



THE FATIGUE LIFE PREDICTION METHODS ACCORDING THE STRUCTURAL STRESSES OF WELDED JOINT

R.Pěnička, M.Růžička *

Summary: *Method according the structural stresses of welded joint is presented in this report. This method was used by FEM analysis and was applied to rectangular hollow section welded joint. Numerical results was compared with experimental results.*

1. Úvod

Řešení životnosti pro navržený svarový spoj bývá dosti komplikované hned z několika důvodů. Svarový spoj je jak geometrickým tak i technologický koncentrátor napětí. Geometrická koncentrace napětí je způsobena vlastní geometrií svaru. Problém geometrické koncentrace napětí je v různorodosti kvality zpracování svaru, z čehož vyplývají velké rozptyly geometrických vlastností, tedy i těchto koncentrátorů. Technologický koncentrátor je způsoben především nehomogenitou materiálu, tedy rozdílnými mechanickými vlastnostmi svarového kovu, materiálu v tepelně ovlivněné zóně svaru a materiálu základního. Mezi další faktory ovlivňující technologickou koncentraci napětí můžeme zařadit zbytková napětí. Zbytková napětí vznikají zejména v důsledku rychlého ochlazení při svařování a důsledkem mikrostrukturních transformací. Kladná (tahová) napětí se projevují nepříznivě zejména ve vysokocyklové oblasti. Všechny tyto faktory se jen velmi těžko zahrnují do řešení. Pro „správnou“ predikci životnosti svarového spoje je potřeba znát napjatost v oblasti svaru, kde dochází k relativně velké koncentraci napětí. Informace o stavu napjatosti jsou získávány především z experimentálního měření, která jsou ovšem velmi nákladná, proto je snaha přejít od podrobnějších MKP analýz k co nejjednodušším, avšak ne na úkor přesnosti výpočtu.

2. Základní přístupy pro výpočet životnosti

Pro každou analýzu pevnosti a životnosti je zásadní otázkou, jak podrobný MKP model je třeba vytvořit, aby poskytl relevantní hodnoty pro další výpočty. Přitom by měl být model co nejjednodušší. V některých případech stačí modelovat svarový spoj bez geometrie svaru, pouze z geometrie spoje. Dalším velkým zjednodušením může být přechod na skořepinové prvky, které oproti objemovým prvkům přinášejí značné zjednodušení a zrychlení výpočtu hlavně u složitějších spojů. Avšak takto zjednodušené modely lze použít pouze pro určité aplikace, např. pro určení hodnot tzv. *tvarového napětí* pro výpočet životnosti založených

* Ing. Radek Pěnička, České vysoké učení technické v Praze - Fakulta strojní, Technická 4, 166 07 Praha 6,
Doc. Ing. Milan Růžička, Csc., taktéž.

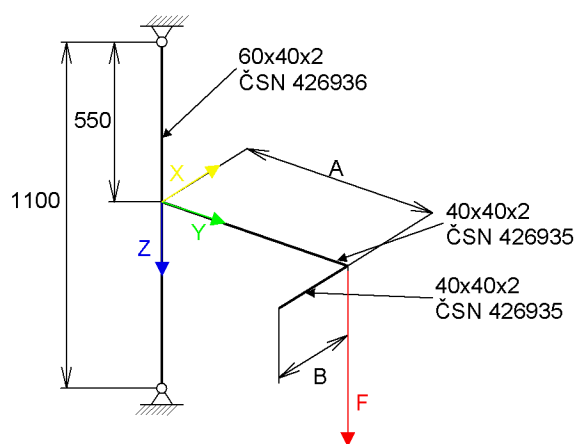
na globálních přístupech. Globálním přístupem rozumíme takový odhad únavové pevnosti, který vychází přímo z působících sil a momentů nebo z nominálních napětí resp. tvarových, odvozených za předpokladu konstantního nebo lineárního rozložení napětí. Ukazuje se, že pro předběžný odhad životnosti jsou tyto přístupy využívající výsledků MKP dostatečné. Zmíněný přístup přes tvarové napětí a jeho aplikace je dále popsána podrobněji.

Podrobnější řešení únavové pevnosti, které je třeba provést např. při kategorizaci svarového uzlu, lze provést pomocí různých varianty lokálních přístupů. Ty se liší podle způsobu, jak respektují místní napětí a deformace a jak definují jejich mezní hodnoty. Metody predikce rozvoje únavového poškození by měly zohledňovat fáze inicializace trhliny ale i jejího šíření až lomu. Doba do inicializace trhliny je predikována obvykle právě lokálními parametry, které jsou určeny na základě mechaniky kontinua. Šíření trhliny až po konečný lom jsou naproti tomu nejčastěji popisovány přístupy s užitím lomové mechaniky. Bohužel pro odhad lokálních parametrů pro výpočet životnosti svarového spoje je skořepinový model nevyhovující. Proto je nutné přejít na objemový model, což vyžaduje modelování vlastního svaru včetně jeho např. odlišných mechanických vlastností.

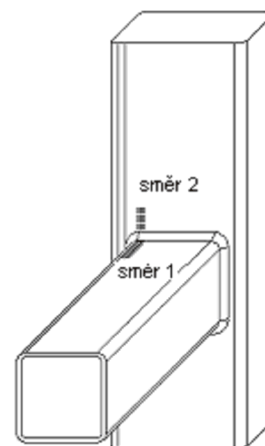
3. Přístup přes tvarová napětí

Přístup přes tvarová napětí je přístupem mezi globální a lokální verzí. Pro určení únavové pevnosti a životnosti vyhodnocuje na součásti amplitudy napětí ve vztažném bodě a srovnává je s S-N křivkou určenou pro tato napětí. V úvahu nejsou brány skutečné vrubové účinky, nýbrž se vychází z poznatku, že kvantitativní údaj, který postihuje únavovou pevnost a životnost, určuje právě „nevrubovaná“ část konstrukce. Výhodou je jednoduché určování tvarových napětí na základě smluvních metod extrapolace z měřených bodů do bodu vzniku potenciální únavové trhliny. Hodnoty napětí v bodech pro extrapolaci určíme z tenzometrického měření nebo pomocí MKP stanovených průběhů napětí v lokalitě dílu v dané vzdálenosti od koncentrátoru (vztažný bod). K tomu je tedy potřeba znát právě místo tohoto vztažného bodu, místo vzniku únavové trhliny.

Výpočty MKP umožňují provádět různá relativní srovnání, kvalitativní hodnocení a trendy z porovnávání různých údajů. Je zřejmé, že příprava MKP modelu a zpracování výpočtu může být poměrně náročná. Je potřebné vhodně volit typ prvku a hustotu sítě. U svarových spojů tento přístup indikuje jaké kvantitativní hodnoty mezních napětí by mělo být dosaženo ve vrubu, aniž by musel být prováděn náročnější postup lokálního hodnocení. V našem případě byl hodnocen modelový konstrukční uzel tvořený dvěma tenkostěnnými profily, obr. 1. Pro získání tvarových napětí v tomto svarovém spoji bylo vytvořeno několik MKP modelů, kde byl sledován vliv hustoty sítě a typ zvoleného prvku. Porovnávány byly modely s 3D-solid elementy (s modelem svaru) a elementy typu shell (bez modelu svaru). Toto porovnání bylo ještě navíc doplněno výsledky tenzometrického měření.



Obr. 1 Řešený svarový spoj

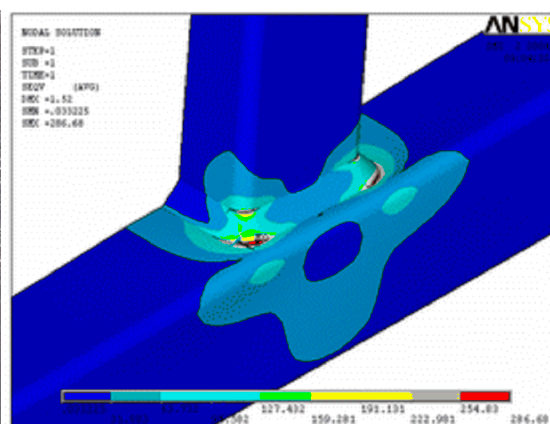


Obr. 2 Směry pro extrapolaci napětí

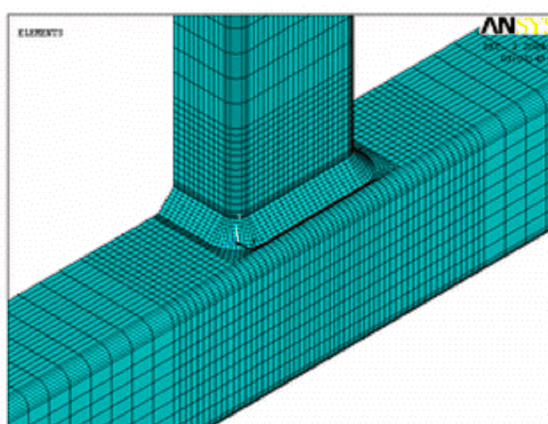
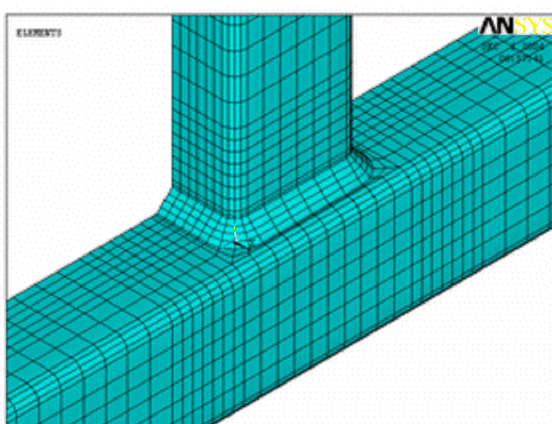
V tomto případě bylo voleno místo vztažného bodu v oblasti paty svaru u zaoblení hrany tenkostěnného profilu a průběhy napětí pro následnou extrapolaci ve směru kolmém ke svaru, obr. 2. Volba byla podložena výsledky únavových zkoušek daného spoje, protože právě v tomto místě byla zjištěna iniciace únavové trhliny, obr. 3. Na obr. 4 je vykresleno pole napětí dle pevnostní teorie HMH, místo nejvyšší koncentrace napětí se shoduje s místem vzniku únavové trhliny.



Obr. 3 Únavová trhlina

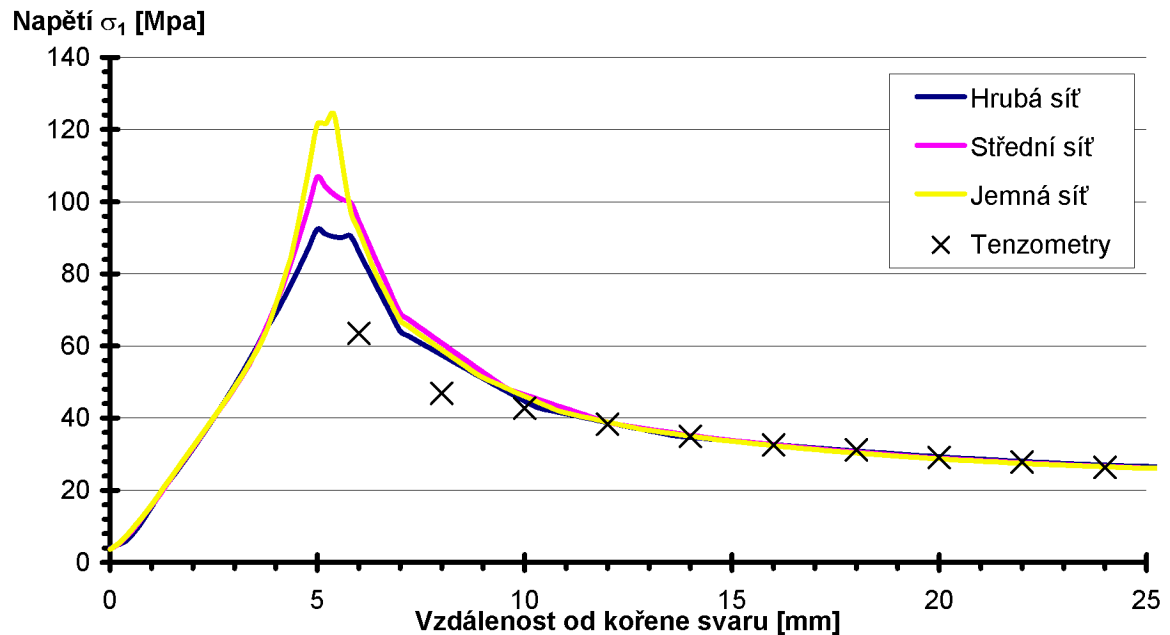


Obr. 4 Pole napětí dle teorie HMH



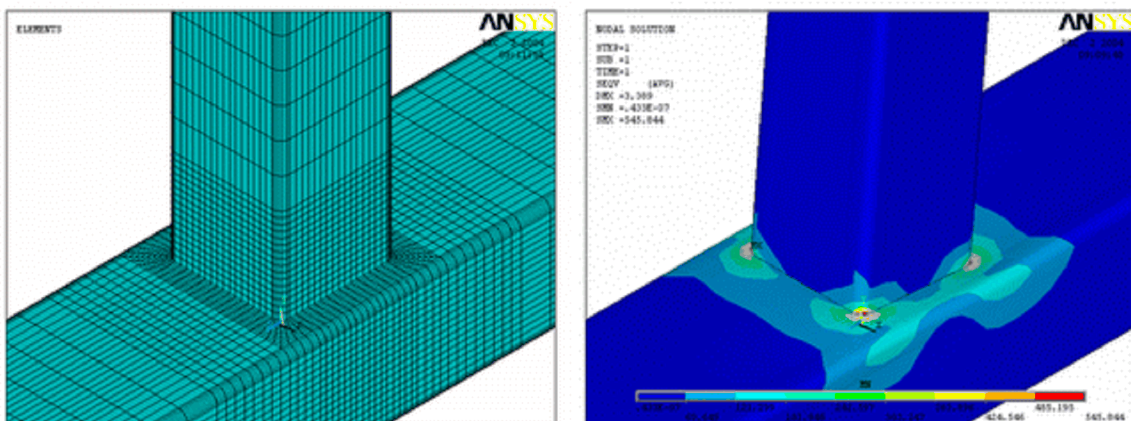
Obr. 5 3D model s hrubou a nejjemnější porovnanou sítí

Na obr. 5 a obr. 7 je možno vidět MKP příklady modelů s elementy typu solid a shell. Z těchto modelů byly vykresleny průběhy napětí ve stanovených směrech. Výsledky z těchto průběhů jsou obdobné pro oba dva směry s tím, že ve směru 2 bylo dosaženo o něco vyšších hodnot lokální koncentrace napětí u paty svaru. Pro ilustraci jsou vykresleny průběhy ve směru 1.

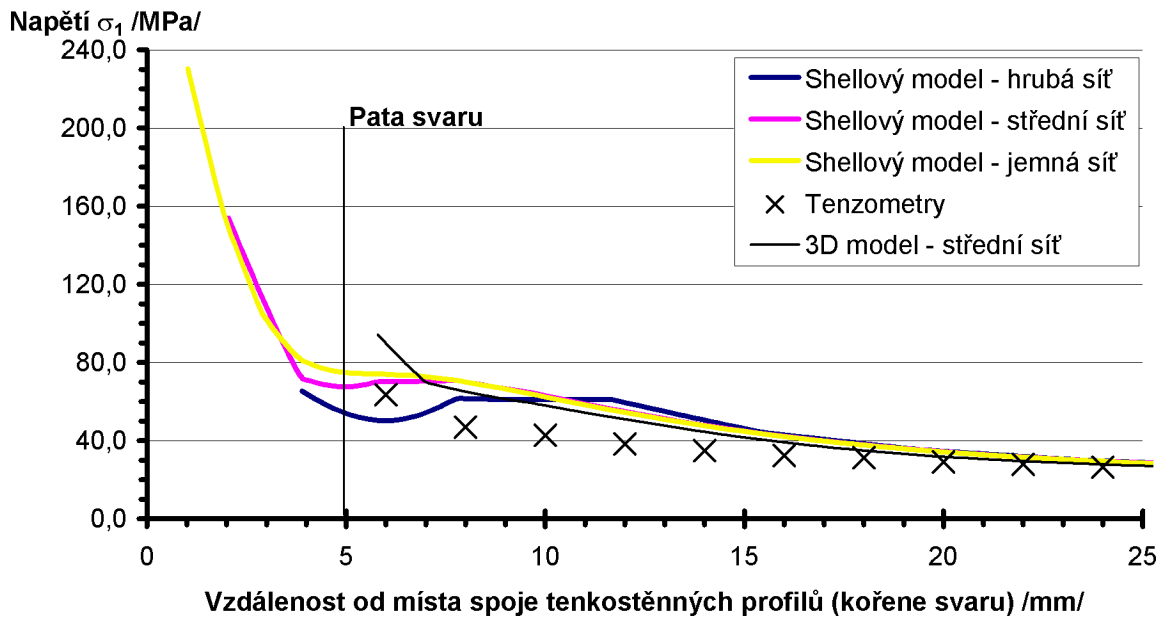


Obr. 6 Průběhy 1. hlavního napětí ve směru 1 pro 3D model + tenz. měření

Podle obr. 6 lze konstatovat, že k výraznějším změnám hodnot napětí vlivem hustoty sítě došlo jen v místech špiček napětí. Z porovnání s tenzometrickým měřením je patrná blízká shoda v oblasti neovlivněné lokální koncentrací a v místě změny gradientu napětí ve vzdálenosti kolem 7 mm od kořene svaru. Z hlediska následné extrapolace napětí do paty svaru (získání tvarových napětí) je patrné, že hustota sítě nemá vliv na velikost tvarového napětí, neboť pro jeho získání se používá míst neovlivněných lokálními vruby, tj. míst “překrytí” všech průběhů.



Obr.7 Shellový model – síť + pole napětí dle HMH



Obr.8 Průběhy 1. hlavního napětí ve směru 1 pro shellový a 3D model

Z obr. 8 je opět patrné, že k výraznějším změnám napětí vlivem hustoty sítě došlo jen v místech špiček lokální koncentrace napětí, kde modely s elementy typu shell mají vlivem geometrie tuto oblast posunutou směrem k místu spoje uzavřených profilů. Z porovnání s 3D modelem ve směru 1 je patrná shoda průběhů od vzdálenosti 7 mm od kořene svaru (pozn. ve směru 2 vychází průběhy shellového modelu více konzervativní). Z hlediska následné extrapolace napětí do paty svaru nemá hustota sítě opět vliv. Jednoduchý shellový model tedy v tomto případě poměrně dobře nahrazuje složitější 3D model. K diskusi tedy zůstává širší užití těchto jednodušších modelů, které by ušetřili nákladný čas pro modelování a výpočet.

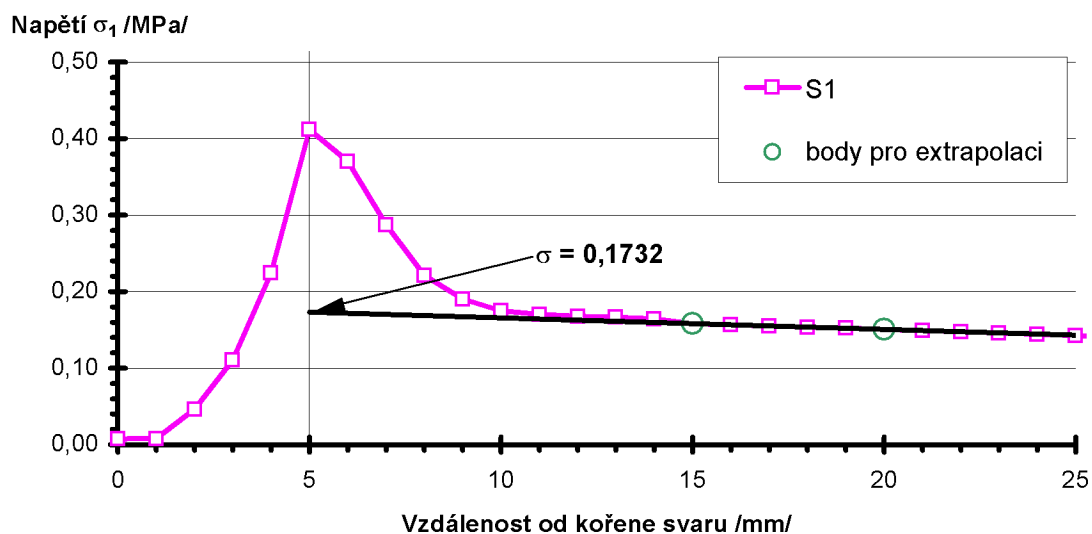
4. Porovnání experimentu a výpočtu

Z takto získaných průběhů je možno provést extrapolaci napětí z míst neovlivněných lokálními vruby do oblasti paty svaru. Otázkou je volba těchto míst, které výrazně ovlivňují velikost získaného tvarového napětí a tím i životnost posuzované součásti. Příliš vysoké tvarové napětí, určené z míst ovlivněných lokálními vruby, degraduje užití konstrukce na krátkou provozní dobu, kdy bude součást předčasně vyřazena nebo začnou příliš brzy nákladné kontroly daného spoje.

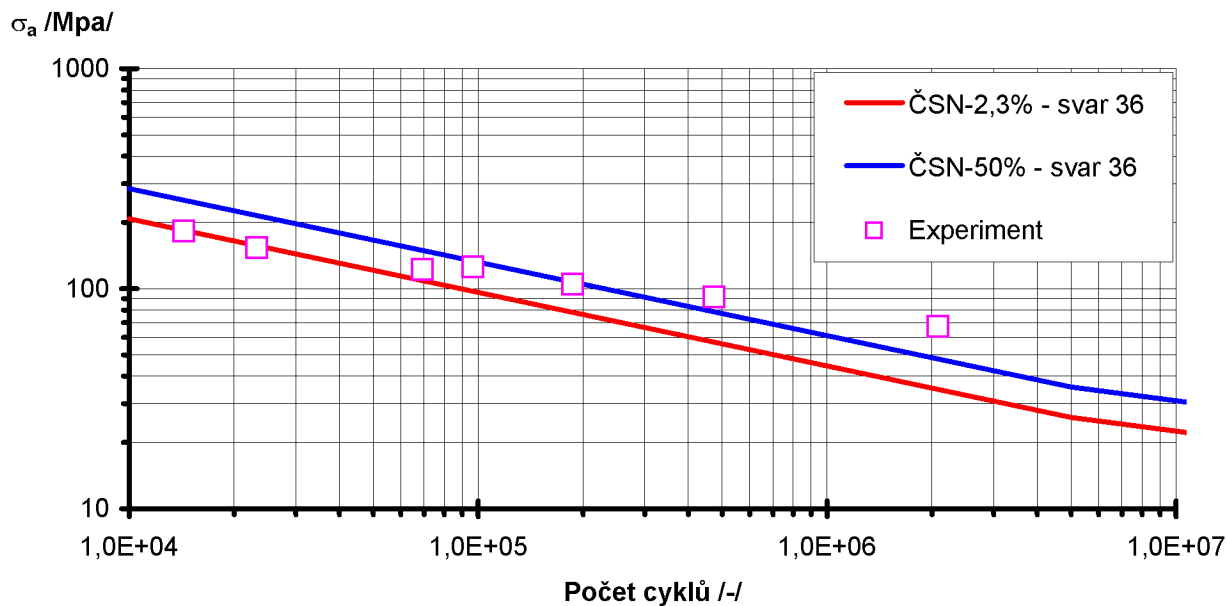
Pro ověření přístupu přes tvarové napětí bylo provedeno experimentální měření únavy 7 vzorků pro různé hodnoty zatěžující síly. Dále byl vytvořen 3D objemový model s jednotkovou zátěžnou silou z důvodu určení velikosti tvarového napětí. Při únavovém experimentu byla měřena pouze zatěžující síla. Z obr. 9 je patrné, že při zatížení 1 N je hodnota tvarového napětí 0,1732 MPa. Z tohoto byly vyčísleny hodnoty tvarového napětí pro jednotlivé vzorky. Hodnoty zatížení a příslušné životnosti shrnuje následující tabulka. Experimentální data byly následně porovnány s S-N křivkou dle ČSN pro tvarové napětí, obr. 10.

tab.1. Porovnání výsledků

	Exp. život /-/	Život z ČSN /-/	Rozkmit napětí /MPa/	Rozkmit síly /N/	Amplituda síly /N/
Vzorek 1	2 081 480	295 027	67,2	395,00	197,50
Vzorek 2	23 190	24 942	153,0	900,00	450,00
Vzorek 3	69 230	49 535	121,7	716,00	358,00
Vzorek 4	187 330	78 168	104,6	615,00	307,50
Vzorek 5	474 360	115 471	91,8	540,00	270,00
Vzorek 6	14 370	14 595	182,9	1076,00	538,00
Vzorek 7	96 920	45 675	125,1	735,63	367,81



Obr.8 Průběh napětí σ_1 ve směru 1 (jednotkové zatížení)



Obr. 10 S-N křivka (tvarová napětí)-porovnání

5. Závěr

Pro zvolený modelový svarový uzel vychází metoda tvarových napětí při vyšším počtu cyklů konzervativněji oproti experimentu. Důležitým poznatkem je nezávislost získaného tvarového napětí od určité hustoty volené sítě, průběhy napětí se shodují v oblasti neovlivněné lokálními vruby. To platí jak pro modely s 3D elementy, tak pro modely s elementy typu shell. Z hlediska užitého prvku vychází shellové modely o něco konzervativněji, což v případě větších rozdílů může vést přehnanému předimenzování součásti. Modelování konstrukcí je podstatně jednodušší oproti složitým MKP modelům pro lokální metody a pro předběžný odhad životnosti spoje je metoda přes tvarové napětí plně dostačující.

6. Poděkování

Tento příspěvek vznikl a jeho prezentace byla umožněna za finanční podpory grantu GA ČR 101/02/0141.

7. LITERATURA

Radaj, D. (1996) Review of fatigue strength assessment of nonwelded and welded structures based on local parameters, *Int. J. Fatigue*, Vol. 18, No3, pp. 153-170.

Radaj, D. (2001) Fatigue assessment of welded joints, *Cambridge*

Grulich, P (2004) Závěrečný projekt, *FS ČVUT, Ústav mechaniky*

Růžička, M (1999) Metody pro hodnocení únavové životnosti, *In: CD ROM z 16.setkání uživatelů COSMOS/M. Praha 30.11.1999*, str. 60-69, Tech Soft Eng., Praha

Pěnička, R. – Růžička, M. – Doubrava, K. (2004) Analýza napjatosti a únavové životnosti svarových spojů, *Zpráva FS ČVUT v Praze, č.2051/04*