



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**ANALÝZA VLIVU RŮZNÉHO MODELU GEOMETRIE
SVARU NA ÚNAVOVOU PEVNOST SVARKU**

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT WELD GEOMETRY MODEL ON FATIGUE STRENGTH OF A WELD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Aleš Holeta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Aleš Holeta
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Petr Vosynek, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza vlivu různého modelu geometrie svaru na únavovou pevnost svarku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařované konstrukce nyní převládají proti původně odlévaným nebo kovaným konstrukcím. Proto je kladen velký důraz na podrobné posouzení takových konstrukcí z hlediska mezních stavů, zejména na únavovou pevnost. Předpisy jsou již založeny na výsledcích z numerického výpočtového modelování metodou konečných prvků. Avšak jakým způsobem vymodelovat geometrii svaru není v mnoha případech zcela upřesněna. Student se bude v práci zabývat vybraným svarovým spojem, u kterého bude modelovat různou úroveň geometrie (různé konfigurace střednicových ploch; přechod objemové housenky do základního materiálu).

Cíle bakalářské práce:

- rešerše,
- tvorba výpočtových modelů v programu Salome meca,
- hodnocení mezního stavu únavové pevnosti dle dodané literatury,
- analýza výsledků, diskuze,

Seznam doporučené literatury:

HOBACHER, A. F. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. 2. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-23757-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na analýzu únavové životnosti jednoduchého svarového spoje. Hlavním cílem práce bylo porovnání různých metod hodnocení svarových spojů a různých přístupů tvorby geometrie výpočtových modelů. Výpočty jsou realizovány analyticky a numericky. Numerické řešení je prováděno pomocí MKP. Daný problém je analyzován v open-source programu Salome Meca a v komerčním programu ANSYS Workbench.

Klíčová slova

Svary, MKP, IIW, MSÚP, Salome Meca, Code Aster, ANSYS Workbench, Metoda nominálního napětí, Metoda extrapolace tvarového napětí, Metoda efektivního vrubového napětí

ABSTRACT

The work was focus on the analysis of the fatigue life of a simple welded joint. The main goal of this work was to compare different methods of evaluation of welded joints and different methods of creating a geometry of computational models. Calculations were performed analytically and numerically. The numerical solution was performed using FEM. The problem was analyzed in the open-source program Salome Meca and in the commercial program ANSYS Workbench.

Key words

Welds, FEM, IIW, Fatigue limit state, Salome Meca, Code Aster, ANSYS Workbench, Nominal stress method, Structural hot spot stress method, Effective notch stress method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOLETA, Aleš. *Analýza vlivu různého modelu geometrie svaru na únavovou pevnost svarku*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125415>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Petr Vosynek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „*Analyza vlivu různého modelu geometrie svaru na únavovou pevnost svarku*“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Aleš Holeta

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Petru Vosynkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále bych chtěl poděkovat mé přítelkyni za psychickou podporu v nelehkých chvílích při studiu a psaní této práce. V neposlední řadě bych také rád poděkoval rodině a blízkým přátelům.

Obsah

1	Úvod	11
1.1	Výpočtové prostředí	12
2	Analýza napětí svarového spoje	13
2.1	Nominální napětí	14
2.1.1	Výpočet nominálního napětí	15
2.2	Extrapolace tvarového napětí	16
2.2.1	Výpočet extrapolovaného tvarového napětí	17
2.2.2	Hodnocení typu a)	19
2.2.3	Hodnocení typu b)	19
2.3	Efektivní vrubové napětí	19
2.3.1	Výpočet efektivního vrubového napětí	20
2.4	Součinitel intenzity napětí	22
3	Determinace únavové životnosti svarového spoje	24
3.1	Metoda nominálních napětí	25
3.2	Metoda extrapolovaného tvarového napětí	26
3.3	Metoda efektivního vrubového napětí	26
4	Praktická část	27
5	Hodnocení metodou nominálních napětí	29
5.1	Určení životnosti	30
6	Hodnocení metodou extrapolace tvarového napětí	31
6.1	Modely geometrie s objemovou reprezentací svaru	31
6.1.1	Rotační symetrie	33
6.1.2	Osová symetrie	35
6.2	Modely geometrie tvořené střednicovými plochami	37
6.2.1	Geometrie se zvětšením tloušťky v oblasti svaru	39
6.2.1.1	Geometrie bez zvětšení tloušťky	40
6.2.1.2	Geometrie se zvětšením tloušťky	42
6.2.1.3	Geometrie se zmenšením tloušťky	44
6.2.2	Geometrie se šikmými střednicovými plochami	46
6.3	Určení životnosti	48
7	Hodnocení pomocí metody efektivního vrubového napětí	51
7.1	Rotační symetrie	51
7.2	Osová symetrie	54
7.3	Určení životnosti	56

8	Diskuze.....	57
9	Závěr	58
	Seznam použitých zdrojů	59
	Seznam použitých symbolů a zkratek.....	61
	Seznam obrázků	63
	Seznam tabulek	65

1 Úvod

Historicky první způsob svařování kovů bylo svařování kovářské. S rozvojem průmyslu a objevem elektrického proudu, vznikly nové možnosti pro spojování kovů. Nové metody sváření se rozvíjely zejména během světových válek. Pro spojení dvou materiálů začal být v 60. letech 20. století využíván laser. O desetiletí později v 70. letech začalo být ve vojenském a leteckém průmyslu využíváno svařování pomocí elektronového paprsku. [1]

V dnešní době výroba svařovaných konstrukcí převládá oproti průvodně odlévaným nebo kovaným konstrukcím. Z toho důvodu je důležité správně odhadnout životnost takovýchto svařovaných konstrukcí. Nesprávné vyhodnocení mezních stavů, zejména mezního stavu únavové pevnosti, může vést k tragickým haváriím. Poškození svařované konstrukce způsobené únavovým porušením svarového spoje (iniciace trhliny z oblasti paty svaru) je zobrazena na obrázku 1.1.

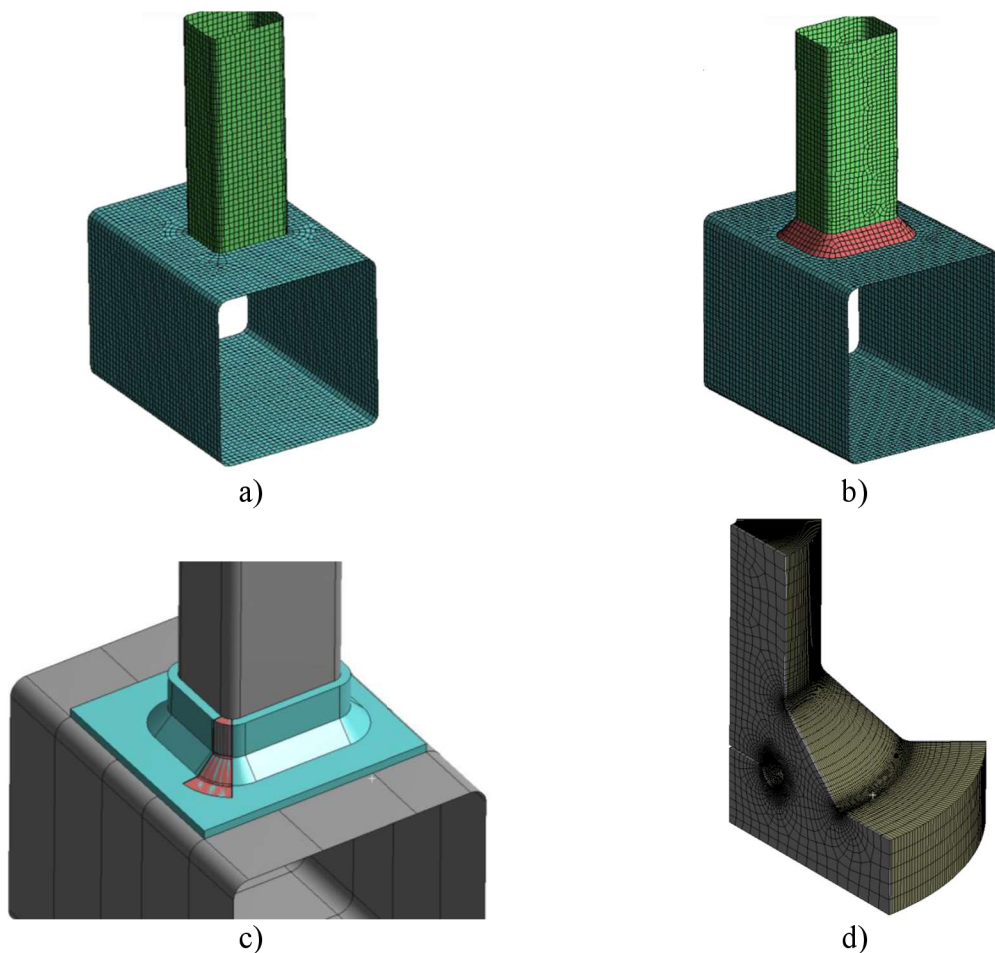
Životnost svarových spojů není v mnoha případech jednoznačně určitelná. Jedním z mnoha faktorů hrající roli, při určení životnosti svarového spoje je tvar geometrie svaru ve výpočtovém modelu.



Obrázek 1.1 Porušení svarového spoje. [2]

Svarové spoje lze vymodelovat v různých geometrických úrovních. Jednotlivé úrovně modelů geometrie vykazují rozdílné tuhosti svarových spojů, rozdílnou náročnost na výpočetní výkon a rozdílnou časovou náročnost přípravy geometrie.

Geometrie na obrázku 1.2 a) není pracná na tvorbu modelů, není náročná na výpočetní výkon a relativně dobře reprezentuje tuhost spoje u svařovaných konstrukcí. Model geometrie zobrazený na obrázku 1.2 b) je relativně časově i výkonnostně nenáročný, do spoje je vnesena dodatečná tuhost, která lépe reprezentuje vlastnosti spoje. Obrázek 1.2 c) a d) zobrazují geometrii výpočetního modelu, který simuluje nejvíce reálné vlastnosti spoje. Negativem je časová (detailní modelování svarového spoje) a výpočtová náročnost (jemná diskretizace geometrie má za následek mnohonásobně větší počet prvků než u předešlých úrovní geometrie).



Obrázek 1.2 Různé modely geometrie svarového spoje. [3]
 a) Skořepinový model bez zahrnutí geometrie svaru, b) Skořepinový model se zahrnutím geometrie svaru, c) Objemový model se submodelem, d) submodel

1.1 Výpočtové prostředí

Výpočty budou řešeny analyticky nebo pomocí metody konečných prvků (dále MKP). Numerické řešení MKP bude realizováno pomocí dvou výpočetních prostředí.

- Salome Meca 2013.1 (SALOME 6)

SALOME je software sloužící k pre- a post-processingu úloh řešených pomocí MKP. Program je distribuováno jako open-source s licenčními podmínkami *GNU LGPL*. Řešičem úloh MKP je *Code-Aster*, který společně s řešičem *Code-Saturn* (úlohy mechaniky tekutin) vyvíjí společnost EDF. [4]

- ANSYS Workbench 2019 R3

ANSYS je společnost, která vyvíjí programový balík pro numerické výpočty v inženýrské praxi. Důležitou součástí softwaru *ANSYS* je platforma *ANSYS Workbench*. *ANSYS Workbench* propojuje jednotlivé výpočetní modely a zajišťuje mezi nimi kompatibilitu (výpočty multifyzikálních úloh – kombinace více druhů analýz). [5]

2 Analýza napětí svarového spoje

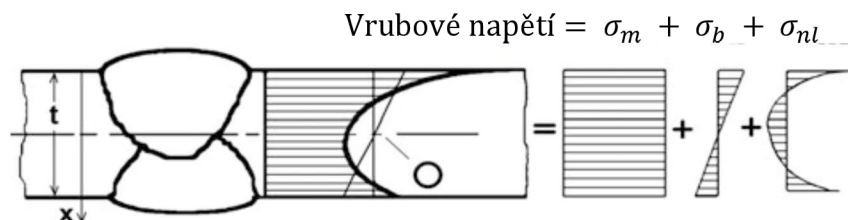
Jednou z institucí zabývajících se analýzou svarových spojů je *International Institute of Welding* (Mezinárodní institut svařování), dále jen IIW. Na základě dokumentů vypracovaných touto institucí lze hodnotit svarové spoje zatěžované proměnlivým i statickým namáháním. Tyto dokumenty jsou pouze doporučení jak postupovat při analyzování svarových spojů. Při aplikaci vyhodnocovacích metod v praxi musí být provedeny experimentální zkoušky.

Při posuzování únavové životnosti konstrukcí nebo součástí je rozhodující relevantní odhad hodnotícího zatížení (napětí získaná jednotlivými metodami). Měli by být brány v potaz všechna zatížení a možné mezní stavy vyplývající z tohoto zatěžování.

Použití jednotlivých hodnotících metod závisí na typu svařovaného spoje, charakteru zatěžování ale i např. zda je k dispozici výpočetní program MKP. Základní metody pro určení napětí nebo faktoru intenzity napětí, jsou podle IIW:

- Metoda nominálních napětí (viz kapitola 2.1),
- Metoda extrapolace tvarového napětí (viz kapitola 2.2),
- Metoda efektivního vrubového napětí (viz kapitola 2.3),
- Metoda součinitele intenzity napětí (viz kapitola 2.4).

V okolí svaru je nelineárně rozložené napětí po tloušťce materiálu, které lze rozdělit na jednotlivá napětí (rozložení napětí je na obrázku 2.1). Rozdělení napětí na lineární (konstantní) a nelineární, je důležité pro uvažování, resp. neuvažování při vyhodnocování jednotlivými metodami (například hodnotící napětí v metodě extrapolace tvarového napětí neobsahuje σ_{nl}).



Obrázek 2.1 Nelineární rozložení napětí – separace napětí. [6]

Části vrubového napětí:

- Membránové napětí σ_m

Membránové napětí má konstantní průběh po celé tloušťce součásti. Jeho hodnota je vypočtena jako aritmetický průměr z vrubového napětí (viz rovnice (2.1)).

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) dx \quad (2.1)$$

- Ohybové napětí σ_b

Lineárně rozložené napětí s nulovou hodnotou uprostřed tloušťky součásti (bod O). Gradient křivky je závislý na špičkovém napětí (hodnoty napětí v $x = 0$; $x = t$), tak aby byl v rovnováze s nelineárním průběhem vrubového napětí. Průběh popisuje rovnice:

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \int_{x=0}^{x=t} (\sigma(x) - \sigma_m) \cdot \left(\frac{t}{2} - x\right) dx \quad (2.2)$$

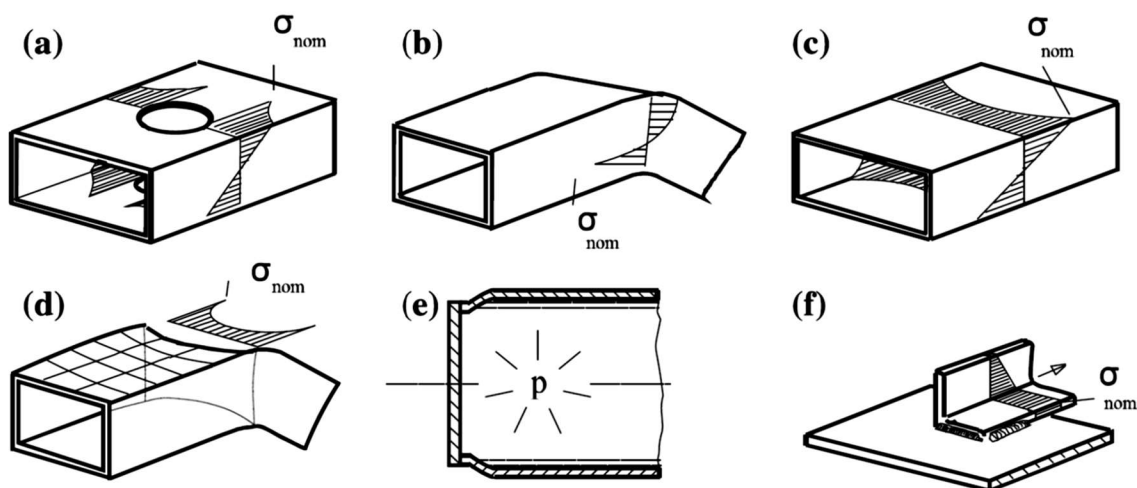
- Špičkové napětí σ_{nl}

Poslední část vrubového napětí má nelineární rozložení po tloušťce materiálu a vypočítá se podle rovnice (2.3).

$$\sigma_{nl} = \sigma(x) - \sigma_m - \left(1 - \frac{2x}{t}\right) \sigma_b \quad (2.3)$$

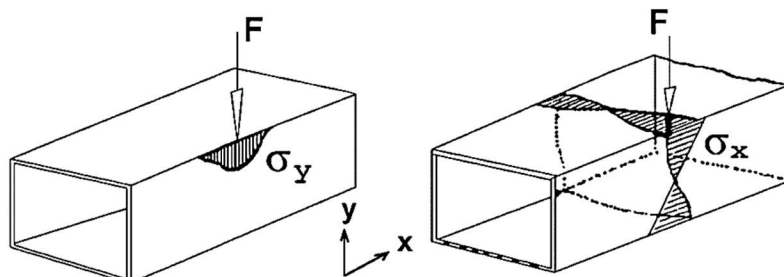
2.1 Nominální napětí

Tento přístup řeší svarové spoje pomocí nominálních napětí. Do výpočtu nominálního napětí se nezahrnují vlivy koncentrace napětí od geometrie svarového spoje. Účinky geometrie konstrukce jako jsou, koncentrace napětí okolo velkých děr a výřezů, vliv zakřivení prutu, smysl zatěžování, excentricita, atd. (viz obrázek 2.2 a obrázek 2.3) se do nominálního napětí zahrnují. Uvažuje se lineárně elastické chování materiálu.



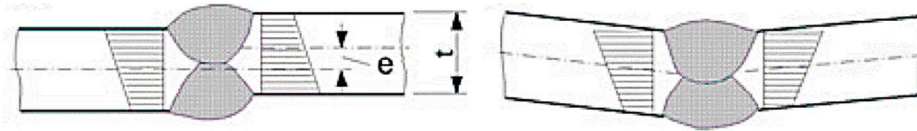
Obrázek 2.2 Vliv geometrie konstrukce na průběh σ_{nom} . [6]

Do nominálního napětí musí být zahrnuty účinky napěťových polí, která vznikají například v blízkosti osamělých sil. Těmito silami může být vytvořeno významné ohybové namáhání, viz obrázek 2.3.



Obrázek 2.3 Vliv osamělé síly na σ_{nom} . [6]

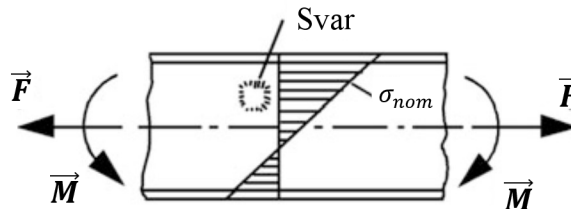
Další účinek ovlivňující σ_{nom} je excentricita a nesouosost. Je-li vliv nesouososti vyšší než vliv uvažovaný v S-N únavové křivce, lze jej dodatečně do výpočtu zahrnout korekčními koeficienty. Průběh napětí při výrazné excentricitě a nesouososti je vidět na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4 Vliv excentricity a nesouososti na σ_{nom} . [6]

2.1.1 Výpočet nominálního napětí

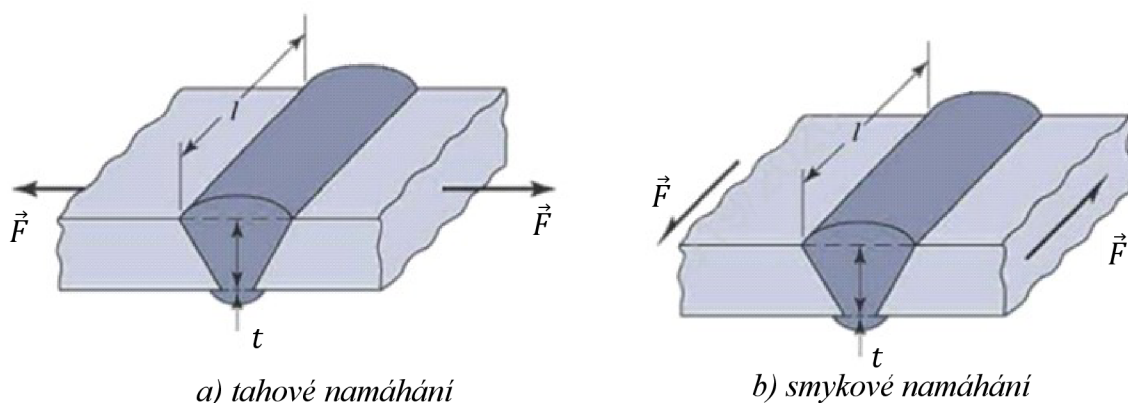
V případě, ve kterém lze zjednodušit daný problém na prutové těleso, je možné nominální napětí vyhodnocovat pomocí tohoto zjednodušení. Na obrázku 2.5 je prut namáháný silovými dvojicemi \vec{F} a silami \vec{M} , průběh σ_{nom} je vyjádřen na základě analytických vztahů.



Obrázek 2.5 Průběh nominálního napětí v prutovém prvku. [6]

Svarový spoj se hodnotí také na napětí vzniklé v nosném průřezu. Analytickým způsobem je možné hodnotit pouze geometricky jednoduché svarové spoje, jako je např. tupý svar viz obrázek 2.6.

Výpočet tupého svaru je závislý na jeho namáhání (tah/tlak, smyk, ohyb, krut a jejich kombinace). Pro jednoduchost si uvedeme pouze dva příklady namáhání. Napětí při namáhání, které je zobrazeno na obrázku 2.6 a) popisuje rovnice (2.4). Rovnice (2.5) určuje napětí smykově zatěženého svaru, obrázek 2.6 b).



Obrázek 2.6 Namáhání tupého svaru. [7]

$$\sigma_w = \frac{F}{S_w} = \frac{F}{l \cdot t} \quad (2.4)$$

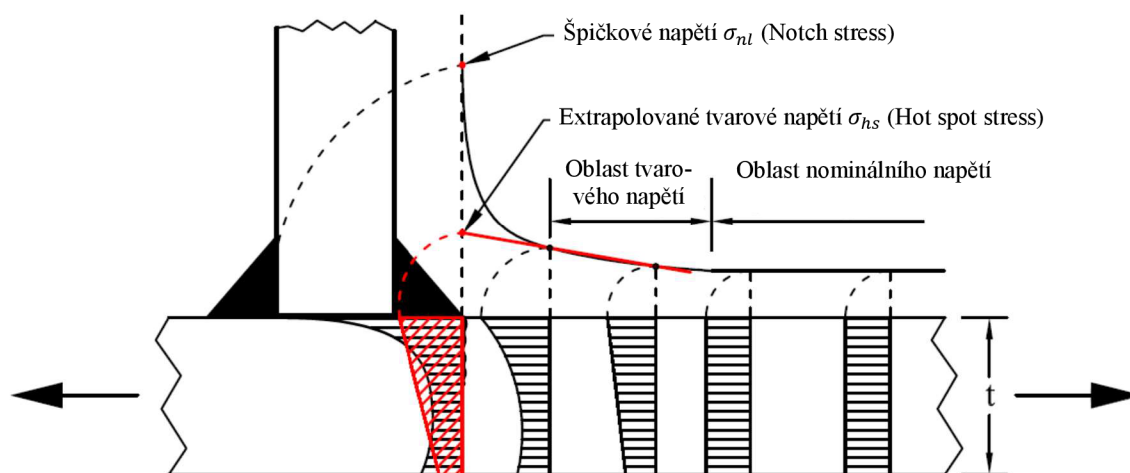
$$\tau_w = \frac{F}{S_w} = \frac{F}{l \cdot t} \quad (2.5)$$

Pokud daný problém nelze nijak zjednodušit a problém je příliš složitý a není ho možné popsat analytickými vztahy, lze vyjádřit σ_{nom} pomocí MKP. Při výpočtu pomocí MKP by měli být z σ_{nom} vyloučeny účinky koncentrace napětí od geometrie konstrukce. V případě použití MKP je vhodnější použít jinou metodu vyhodnocování svarového spoje, například metodu extrapolace tvarového napětí (kapitola 2.2).

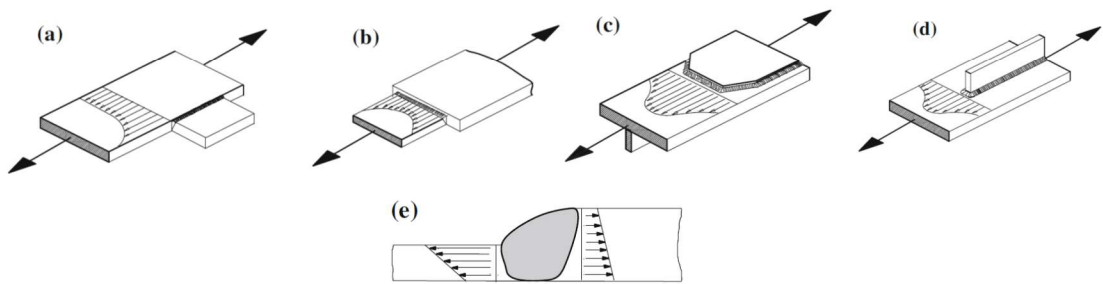
2.2 Extrapolace tvarového napětí

V angličtině je tato metoda známá pod termínem „Structural hot spot stress method“. Metoda se používá v případě značné složitosti svarových spojů, které nelze řešit analytickými metodami (metodou nominálního napětí viz kapitola 2.1 strana 13) nebo v případech, kde je nejednoznačně určitelné nominální napětí.

Tato metoda vyhodnocování svarových spojů zahrnuje do vypočteného napětí σ_{hs} všechny efekty zvyšující napětí (geometrické, konstrukční nelinearity, nepřesnosti, rozdílné tloušťky součástí, atd. viz obrázek 2.8) s výjimkou koncentrace napětí od samotného svarového spoje (špičkové napětí neboli „notch stress“, obrázek 2.7). Z čehož vyplývá, že lokální nelineární napětí σ_{nl} se neuvažuje, viz obrázek 2.1. Napětí σ_{hs} se stanovuje v patě svaru (nejpravděpodobnější místo iniciace trhliny) a to skrz tloušťku nebo na povrchu součástí.



Obrázek 2.7 Průběh napětí ve svaru. [8]



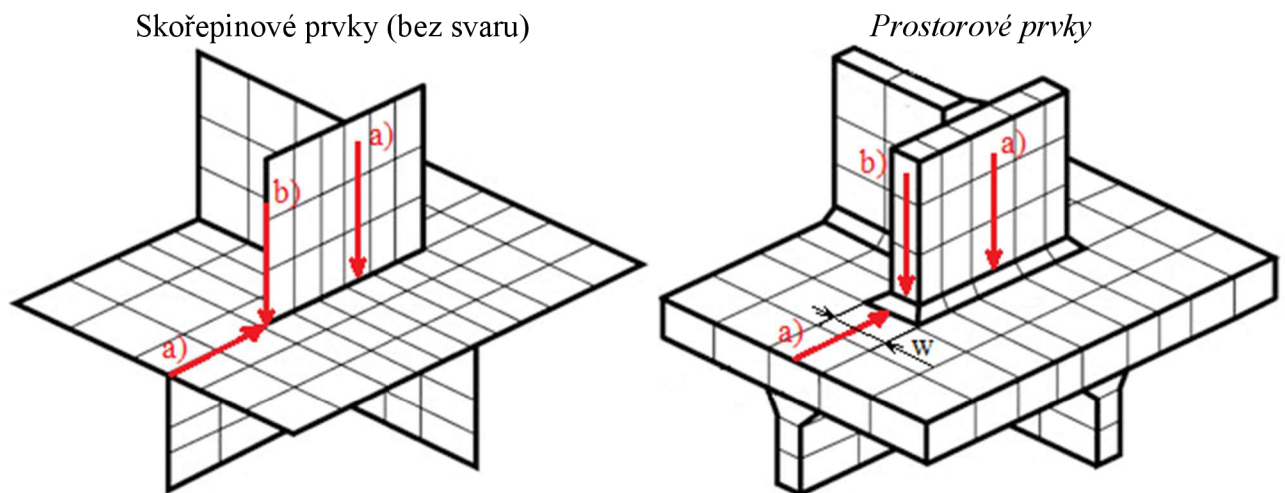
Obrázek 2.8 Konstrukční a geometrická koncentrace napětí. [6]

2.2.1 Výpočet extrapolovaného tvarového napětí

V tomto dokumentu se budeme zabývat pouze určením napětí na povrchu součásti.

Jak je již z názvu metody patrné, tato metoda pracuje s extrapolací tvarového napětí. Analytické vyjádření tvarového napětí velmi obtížné a parametrické vzorce pro daný tvar svaru jsou málokdy k dispozici, proto se využívá MKP analýza. Avšak aby mohly být výsledky považovány za relevantní, musí se MKP síť řídit určitými pravidly. Doporučené velikosti prvků jsou v tabulce 2.1, která koreluje s obrázkem 2.10 a obrázkem 2.11. Lze použít skořepinové i prostorové prvky. Prvky musí umožnit výpočet vysokého gradientu napětí v okolí svarového spoje.

Při vyhodnocování svarových spojů je nutno uvažovat i orientaci spoje. Tato orientace v materiálu vyvolává různé napětí, které je příslušným způsobem hodnoceno. Proto je zavedeno základní rozdělení na typ a) a typ b), viz obrázek 2.9.



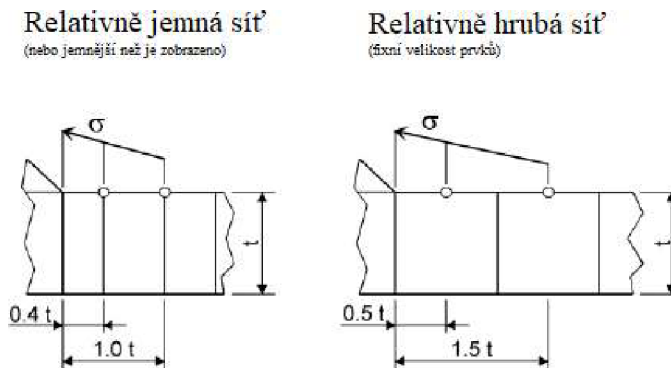
Obrázek 2.9 Určení typu namáhaného svarového spoje. [6]

Tabulka 2.1 Velikosti prvků a vzdálenosti extrapolačních bodů. [6]

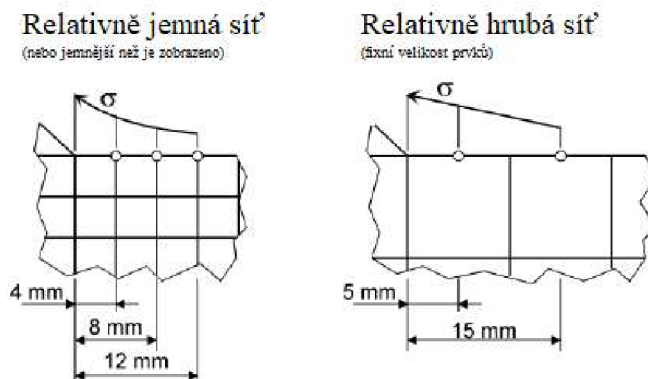
Typ modelu		„Relativně hrubá síť“		„Relativně jemná síť“	
		Typ a)	Typ b)	Typ a)	Typ b)
Velikost elementů	SP	$t \times t$ avšak maximálně $t \times \frac{w}{2}$	10 x 10 mm	$\leq 0,4 \cdot t \times t$ nebo $\leq 0,4 \cdot t \times \frac{w}{2}$	$\leq 4 \times 4$ mm
	PP	$t \times t$ avšak maximálně $t \times w$	10 x 10 mm	$\leq 0,4 \cdot t \times t$ nebo $\leq 0,4 \cdot t \times \frac{w}{2}$	$\leq 4 \times 4$ mm
Vzdálenost extrapolovaných bodů	SP	$0,5 \cdot t$ a $1,5 \cdot t$	5 a 15 mm	$0,4 \cdot t$ a t	4,8 a 12 mm
	PP	$0,5 \cdot t$ a $1,5 \cdot t$	5 a 15 mm	$0,4 \cdot t$ a t	4,8 a 12 mm

SP = Skořepinové prvky PP= Prostorové prvky w=šířka svaru (viz Obrázek 2.9)

Pozn.: ExtrapoláčnÍ body u modelů s „relativně hrubou sítí“ jsou v uzlech uprostřed hrany prvků (viz obrázek 2.10 vpravo). ExtrapoláčnÍ body u modelů s „relativně jemnou sítí“ jsou v uzlech v rozích prvků (viz obrázek 2.10 vlevo).



Obrázek 2.10 ExtrapoláčnÍ body - typ a). [6]



Obrázek 2.11 ExtrapoláčnÍ body - typ b). [6]

2.2.2 Hodnocení typu a)

Extrapolované tvarové napětí se počítá pomocí napětí v extrapoláčnících bodech a pomocí extrapoláčnících rovnic ((2.6) až (2.10)).

Při užití „relativně jemné sítě“ (maximální velikosti prvků $0,4 \cdot t$) se napětí vyhodnocuje pomocí dvou extrapoláčnících bodů ve vzdálenostech $0,4 \cdot t$ a t od paty svaru. Jedná se o lineární extrapolaci podle rovnice (2.6).

$$\sigma_{hs} = 1,67 \cdot \sigma_{0,4 \cdot t} - 0,67 \cdot \sigma_t \quad (2.6)$$

Další možností jak vyhodnocovat σ_{hs} je pomocí tří extrapoláčnících bodů. Jejichž vzdálenosti od paty svaru jsou $0,4 \cdot t$, $0,9 \cdot t$ a $1,4 \cdot t$. Tato kvadratická extrapolace (viz rovnice (2.7)) se používá v případě výrazně nelineárního průběhu napětí směrem k patě svaru. To je zapříčiněno prudkými změnami směru působící síly nebo tento průběh vzniká u silnostěnných konstrukcí.

$$\sigma_{hs} = 2,52 \cdot \sigma_{0,4 \cdot t} - 2,24 \cdot \sigma_{0,9 \cdot t} + 0,72 \cdot \sigma_{1,4 \cdot t} \quad (2.7)$$

„Relativně hrubá síť“ využívá prvky s vyšším řádem bázových funkcí (kvadratické prvky). Tvarové napětí je odečteno ve vzdálenostech $0,5 \cdot t$ a $1,5 \cdot t$ od paty svaru. Rovnice pro lineární extrapolaci:

$$\sigma_{hs} = 1,5 \cdot \sigma_{0,5 \cdot t} - 0,5 \cdot \sigma_{1,5 \cdot t} \quad (2.8)$$

2.2.3 Hodnocení typu b)

U hodnocení svaru typu b) nezávisí rozložení napětí na tloušťce desky. Proto jsou extrapoláčnící body definovány v přesně daných vzdálenostech od paty svaru.

Pro „relativně jemnou síť“ volíme kvadratickou extrapolaci. Vzdálenosti referenčních bodů jsou 4 mm, 8 mm a 12 mm. Extrapolace má tvar:

$$\sigma_{hs} = 3 \cdot \sigma_{4 \text{ mm}} - 3 \cdot \sigma_{8 \text{ mm}} + \sigma_{12 \text{ mm}} \quad (2.9)$$

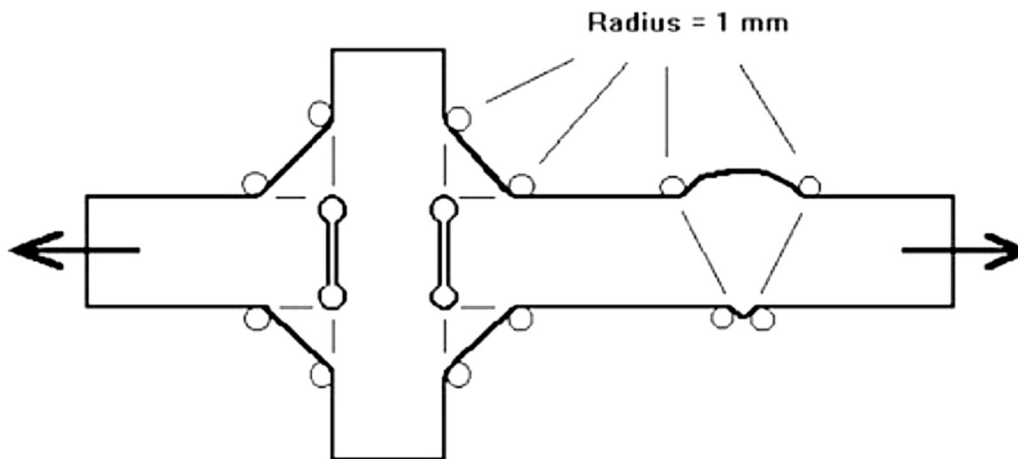
„Relativně hrubá síť“ využívá prvků s vyšším řádem bázových funkcí a lze použít lineární extrapolaci. Napětí je odečteno v extrapoláčnících bodech ve vzdálenosti 5 mm a 15 mm od paty svaru.

$$\sigma_{hs} = 1,5 \cdot \sigma_{5 \text{ mm}} - 0,5 \cdot \sigma_{15 \text{ mm}} \quad (2.10)$$

2.3 Efektivní vrubové napětí

Efektivní vrubové napětí je v anglických textech uváděno jako „Effective notch stress method“. Napětí je hodnoceno za předpokladu lineárně elastického chování materiálu. Reálný svarový spoj je nahrazen idealizovaným svarem. Iniciace trhliny se předpokládá v patě a kořeni svaru – místo s vysokým gradientem napětí. Aby byly zohledněny všechny nelinearity tvaru reálného svaru a nekonzistentní materiálové vlastnosti v oblasti svarového spoje, je svar zidealizován a v patě a kořeni svaru zaoblen. Pro dosažení relevantních výsledků je u konstrukčních ocelí a slitin hliníku stanoven poloměr zaoblení $r = 1 \text{ mm}$. Obrázek 2.12 zobrazuje zaoblení paty a kořene svaru.

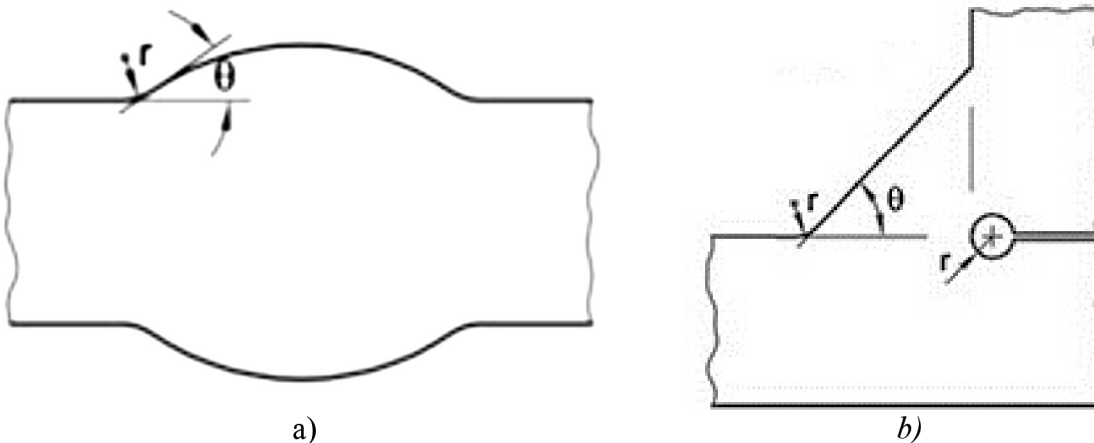
Metoda hodnotí napětí pouze v patě a kořeni svaru – v zidealizovaném vrubu. Pro hodnocení celého svarového spoje je zapotřebí zhodnotit i základní spojovaný materiál pomocí metody extrapolovaného tvarového napětí (kapitola 2.2 na straně 15).



Obrázek 2.12 Možnosti zaoblení svarových spojů. [6]

Použití metody je omezeno na tloušťky $t \geq 5$ mm. Při výpočtech s tloušťkou menší než 5 mm musí být výsledky prakticky ověřeny. Metoda není použitelná, pokud existuje významná složka napětí ve směru rovnoběžném se svarem. V analýze není uvažováno porušování vlivem růstu trhliny z drsnosti povrchu ani vady vzniklé nestandardním provedením svaru (studený svár, vměstky a další svarové nedokonalosti). Přístup efektivního vrubového napětí umožňuje porovnávat atypické geometrie svarů.

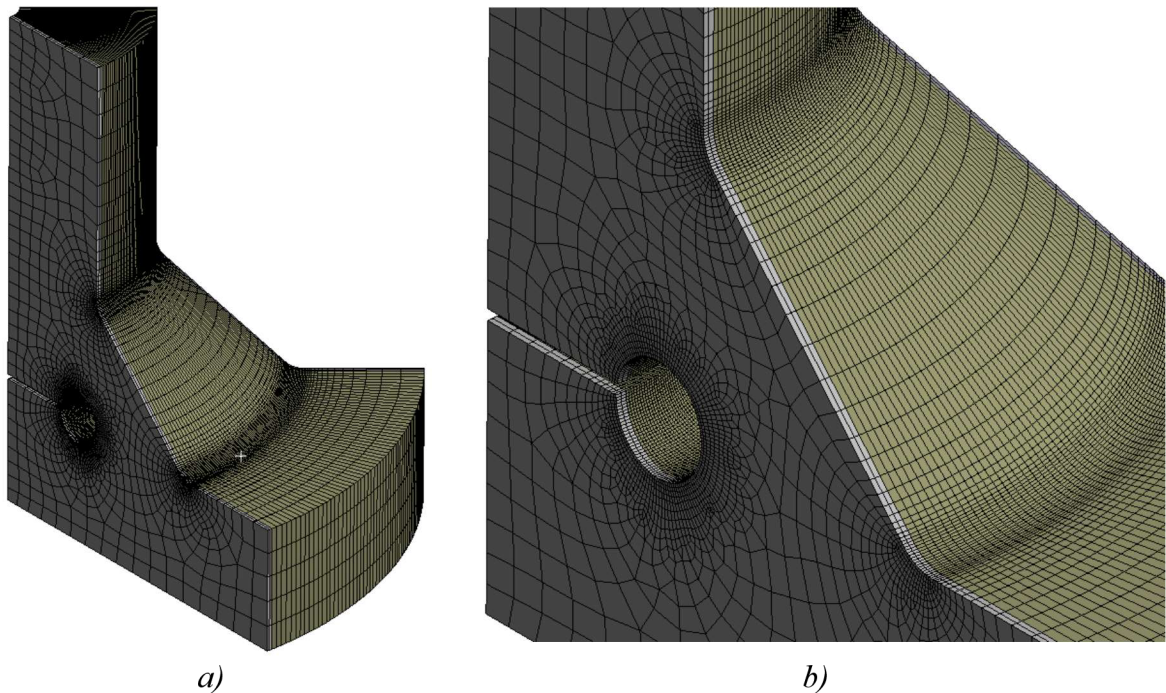
Pokud není uvedeno jinak, svarové spoje jsou modelovány s úhlem bočnice $\theta = 30^\circ$ pro tupé svary (obrázek 2.13 a)) a úhlem $\theta = 45^\circ$ u koutových svarů (obrázek 2.13 b)).



Obrázek 2.13 Úhel bočnice. Převzato a upraveno z [6].

2.3.1 Výpočet efektivního vrubového napětí

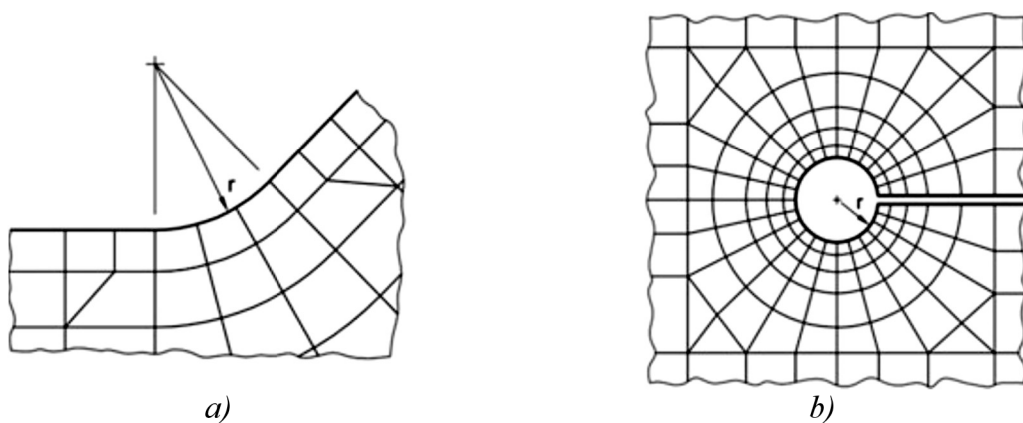
Efektivní vrubové napětí je vypočteno pomocí MKP programu. Model je vytvořený v souladu s předpisy uvedenými v IIW (viz obrázek 2.14). Důraz je kladen zejména na jemnost sítě konečných prvků (detail výpočtové sítě je na obrázku 2.14 b)).



Obrázek 2.14 3D model pro výpočet efektivního vrubového napětí. [3]

Pravidla tvorby sítě konečných prvků jsou odlišná pro různé báze funkce prvků. Pro prvky s lineárními bázeovými funkcemi a 360° zaoblením je absolutní velikost prvku $\leq 0,15$ mm a počet prvků na povrchu zaoblení nesmí být menší než 40. Maximální velikosti prvků by měli být dodrženy i na začátcích rovných ploch. Všechny doporučení jsou uvedeny v tabulce 2.2 korelující s obrázkem 2.15.

Ve vytvořeném vrubu (pata a kořen svaru) by mělo být efektivní vrubové napětí nejméně 1,6krát větší, než napětí vypočtené metodou extrapolace tvarového napětí (kapitola 2.2 stránka 15).



Obrázek 2.15 Doporučená diskretizace geometrie v oblasti zaoblení. [6]

Tabulka 2.2 Doporučené velikosti prvků na povrchu zaoblení. [6]

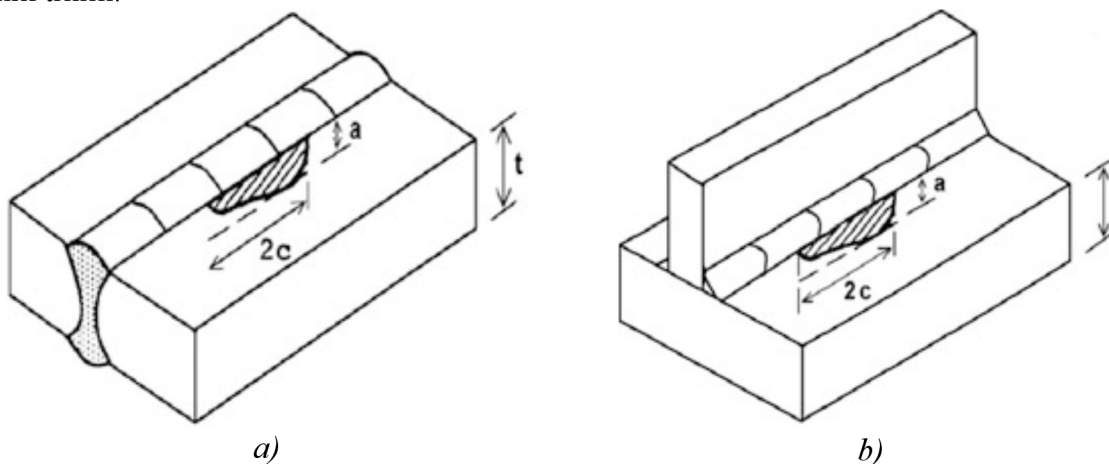
Typ prvků	Relativní velikost	Absolutní velikost [mm]	Počet prvků na 45° zaoblení obrázek 2.15 a)	Počet prvků na 360° zaoblení obrázek 2.15 b)
Kvadratické	$\leq r/4$	$\leq 0,25$	≥ 3	≥ 24
Lineární	$\leq r/6$	$\leq 0,15$	≥ 5	≥ 40

V určitých případech lze problém zjednodušit z trojrozměrného (prostorové prvky) na dvojrozměrný (rovinné prvky), ale pouze při splnění těchto předpokladů:

- Zatížení je ve směru kolmém na svarový spoj. To znamená že, normálové a smykové napětí ve směru rovnoběžném se svarem jsou nulové, nebo zanedbatelně malé.
- Zatížení ani geometrie by se neměly lišit v oblasti, která je posuzována.

2.4 Součinitel intenzity napětí

Tato metoda je vhodná pro svarové spoje s již vzniklými defekty (trhliny, vady připomínající trhliny, nebo jiné koncentrátoři napětí, viz obrázek 2.16) nebo pro spoje které iniciují vznik trhlín.



Obrázek 2.16 Příklady trhlín svarového spoje. [6]

Posuzování životnosti je založeno, na výpočtu součinitele intenzity napětí. Metoda je vhodná pro tyto případy:

- Posouzení lomu u svarů s trhlinami (zejména křehký lom).
- Určení životnosti spojů obsahující trhliny nebo nedokonalosti podobné trhlinám.
- Spoje s vysokou pravděpodobností vzniku trhlín (koncentrátoři napětí¹).

Výpočet je prováděn na základě analyticko-empirických vztahů, uvedených například v dokumentu IIW. Základní vzorec pro určení součinitele intenzity napětí:

$$K = \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \left(\sigma_m(a) \cdot Y_m(a) \cdot M_{k,m}(a) + \sigma_b(a) \cdot Y_b(a) \cdot M_{k,b}(a) \right) \quad (2.11)$$

¹ Svarová geometrie s geometrickými prvky podporující nukleaci trhlín (např. ostré hrany, prudké změny tvaru svaru, apod.)

V případě geometricky složitých spojů lze použít pro určení součinitele intenzity napětí MKP. K predikci únavového poškození lze použít Parisuv vztah:

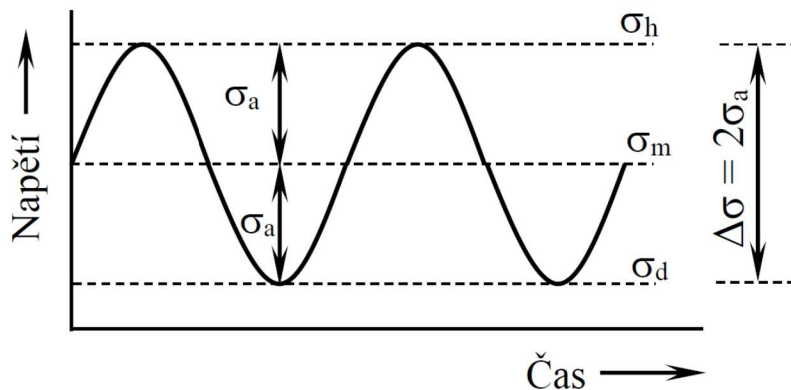
$$\frac{da}{dN} = C_0 \cdot \Delta K^{m'} \quad (2.12)$$

Detailní popis metody je uveden v dokumentu IIW, [6]. Do výpočtové části tato metoda zahrnuta nebude.

3 Determinace únavové životnosti svarového spoje

Únavové poškození materiálu je systematicky zkoumáno již více než 150 let. Přesto, že se za takto dlouhé období nashromáždilo značné množství experimentálních i teoretických materiálů, zůstává stále mnoho problémů, které vyžadují další detailní studium, např. únavové namáhání svarových spojů. [9]

Únavová životnost je závislá na průběhu zatížení v čase. Průběhy mohou být harmonické (viz obrázek 3.1) nebo neharmonické (například stochastické).



Obrázek 3.1 Cyklický průběh napětí. [9]

Pro správné určení životnosti je důležité zahrnout všechna časově proměnlivá i neproměnlivá zatížení. Napětí ve svařovaných konstrukcích mohou vzniknout prostřednictvím různých vnějších vlivů, jako například vodních vln, sněhových srážek, akcelerací, dynamickými odezvami soustavy nebo teplotními změnami. Nezahrnutí všech napětí je jedním z hlavních důvodů vzniku havárií spojených s únavovým poškozením.

Doporučení uvedená v dokumentech IIW, jsou omezena pouze pro použití konstrukčních ocelí a hliníkových slitin. Pro konstrukční oceli platí maximální mez kluzu $R_e = 960$ MPa. Dalším limitním faktorem je velikost maximálního rozkmitu napětí. Rozkmit normálového napětí nesmí přesáhnout velikost $1,5 \cdot R_e$. Pro smykové napětí je stanoven limit $\frac{1,5}{\sqrt{3}} \cdot R_e$.

Pro vyhodnocení životnosti konstrukce jsou potřebné hodnoty rozkmitu napětí² $\Delta\sigma$ nebo hodnoty rozkmitu součinitele intenzity napětí ΔK , vztahy uvedené v rovnicích (3.1) a (3.2). [6]

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (3.1)$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (3.2)$$

Počty cyklů, které svarový spoj přenesou do nastání mezního stavu únavové pevnosti je určen z rovnice (3.3).

$$N_f = \frac{C}{\Delta\sigma^m} \quad N_f = \frac{C}{\Delta\tau^m} \quad (3.3)$$

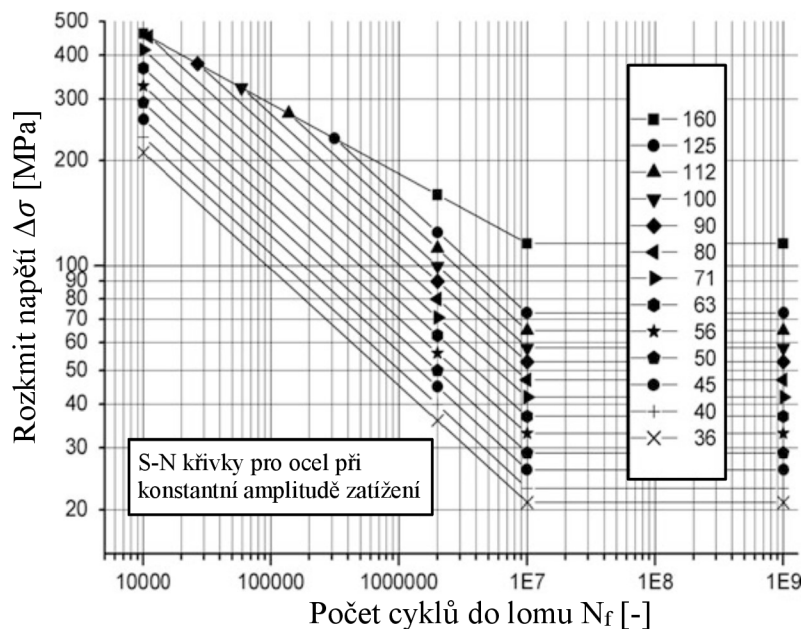
² Rozkmitu napětí je u metody extrapolace tvarového napětí a u metody efektivního napětí určena pomocí prvního hlavního napětí σ_1 . [6]

3.1 Metoda nominálních napětí

Únavová životnost analyzovaná metodou nominálních napětí je nejstarší metodou z výše uvedených. Tato metoda vyhodnocování existovala v době, kdy ještě nebylo rozvinuto MKP. Stanovení životnosti může být založeno na analytických výpočtech.

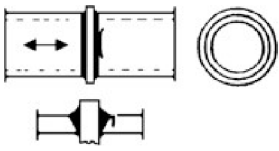
Tato metoda hodnotí svarové spoje na základě nominálního napětí σ_{nom} . Pro vyhodnocení životnosti je zapotřebí určit tvar svarového detailu. Na základě svarového detailu je stanovena FAT třída. Hodnocený svar by měl být co nejvíce tvarově shodný se svarovým detailem. Podobnost by měla být i ve smyslu zatěžování. Třída FAT určuje závislost mezi rozkmitem napětí $\Delta\sigma$ a počtem cyklů do lomu N_f – závislost je známá pod pojmem S-N křivka (obdoba Wöhlerovy křivky). Jednotlivé S-N křivky s odpovídajícími třídami FAT jsou zobrazeny v grafu 3.1.

V tabulce 3.1 je příklad svarového detailu, určení třídy FAT a požadavky na svarový spoj.



Graf 3.1 S-N křivky konstrukční oceli pro metodu nominálního napětí. [6]

Tabulka 3.1 Detail svarového spoje, metoda nominálních napětí. Převzato z [6].

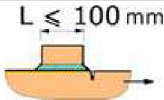
Svarový detail	Popis svaru	FAT ocel	FAT hliník	Požadavky
	<p>Svarový spoj trubek s plechem uprostřed, jednostranné tupé svary, předpokládané místo porušení – kořen svaru</p> <p>Tloušťka stěny > 8 mm</p> <p>Tloušťka stěny < 8 mm</p>	56	52	Zajištění plného provaření kořenu svaru
		50	20	

3.2 Metoda extrapolovaného tvarového napětí

Životnost se posuzuje pomocí S-N křivek ve kterých je definovaná třída FAT. Ke každému detailu svaru je přiřazena třída FAT. V tabulce 3.2 je uveden příklad přiřazení třídy FAT. S-N křivky mají stejný průběh jako u metody nominálních napětí (viz kapitola 3.1, graf 3.1).

Přiřazené třídy FAT zahrnují negativní účinky vysokého zbytkového napětí, které vznikají tepelným ovlivněním materiálu. Dále jsou zahrnuty vlivy vzniklé prostřednictvím malých nepřesností.

Tabulka 3.2 Detail svarového spoje, metoda extrapolace tvarového napětí. Převzato z [6].

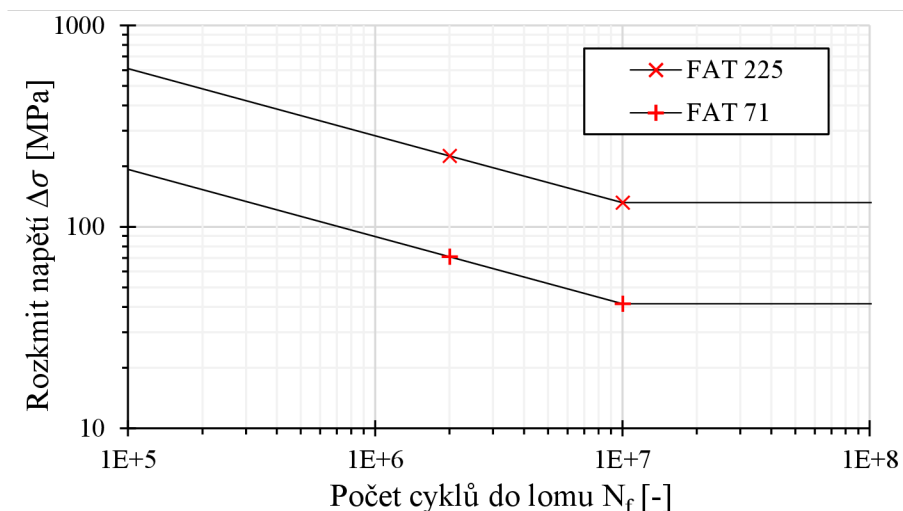
Svarový detail	Popis svaru	Požadavky	FAT ocel	FAT hliník
	Svar typu „b“ Krátký nezatížený	Plně provařený	100	40

Svarové detaily by měli být určovány na základě tvarové podobnosti a na podobném smyslu zatěžování.

3.3 Metoda efektivního vrubového napětí

Hodnocení únavové životnosti metodou efektivního vrubového napětí za konstantní amplitudy je určeno na základě jedné S-N křivky – geometrie svaru nemá vliv na určení třídy FAT (třída FAT ovlivní pouze materiál). Třída FAT 225 je určena pro konstrukční ocele, pro hliníkové slitiny se užívá třída FAT 71 (viz graf 3.2). Předpokládá se standardní kvalita svaru. Třídy FAT zahrnují zbytkové napětí. Napětí vzniklé nesouměrnostmi a dalšími nepřesnostmi nejsou v třídách FAT zahrnuty. Musí být proto zahrnuto do výpočtového modelu dodatečně.

Pro hodnocení celého svarového spoje je zapotřebí zhodnotit i základní spojovaný materiál pomocí metody extrapolovaného tvarového napětí (kapitola 2.2 stránka 15).



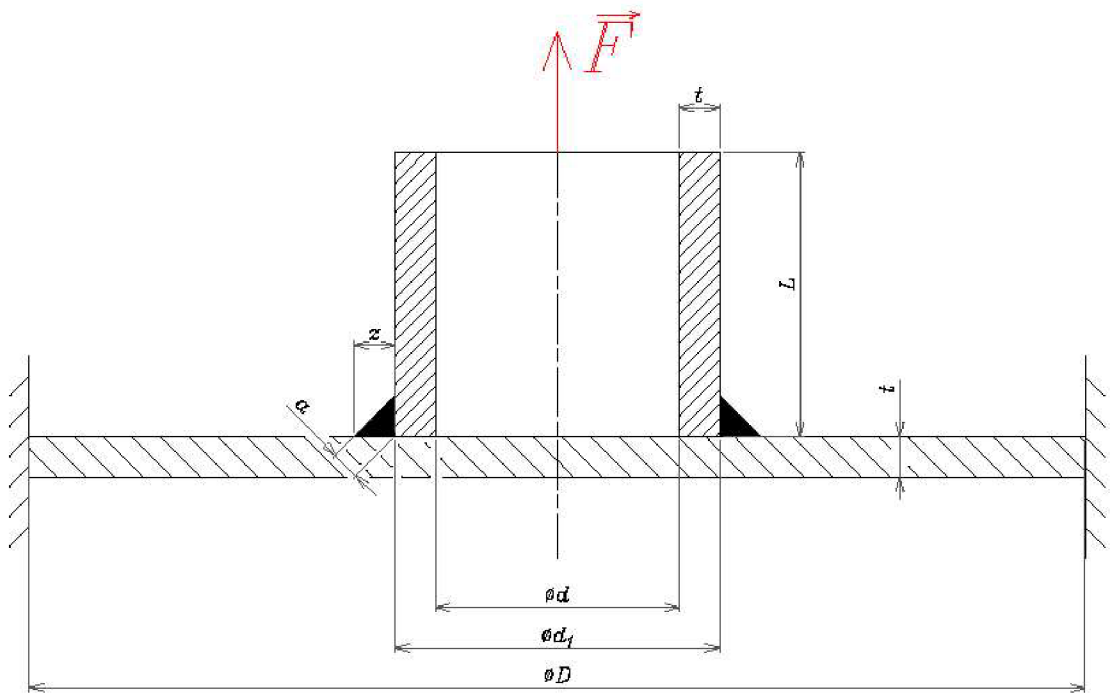
Graf 3.2 S-N křivky pro metodu efektivního vrubového napětí. [6]

4 Praktická část

Pro účely této bakalářské práce byl zvolen jednoduchý tvar svarového spoje, viz obrázek 4.1. Svařovaná komponenta se skládala z trubky, která byla přivařena ke kruhové desce. Kruhová deska byla na vnějším okraji připevněna k dokonale tuhému tělesu³.

V této bakalářské práci proběhla analýza následujícími metodami.

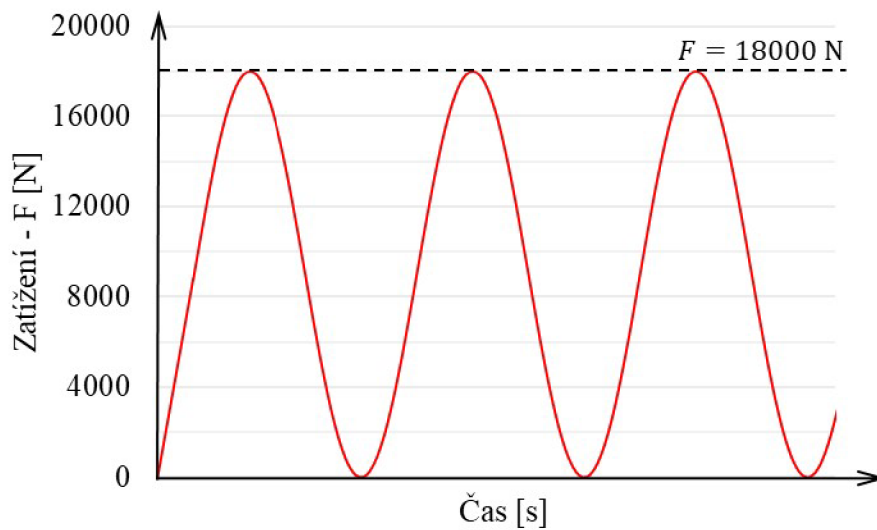
- Metodou nominálních napětí (kapitola 5)



Obrázek 4.1 Řešený problém – spoj trubky s kruhovou deskou.

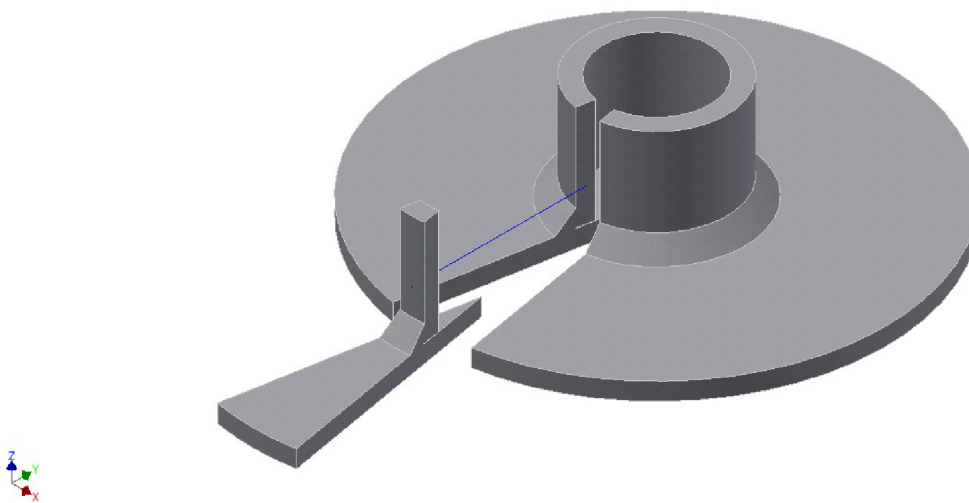
Okrajové podmínky: $F = 18000 \text{ N}$ (průběh v čase je zobrazen v grafu 4.1); $\phi d = 60 \text{ mm}$; $\phi d_1 = 80 \text{ mm}$; $\phi D = 260 \text{ mm}$; $t = 10 \text{ mm}$; $L = 60 \text{ mm}$; $z = 10 \text{ mm} \rightarrow a = 7,071 \text{ mm}$; $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$; $R_e = 900 \text{ MPa}$; $\mu = 0,3$

³ Připevnění k dokonale tuhému tělesu může být v reálném světě reprezentováno například vetknutím do zdi.



Graf 4.1 Závislost zatížení na čase.

Při řešení spoje trubky s kruhovou deskou byla využita symetrie. Při vytváření výpočtového modelu byla využita pouze výseč celkového tvaru (středový úhel $\alpha = 20^\circ$). Výseč byla použita z důvodu zmenšení výpočetní náročnosti. Výseč je zobrazena na obrázku 4.2.



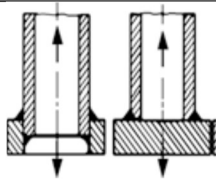
Obrázek 4.2 Prostorová reprezentace řešeného problému – výseč.

Příloha práce obsahuje soubory se sítěmi konečných prvků ve formátu *.med* a soubory *.comm*, ve kterých byli nastaveny vstupní parametry, které *Code-Aster* potřeboval k uskutečnění výpočtů (soubory byli vytvořeny v programu *SALOME 6*, *.med* soubory byli exportovány z modulu *Mesh* a soubory *.comm* byli vytvořeny v modulu *Eficas*).

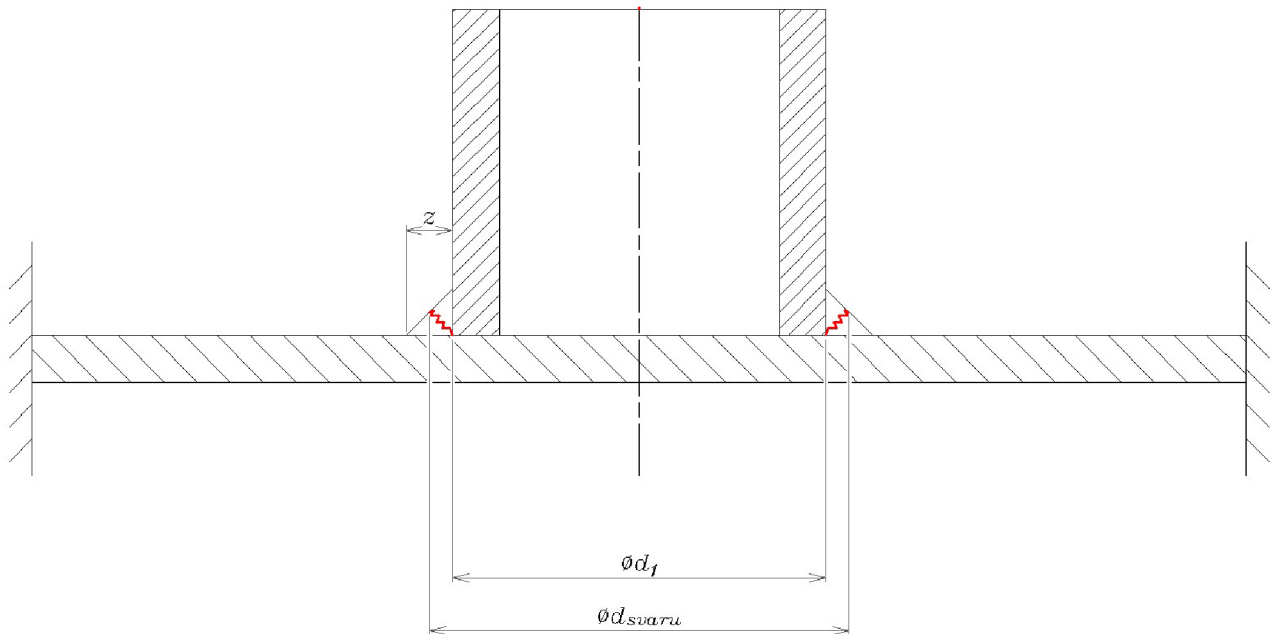
5 Hodnocení metodou nominálních napětí

Svarový spoj je hodnocen pomocí nominálního napětí vzniklého ve svarové housence nebo napětím v základním materiálu. Na základě tvarové podobnosti a podobnosti smyslu zatěžování svarového spoje trubky s deskou byl určen svarový detail číslo 913, viz tabulka 5.1.

Tabulka 5.1 Detail svarového spoje – metoda nominálních napětí. Převzato z [6].

De- tail	Svarový detail	Popis svaru	Požadavky	FAT ocel	FAT hliník
913		Koutový svar nebo částečně provařený svarový spoj mezi trubkou a přírubou. Předpokládané místo porušení – kořen svaru.	Při výskytu trhlin v kořeni svaru (zjištěných pomocí nedestruktivních zkoušek NDT) mohou být při vyhodnocování zahrnuty bezpečnostní koeficienty nebo může být snížena třída FAT.	50	18

Spoj byl kontrolován na porušení, které by vzniklo v oblasti kořenu svaru. Uvažovaná výpočtová plocha svaru byla charakterizována přímkou, která vznikla spojením nejhlubšího bodu ve svaru (v případě detailu 913 byl nejhlubší bod v kořenu svaru) a povrchu svarové housenky. Výpočtová plocha vznikla rotací přímky kolem osy trubky. Průřez je červenou čarou vyznačen na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1 Uvažovaný průřez svarového spoje trubky s deskou.

$$d_{svaru} = d_1 + z = 80 + 10 = 90 \text{ mm}$$

Výpočet nejmenšího možného průřezu svarové housenky:

$$S_w = \pi \cdot \left(\frac{d_{svaru} + d_1}{2} \right) \cdot z \cdot \cos 45^\circ = \pi \cdot \left(\frac{90 + 80}{2} \right) \cdot 10 \cdot \cos 45^\circ = 1888,25 \text{ mm}^2$$

Výpočet nominálního napětí v průřezu svarového spoje:

$$\sigma_w = \frac{F}{S_w} = \frac{18000}{1888,25} = 9,53 \text{ MPa}$$

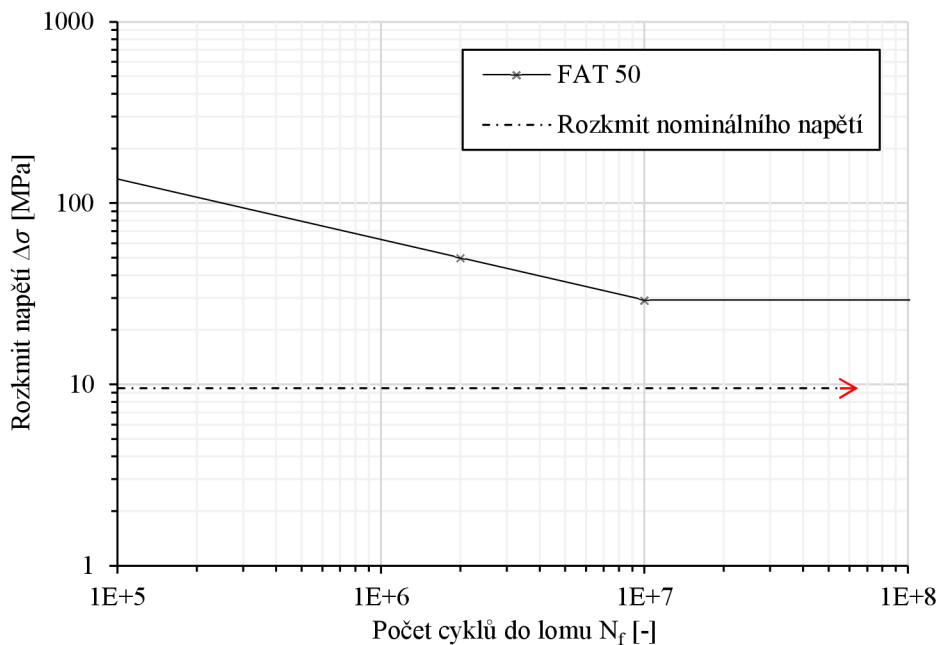
5.1 Určení životnosti

Svarovému detailu odpovídá třída FAT, která charakterizuje napětí, při kterém se součást poruší po $2 \cdot 10^6$ cyklech. Svarovému detailu č. 913 odpovídá třída FAT 50.

Průběh S-N křivky je do hodnoty $N = 10^7$ cyklů charakterizován rovnicí (3.3). Exponent m pro tuto metodu hodnocení nabývá hodnoty $m = 3$. Dle charakteristiky třídy FAT (uvedené výše) a rovnice (3.3), byl vypočten koeficient C . Hodnota koeficientu je $C = 2,5 \cdot 10^{11}$.

Rozkmit napětí, pro něj platí dle S-N křivky neomezená životnost, byl vypočten pomocí vstupních parametrů uvedených výše a rovnice (3.3). Hodnota rozkmitu pro neomezenou životnost svaru je $\Delta\sigma_\infty \cong 29,24 \text{ MPa}$.

Velikost rozkmitu nominálního napětí ve svaru bylo v případě harmonického mívivého namáhání rovno $\Delta\sigma = \sigma_{max} - (\sigma_{min}) = 9,53 - (0) = 9,53 \text{ MPa}$. Životnost svarového spoje analyzována metodou nominálních napětí byla stanovena na více než 10^7 cyklů. ($\Delta\sigma_\infty > \Delta\sigma$). Grafické znázornění S-N křivky je zobrazeno v grafu 5.1.



Graf 5.1 S-N křivka s vyznačenou únavovou životností dle metody nominálního napětí.

6 Hodnocení metodou extrapolace tvarového napětí

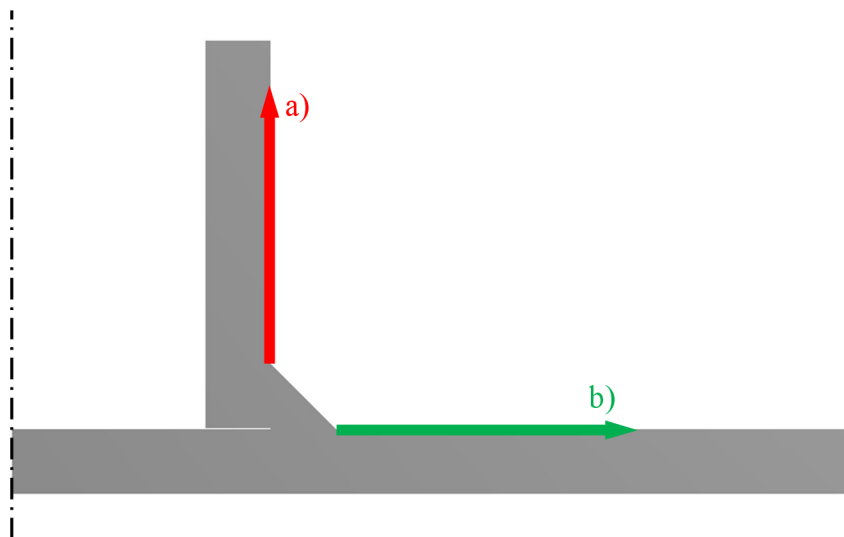
Metoda hodnotí životnost svaru pomocí extrapolovaného tvarového napětí σ_{hs} , S-N křivka a příslušné třídy FAT. Metoda extrapolace tvarového napětí hodnotí svar pouze na poškození v patě svaru.

Extrapolace byla konstruována pomocí dvou, resp. tří bodů, jedná se tedy o lineární, resp. kvadratickou extrapolaci. Po tloušťce materiálu byl uvažován konstantní průběh napětí. Extrapolace napětí je tedy provedena na povrchu součásti (vnější povrch trubky, horní povrch desky).

Svar bude vyhodnocován dvěma druhy geometrie:

- Modely geometrie s objemovou reprezentací svaru (kapitola 6.1)
- Modely geometrie tvořené střednicovými plochami (kapitola 6.2)

Napětí je možné extrapolovat na povrchu trubky (obrázek 6.1 trajektorie a)) nebo na povrchu desky (obrázek 6.1 trajektorie b)). Pro stanovení životnosti svarového spoje bude použita kritičtější hodnota extrapolovaného napětí. V případě spoje trubky s deskou je hodnota σ_{hs} vyšší při extrapolaci napětí z povrchu desky (trajektorie b)).



Obrázek 6.1 Možné extrapolační cesty.

6.1 Modely geometrie s objemovou reprezentací svaru

Modely geometrie s objemovou reprezentací svaru zahrnují celkový tvar svarového spoje (včetně ostrých hran a přechodů). U výpočtových modelů s „relativně jemnou sítí“ roste náročnost na výpočtový výkon. Snížení výpočtové náročnosti modelu je docíleno použitím:

- Rotační symetrií (výseč se středovým úhlem $\alpha = 20^\circ$, kapitola 6.1.1)
- Osovou symetrií (zjednodušení na rovinný problém, kapitola 6.1.2)

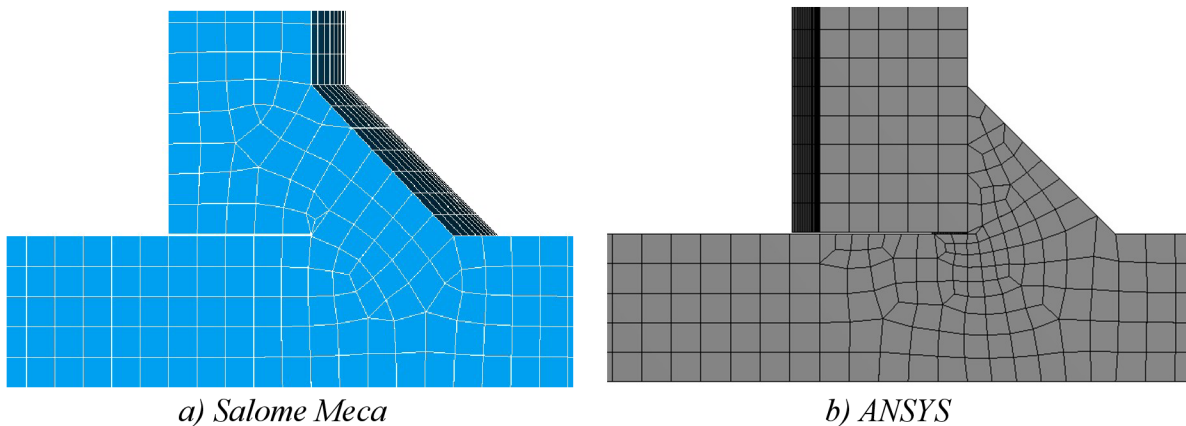
Ve výpočtovém modelu je vymodelováno odsazení mezi trubkou a deskou. Velikost odsazení je 0,1 mm. Odsazení vystihuje reálný tvar svarového spoje – svarová housenka nezasahuje do základního materiálu (trubka, deska). Odsazení je zobrazeno na obrázku 6.2.



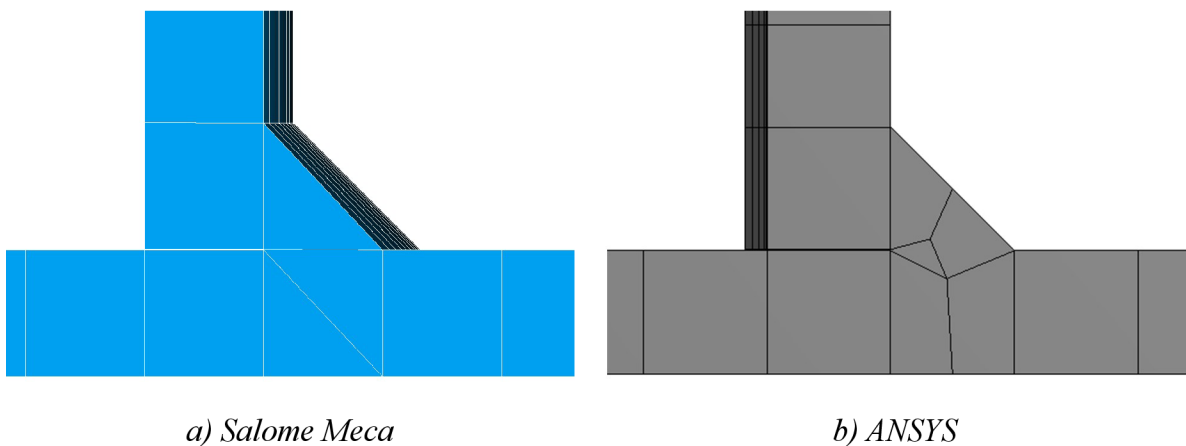
Obrázek 6.2 Osazení mezi trubkou a deskou.

Analýza je prováděna na modelech s různou jemností sítě konečných prvků. Diskretizace modelu geometrie s „relativně jemnou sítí“ je zobrazena na obrázku 6.3, model geometrie s „relativně hrubou sítí“ je na obrázku 6.4. Pro výpočet svarového spoje trubky s deskou jsou použity velikosti a typy prvků:

- Kvadratické prvky o velikosti tloušťky materiálu – lineární extrapolace napětí
- Lineární prvky o velikosti $0,2 \cdot t$ – lineární extrapolace napětí
- Lineární prvky o velikosti $0,1 \cdot t$ – kvadratická extrapolace napětí



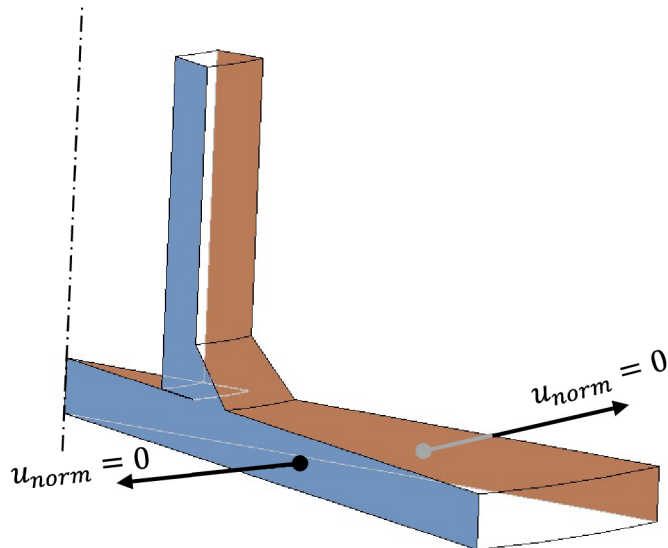
Obrázek 6.3 „Relativně jemná síť“ pro metodu extrapolace tvarového napětí.



Obrázek 6.4 „Relativně hrubá síť“ pro metodu extrapolace tvarového napětí.

6.1.1 Rotační symetrie

Model geometrie řešený pomocí rotační symetrie byl tvořen prostorovými prvky. Geometrie výpočetního modelu rotační symetrie byla kruhová výseč se středovým úhlem $\alpha = 20^\circ$. Pro uplatnění rotační symetrie byly nastaveny okrajové podmínky vyznačené na obrázku 6.5 (nulové posuvy v normálovém směru plochy řezu - $u_{norm} = 0$)



Obrázek 6.5 Okrajové podmínky pro výpočtový model rotační symetrie.

Výsledné hodnoty z obou výpočetních softwarů jsou zaneseny do tabulek níže. Cesta pro odečítání napětí je zobrazena na obrázku 6.6. Hodnoty napětí σ_1 jsou zaneseny do grafu 6.1 (pro přehlednost práce je uveden pouze průběh jednoho výpočtového modelu – síť s prvky o velikosti $0,1 \cdot t$). Extrapoláční body jsou voleny podle doporučení IIW. Stručný souhrn doporučení je v kapitole 2.2.2

Tabulka 6.1 Napětí z modelu rotační symetrie s „relativně hrubou sítí“ (vel. prvků t).

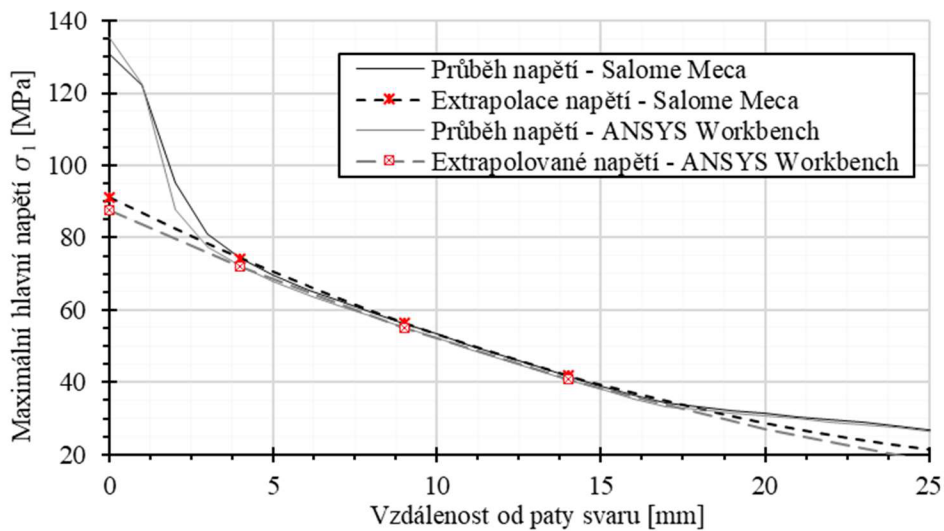
Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]		
	$\sigma_{0,5 \cdot t} = \sigma_{5 \text{ mm}}$	$\sigma_{1,5 \cdot t} = \sigma_{15 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	61,61	32,84	76
ANSYS Workbench	69,24	38,98	84,38

Tabulka 6.2 Napětí z modelu rotační symetrie s „relativně jemnou sítí“ (vel. prvků $0,2 \cdot t$).

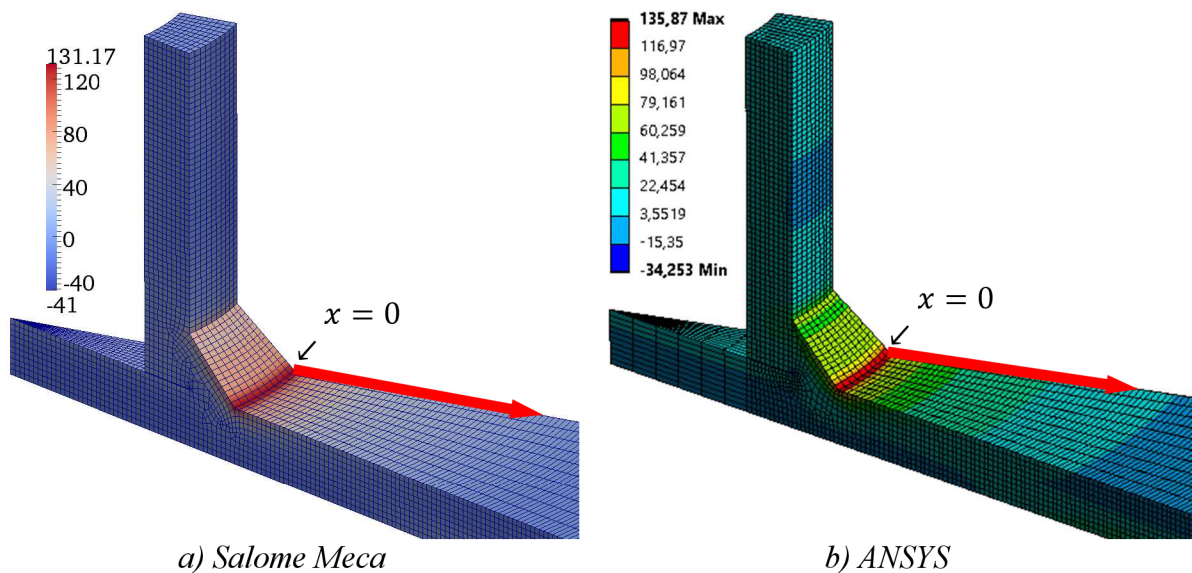
Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]		
	$\sigma_{0,4 \cdot t} = \sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_t = \sigma_{10 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	78,27	54,3	94,33
ANSYS Workbench	74,49	52,5	89,21

Tabulka 6.3 Napětí z modelu rotační symetrie s „relativně jemnou sítí“ (vel. prvků $0,1 \cdot t$).

Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]			
	$\sigma_{0,4 \cdot t} = \sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_{0,9 \cdot t} = \sigma_{9 \text{ mm}}$	$\sigma_{1,4 \cdot t} = \sigma_{14 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	74,23	56,31	41,72	90,96
ANSYS Workbench	72,13	55,14	40,73	87,57



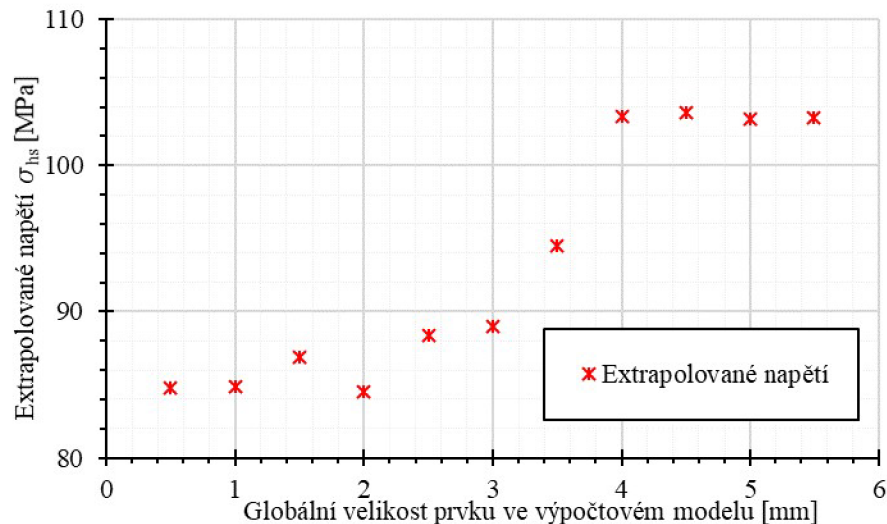
Graf 6.1 Průběh σ_1 u modelu rotační symetrie s „relativně jemnou sítí“ (vel. prvků $0,1 \cdot t$)



Obrázek 6.6 Cesta pro odečtení σ_1 u modelu rotační symetrie (vel. prvků $0,1 \cdot t$).

Korektní volba velikosti prvků byla ověřena pomocí citlivostní analýzy. Bylo analyzováno výsledné extrapolované tvarového napětí σ_{hs} (extrapolace je provedena pomocí σ_1 v extrapoláčních bodech dle rovnice (2.6) z kapitoly 2.2.2). Hodnoty napětí byly vneseny do

grafu 6.2. Zjemňováním sítě konečných prvků napětí konverguje na ustálenou hodnotu. Velikost prvku zvolená ve výpočtovém modelu s „relativně jemnou sítí“ ($0,2 \cdot t = 2 \text{ mm}$) je v oblasti ustáleného napětí. Z tohoto důvodu považuji volbu velikosti prvků za korektní.

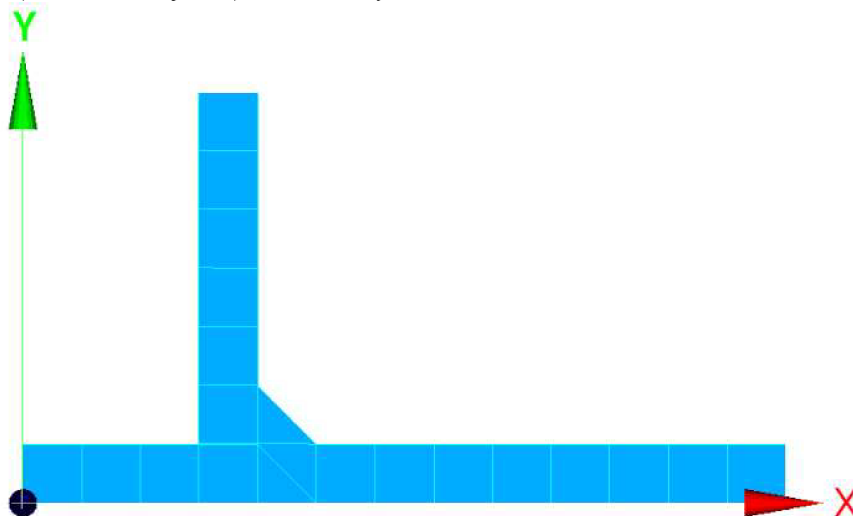


Graf 6.2 Citlivostní analýza extrapolovaného tvarového napětí.

6.1.2 Osová symetrie

Sítě konečných prvků výpočtových modelů řešených osovou symetrií byli tvořeny rovinnými prvky. Geometrie tvořené rovinnými prvky obsahují mnohonásobně méně prvků oproti modelům využívající prostorové prvky (rotační symetrie). Z tohoto důvodu byly řešené modely méně hardwarově náročné. Značnou nevýhodou jsou podmínky použitelnosti osové symetrie (pravidelnost tvaru - v praxi se s takovým problémem málokdy setkáme, obzvláště u složitých svařovaných konstrukcí).

Geometrie výpočtového modelu je tvořena meridiánovým řezem. Při řešení úloh osové symetrie, mají oba výpočtové programy nastavenou osu y jako osu rotace. Modely musí mít síť konečných prvků (meridiánový řez) v rovině xy . viz obrázek 6.7.



Obrázek 6.7 Umístění meridiánového řezu do prostoru výpočetního programu. (rovina xy)

Výsledné hodnoty z obou výpočetních softwarů jsou zaneseny do tabulek níže. Cesta pro odečítání napětí je zobrazena na obrázku 6.8. Hodnoty prvních hlavních napětí jsou vykresleny v grafu 6.3 (pro přehlednost práce je uveden pouze průběh jednoho výpočtového modelu – síť s prvky o velikosti $0,2 \cdot t$). Extrapolační body jsou voleny podle doporučení IIW. Stručný souhrn doporučení je v kapitole 2.2.2.

Tabulka 6.4 Napětí z modelu osově symetrie s „relativně hrubou sítí“ (vel. prvků t).

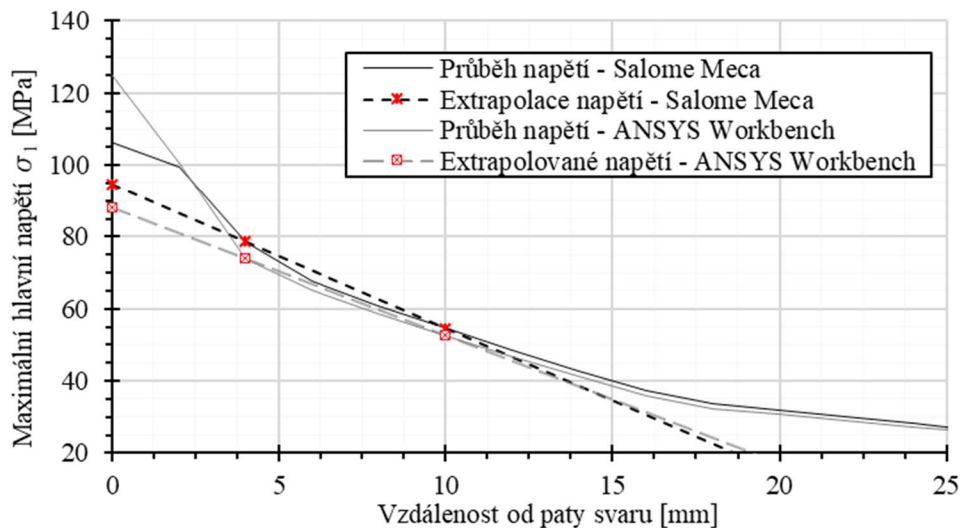
Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]		
	$\sigma_{0,5 \cdot t} = \sigma_{5 \text{ mm}}$	$\sigma_{1,5 \cdot t} = \sigma_{15 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	61,53	32,76	75,92
ANSYS Workbench	66,68	39,18	80,43

Tabulka 6.5 Napětí z modelu osově symetrie s „relativně jemnou sítí“ (vel. prvků $0,2 \cdot t$).

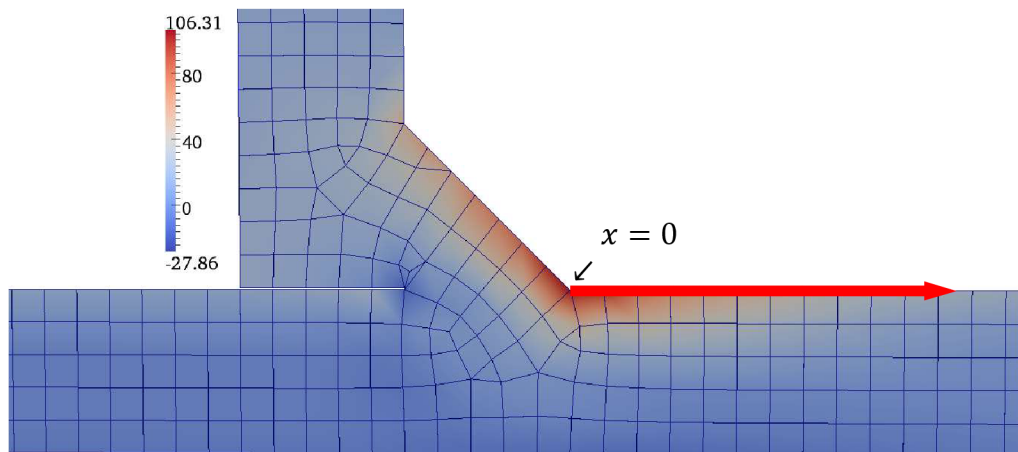
Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]		
	$\sigma_{0,4 \cdot t} = \sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_t = \sigma_{10 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	78,54	54,51	94,64
ANSYS Workbench	73,81	52,51	88,08

Tabulka 6.6 Napětí z modelu osově symetrie s „relativně jemnou sítí“ (vel. prvků $0,1 \cdot t$).

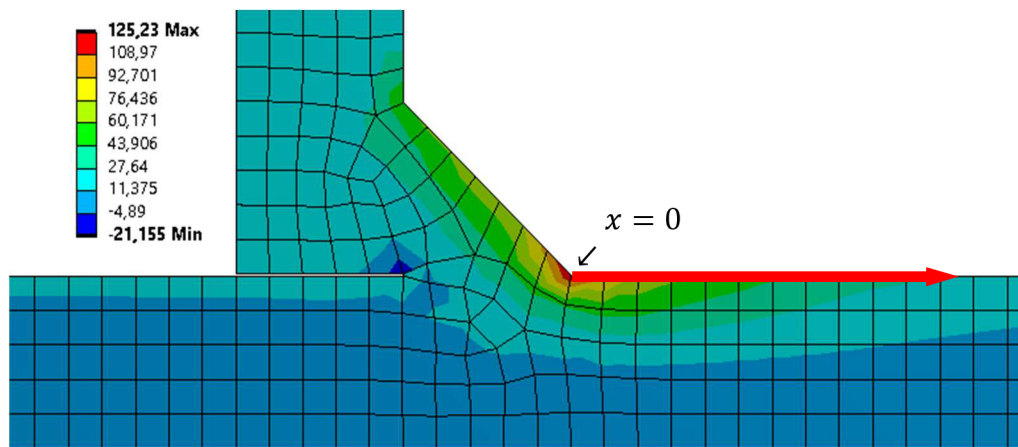
Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]			
	$\sigma_{0,4 \cdot t} = \sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_{0,9 \cdot t} = \sigma_{9 \text{ mm}}$	$\sigma_{1,4 \cdot t} = \sigma_{14 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	74,5	56,53	41,89	91,27
ANSYS Workbench	72,16	55,14	40,74	87,66



Graf 6.3 Průběh σ_1 u modelu osově symetrie s „relativně jemnou sítí“ (vel. prvků $0,2 \cdot t$)



a) Salome Meca



b) ANSYS Workbench

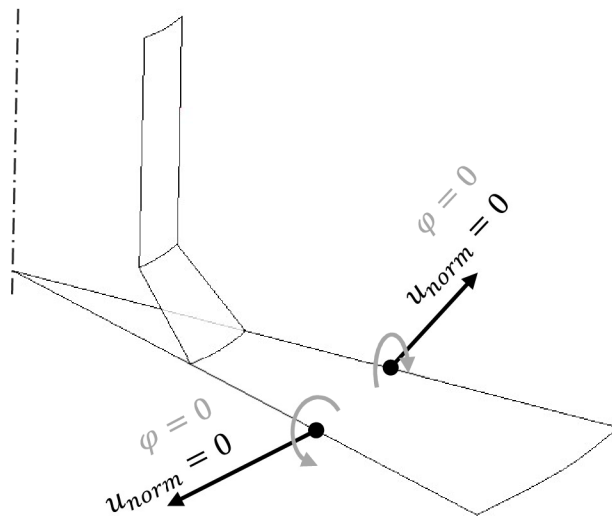
Obrázek 6.8 Cesta pro odečtení σ_1 u modelu osově symetrie (vel. prvků $0,2 \cdot t$).

6.2 Modely geometrie tvořené střednicovými plochami

Geometrie výpočetních modelů jsou tvořeny skořepinovými prvky, které jsou oproti výpočtovým modelům s prostorovými prvky méně výpočetně náročné. Zároveň střednicovými plochami lze vymodelovat prakticky veškeré tvary svarových spojů. Z tohoto důvodu jsou výpočtové modely tvořené skořepinovými prvky (střednicovými plochami) v inženýrské praxi značně rozšířené.

Sítě konečných prvků byly vytvořeny diskretizací střednicových ploch. Střednicová plocha byla vytvořena uprostřed tloušťky objemového tělesa (plechu, trubky). Na obrázku 6.11 je tlustou černou čarou vyznačena střednicová plocha a uzly prvků jsou reprezentovány černými tečkami.

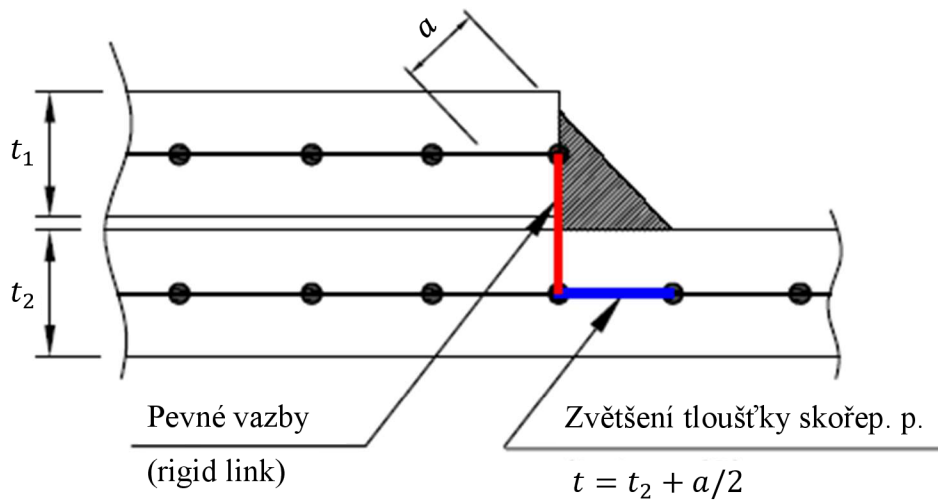
Modely obsahující skořepinové prvky byly řešeny pomocí rotační symetrie. Geometrie modelu rotační symetrie byla kruhová výseč. Pro aplikaci rotační symetrie byly nastaveny okrajové podmínky vyznačené na obrázku 6.9 (nulové posuvy v normálovém směru $u_{norm} = 0$ a nulové natočení okolo hrany řezu $\varphi = 0$)



Obrázek 6.9 Okrajové podmínky pro rotační symetrii u modelu se skořepinovými p.

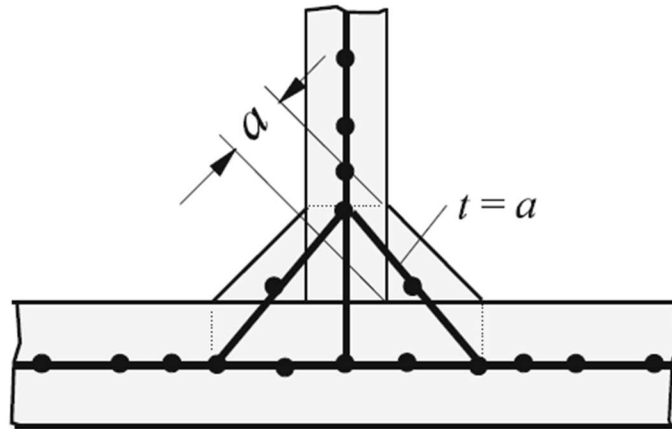
Problém vzniká při modelování geometrie daného problému. Existuje mnoho způsobů jak vymodelovat geometrii svaru. Rozdílné úrovně geometrií střednicových ploch vykazují rozdílné vlastnosti (napětí, deformaci). Vybrané přístupy pro řešení výpočtových modelů tvořených střednicovými plochami:

- Modely se zvětšenou tloušťkou v oblasti svaru, viz obrázky 6.10 a 6.13



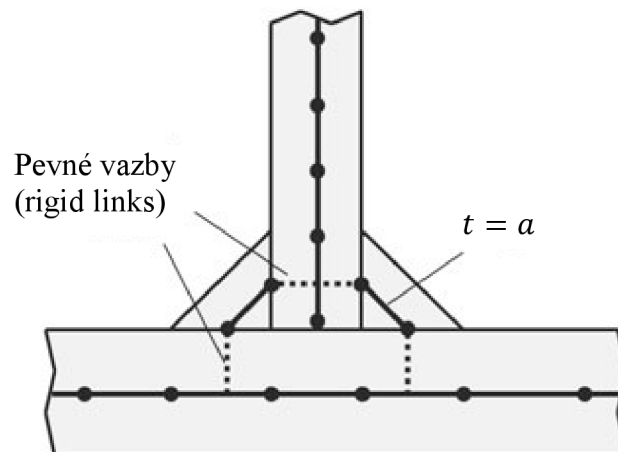
Obrázek 6.10 Model geometrie se zvětšenou tloušťkou v oblasti svaru. [10]

- Modely se šikmou střednicovou plochou v oblasti svaru, viz obrázek 6.11



Obrázek 6.11 Model geometrie se šikmými střednicovými plochami. [8]

- Modely s pevnými vazbami (rigid links) a šikmými střednicovými plochami, viz obrázek 6.12



Obrázek 6.12 Model geometrie se šikmými střednicovými pl. a využitím pevných vazeb. [8]

Extrapolace tvarového napětí byla prováděna na modelech s různou jemností sítě konečných prvků. Byly použity stejné velikosti a druhy bazových funkcí jako v modelech s objemovými prvky.

- Kvadratické prvky o velikosti tloušťky materiálu – lineární extrapolace napětí
- Lineární prvky o velikosti $0,2 \cdot t$ – lineární extrapolace napětí
- Lineární prvky o velikosti $0,1 \cdot t$ – kvadratická extrapolace napětí

6.2.1 Geometrie se zvětšením tloušťky v oblasti svaru

Velkou výhodou při tvorbě geometrie je časová nenáročnost. Prostorovou geometrii (konstrukční dokumentace) lze snadno převést na střednicové plochy a to přímo v prostředí výpočtového programu.

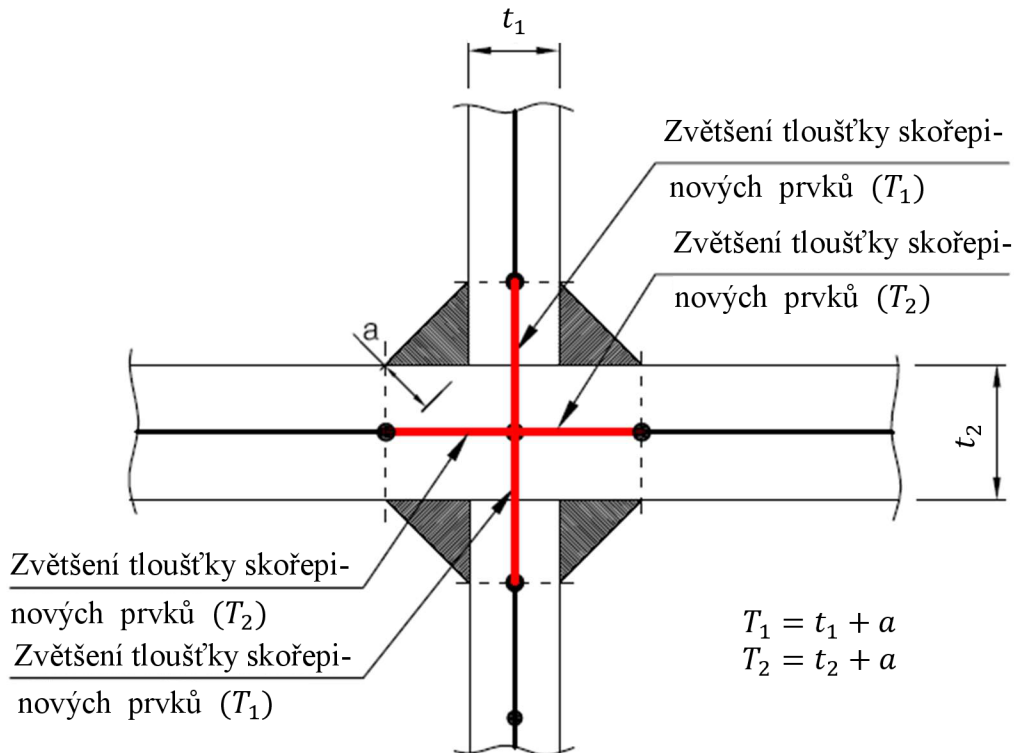
Metodiku tvorby výpočtových modelů tvořených střednicovými plochami (skořepinovými prvky) navrhl Niemi [12]. Princip spočívá ve zvětšení tloušťky v oblasti svaru. Tato me-

toda je založena na dvou důležitých konfiguracích geometrie:

- Volba tloušťky skořepinových prvků v oblasti svaru
- Velikost oblasti pro zvětšení tloušťky skořepinových prvků

Niemi navrhl pouze velikost oblasti se zvětšenou tloušťkou skořepinových prvků, aniž by doporučil tloušťku prvků.

Eriksson a kol. [10] navrhly optimální velikosti tlouštěk skořepinových prvků. Tyto doporučení jsou graficky znázorněny na obrázcích 6.10 a 6.13. [11]



Obrázek 6.13 Geometrie se skořepinovými prvky a zvětšenou tloušťkou v oblasti svaru. [10]

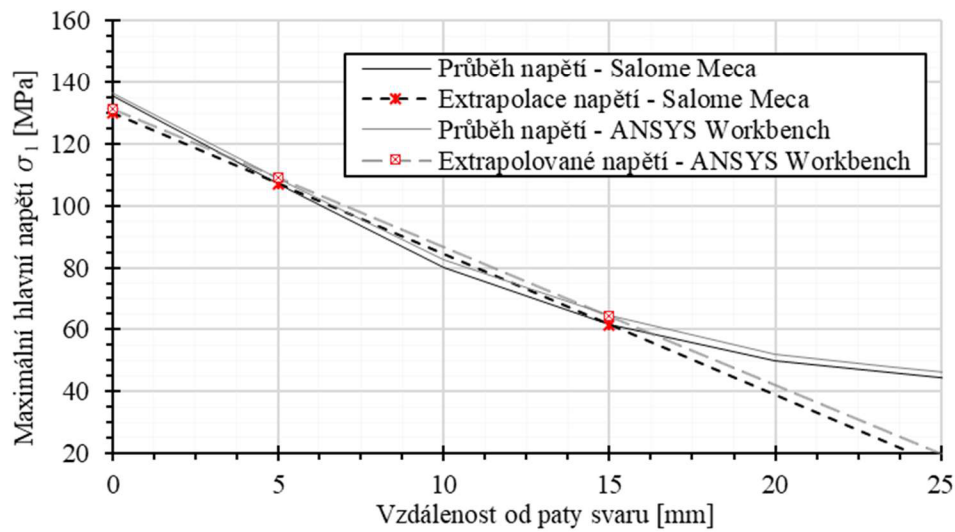
6.2.1.1 Geometrie bez zvětšení tloušťky

Model geometrie byl vytvořen pomocí skořepinových prvků, které mají předepsanou konstantní tloušťku v celém výpočetním modelu. Stanovená tloušťka skořepinových prvků odpovídá tloušťce trubky a desky.

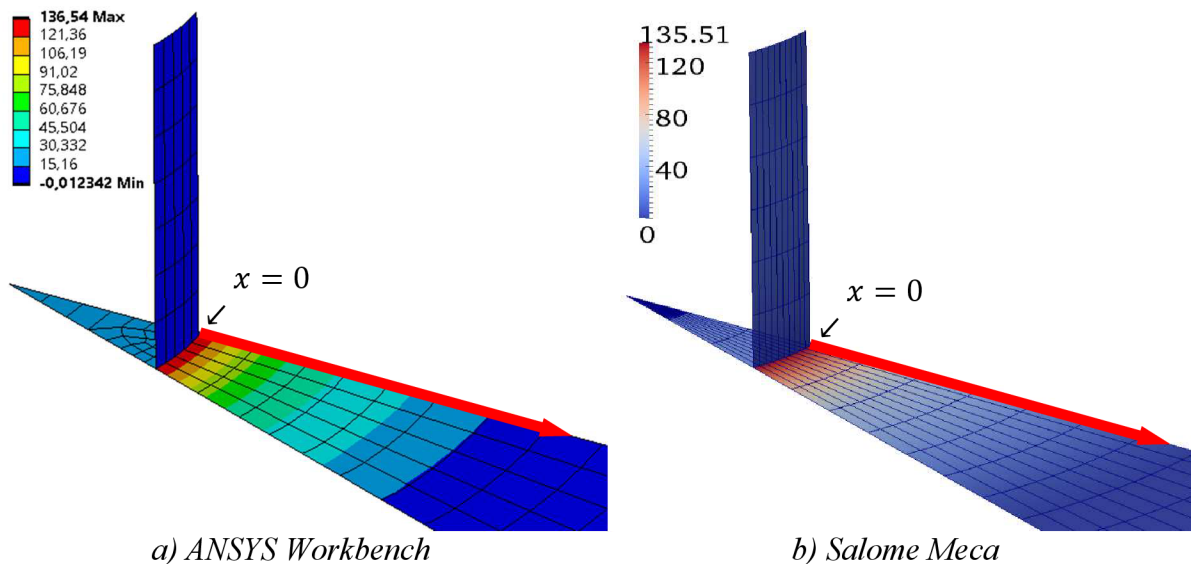
$$t_{\text{modelu}} = 10 \text{ mm}$$

Velikost tloušťky byla stanovena tak aby tvorba geometrie byla co nejméně časově náročná (převedením z prostorového konstrukčního modelu na výpočtový – lze převést i ve výpočtových softwarech). Volba této tloušťky není podložena literaturou. Při extrapolaci jsou dodrženy doporučení z IIW[6], stručný souhrn doporučení je v kapitole 2.2.2.

Extrapolace byla provedena na okraji skořepinové výseče v radiálním směru. Vzdálenost extrapoláčních bodů je měřena na povrchu desky od okraje trubky. Cesta pro extrapolaci napětí je zobrazena na obrázcích níže. Výsledné hodnoty prvních hlavních napětí jsou graficky zpracovány v grafu 6.4 a hodnoty napětí v extrapoláčních bodech jsou uvedeny v tabulkách 6.7 až 6.9.



Graf 6.4 Průběh σ_1 u modelu bez zvětšení tloušťky (skořepinové prvky velikosti t)



Obrázek 6.14 Cesta pro odečtení σ_1 (bez zvětšení tloušťky, skořep. p., velikost t).

Tabulka 6.7 Model s nezvětšenou tloušťkou p. a „relativně hrubou sítí“ (skořep. p. velikost t)

Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]		
	$\sigma_{0,5 \cdot t} = \sigma_{5 \text{ mm}}$	$\sigma_{1,5 \cdot t} = \sigma_{15 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	107,21	61,6	130,02
ANSYS Workbench	109,12	64,51	131,43

Tabulka 6.8 Model s nezvětšenou tloušťkou p. a „relativně jemnou sítí“ (skořepinové. prvky velikosti $0,2 \cdot t$)

Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]		
	$\sigma_{0,4 \cdot t} = \sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_t = \sigma_{10 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	115,43	85,48	135,5
ANSYS Workbench	114,18	84,42	134,12

Tabulka 6.9 Model s nezvětšenou tloušťkou p. a „relativně jemnou sítí“ (skořepinové prvky velikosti $0,1 \cdot t$)

Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]			
	$\sigma_{0,4 \cdot t} = \sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_{0,9 \cdot t} = \sigma_{9 \text{ mm}}$	$\sigma_{1,4 \cdot t} = \sigma_{14 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	115,23	93,12	68,78	131,31
ANSYS Workbench	113,76	88,3	67,77	137,69

6.2.1.2 Geometrie se zvětšením tloušťky

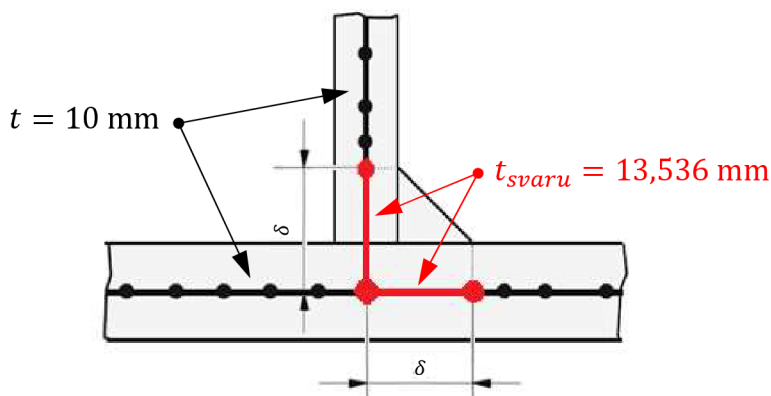
Výpočtový model byl vytvořen podle doporučení, které navrhl Eriksson a kol. [10]. Skořepinové prvky tedy nemají stejnou tloušťku v celém výpočetním modelu. Tloušťka je zvětšena v oblasti pod svarem. Šířka oblasti byla určena rovnicí níže.

$$\delta = \frac{t}{2} + z = \frac{10}{2} + 10 = 15 \text{ mm}$$

Tloušťka skořepinových prvků v oblasti svaru byla určena v návaznosti na obrázek 6.13. Obrázek 6.13 zobrazuje oboustranný koutový svar, z tohoto důvodu byla uvažována poloviční tloušťka svaru – $\frac{a}{2}$. Výsledná tloušťka skořepinových prvků byla stanovena rovnicí níže.

$$t_{svaru} = t + \frac{a}{2} = 10 + \frac{7,071}{2} = 13,536 \text{ mm}$$

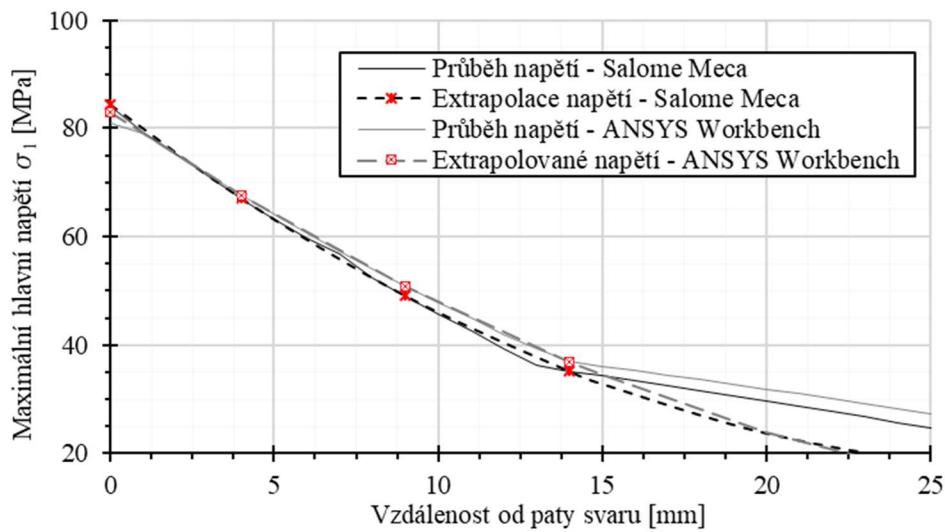
Tloušťky prvků a velikost oblasti se zvětšenou tloušťkou skořepinových prvků je zobrazena na obrázku 6.15.



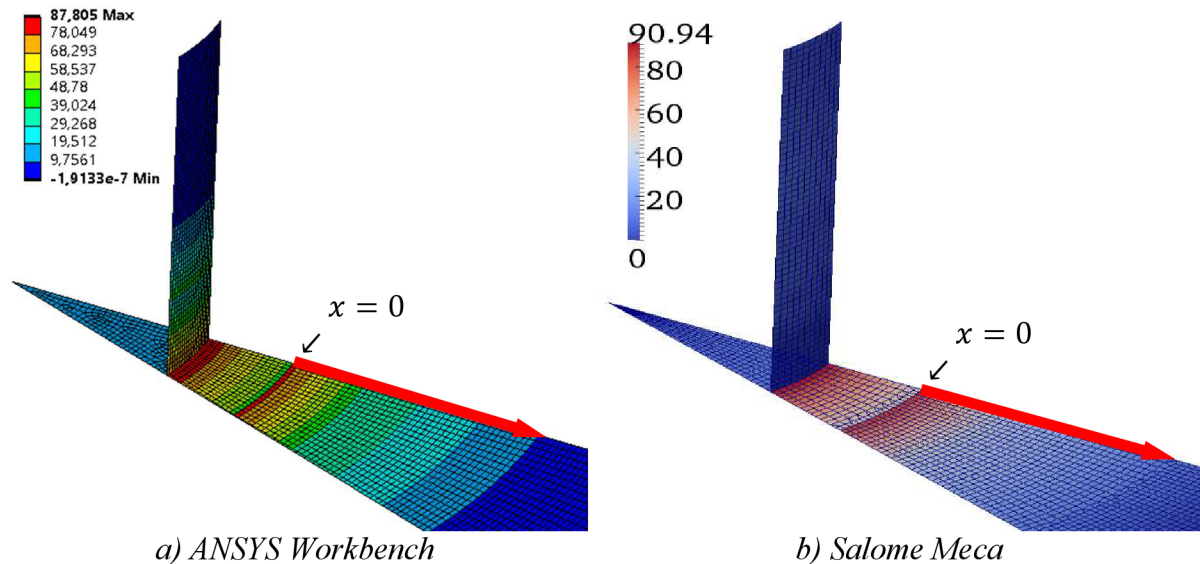
Obrázek 6.15 Detail modelu geometrie se zvětšenou tloušťkou.

Extrapolace byla provedena na okraji skořepinové výseče v radiálním směru. Vzdálenost extrapoláčních bodů je měřena od okraje oblasti se zvětšenou tloušťkou, viz obrázek 6.16.

Výsledné hodnoty prvních hlavních napětí z obou výpočetních softwarů jsou zaneseny do grafu a tabulek níže.



Graf 6.5 Průběh σ_1 modelu se zvětšenou tloušťkou (skořepinové prvky velikosti $0,1 \cdot t$)



Obrázek 6.16 Cesta pro odečtení σ_1 (se zvětšení tloušťky, skořep. p., velikost $0,1 \cdot t$).

Tabulka 6.10 Model se zvětšenou tloušťkou prvků a „relativně hrubou sítí“ (skořepinové prvky velikosti t)

Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]		
	$\sigma_{0,5 \cdot t} = \sigma_{5 \text{ mm}}$	$\sigma_{1,5 \cdot t} = \sigma_{15 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	64,31	35,78	78,58
ANSYS Workbench	64,42	36,12	78,57

Tabulka 6.11 Model se zvětšenou tloušťkou prvků a „relativně jemnou sítí“ (skořepinové prvky velikosti $0,2 \cdot t$)

Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]		
	$\sigma_{0,4 \cdot t} = \sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_t = \sigma_{10 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	67,89	47,26	81,71
ANSYS Workbench	67,42	47,89	80,5

Tabulka 6.12 Model se zvětšenou tloušťkou prvků a „relativně jemnou sítí“ (skořepinové prvky velikosti $0,1 \cdot t$)

Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]			
	$\sigma_{0,4 \cdot t} = \sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_{0,9 \cdot t} = \sigma_{9 \text{ mm}}$	$\sigma_{1,4 \cdot t} = \sigma_{14 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	67,19	49,18	35,19	84,49
ANSYS Workbench	67,61	50,91	36,98	82,98

6.2.1.3 Geometrie se zmenšením tloušťky

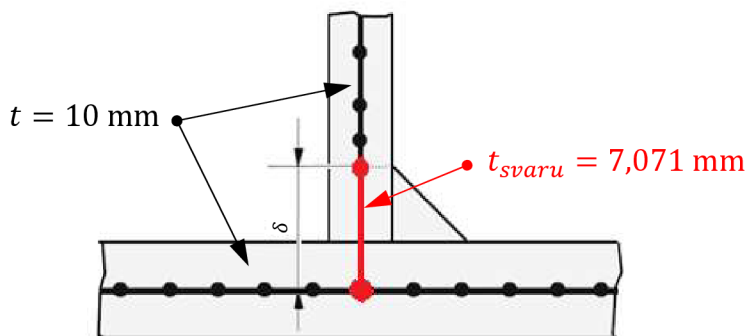
Podobně jako u předchozího typu geometrie byla tloušťka skořepinových prvků v oblasti svaru pozmeněna. Šířka oblasti pod svarem byla stanovena dle rovnice níže.

$$\delta = \frac{t}{2} + z = \frac{10}{2} + 10 = 15 \text{ mm}$$

Byla uvažována situace, při které svar neovlivní tuhosti desky (prvkům byla přiřazena tloušťka shodná s tloušťkou desky). Dále byla uvažována zmenšená tuhost trubky. Tloušťka prvků byla v oblasti svaru zmenšena na hodnotu:

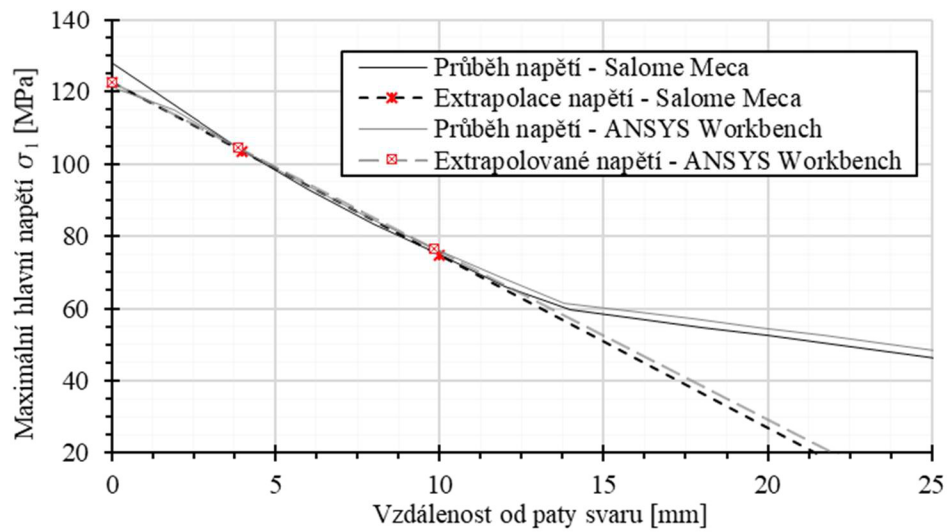
$$t_{svaru} = a = 7,071 \text{ mm}$$

Oblast se zmenšenou tloušťkou je zobrazena na obrázku 6.17. Takto zvolené tloušťky nebyly nijak podloženy literaturou.

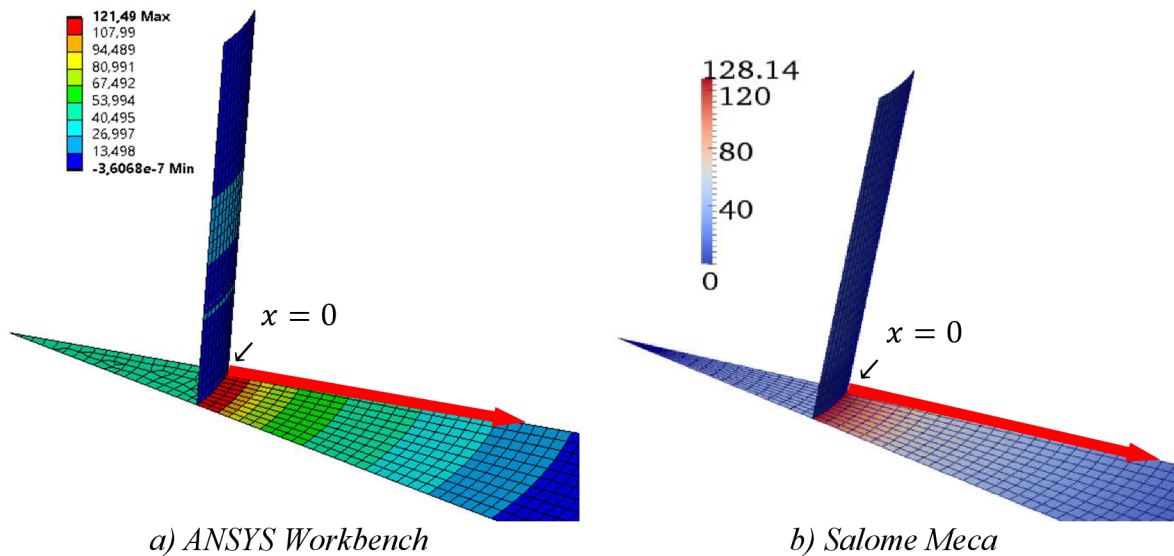


Obrázek 6.17 Detail modelu geometrie se zmenšenou tloušťkou.

Extrapolace byla provedena na okraji skořepinové výseče v radiálním směru. Vzdálenost extrapoláčních bodů je měřena od okraje skořepiny trubky. Extrapoláční cesta je zobrazena na obrázku níže. Výsledná napětí jsou zpracovány v grafu a tabulkách níže.



Graf 6.6 Průběh σ_1 u modelu se zmenšenou tloušťkou (skořepinové prvky velikosti $0,2 \cdot t$)



Obrázek 6.18 Cesta pro odečtení σ_1 (se zmenšením tloušťky, skořep. p., velikost $0,2 \cdot t$).

Tabulka 6.13 Model se zmenšenou tloušťkou prvků a „relativně hrubou sítí“ (skořepinové prvky velikosti t)

Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]		
	$\sigma_{0,5 \cdot t} = \sigma_{5 \text{ mm}}$	$\sigma_{1,5 \cdot t} = \sigma_{15 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	98,94	59,59	118,62
ANSYS Workbench	99,3	60,12	118,89

Tabulka 6.14 Model se zmenšenou tloušťkou prvků a „relativně jemnou sítí“ (skořepinové prvky velikosti $0,2 \cdot t$)

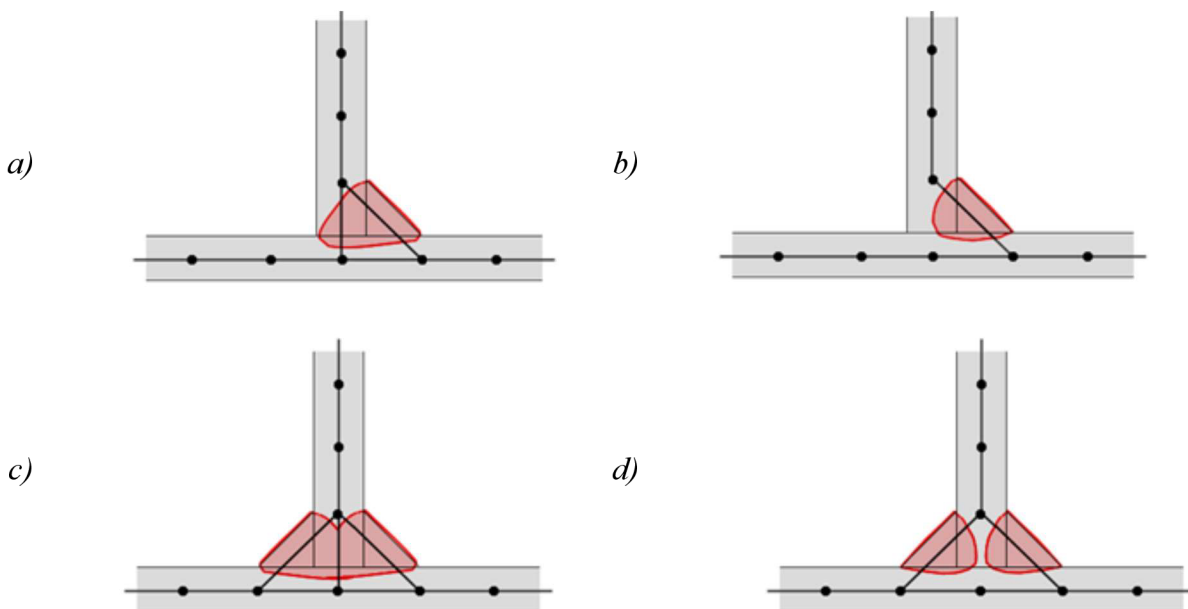
Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]		
	$\sigma_{0,4 \cdot t} = \sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_t = \sigma_{10 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	103,97	75,09	123,32
ANSYS Workbench	104,37	76,67	122,93

Tabulka 6.15 Model se zmenšenou tloušťkou prvků a „relativně jemnou sítí“ (skořepinové prvky velikosti $0,1 \cdot t$)

Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]			
	$\sigma_{0,4 \cdot t} = \sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_{0,9 \cdot t} = \sigma_{9 \text{ mm}}$	$\sigma_{1,4 \cdot t} = \sigma_{14 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	104,9	81,12	61,78	127,12
ANSYS Workbench	103,6	80,01	61,27	125,97

6.2.2 Geometrie se šikmými střednicovými plochami

Tento přístup modelování geometrie zjednodušuje svařovanou konstrukci na skořepinový model obsahující mimo jiné i šikmé plochy v oblasti svarů. Šikmé plochy reprezentují svarové spoje (svarové housenky). Existuje více možností jakým způsobem namodelovat svarový spoj. Především záleží na typu svaru – provařený/neprovařený kořen svaru, viz obrázek 6.19.



Obrázek 6.19 Skořepinové modely se šikmými střednicovými plochami. [13]

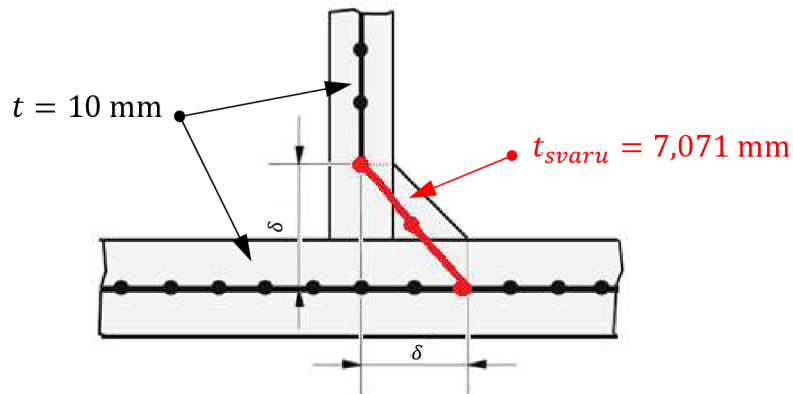
Analýzovaná konstrukce byla namodelována stejným způsobem, jako je zobrazeno na obrázku 6.19 b). Úhle sklonu šikmé plochy je 45° . Šířka šikmé plochy byla stanovena pomocí vzorce níže.

$$\delta = \frac{t}{2} + z = \frac{10}{2} + 10 = 15 \text{ mm}$$

Tloušťka skořepinových prvků v oblasti šikmé plochy byla určena dle obrázku 6.11.

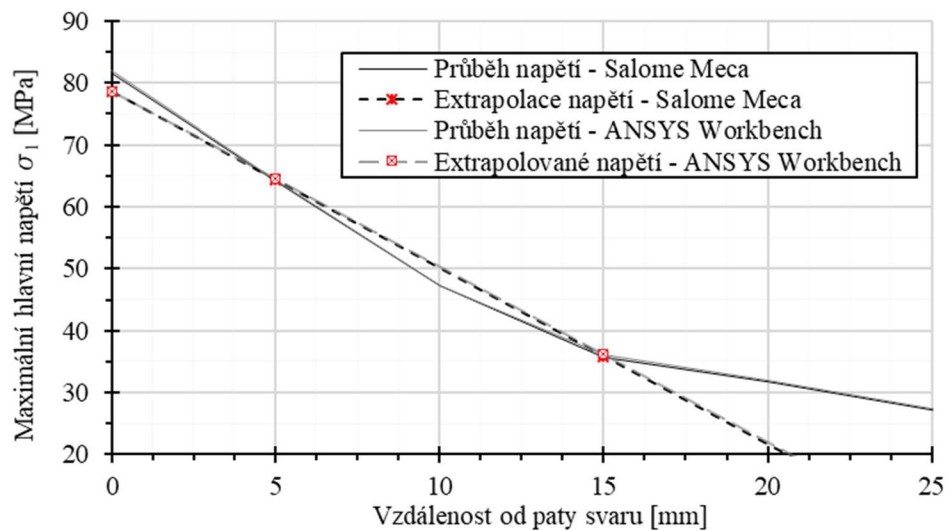
$$t_{\text{svaru}} = a = 7,071 \text{ mm}$$

Tloušťka ostatní skořepinových prvků byla nastavena na hodnotu tloušťku desky a trubky. Grafické znázornění rozměrů výpočtového modelu je na obrázku 6.20.

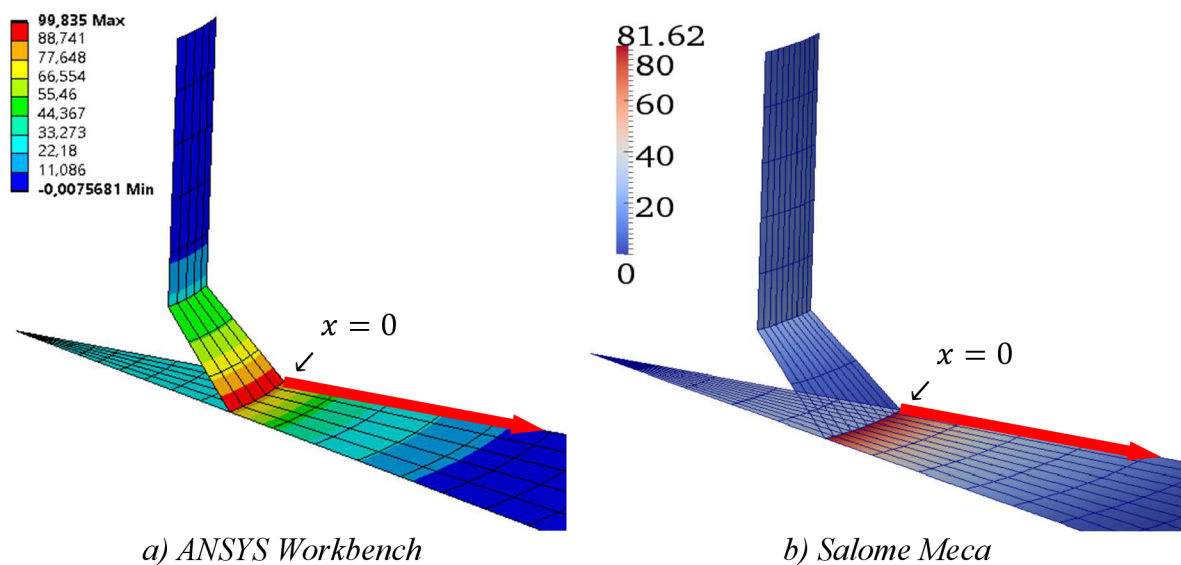


Obrázek 6.20 Detail modelu geometrie se šikmou střednicovou plochou.

Výsledné hodnoty σ_1 z obou výpočetních softwarů jsou vneseny do tabulek níže. Cesta pro odečtení napětí je zobrazena na obrázku 6.21, odečtená napětí jsou zobrazeny v grafu 6.7 (hodnoty napětí se liší v řádu desetin MPa, z tohoto důvodu není graf příliš přehledný). V obrázku 6.21 a) je zobrazeno maximální napětí 99,835 MPa, toto napětí je ovšem již na šikmé ploše, v grafu 6.7 („Průběh napětí - ANSYS Workbench“) v počátku ($x = 0$ mm) je tím pádem zobrazeno napětí 81,97 MPa.



Graf 6.7 Průběh σ_1 u modelu se šikmou střednicovou plochou (skořepinové prvky velikosti t)



Obrázek 6.21 Cesta pro odečtení σ_1 (se šikmými střed. pl., skořep. p., velikost t).

Tabulka 6.16 Model se šikmou střednicovou plochou a „relativně hrubou sítí“ (skořepinové prvky velikosti t)

Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]		
	$\sigma_{0,5 \cdot t} = \sigma_{5 \text{ mm}}$	$\sigma_{1,5 \cdot t} = \sigma_{15 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	64,27	35,79	78,51
ANSYS Workbench	64,45	36,15	78,6

Tabulka 6.17 Model se šikmou střednicovou plochou a „relativně jemnou sítí“ (skořepinové prvky velikosti $0,2 \cdot t$)

Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]		
	$\sigma_{0,4 \cdot t} = \sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_t = \sigma_{10 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	67,29	47,4	80,62
ANSYS Workbench	67,55	47,8	80,78

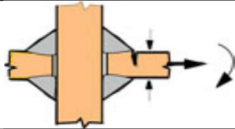
Tabulka 6.18 Model se šikmou střednicovou plochou a „relativně jemnou sítí“ (skořepinové prvky velikosti $0,1 \cdot t$)

Výpočetní program	Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]			
	$\sigma_{0,4 \cdot t} = \sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_{0,9 \cdot t} = \sigma_{9 \text{ mm}}$	$\sigma_{1,4 \cdot t} = \sigma_{14 \text{ mm}}$	σ_{hs}
Salome Meca	67,27	50,63	36,67	82,51
ANSYS Workbench	67,48	50,79	37,02	82,94

6.3 Určení životnosti

Na základě tvarové podobnosti a podobnosti zatěžování byl vybrán svarový detail, viz tabulka 2.1. Koutový svar detailu při odpovídajícím zatěžování a užití konstrukční oceli má předepsanou třídu FAT 90.

Tabulka 6.19 Detail svarového spoje, převzato z [6].

Svarový detail	Popis svaru	Požadavky	FAT ocel	FAT hliník
	Koutový svar, přenášejíící zatížení, svar typu a)	Plně provařený	90	36

Třída FAT charakterizuje hodnotu rozkmitu napětí $\Delta\sigma$ a nastání MSÚP právě při $N_f = 2 \cdot 10^6$ cyklech. Exponent m pro metodu extrapolace tvarového napětí nabývá hodnoty $m = 3$. Koeficient C byl vypočten z rovnice (3.3), jeho hodnota nabývá velikosti $C = 1,458 \cdot 10^{12}$.

Modely geometrie s objemovou reprezentací a modely geometrie tvořené střednicovými plochami byly hodnoceny dle stejné třídy FAT. Výpočet životnosti byl proveden pomocí rovnic (3.1) a (3.3), kde:

$$\sigma_{min} = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{hs}$$

Výsledné hodnoty životností pro jednotlivé modely geometrie byly zpracovány v tabulkách níže.

Vysvětlivky:

„relativně hrubá síť“: ○ KPLE (Kvadratické Prvky, Lineární Extrapolace)

„relativně jemná síť“: ● LPLE (Lineární Prvky, Lineární Extrapolace)
● LPKE (Lineární Prvky, Kvadratická Extrapolace)

Zkratka KPLE je pro modely s „relativně hrubou sítí“ a zkratky LPLE, LPKE jsou pro modely s „relativně jemnou sítí“.

Tabulka 6.20 Výsledné životnosti, metoda extrapolace tvarového napětí (modely s objemovou reprezentací svaru)

Typ úlohy	Výpočetní software	Rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa]		Počet cyklů do lomu N_f [-]
		KPLE	LPKE	
Rotační symetrie	Salome Meca	KPLE	76	3 321 366
		LPLE	94,33	1 737 033
		LPKE	90,96	1 937 341
	ANSYS Workbench	KPLE	84,38	2 426 828
		LPLE	89,21	2 053 605
		LPKE	87,57	2 171 158
Osová symetrie	Salome Meca	KPLE	75,92	3 331 877
		LPLE	94,64	1 720 019
		LPKE	91,27	1 917 668
	ANSYS Workbench	KPLE	80,43	2 802 227
		LPLE	88,08	2 133 662
		LPKE	87,66	2 164 478

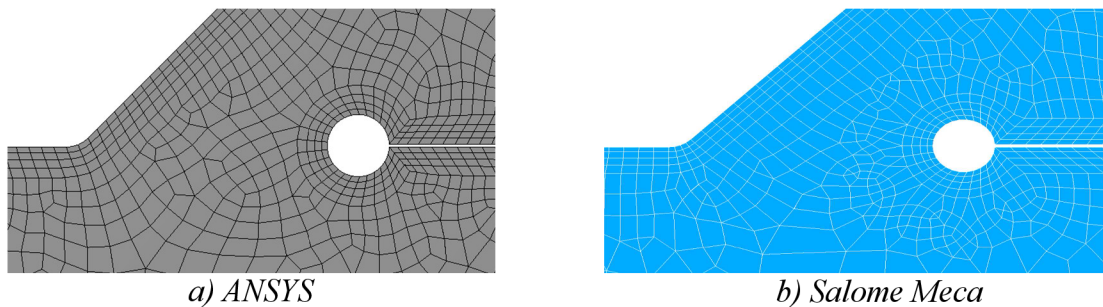
Tabulka 6.21 Výsledné životnosti, metoda extrapolovaného tvarového napětí (model tvořený střednicovými plochami)

Typ úlohy	Výpočetní software	Rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa]		Počet cyklů do lomu N_f [-]
		KPLE	LPKE	
Bez zvětšení tloušťky	Salome Meca	KPLE	130,02	663 403
		LPKE	135,50	586 122
		LPKE	131,32	643 894
	ANSYS Workbench	KPLE	131,43	642 279
		LPKE	134,12	604 334
		LPKE	137,69	558 596
Se zvětšením tloušťky	Salome Meca	KPLE	78,58	3 005 414
		LPKE	81,71	2 672 587
		LPKE	84,50	2 416 932
	ANSYS Workbench	KPLE	78,57	3 005 988
		LPKE	80,51	2 794 402
		LPKE	82,98	2 552 206
Se zmenšením tloušťky	Salome Meca	KPLE	118,62	873 652
		LPKE	123,32	777 422
		LPKE	127,12	709 767
	ANSYS Workbench	KPLE	118,89	867 604
		LPKE	122,93	784 845
		LPKE	125,98	729 297
Se šikmými střednicovými plochami	Salome Meca	KPLE	78,51	3 012 885
		LPKE	80,62	2 782 979
		LPKE	82,51	2 595 600
	ANSYS Workbench	KPLE	78,60	3 002 547
		LPKE	80,78	2 765 961
		LPKE	82,94	2 555 901

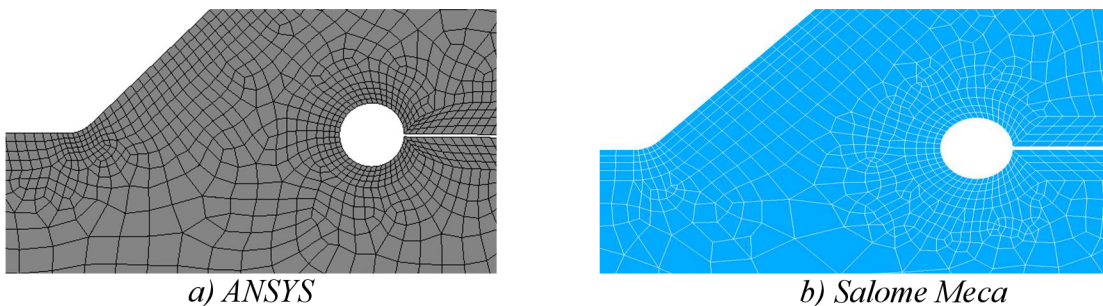
7 Hodnocení pomocí metody efektivního vrubového napětí

Metoda efektivního vrubového napětí hodnotí svarové spoje na základě detailního modelu geometrie v oblasti paty a kořene svaru. Reálný tvar kořene a paty svaru je zidealizován na jednoduchý tvar. Vytvořené vruby mají tvar otvoru nebo zaoblění o velikosti poloměru $r = 1 \text{ mm}$. Vruby vytvořené ve výpočtovém modelu spoje trubky s deskou jsou na obrázku 7.2.

Jemnost sítě v okolí vrubu závisí na použitém typu prvků (kvadratické prvky – obrázek 7.1, lineární prvky - obrázek 7.2). Kvadratické prvky oproti lineárním prvkům umožňují hrubší diskretizaci geometrie.



Obrázek 7.1 Síť v oblasti vrubů – kvadratické prvky.



Obrázek 7.2 Síť konečných prvků v oblasti vrubů (lineární prvky).

Jemná diskretizace geometrie v okolí vrubů má za následek značnou výpočtovou náročnost. Vyšší výpočtová náročnost může být problém u rozsáhlých výpočtových modelů. Snížení požadavků na výpočtový výkon je provedeno:

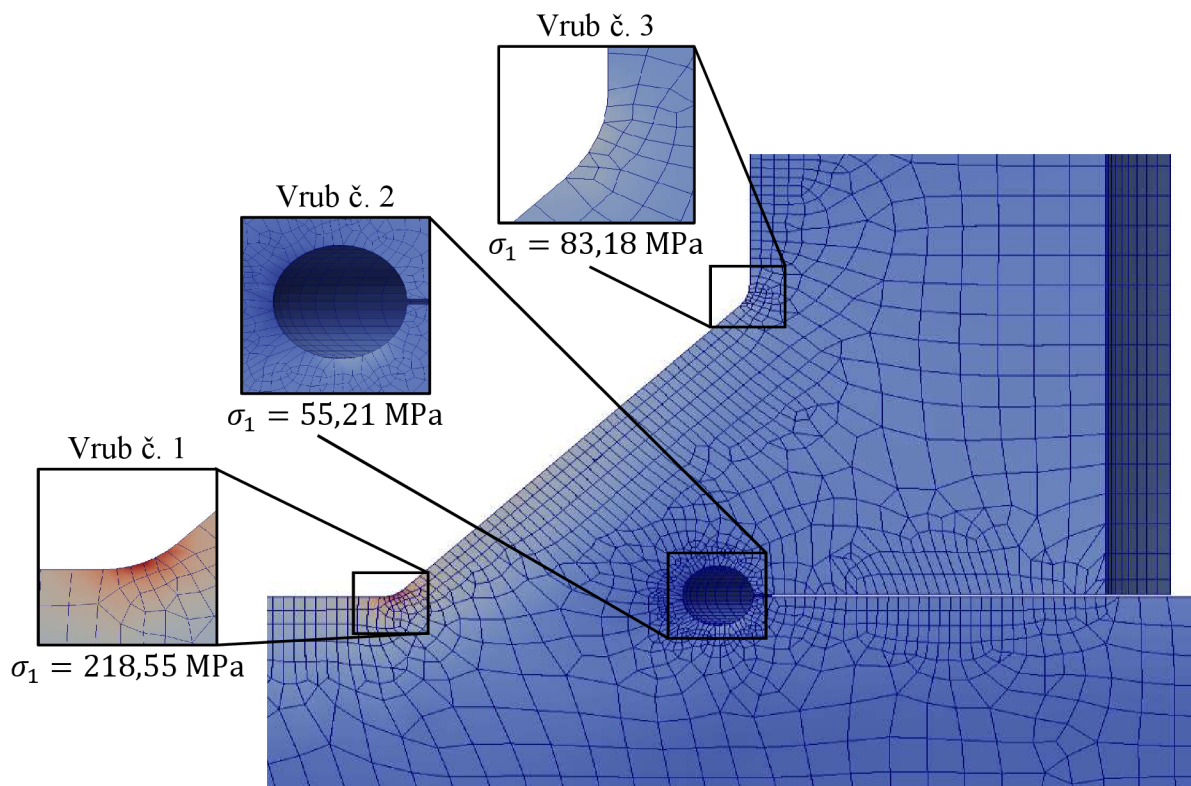
- Rotační symetrie (výseč se středovým úhlem $\alpha = 20^\circ$, kapitola 7.1)
- Osová symetrie (zjednodušení na rovinný problém, kapitola 7.2)

Metodou lze hodnotit únavové porušení svarového spoje v patě i kořeni svaru. Pro stanovení životnosti spoje je uvažováno maximální napětí. Porušení je uvažováno v místě maximálního napětí (pata nebo kořen svaru).

7.1 Rotační symetrie

Model geometrie řešený pomocí rotační symetrie byl tvořen prostorovými prvky. Geometrie výpočetního modelu rotační symetrie byla kruhová výseč se středovým úhlem $\alpha = 20^\circ$. Výpočtový model byl tvořen totožně jako v kapitole 6.1.1 až na rozdílnou geometrii modelu.

Při určení hodnotícího napětí pro stanovení únavové životnosti svarového spoje bylo zapotřebí určit vrub (pata nebo kořen svaru), který byl nejvíce namáhán. Na obrázku 7.3 jsou zobrazeny vruby s výslednými hodnotami σ_1 . Nejkritičtěji namáhaný byl vrub č. 1.

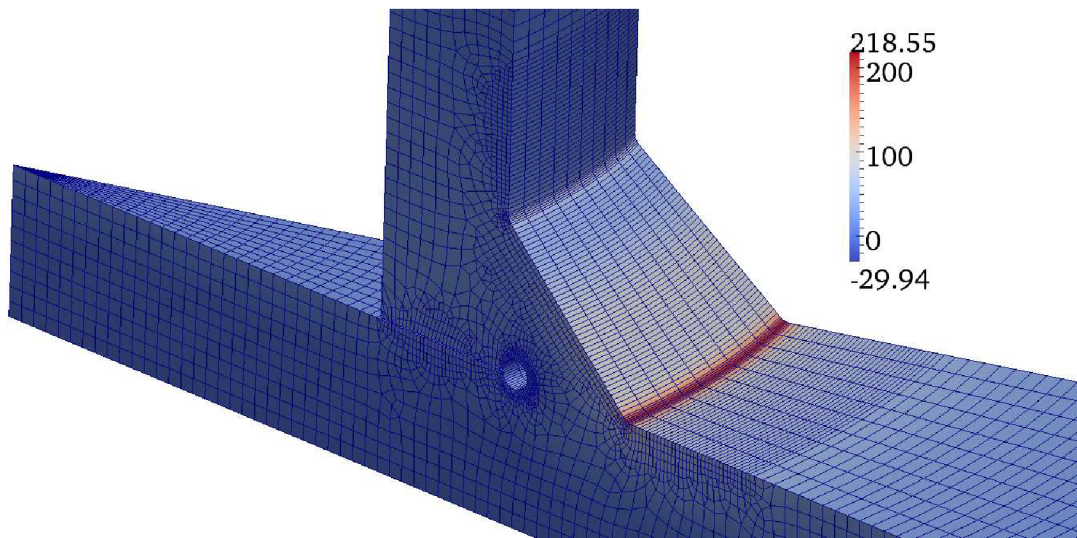


Obrázek 7.3 Porovnání napětí ve vrubech (Salome Meca).

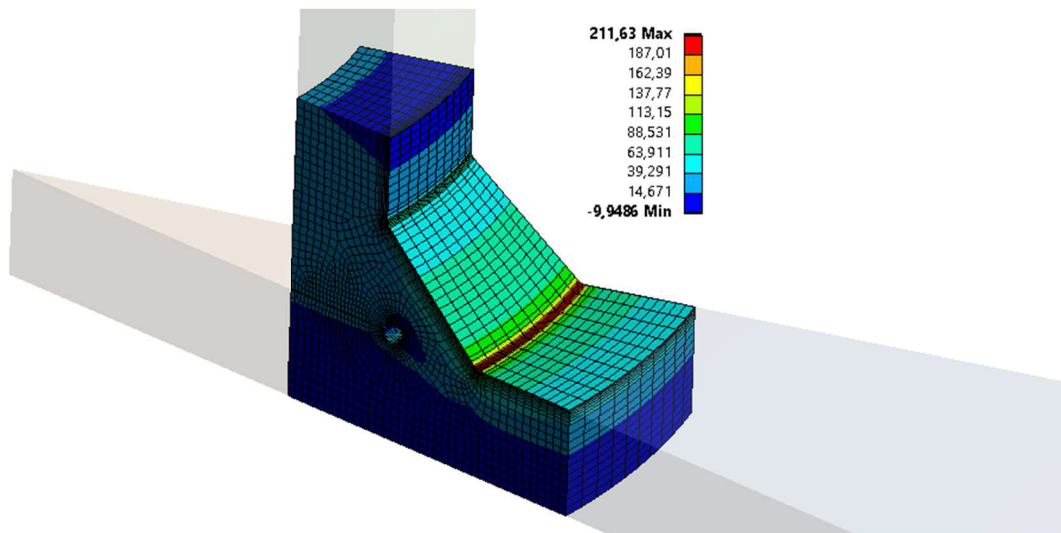
Výsledné hodnoty prvních hlavních napětí ve vrubu č. 1 jsou uvedeny v tabulce 7.1. Hodnoty σ_1 jsou vykresleny do obrázku 7.4 (modely tvořené lineárními prvky).

Tabulka 7.1 Výsledné hodnoty napětí z výpočtového modelu rotační symetrie.

Výpočetní program	Maximální hodnota prvního hlavního napětí ve vrubu	
	Lineární prvky [MPa]	Kvadratické prvky [MPa]
Salome Meca	218,55	208,73
ANSYS Workbench	211,64	214,54



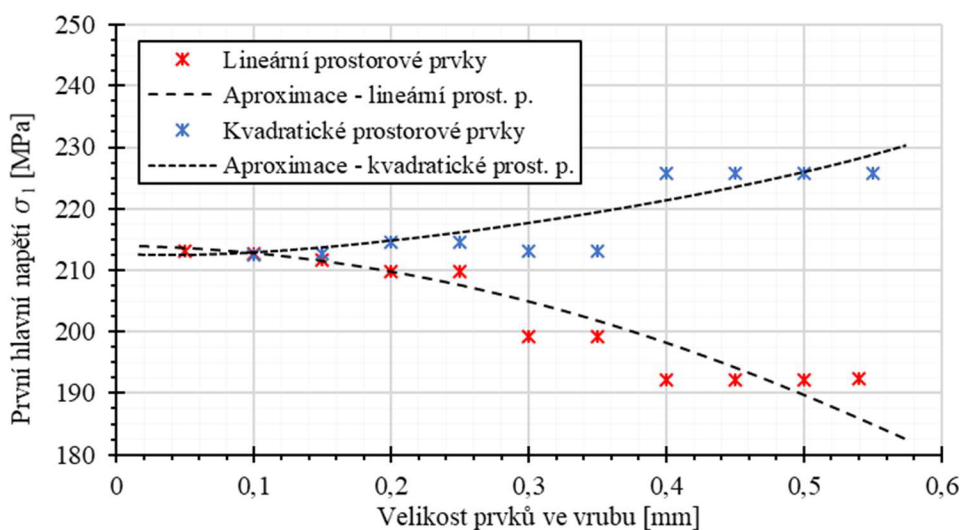
a) Salome Meca



b) ANSYS Workbench

Obrázek 7.4 Efektivní vrubové napětí, model rotační symetrie (prostorové kvadratické p.).

Pro ověření předepsané maximální velikosti prvků ve vrubu, doporučených podle IIW, byla provedena citlivostní analýza. Analýza potvrzuje dostatečnou jemnost prvků. Předepsané velikosti prvků byli spíše konzervativně zvolené. U obou typů prvků je jistá rezerva, která činí přibližně 0,05 mm. Citlivostní analýza je vykreslena do grafu 7.1.



Graf 7.1 Citlivostní analýza modelu s prostorovými prvky.

7.2 Osová symetrie

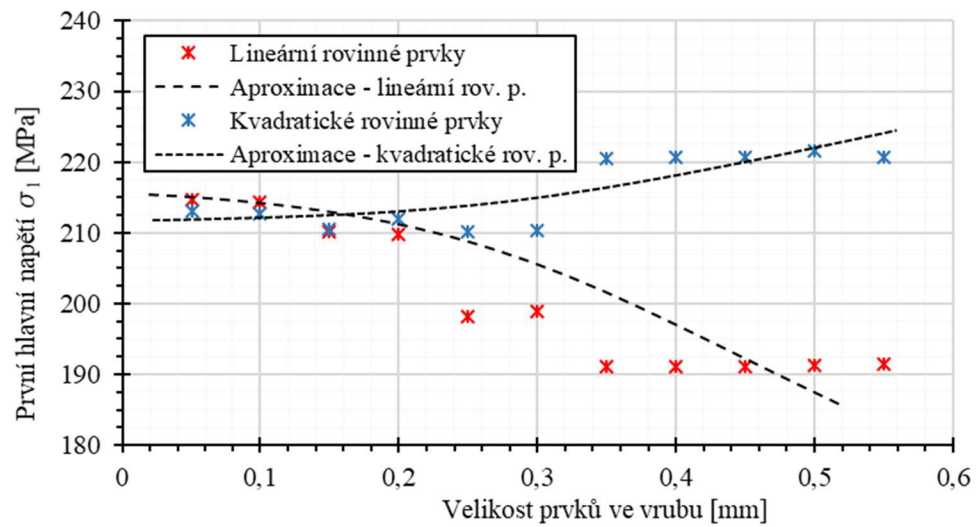
Síť konečných prvků u modelu osové symetrie byl tvořen rovinnými prvky. Model užívající rovinné prvky je ve srovnání s modelem využívající prostorové prvky mnohonásobně méně náročný na výpočetní výkon. Právě z tohoto důvodu je výhodné využít osové symetrie. Tvorba výpočtového modelu byla prakticky shodná s modelem využívající rovinné prvky v kapitole 6.1.2 až na rozdílnou geometrii modelu (meridiánový řez).

Výsledné hodnoty prvních hlavních napětí jsou uvedeny v tabulce 7.2. Grafické znázornění σ_1 u modelů obsahující kvadratické prvky je na obrázku 7.5.

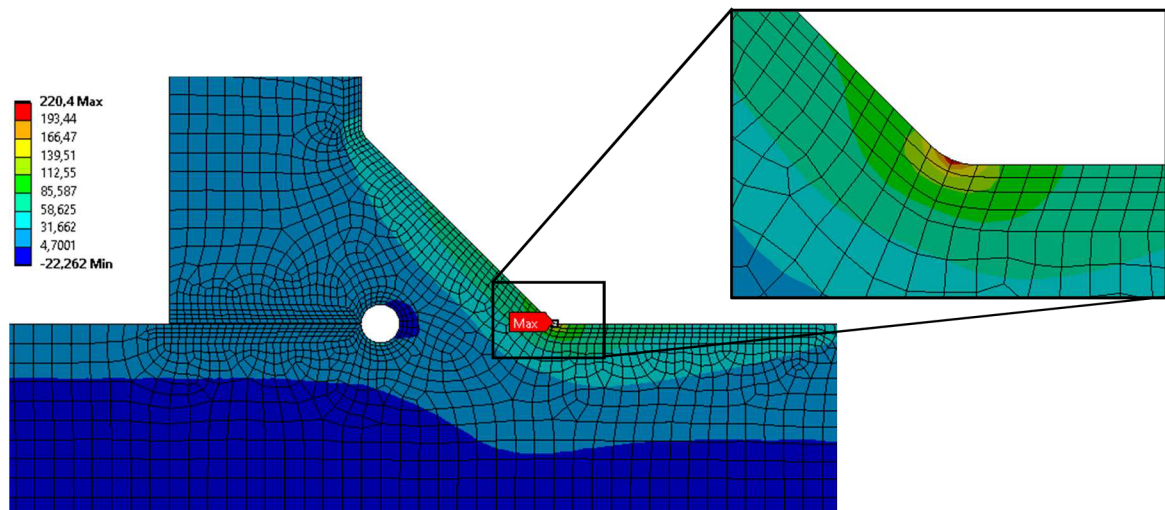
Tabulka 7.2 Vypočtené hodnoty napětí z modelu osové symetrie.

Výpočetní program	Maximální hodnota prvního hlavního napětí ve vrubu	
	Lineární prvky [MPa]	Kvadratické prvky [MPa]
Salome Meca	217,11	214,62
ANSYS Workbench	210,14	220,4

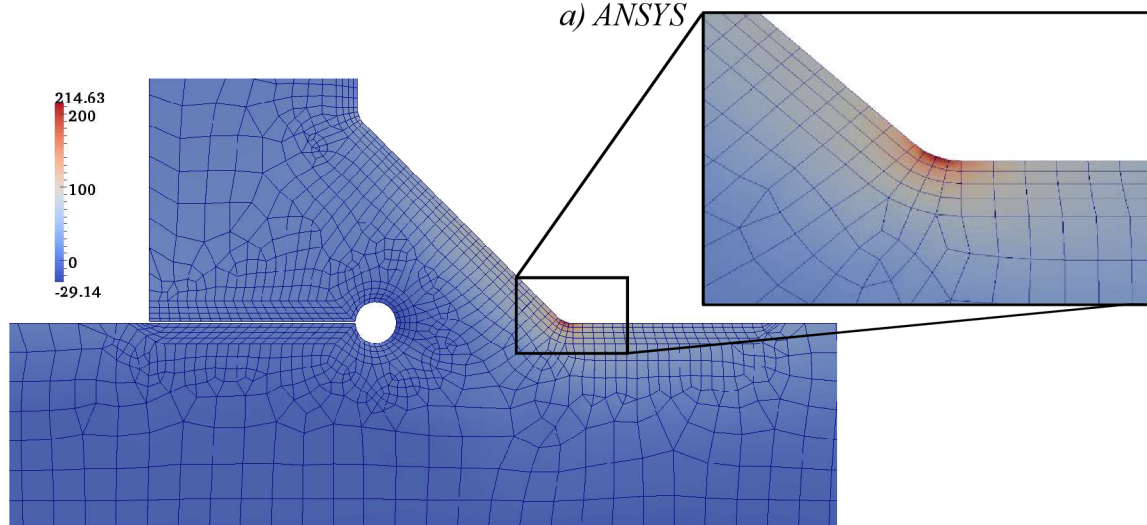
U výpočetního modelu osové symetrie byla také provedena citlivostní analýza. Výsledná napětí jsou prakticky totožná s modelem rotační symetrie. Analýza potvrzuje dostatečnou jemnost prvků ve vrubu pro výpočet napětí s dostatečnou přesností. Citlivostní analýza je vykreslena do grafu 7.2.



Graf 7.2 Citlivostní analýza modelu osové symetrie.



a) ANSYS



b) Salome Meca

Obrázek 7.4 Efektivní vrubové napětí, model osové symetrie (prostorové kvadratické p.).

7.3 Určení životnosti

Ocelové součásti hodnocené pomocí metody efektivního vrubového napětí mají dle IIW přiřazenou třídu FAT 225. Exponent m pro tuto metodu nabývá hodnoty $m = 3$. Koeficient C byl vypočten stejným způsobem, jako je uvedeno v kapitole 6.3 a 5.1 (pomocí rovnice (3.3)), hodnota koeficientu je $C = 2,27812 \cdot 10^{13}$.

Modely řešené osovou i rotační symetrií byli hodnoceny dle stejné třídy FAT. Výpočet životnosti byl proveden pomocí rovnic (3.1) a (3.3), kde:

$$\sigma_{min} = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = \sigma_1$$

Výsledné hodnoty rozkmitů napětí $\Delta\sigma$ a počty cyklů do lomu N_f jsou vypsány v tabulce níže.

Tabulka 7.3 Životnosti pro metodu efektivního vrubového napětí.

Typ úlohy	Výpočetní software	Rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa]		Počet cyklů do lomu N_f [-]
		LP	KP	
Rotační symetrie	Salome Meca	LP	218,55	2 182 354
		KP	208,73	2 505 088
	ANSYS Workbench	LP	211,64	2 403 169
		KP	214,54	2 307 027
Osová sy- metrie	Salome Meca	LP	217,11	2 226 066
		KP	214,62	2 304 448
	ANSYS Workbench	LP	210,14	2 454 999
		KP	210,30	2 449 575

LP – model s lineárními prvky

KP – model s kvadratickými prvky

8 Diskuze

Metoda nominálního napětí determinovala životnost svarového spoje (dle kapitoly 5 na straně 28) na více než 10^7 cyklů do lomu. Hodnota 10^7 cyklů byla stanovena pro poruchu vznikající v oblasti kořene svaru. Pro ověření správnosti výpočtu lze převzít napětí vypočtené v kořeni svaru *metodou efektivního vrubového napětí* (kapitola 7, strana 50, obrázek 7.3 – vrub č. 2). Rozkmit napětí v kořeni svaru byl stanoven na hodnotu $\Delta\sigma = 55,21$ MPa, podle rovnice (3.3) a vstupních parametrů z kapitoly 7.3 bylo vypočteno $N_f = 1,3537 \cdot 10^8$ cyklů. Hodnoty životností vypočtené *metodou nominálního napětí* a *metodou efektivního vrubového napětí* jsou z praktického hlediska stejné ($N_f > 10^7$ cyklů). Výpočet *metodou nominálního napětí* je tedy korektní. Avšak nejedná se o nejkritičtěji namáhanou část svarového spoje, z toho důvodu nelze považovat hodnotu $N_f = 10^7$ cyklů za celkovou životnost svarového spoje.

Svarový spoj analyzován **metodou extrapolace tvarového napětí** byl ve výpočetních modelech zastoupen dvěma rozdílnými geometriemi (modely s objemovou reprezentací svaru a modely tvořené střednicovými plochami). *Metodou extrapolace tvarového napětí* je možné analyzovat porušení vzniklá v patě svaru, svarový spoj (specifikovaný v kapitole 4) byl nejkritičtěji namáhan v oblasti paty svaru (toto tvrzení bylo ověřeno v kapitole 7, strana 50, obrázek 7.3 - vrub č.1)

Výpočetní modely tvořené střednicovými plochami s geometriemi *bez zvětšení tloušťky* (kapitola 6.2.1.1) a *se zmenšenou tloušťkou* (kapitola 6.2.1.3) vykazovali neúměrně vysoké hodnoty extrapolovaného tvarového napětí (neodpovídající hodnota N_f ve srovnání s hodnotami N_f ostatních druhů geometrií hodnocených buď *metodou extrapolace tvarového napětí* anebo *metodou vrubového napětí*). Z výsledků analýzy vyplývá, že není vhodné pro hodnocení MSÚP svarových spojů využívat modely geometrií tvořené střednicovými plochami *bez zvětšení tloušťky* a *se zmenšením tloušťky* (kapitoly 6.2.1.1 a 6.2.1.3)

Ostatní druhy geometrií hodnocené *metodou extrapolace tvarového napětí* vykazují relativně konzistentní výsledky (výsledné hodnoty N_f jsou přibližně v rozsahu od $1,7 \cdot 10^6$ do $2,8 \cdot 10^6$ cyklů do lomu). Použití geometrie s objemovou reprezentací svaru bylo oproti geometrii tvořené střednicovými plochami spíše konzervativní. Nedoporučuji provádět analýzy s diskretizací geometrie uvedenou výše jako „relativně hrubá síť“ – velikost prvků pro svar analyzovaný v této práci byla rovna tloušťce materiálu. Prvky neumožňují vypočítat dostatečně velký gradient napětí (z tohoto důvodu bylo extrapolované tvarového napětí σ_{hs} nižší než u modelů s jemnější diskretizací geometrie).

Geometrie pro výpočty realizované pomocí **metody efektivního vrubového napětí** byly vymodelovány prostorovými prvky a rovinnými prvky (rotační a osová symetrie). Byla vytvořena citlivostní analýza potvrzující správnost volby velikosti prvků ve výpočetních modelech. Metoda dále určuje nejvíce namáhanou oblast svarového spoje (kapitola 7, strana 50, obrázek 7.3 - vrub č.1). Výsledné hodnoty N_f jsou v rozsahu od $2,2 \cdot 10^6$ do $2,5 \cdot 10^6$ cyklů do lomu. Životnosti se z praktického hlediska shodují s počty cyklů získaných *metodou extrapolace tvarového napětí*.

Celková životnost svarového spoje musí být prakticky ověřena únavovými testy. Dle metod popsanych a aplikovaných v této práci můžeme očekávat životnost svarového spoje v rozmezí od $1,7 \cdot 10^6$ do $2,8 \cdot 10^6$ cyklů. Modely geometrie s objemovou reprezentací svaru hodnocené *metodou extrapolace tvarového napětí* vykazovaly nejkonzervativnější životnosti N_f . Modely geometrie tvořené střednicovými plochami hodnocené *metodou extrapolace tvarového napětí* byli nejméně konzervativní.

9 Závěr

V úvodu práce bylo vysvětleno, z jakého důvodu je důležité zaobírat se touto problematikou, a také byly představeny MKP programy, ve kterých byla analýza prováděna. V rešeršní části práce byly popsány základní principy metod hodnocení cyklicky namáhaných svarových spojů, možnosti tvorby geometrií výpočetních modelů a hodnocení životností svarových spojů.

Analytická část práce byla zaměřena na řešení vybraného svarového spoje (bližší specifikace v kapitole 4). V této části práce je stručný popis tvorby výpočtových modelů a tvorby použitých geometrií. Metodami, kterými byl v této práci hodnocen vybraný svarový spoj, jsou:

- Metoda nominálních napětí
- Metoda extrapolovaného tvarového napětí
- Metoda efektivního vrubového napětí

Metoda nominálního napětí má omezené použití. Hlavní důvod tohoto omezení je nutnost mít předepsanou třídu FAT pro každý tvar svarového spoje (omezení je do takové míry, že třída FAT je rozdílná i pro různá místa vzniku porušení (při stejném tvaru svaru), to znamená, že v určitých případech se musí svar hodnotit více třídami FAT, i když je svar namáhán stejným způsobem).

Životnost hodnocená *metodou nominálního napětí* byla stanovena na hodnotu větší než 10^7 cyklů do lomu. Životnost byla ovšem uvažována pro porušení v kořeni svaru, avšak nejkritičtěji namáhaná oblast svaru byla v patě svaru.

Metoda extrapolace tvarového napětí hodnotí MSÚP vzniklé v patě svaru. Ovšem použití je prakticky neomezené. Touto metodou lze vymodelovat prakticky jakoukoliv svařovanou konstrukci. Výhodou je v porovnání s *metodou efektivního vrubového napětí* menší náročnost na výpočetní výkon, při porušení v patě svaru metoda vykazuje stejné výsledné hodnoty životností.

Výsledné životnosti při použití geometrie s objemovou reprezentací svaru byli vypočteny v rozmezí od $1,7 \cdot 10^6$ do $2,2 \cdot 10^6$ cyklů do lomu (konzervativnější geometrie). Modely geometrie tvořené střednicovými plochami vykazovali výsledné životnosti od $2,4 \cdot 10^6$ do $2,8 \cdot 10^6$ cyklů do lomu (méně konzervativní geometrie).

Metoda efektivního vrubového napětí má nejširší pole použití. Lze namodelovat jakoukoliv konstrukci i s atypickými tvary svarů. Metodou je možné hodnotit porušení vzniklé jak v kořeni svaru, tak i v patě svaru. Výhodou této metody je hodnocení životnosti pouze jedinou třídou FAT, tato kladná vlastnost se využívá především při analýze atypických tvarů svarů.

Predikovaná životnost se při poruše v oblasti paty svaru pohybuje mezi hodnotami od $2,2 \cdot 10^6$ do $2,5 \cdot 10^6$ cyklů.

V závěru každé kapitoly (kapitoly 5, 6 a 7 – jednotlivé metody hodnocení) jsou uvedeny výsledné počty cyklů do nastání MSÚP. Celkové porovnání vypočtených životností jednotlivých metod a geometrií je v kapitole 8.

Jak je uvedeno v IIW (zdroje [6] a [8]), výsledné počty cyklů do lomu pro jednotlivé metody musí být prakticky ověřeny (rozdílné materiály, kvalita provedení svaru, prostředí ve kterém je svarová konstrukce použita, atd.). Praktické ověřování výsledků by mohlo být téma pro závěrečné práce dalších ročníků.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Příspěvodatelé Wikipedie. Svařování. In: *Wikipedia: Otevřená encyklopedie* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, ©2020, Datum poslední úpravy 20. 05. 2020, 09:27 UTC [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD&oldid=18530047>
- [2] RAJU, MSP. a A. PREMANANDH. A study on common ship structural failures. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology* [online]. IAEME Publication, 2018, 9(7), 749 [cit. 2020-06-04]. ISSN 0976-6359. Dostupné z: <http://www.iaeme.com/ijmet/issues.asp?JType=IJMET&VType=9&IType=7>
- [3] JURENKA, J. *Přístupy predikce únavové životnosti svařovaných konstrukcí* [přednáška]. Praha: Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Fakulta strojní, ČVUT v Praze. In: *Docplayer.com* [online]. [vid. 15. 4. 2020]. Záznam dostupný z: <https://docplayer.cz/111931971-Pristupy-predikce-unavove-zivotnosti-svarovanychkonstrukci.html>
- [4] *Code_Aster* [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: www.code-aster.org
- [5] *SVS FEM* [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: www.svsfem.cz
- [6] HOBACHER, A. F. *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. 2. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-23757-2.
- [7] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [8] NIEMI, E., W. FRICKE a S. J. MADDOX. *Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components*. 2. Villepinte (France): Springer Nature Singapore, 2018. ISBN 978-981-10-5568-3.
- [9] PANTĚLEJEV, Libor. Únava kovových materiálů. *Ime.fme.vutbr.cz: Studijní opory pro výuku předmětů* [online]. Brno: Ústav materiálových věd a inženýrství, 1-31 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/ukm/Unava%20kovovych%20materialu.pdf?fbclid=IwAR3eO4dP624B2WvOSzz-BvstzLX5r2edWXnwqB-hICPr9RimjYKTE4RgInw>
- [10] ERIKSSON, Å., A. M. LIGNELL, C. OLSSON a H. SPENNARE. *Weld evaluation using FEM: A guide to fatigue-loaded structures*. Gothenburg (Sweden): Industrilitteratur AB, 2003. ISBN 978-9-175-48665-9.

- [11] AYGÜL, M. *Fatigue Analysis of Welded Structures Using the Finite Element Method* [online]. Gothenburg (Sweden), 2012 [cit. 2020-06-01]. ISSN no. 1652-9146. Dostupné z: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/155710.pdf>. Thesis for the degree of licentiate of engineering. Chalmers University of Technology.
- [12] NIEMI, E. *Stress determination for Fatigue Analysis of Welded Components*. Cambridge (England): Woodhead Publishing, 1995. ISBN 978-1-85573-213-1.
- [13] MARIN, T. a G. NICOLETTO. Fatigue design of welded joints using the finite element method and the 2007 ASME Div. 2 Master curve. *Frattura ed Integrità Strutturale* [online]. 2009, **3**(9), 78 [cit. 2020-06-04]. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.09.08. ISSN 19718993. Dostupné z: <https://www.fracturae.com/index.php/fis/article/view/53>

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Veličina	Jednotka
σ_m	Membránové napětí	[MPa]
σ_b	Ohybové napětí	[MPa]
σ_{nl}	Špičkové napětí	[MPa]
$\sigma(x)$	Průběh napětí po tloušťce	[MPa]
t	Tloušťka materiálu	[mm]
σ_{nom}	Nominální napětí	[MPa]
l	Šířka svaru	[mm]
σ_w	Normálové nominální napětí ve svaru	[MPa]
τ_w	Smykové nominální napětí ve svaru	[MPa]
S_w	Zatížení plocha svaru	[mm ²]
F	Zatěžující síla	[N]
σ_{hs}	Extrapolované tvarové napětí	[MPa]
w	Šířka svaru	[mm]
θ	Úhel svaru (v řezu)	[°]
K	Faktor intenzity napětí	[MPa · m ^{1/2}]
a	Velikost praskliny	[m]
Y_m	Korekční součinitel pro membránové napětí	[–]
Y_b	Korekční součinitel pro ohybové napětí	[–]
$M_{k,m}$	Korekční součinitel σ_{nl} pro membránové napětí	[–]
$M_{k,b}$	Korekční součinitel σ_{nl} pro ohybové napětí	[–]
ΔK	Rozkmit faktoru intenzity napětí	[MPa · m ^{1/2}]
C_0	Koeficient Parisova vztahu	[–]
m'	Exponent Parisova vztahu	[–]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
$\Delta\sigma$	Rozkmit napětí	[MPa]
σ_{max}	Maximální napětí	[MPa]
σ_{min}	Minimální napětí	[MPa]
K_{max}	Maximální faktor intenzity napětí	[MPa · m ^{1/2}]
K_{min}	Minimální faktor intenzity napětí	[MPa · m ^{1/2}]
N_f	Počet cyklů do lomu	[–]
σ_1	První hlavní napětí	[MPa]
m	Exponent S-N křivky	[–]
C	Konstanta S-N křivky	[–]
d	Vnitřní průměr trubky	[mm]
d_1	Vnější průměr trubky	[mm]
D	Vnější průměr desky	[mm]
L	Délka trubky	[mm]
a	Jmenovitá velikost svaru	[mm]

Symbol	Veličina	Jednotka
z	Délka odvěsny svaru	[mm]
E	Youngův modul pružnosti v tahu	[MPa]
μ	Poissonovo číslo	[–]
α	Středový úhel	[°]
u_{norm}	Deformační posuv ve směru normály	[mm]
x	Extrapoláční vzdálenost (směr)	[mm]
φ	Natočení okolo hrany skořepinového prvku	[°]
t_{modelu}	Tloušťka skořepinových prvků	[mm]
δ	Velikost oblasti s upravenou tloušťkou skořep. prvků	[mm]
t_{svaru}	Tloušťka skořepinových prvků v oblasti δ	[mm]

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Porušení svarového spoje. [2]	11
Obrázek 1.2 Různé modely geometrie svarového spoje. [3]	12
Obrázek 2.1 Nelineární rozložení napětí – separace napětí. [6]	13
Obrázek 2.2 Vliv geometrie konstrukce na průběh σ_{nom} . [6]	14
Obrázek 2.3 Vliv osamělé síly [6]	14
Obrázek 2.4 Vliv excentricity a nesouososti. [6]	15
Obrázek 2.5 Průběh nominálního napětí v prutovém prvku. [6]	15
Obrázek 2.6 Namáhání tupého svaru. [7]	15
Obrázek 2.7 Průběh napětí ve svaru. [8]	16
Obrázek 2.8 Konstrukční a geometrická koncentrace napětí. [6]	17
Obrázek 2.9 Určení typu namáhaného svarového spoje. [6]	17
Obrázek 2.10 Extrapoláčnické body - typ a). [6]	18
Obrázek 2.11 Extrapoláčnické body - typ b). [6]	18
Obrázek 2.12 Možnosti zaoblení svarových spojů. [6]	20
Obrázek 2.13 Uhel bočnice. Převzato a upraveno z [6]	20
Obrázek 2.14 3D model pro výpočet efektivního vrubového napětí. [3]	21
Obrázek 2.15 Doporučená diskretizace svarového spoje. [6]	21
Obrázek 2.16 Příklady trhlin svarového spoje. [6]	22
Obrázek 3.1 Cyklický průběh napětí. [9]	24
Obrázek 4.1 Řešený problém – spoj trubky s kruhovou deskou.	27
Obrázek 4.2 Prostorová reprezentace řešeného problému – výseč.	28
Obrázek 5.1 Uvažovaný průřez svarového spoje trubky s deskou.	29
Obrázek 6.1 Extrapoláčnické cesty	31
Obrázek 6.2 Osazení mezi trubkou a deskou.	32
Obrázek 6.3 „Relativně jemná síť“ pro metodu extrapol. tvarového napětí.	32
Obrázek 6.4 „Relativně hrubá síť“ pro metodu extrapol. tvarového napětí.	32
Obrázek 6.5 Okrajové podmínky pro výpočtový model rotační symetrie.	33
Obrázek 6.6 Cesta pro odečtení σ_1 u modelu rotační symetrie (vel. prvku $0,1 \cdot t$).	34
Obrázek 6.7 Umístění meridiánového řezu do prostoru výpočetního programu.	35
Obrázek 6.8 Cesta pro odečtení σ_1 u modelu osové symetrie (vel. prvků $0,2 \cdot t$).	37
Obrázek 6.9 Okrajové podmínky pro rotační symetrii u modelu se skořepinovými p.	38
Obrázek 6.10 Model geometrie se zvětšenou tloušťkou v oblasti svaru. [10]	38
Obrázek 6.11 Model geometrie se šikmými střednicovými plochami. [8]	39
Obrázek 6.12 Model geom. se šikmými střednicovými pl. a využitím pevných vazeb. [8]	39
Obrázek 6.13 Geometrie se skořepinovými p. a zvětšenou tl. v oblasti svaru. [10]	40
Obrázek 6.14 Cesta pro odečtení σ_1 (bez zvětšení tloušťky, skořep. p., velikost t)	41
Obrázek 6.15 Detail modelu geometrie se zvětšenou tloušťkou.	42
Obrázek 6.16 Cesta pro odečtení σ_1 (se zvětšením tloušťky, skořep. p., velikost $0,1 \cdot t$).	43
Obrázek 6.17 Detail modelu geometrie se zmenšenou tloušťkou.	44
Obrázek 6.18 Cesta pro odečtení σ_1 (se zmenšením tloušťky, skořep. p., velikost $0,2 \cdot t$).	45
Obrázek 6.19 Skořepinové modely se šikmými střednicovými plochami. [13]	46
Obrázek 6.20 Detail modelu geometrie se šikmou střednicovou plochou.	47
Obrázek 6.21 Cesta pro odečtení σ_1 (se šikmými střed. pl., skořep. p., velikost t)	48
Obrázek 7.1 Síť v oblasti vrubů – kvadratické prvky	51
Obrázek 7.2 Síť konečných prvků v oblasti vrubů (lineární prvky)	51
Obrázek 7.3 Porovnání napětí ve vrubech (Salome Meca).	52

Obrázek 7.4 Efektivní vrubové napětí, model rotační symetrie (prostorové kvadratické p.) . . 53
Obrázek 7.5 Efektivní vrubové napětí, model osové symetrie (prostorové kvadratické p.).... 55

Seznam tabulek

Tabulka 2.1 Velikosti prvků a vzdálenosti extrapoláčních bodů u MKP modelu. [6]	18
Tabulka 2.2 Doporučené velikosti prvků na povrchu zaoblení. [6]	22
Tabulka 3.1 Detail svarového spoje, metoda nominálních napětí. Převzato z [6].	25
Tabulka 3.2 Detail svarového spoje, metoda extr. tvarového napětí. Převzato z [6].	26
Tabulka 5.1 Detail svarového spoje – metoda nominálních napětí. Převzato z [6].	29
Tabulka 6.1 Napětí z modelu rotační symetrie s „relativně hrubou sítí“ (vel. prvků t).	33
Tabulka 6.2 Napětí z modelu rotační symetrie s „relativně jemnou sítí“ (vel. prvků $0,2 \cdot t$).	33
Tabulka 6.3 Napětí z modelu rotační symetrie s „relativně jemnou sítí“ (vel. prvků $0,1 \cdot t$).	34
Tabulka 6.4 Napětí z modelu osové symetrie s „relativně hrubou sítí“ (vel. prvků t).	36
Tabulka 6.5 Napětí z modelu osové symetrie s „relativně jemnou sítí“ (vel. prvků $0,2 \cdot t$).	36
Tabulka 6.6 Napětí z modelu osové symetrie s „relativně jemnou sítí“ (vel. prvků $0,1 \cdot t$).	36
Tabulka 6.7 Model s nezvětšenou tloušťkou p. a „relativně hrubou sítí“ (skořep. p. velikost t). ...	41
Tabulka 6.8 Model s nezvětšenou tl. p. a „relativně jemnou sítí“ (skořep. p. velikosti $0,2 \cdot t$).	41
Tabulka 6.9 Model s nezvětšenou tl. p. a „relativně jemnou sítí“ (skořep. p. velikosti $0,1 \cdot t$).	42
Tabulka 6.10 Model se zvětšenou tl. p. a „relativně hrubou sítí“ (skořep. p. velikosti t).	43
Tabulka 6.11 Model se zvětšenou tl. p. a „relativně jemnou sítí“ (skořep. p. velikosti $0,2 \cdot t$).	43
Tabulka 6.12 Model se zvětšenou tl. p. a „relativně jemnou sítí“ (skořep. p. velikosti $0,1 \cdot t$).	44
Tabulka 6.13 Model se zmenšenou tl. p. a „relativně hrubou sítí“ (skořep. p. velikosti t).	45
Tabulka 6.14 Model se zmenšenou tl. p. a „relativně jemnou sítí“ (skořep. p. velikosti $0,2 \cdot t$). ...	45
Tabulka 6.15 Model se zmenšenou tl. p. a „relativně jemnou sítí“ (skořep. p. velikosti $0,1 \cdot t$). ...	46
Tabulka 6.16 Model se šikmou střednic. pl. a „relativně hrubou sítí“ (skořep. p. velikosti t).	48
Tabulka 6.17 Model se šikmou střednic. pl. a „relativně jemnou sítí“ (skořep. p. vel. $0,2 \cdot t$).	48
Tabulka 6.18 Model se šikmou střednic. pl. a „relativně jemnou sítí“ (skořep. p. vel. $0,1 \cdot t$).	48
Tabulka 6.19 Detail svarového spoje, převzato z [6].	49
Tabulka 6.20 Výsledné životnosti, m. extr. tvar. napětí (m. s objemovou reprezentací svaru)	49
Tabulka 6.21 Výsledné životnosti, m. extr. tvar. napětí (m. tvořený střednicovými plochami)	50
Tabulka 7.1 Výsledné hodnoty napětí z výpočtového modelu rotační symetrie	52
Tabulka 7.2 Vypočtené hodnoty napětí z modelu osové symetrie	54
Tabulka 7.3 Životnosti pro metodu efektivního vrubového napětí.	56