěžovacího stroje, siloměru, extenzometru, akcelerometru nebo snímače polohy umístěného na zkušebním tělese. U sledovaného vzorku bylo použito signálu ze siloměrného snímače.

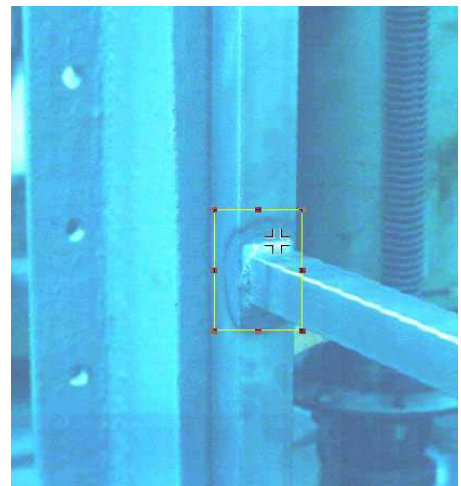


Obr. 10 Schéma měření pomocí přístroje SPATE a jeho realizace

Schéma měření a jeho realizaci ukazuje obr. 10. Měřený objekt byl zatěžován excentrem pulzující silou 150 až 900N. Pro kalibraci měřícího zařízení bylo užito známého nominálního napětí uvnitř skenovaného pole v dostatečně vzdálené oblasti mimo svar s přibližně konstantním rozdělením napětí na povrchu. V této oblasti byl odečten signál SPATE V0. Kalibrační bod byl zvolen na rameni vzorku, ve kterém bylo napětí stanoveno výpočtem: 105MPa pro maximální sílu 900N a 17,5MPa pro minimální sílu 150N.. Tříkrát opakovaným odečtením signálu v tomto bodě byla získána průměrná hodnota a byl vypočten kalibrační faktor.

Na obr. 11 je snímek z televizní CCD kamery zachycující zvolenou měřenou oblast zkoušeného vzorku. Zařízení SPATE 4000 obsahuje kromě tohoto optického systému ještě další dva – laserový systém pro navigaci scanování a optický systém vlastního teplotního čidla chlazeného kapalným dusíkem.

Na obr. 12 je vidět porovnání výsledků pro různé hodnoty maxima měřícího rozsahu. Vlevo je zobrazeno pole napětí ve zvolené oblasti zkoušeného objektu, pro nastavení rozsahu měření ± 100 MPa. Z obrázků je patrný nárůst koncentrace napětí při přechodu ze základního materiálu do paty svaru. Dále je zřejmé, že v oblasti svaru měřený signál značně převyšuje nastavenou maximální hodnotu. Pro zjištění lokální hodnoty napětí se proto měření opakovalo tentokrát na omezené oblasti při nastavení nižší citlivosti snímání s maximem na $\pm 342,6$ MPa. Lokální hodnoty součtu dvou hlavních napětí v oblasti koncentrace však i zde převyšují nastavený rozsah a mez kluzu materiálu. Lze konstatovat, že zde již probíhá zatěžování v elasto-plastické oblasti, a tedy nejsou splněny podmínky pro termoelastický jev.



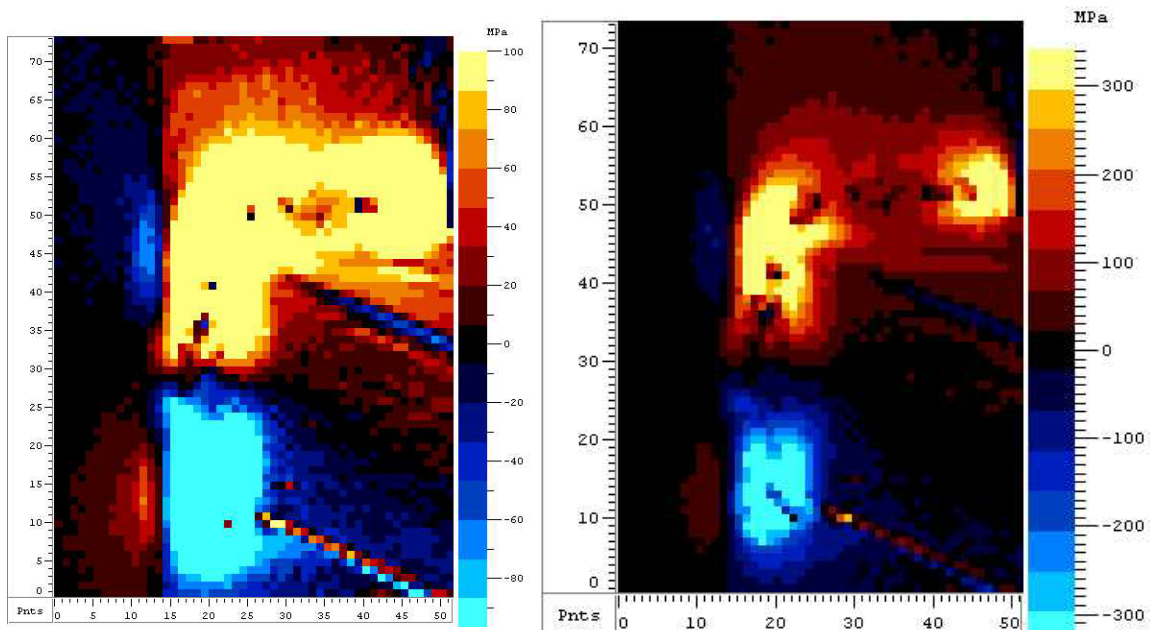
Obr. 11 Sledovaná oblast

Naměřené hodnoty napětí ve špičkách koncentrace proto již nelze považovat za korektní. Nicméně místo maximální koncentrace napětí se shoduje s místem iniciace únavové trhliny při únavových zkouškách i s extrémy získanými z vyhodnocení pomocí tenzometrů.

Další možný způsob zobrazení výsledků měření využívá vedení řezů naměřenou mapou a vykreslení průběhu součtu složek napětí.

Výpočtová analýza pomocí MKP

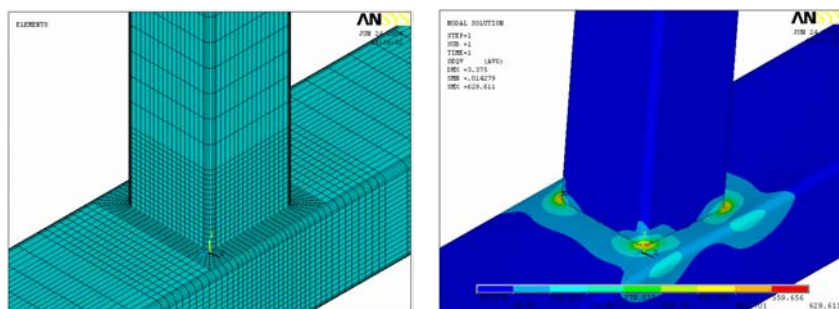
V průběhu řešení dané problematiky bylo vytvořeno několik modelů pro analýzy pomocí MKP, které měly sloužit k porovnání s experimentálními výsledky i pro testování využitelnosti jednoduchých modelů MKP v praxi.



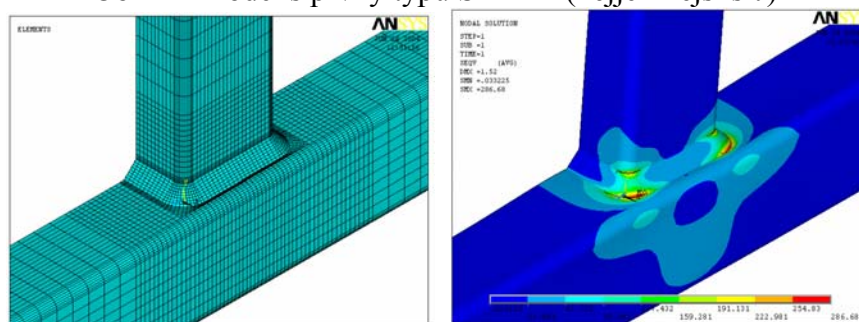
Obr. 12 Výsledky analýzy napjatosti přístrojem SPATE při dvou různých úrovních nastavení maxima napětí

Výpočty v systému ANSYS s elementy typu SHELL a SOLID pro aplikaci přístupů přes tvarová napětí

V programu ANSYS byly nejprve vytvořeny tři modely uzlu pomocí elementů typu SHELL 63. Modely se lišily zvolenou hustotou sítě (11707, 22344, 100432 elementů). Dále byly vytvořeny tři MKP půl-modely dílu pomocí 3D elementů typu solid (PLANE 82). V těchto modelech byl vlastní průřez svaru o charakteristickém rozměru 5 mm modelován jako rovnoramenný trojúhelník. První model byl tvořen 7348 elementy a tloušťka uzavřeného profilu byla modelována jedním elementem. Druhý a třetí model měly 27758, resp. 53184 elementů se dvěma resp. třemi elementy po tloušťce stěny profilu. Porovnání modelů pro jeden typ hustoty sítě a porovnání výsledků napětí v podélném řezu vzorkem v místě rohu přivařeného dutého profilu jsou ukázány na obr. 12 a 13 a na obr. 14.

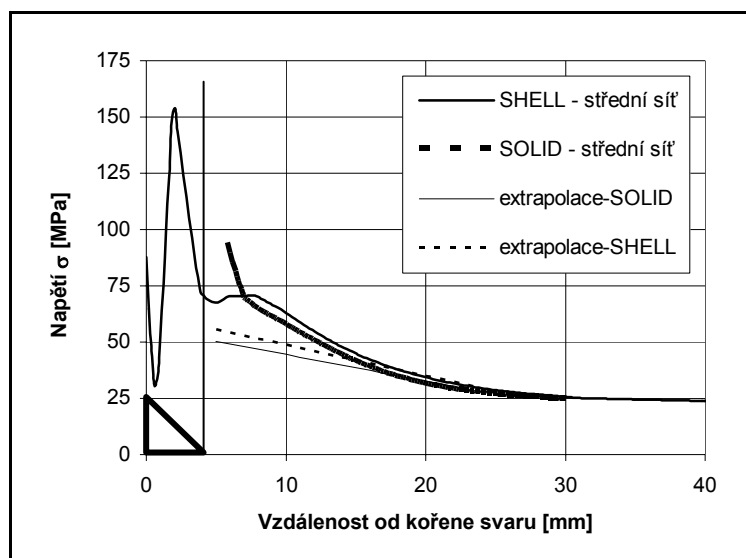


Obr.12 Model s prvky typu SHELL (nejjemnější síť)



Obr.13. Model s prvky typu SOLID

Do obr. 14 je také zakreslen způsob extrapolace do paty svaru pro určení tvarového napětí pro první z výpočtových metod. Ukázalo se, že od jisté hustoty sítě již nedochází k výraznějším změnám hodnot špiček napětí. Z porovnání výsledků pro elementy typu SHELL a SOLID ve směru 1 je patrná velmi dobrá shoda průběhů od vzdálenosti cca 2 mm od paty svaru. Hodnoty získané pomocí tenzometrů (délka mřížky 0,3 mm) jsou asi o 15 až 25 % nižší.

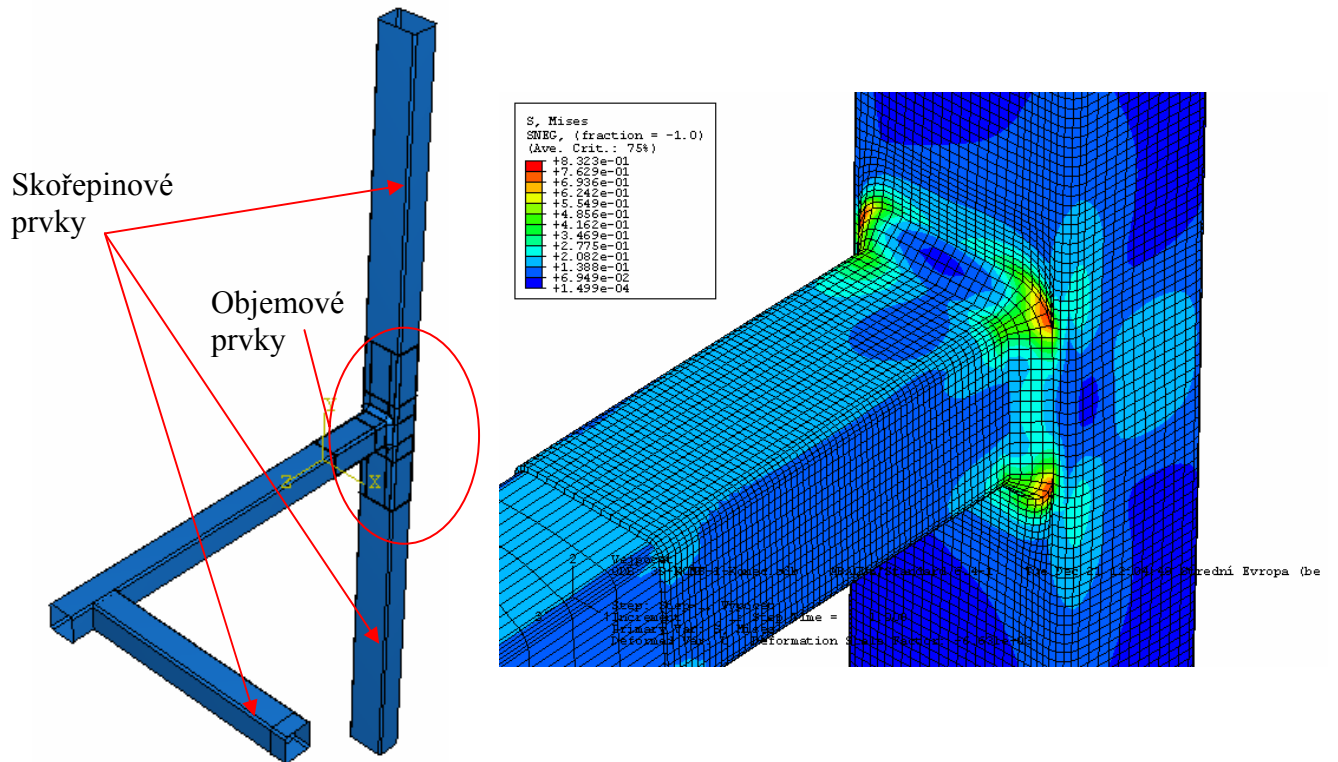


Obr.14. Model s prvky typu SOLID

Výpočty v systému ABAQUS

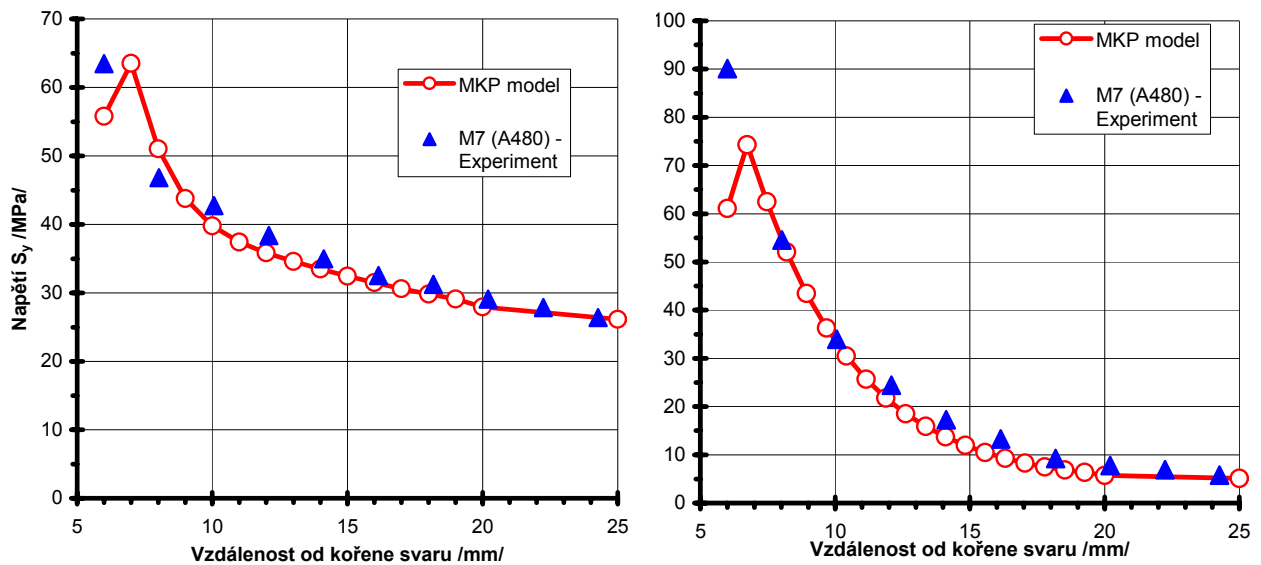
Další 2 upřesňující MKP modely byly řešeny v programu ABAQUS/CAE Verze 6.4-1 a to model pro prostý ohyb a model pro kombinaci. U těchto modelů byl svar zvětšen na základě měření jeho rozměrů z 5 mm na 6 mm. Oba modely byly pro výpočet zjednodušeny a to tak, že do vzdálenosti 100 mm od místa svaru byl vzorek modelován pomocí objemových prvků

C3D8R, mimo kritickou oblast byly užity skořepinové prvky S4R, viz obr. 15. Toto zjednodušení nijak neovlivnilo napjatost v oblasti spoje a výrazně urychlilo výpočet.



Obr. 15 MKP model a pole napětí HMH – model kombinace ohyb a krut

Porovnání výsledků naměřených hodnot napětí v podélném směru (*cesta 1* v ose *y* resp. *cesta 2* v ose *z*) získaných při tenzometrickém měření na řetězcích s vypočtenými hodnotami pomocí MKP na tomto podrobném 3D modelu ukazují grafy na obr. 16. Je patrné, že v tomto případě je při uvažování skutečné velikosti svaru shoda výpočtu a měření velmi dobrá.



Obr. 16 Porovnání vypočtených a tenzometricky měřených hodnot gradientu napětí u paty svaru

Závěr

Literatura uvádí, že přístup výpočtů svarů přes nominální napětí (např. aplikace standardů) je považován za dostatečně „robustní“, neboť je podložen rozsáhlými zkouškami a databankami pro různé typy svarů a tedy obsahuje i statistické podklady. V konstrukční praxi je proto používán častěji než přístupy lokální. Avšak i tak, je vzhledem k velkému množství parametrů, které ovlivňují únavovou pevnost svarů, naprostá shoda predikce životnosti s experimenty na vzorcích spíše výjimečná než obvyklá.

Doporučuje se proto vždy nejprve provést analýzu tvarových napětí, neboť určení jak napětí ve vrubu, tak faktoru intenzity napětí pro další hodnocení svarů, je založeno na kategorizovaném tvarovém napětím. Proto přístup přes tvarová napětí nalézá i nejširší rozsah použití. Přejít od přístupu přes tvarová napětí na přístup přes napětí a deformace ve vrubu a dále k predikci šíření trhlin přes lomovou mechaniku je použitelný, jestliže rozptyl lokální geometrie vrubu způsobených výrobou je malý, nebo pokud může být vztažen k nejhoršímu analyzovanému případu. To se týká zejména nepracovaných svarových spojů. Provedené výpočty ukázaly možnost použití jednodušších stěno-deskových modelů pro modelování tenkostěnných profilů. Pro aplikaci nominálních přístupů i pro určení tvarových napětí jsou dostatečně přesné a výsledky se významně nelišily oproti 3D analýze pomocí prvků typu solid. Detailní analýzy MKP se ukázaly jako vhodné pro vyšetřování gradientů napětí, při relativním srovnávání různých typů svarů, nebo jejich tvarových odchylek. Bylo dosaženo dobré shody experimentální tenzometrické analýzy a podrobných 3D MKP výpočtů.

Termoelastická analýza napětí měřená přístrojem SPATE dává dobrý zejména celoplošný přehled o napjatosti. Je vhodná pro aplikace jednoosého napětí, kde není třeba separovat složky dílčích napětí. Z důvodů překračování meze kluzu v koncentrátoch nedala reálné hodnoty špičkových napětí ve svaru.

Literatura

- [1] Kafka V.: *Termoelastické měření napjatosti na svařovaném vzorku pomocí zařízení SPATE 4000*, Praha, 2004 Autor, zPráva VZLÚ a.s. č. R-3572/04.
- [2] Růžička, M.- Papuga, J.- Hejman, M.-Pěnička, R.: *Expert System for Assessing the Fatigue Resistance of Thin-Wall Profile Weld*. In: Computational Mechanics, WCCM VI in conjunction with APCOM'04, Sept. 5-10, 2004, Beijing, China, CD ROM Tsinghua University Press & Springer-Verlag 2004, pp. 1-10.

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci výzkumu únavové odolnosti svarových spojů podpořeného grantovým projektem GAČR 101/02/0141 a návazným výzkumem vícesložkového únavového namáhání v projektu GAČR 101/05/0199.