

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky



Diplomová práce

**Výpočetní metody pro predikci únavové životnosti
rozsáhlých svařovaných konstrukcí**

Anotační list

Jméno autora:	Daniel VANCL
Název BP:	Výpočetní metody pro predikci únavové životnosti rozsáhlých svařovaných konstrukcí
Anglický název:	Fatigue life prediction of large welded structures
Rok:	2016
Obor studia:	Aplikovaná mechanika
Ústav/odbor:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky/ Odbor pružnosti a pevnosti
Vedoucí:	Ing. Josef Jurenka, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Vladislav Drobný, Ph.D.

Bibliografické údaje:	počet stran	70
	počet obrázků	61
	počet tabulek	21
	počet příloh	0

Klíčová slova:	svařované konstrukce, strukturální napětí, životnost
Keywords:	welded structures, structural stress, fatigue life

Anotace:

Svary jsou hojně využívané konstrukční prvky. V cyklicky zatěžovaných konstrukcích dojde často k porušení v oblasti svaru. Cílem této práce je popsat výpočetní metody predikce životnosti svarových spojů, vybrat vhodnou metodu pro predikování životnosti na rozsáhlých svařovaných konstrukcích a určit vhodný způsob použití vybrané metody v praxi.

Abstract:

Welded joints are plentifully used structural components. Structures subjected to cyclic loading are prone to fail in weld region. Main purpose of this paper is to examine methods for fatigue life prediction of welded joints, choose applicable method for fatigue life prediction of large welded structures and describe appropriate way for practical use of this method.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem moji diplomovou práci vypracoval samostatně výhradně s použitím literatury uvedené v seznamu použité literatury.

Daniel Vancí

Dne

Poděkování:

V první řadě děkuji mému vedoucímu práce panu Ing. Josefu Jurenkovi, Ph.D. za trpělivost, odborné rady a vedení k cíli. Dále bych chtěl poděkovat celému výpočetnímu oddělení firmy Doosan Bobcat Engineering s.r.o.. Především pak panu Ing. Vladislavu Drobnému, Ph.D., bez jehož počáteční vize by téma této práce nevzniklo. Dále jemu a Ing. Janě Whitechurch děkuji za inspiraci a odborné rady při tvorbě výpočetního algoritmu. Za zpracování dat z experimentu děkuji Ing. Šárce Trubelové.

Seznam použitých označení

Název	Značka	Jednotka
Napětí	σ	N/mm ²
Rozkmit napětí	$\Delta\sigma$	N/mm ²
Membránové napětí	σ_{mem}	N/mm ²
Ohybové napětí	σ_{ben}	N/mm ²
Nelineární špičkové napětí	σ_{nlp}	N/mm ²
Hot spot napětí	σ_{hs}	N/mm ²
Strukturální napětí	σ_s	N/mm ²
Počet cyklů do porušení	N	cyklů
Materiálová konstanta	C	MPa ³
Materiálová konstanta	m	-
Efektivní tloušťka svaru	a	mm
Tloušťka plechu	t	mm
Rychlost šíření trhliny	v	mm/cyklus
Rozkmit faktoru intenzity napětí	ΔK	MPa*mm ^{1/2}
Počet cyklů	n	cyklů
Materiálová konstanta	A	mm/(MPa*mm ^{1/2}) ^m
Délka trhliny	a	mm
Tloušťka	w	mm
Korekční součinitel	Y	-
Délka nohy svaru	λ	mm
Délka nohy svaru	l	mm
Vnitřní silové účinky	f	N/mm
Vnitřní silové účinky	m	Nmm/mm
Síla	F	N
Moment	M	Nmm
Součinitel nesouměrnosti cyklu	R	-
Poloměr pinball oblasti	r	mm
Směrodatná odchylka	S	-
Kvantil	u_p	-
Střední hodnota	μ	-
Pravděpodobnost porušení	P	-
Kumulované poškození	D	-

Obsah

1. Úvod	7
2. Metody pro hodnocení životnosti	9
2.1 Metoda nominálních napětí	9
2.2 Metoda strukturálního napětí	9
2.3 Metoda strukturálních hot spot napětí [13].....	9
2.4 Metoda efektivního vrubového napětí	10
2.5 Metoda založená na lomové mechanice	11
2.6 Metody predikce životnosti svarů používané v inženýrské praxi.....	12
2.6.1 Metoda Seam Sim od firmy Lohr [4]	12
2.6.2 Metoda Verity in FE-safe [12,16]	18
2.6.3 Přístupy programu FEMFAT [14]	20
2.6.4 Metoda Seamweld nCode [8]	22
2.7 Výběr vhodné metody pro praktické řešení a její použití	25
3. Výpočetní model	27
3.1 Tvorba modelu podle Seam Sim metodiky.....	27
3.2 Postup vypočtení strukturálního napětí.....	29
3.3 Verifikace funkčnosti přístupu strukturálního napětí na jednoduchém modelu.....	30
4. Citlivostní studie vybraného výpočetního modelu	33
4.1 Vliv nastavení MKP modelu na tuhost kontaktního spojení	33
4.2 Vliv nastavení MKP modelu na strukturální napětí, výslednou životnost a výpočetní náročnost	36
4.2.1 Vliv kvality sítě.....	36
4.2.2 Vliv nesymetrické sítě	38
4.2.3 Vliv globální velikosti sítě	38
4.2.4 Vliv lokální velikosti sítě v kritickém místě, vliv velikosti pinball oblasti a vliv geometrie svaru	39
4.2.5 Shrnutí vlivu nastavení sítě, vlivu velikosti pinball oblasti a porovnání výsledků pro různé geometrie.....	52
5. Experimentální vzorek a provedený experiment	55
6. Porovnání s jinými metodami predikce únavového života	57
6.1 Porovnání s metodou hot spot napětí [13]	57
7. Predikce životnosti rozsáhlé svařované konstrukce metodou strukturálních napětí	61
8. Závěr	66
9. Literatura	69

1. Úvod

Téma mé diplomové práce vzešlo z firmy Doosan Bobcat Engineering s.r.o.. Jako praktikant na tamním výpočetním oddělení jsem si vybíral z několika zajímavých témat k řešení v diplomové práci. Nejvíce mě zaujalo téma zdokonalení stávajícího či vyzkoušení nového postupu vyhodnocování životnosti svarových spojení.

V dnešní době jsou důležitým konstrukčním prvkem svařované plechy. Ve svařované konstrukci namáhané cyklicky dochází ve většině případů k porušení v oblasti svaru. Svar je velmi náchylný na únavu, protože už od výroby obsahuje vruby. Také jsou ve svaru velká zbytková napětí někdy dosahující až meze kluzu. Ve vrubech dochází ke koncentraci napětí a k iniciaci trhliny. Predikci únavové životnosti svaru je možné provést několika způsoby. A to metodou nominálních napětí, strukturálního hot spot napětí, strukturálního napětí, efektivního vrubového napětí a pomocí faktoru intenzity napětí. Tyto metody jsou popsány v kapitolách 2.1 – 2.5. Výstupem z napěťových metod je velikost rozkmitu napětí, která se porovnává s FAT únavovou S-N křivkou.

FAT únavová S-N křivka popisuje životnost svarového spojení jako závislost počtu cyklů do porušení na rozkmitu napětí. Obecně se pro malé testovací vzorky jako porušení uvažuje kompletní roztržení vzorku. U velkých komponentů nazýváme porušením stav, kdy je pozorován průchod trhliny skrze celou tloušťku materiálu. Rozkmit napětí je uvažován jako konstantní po celou dobu provozu. Pro kumulaci poškození způsobenou proměnným rozkmitem lze použít například Palmgren-Minerovo pravidlo. Křivky FAT se liší v únavových třídách značených jako FATXX. XX je hodnota rozkmitu napětí, pro který je 97,7% pravděpodobnost na přežití svaru po $2 * 10^6$ cyklech. FAT křivka vznikne vyhodnocením únavových experimentů cyklicky zatěžovaných svařovaných vzorků. Šikmá část únavové křivky je popsána vztahem $\Delta\sigma^m * N = C$, kde $\Delta\sigma$ je rozkmit napětí, N je počet cyklů do porušení a m a C jsou konstanty. Pro svary vychází konstanta $m = 3$. Konstanta C je pro každou křivku jiná a lze dopočítat z hodnot $\Delta\sigma$ a N , kterými prochází daná křivka. V závislosti na použité metodě predikce únavové životnosti jsou ve FAT křivkách zahrnuty různé vlivy na únavovou životnost. Jedná se např. o zbytkových napětích, technologii svařování, koncentraci napětí od geometrie svaru, okolním prostředím a nedokonalosti provedení svarového spoje. Třída FAT křivky nezáleží na jakostní třídě materiálu, ale pouze na druhu materiálu (ocel, hliník).

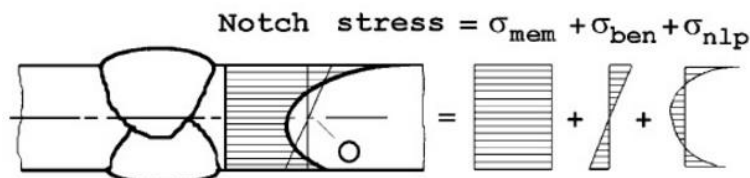
V mé práci se budu zabývat výpočetními metodami pro predikci únavové životnosti rozsáhlých svařovaných konstrukcí. Tyto konstrukce bývají většinou tvořeny svařovanými plechy, které se v MKP z důvodů výpočetní efektivity modelují skořepinovými prvky. Je vhodné, aby samotný svar byl modelován také skořepinovými prvky. S tím se pojí určitá specifika, která budou řešena v této diplomové práci.

Trhlina může vzniknout v kořeni nebo patě svaru. Tyto dvě lokality už od výroby představují místo s vrubem a tudíž koncentraci napětí. V jakém místě trhlina vznikne, závisí hlavně na poměru mezi tloušťkou těla svaru a a tloušťkou plechu t , kdy se zvětšujícím se poměrem a/t se zvyšuje pravděpodobnost vytvoření trhliny v patě svaru. Dále závisí také na typu zatěžování, tvaru svaru, přesnosti umístění, zbytkových napětích atd.. Trhliny v patě

svaru jsou vidět už v průběhu života svaru přímo v patě, zatímco trhliny v kořenu svaru vidět nejsou. Z tohoto důvodu jsou trhliny v kořeni považovány za nebezpečnější. Patu svaru lze navíc ošetřit různými technologickými úpravami pro snížení náchylnosti na tvorbu trhliny.

2. Metody pro hodnocení životnosti

Svar představuje místo s koncentrací napětí. Obecný průběh napětí v patě svaru je zobrazen na obr. 1. Toto napětí se nazývá vrubové („notch stress“ na obr. 1) a je složeno z membránového σ_{mem} , ohybového σ_{ben} a nelineárního špičkového napětí σ_{nlp} . Následující metody určení životnosti se liší uvažovaným zjednodušením vrubového napětí.



Obr. 1 Vrbové napětí a jeho složky [13]

2.1 Metoda nominálních napětí

Nominální napětí je elastické napětí počítané pro daný uvažovaný průřez. Lokální nárůst napětí vlivem svarového spojení není uvažován. Při výpočtu nominálního napětí je potřeba v blízkosti svarového spojení zahrnout vliv velkých geometrických prvků (např. výřezy). Pro tuto metodu se zahrne vliv lokální koncentrace napětí od geometrie svaru, svarových nedokonalostí nebo zbytkového napětí v únavových FAT křivkách. Nominální napětí se určí v místě svaru analyticky nebo pomocí MKP. Pomocí MKP se určuje v místě, které nebude ovlivněno koncentrací napětí od svaru. Tato metoda lze použít jen pro geometrické konfigurace a způsoby zatěžování svaru, které jsou už popsány v tabulkách, kódech nebo doporučeních. V případě vzniku trhliny v kořeni svaru se použije nominální napětí v rovině efektivní tloušťky svaru. Jednoduchost této metody umožňuje vyhodnotit svar analyticky. Nevýhoda je, že nelze použít na svary složitějších tvarů. Po rozšíření MKP se tato metoda používá velmi málo.

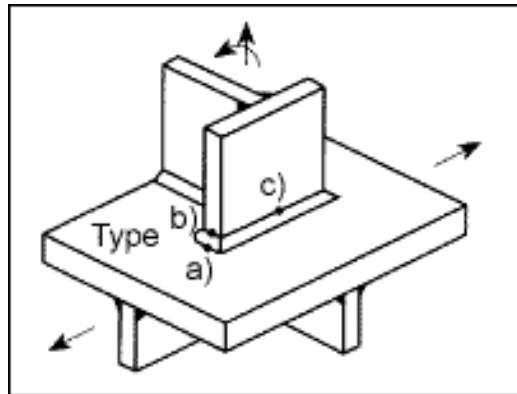
2.2 Metoda strukturálního napětí

Strukturální napětí je elastické napětí linearizované skrz tloušťku daného průřezu. Vypočte se součtem membránového a ohybového napětí. V této metodě je pro zjištění strukturálního napětí zahrnut nárůst napětí vlivem konstrukčních detailů a dodatečného ohybu plechu. Lokální koncentrace napětí způsobená geometrií svaru zahrnuta není. Tento přístup byl vyvinut pro patu svaru, ale v některých případech i pro kořen svaru. Funguje na principu linearizace napětí v daném průřezu. Toto téma bude obsáhleji rozebráno v kapitole 2.6.

2.3 Metoda strukturálních hot spot napětí [13]

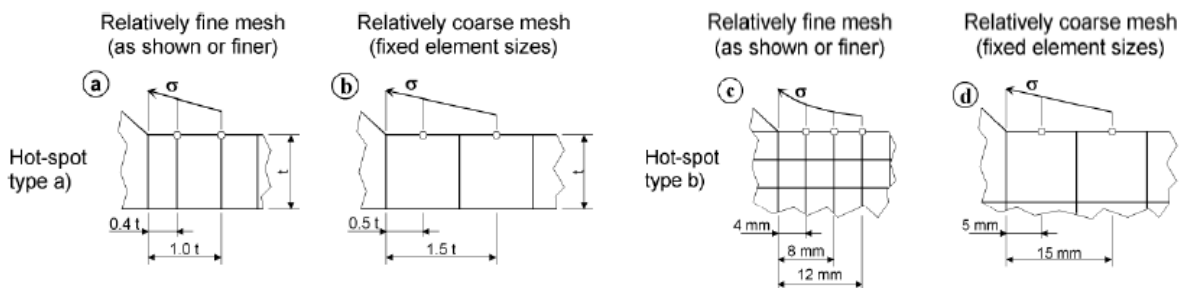
Je to metoda řadící se mezi metody používající strukturální napětí. Pro tuto metodu se linearizují povrchová napětí v blízkosti svaru. Nárůst napětí vlivem konstrukčních detailů v okolí svaru je započítán. Lokální koncentrace napětí způsobená geometrií svaru zahrnuta není. Tuto metodu je doporučeno použít pro případy, kde není jasně definovatelné nominální napětí. Je použitelná pouze pro případ, kdy iniciační trhlina vznikne v patě svaru. Funguje na principu extrapolace povrchových napětí před svarem. Povrchové napětí se získává

experimentálně nebo pomocí MKP. Experimentální přístup je citlivý na přesnost umístění tenzometrů a MKP přístup je citlivý na kvalitu sítě. Obecná doporučení pro umístění tenzometrů a nastavení sítě jsou zobrazena na obr. 3. Výhodou je potřeba menšího množství FAT křivek v porovnání s metodou nominálních napětí. A to křivky FAT90 a FAT100.



Obr. 2 Typy hot spot míst [13]

Na obr. 2 jsou zobrazeny 2 typy „hot spot“ míst. Pro místo „a)“ a „c)“ se napětí zjišťuje z napětí na přiléhající ploše. Pro místo „b)“ se napětí zjišťuje po hraně plechu.



Obr. 3 Způsoby extrapolace pro různé typy hot spot míst [13]

Podle obr. 3 se napětí extrapoluje lineárně nebo kvadraticky z rohových uzlů nebo z uzlů uprostřed hrany prvku („mid-side“ uzly). Typ „a“ z obr. 3 se aplikuje na hot spot místa „a)“ a „c)“ z obr. 2. Pro tyto hot spot místa je vzdálenost extrapoláčních bodů od paty svaru funkcí tloušťky stěny. Pro hot spot místo „b)“ není funkcí tloušťky stěny. Například pro případ na obr. 3a se extrapolované strukturální hot spot napětí rovná:

$$\sigma_{hs} = 1,67 * \sigma_{0,4*t} - 0,67 * \sigma_{1,0*t} ,$$

kde $\sigma_{0,4*t}$ a $\sigma_{1,0*t}$ jsou napětí změřené nebo spočítané ve vzdálenosti 0,4, resp. 1 násobku tloušťky stěny od paty svaru.

2.4 Metoda efektivního vrubového napětí

Tato metoda zahrnuje koncentraci napětí ve vrubu, která vznikne v patě a v kořeni svaru z důvodu geometrie svaru. Tento přístup uvažuje chování materiálu jako čistě elastické. Vrubové napětí je počítáno pomocí MKP softwaru. V MKP modelu je v patě nebo kořeni svaru vytvořen kruhový vrub. Pro plechy o tloušťce $t \geq 5$ mm je jeho průměr 1 mm. Pro plechy menších tloušťek ($t < 5$ mm) se modelují vruby s menším průměrem, a to průměrem 0,05 mm. MKP síť je v okolí vrubu velmi jemná. Což znamená velký počet stupňů volnosti a vysokou

výpočetní náročnost. Proto není obecně vhodné používat tuto metodu při vyhodnocování velkých sestav jako celku. Tato metoda se často kombinuje s metodou tvorby submodelů. Výsledné efektivní vrubové napětí se porovnává s únavovou křivkou FAT225 (pro průměr vrubu 1 mm) nebo FAT630 (pro průměr vrubu 0,05 mm). Výhodou je geometrická obecnost, protože je modelován detail a je tak možno hodnotit životnost pro místa se složitou geometrií, kde by dříve prezentované metody nebyly použitelné.

2.5 Metoda založená na lomové mechanice

Život cyklicky namáhané součásti lze rozdělit na tři stadia. V prvním dochází ke změně **materiálových vlastností**. Toto stadium na ale z pohledu délky života součásti velmi krátké. Důležitější jsou následující dvě stadia. Druhé je stadium **nukleace únavových mikrotrhlin**. V této fázi dochází k vytvoření skluzových pásem. V těchto pásmech se na povrchu materiálu vytvoří výstupky a prohlubně (extruze a intruze) o velikosti jednotek μm . V místech s největším rozdílem výšky extruze a intruze se tvoří únavové mikrotrhliny. Další stadium se nazývá **šíření trhliny**. Šířením trhliny se zabývá lomová mechanika. Při pokračujícím cyklickém zatěžování dochází k růstu mikrotrhlin, které se spojují v jednu makrotrhlinu – magistrální trhlinu. Na součást se svarem lze pohlížet jako na součást s defektem v oblasti svaru, protože už při výrobě svaru (ale také třeba odlitku) dojde k vytvoření vrubů, které představují magistrální trhliny. Šíření trhliny popisuje **křivka růstu trhliny**. Ta je rozdělena do tří oblastí: oblast nízkých rychlostí, oblast stabilního šíření únavové trhliny a oblast zrychleného šíření trhliny. Oblast stabilního šíření únavové trhliny popisuje Paris-Erdoganův zákon:

$$v = \frac{da}{dn} = A * \Delta K^m,$$

kde rychlost šíření trhliny (v) závisí na materiálových konstantách (A, m) a rozkmitu faktoru intenzity napětí (ΔK). Dále a je délka trhliny a n je počet cyklů. A pro ΔK platí:

$$\Delta K = Y \left(\frac{a}{w} \right) * \Delta \sigma * \sqrt{\pi * a},$$

kde $Y \left(\frac{a}{w} \right)$ je korekční součinitel v závislosti na poměru délky trhliny a a nominální šířky průřezu w , $\Delta \sigma$ je rozkmit napětí. Kde $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$.

Pro predikci životnosti pomocí MKP bude vztah pro ΔK upraven:

$$\Delta K = Y \left(\frac{a}{w} \right) * \Delta \sigma * \sqrt{\pi * a} * M_k(a),$$

kde přídavná funkce M_k zavádí vliv nelineárního špičkového napětí a speciálních geometrických podmínek. Pro $M_k(a)$ platí:

$$M_k(a) = \frac{2}{\pi} * \int_{x=0}^{x=a} \frac{k_{t,nlp}(x)}{\sqrt{a^2 - x^2}} dx$$

a $k_{t,nlp}(x)$ je faktor intenzity napětí [5]. Pro adekvátní použití lomové mechaniky je potřeba odhadnout iniciační délku trhliny. Hodnoty kolem $a_i = 0,1$ mm vykazují dobré výsledky. Hodnota $a_i = 0,15$ mm lze použít jako konzervativní odhad. Pro některé aplikace je možné použít i hodnotu $a_i = 0,05$ mm. Doplnění tohoto tématu je možno nalézt v literatuře [13].

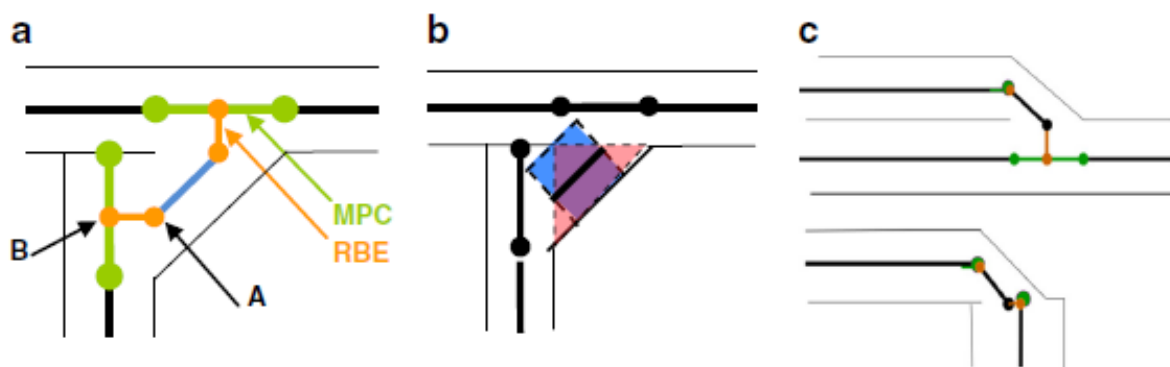
2.6 Metody predikce životnosti svarů používané v inženýrské praxi

V této části je pozornost věnována metodám založeným na strukturálním napětí. Životnost se vyhodnocuje z uzlových sil v patě nebo kořeni svaru. Podrobněji bude tento způsob popsán v následujících kapitolách.

2.6.1 Metoda Seam Sim od firmy Lohr [4]

Firma Lohr navrhuje nákladní vagony. Vagon je po dobu svého provozu zatěžován různými vlivy okolí, jako je vliv profilu trati, aerodynamiky, nakládání (vykládání), setrvačných sil. Hlavní konstrukční prvek na vagonech firmy Lohr jsou svařované plechy. Svary jsou z pohledu životnosti nejkritičtější místa konstrukce. Metoda Seam Sim [1] od firmy Lohr se používá pro MKP predikci životnosti svarů. Konstrukce jsou modelovány pomocí skořepinových prvků. Tato metoda byla nejprve vyvinuta pro patu svaru. W. Fricke ji rozšířil i pro kořen svaru [6,15]. Výpočetní model vytvořený podle metody Seam Sim byl validován experimentem. Součástí této metody od firmy Lohr je také automatizace přípravy MKP modelu. Detailněji bude přístup popsán dále.

2.6.1.1 Tvorba MKP modelu svaru



Obr. 4 Způsob modelování svaru skořepinovými prvky Seam Sim metodou [4]

Schéma tvorby skořepinového prvku tvořícího náhradu geometrie svaru je zobrazeno na obr. 4, kde je modrou úsečkou zobrazen skořepinový prvek aproximující svar. Skořepinový prvek je modelován uprostřed tloušťky svaru. Bod A a bod B spojuje tuhá vazba – tzv. „Rigid Body Element“ (RBE - tuhý 1-D prvek). Bod A je krajní uzel skořepinového prvku, který nahrazuje svar. Bod B vznikne promítnutím bodu A na skořepinové prvky svařovaných plechů. Uzel B má svázána uzlová posunutí s prvky plechu tzv. „Multipoint constraint“ (MPC) vazbou. Prvky plechu jsou reprezentovány zelenými uzly. Zároveň posunutí uzlu B odpovídá váženému průměru posunutí zelených uzlů.

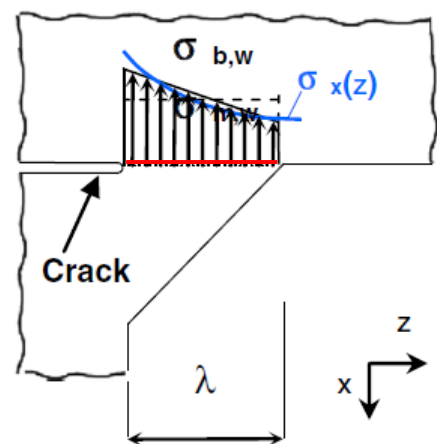
Pro správnou distribuci zatížení ve složitějších sestavách s množstvím svarů je potřeba správně modelovat tuhost svaru. Na obr. 4b je modře zobrazena tloušťka skořepinového prvku. Ta je stejná jako skutečná tloušťka těla svaru (zobrazena červeně). Náhrada těla svaru skořepinovým prvkem je zobrazena černou úsečkou a prochází středem tloušťky svaru. Na obr. 4c je zobrazeno použití této metody pro překládané a rohové svary.

2.6.1.2 Únavová životnost

Únavová životnost se vyhodnocuje na základě výpočtu strukturálního napětí v kořenu a patě svaru. Strukturální napětí v patě svaru se zjišťuje linearizací napětí přes základní tloušťku plechu. Strukturální napětí se získává součtem ohybového normálového napětí a membránového normálového napětí. Při použití skořepinových prvků je možné zjistit rozložení strukturálního napětí podél paty svaru přímo z uzlových sil a momentů v prvcích před patou svaru. Touto metodou výpočtu strukturálního napětí je možno dosáhnout přesnějších výsledků určení životnosti než přímým použitím napětí v patě svaru. Napětí odečítané přímo v patě svaru může být ovlivněno singularitami napětí. Pro koutové svary se při vyhodnocování únavové životnosti v patě svaru používají únavové křivky FAT90 nebo FAT100. FAT90 se používá pro svar, který nese zátěž a FAT100 pro svar, který nenese zátěž. Svar nenese zátěž, když silový tok nepřechází z jednoho plechu přes svar do druhého plechu. O FAT křivkách pro patu svaru je psáno v kapitole 3.3 v IIW doporučeních [13] (International Institute of Welding – Mezinárodní Instituce pro Svařování). Fricke tuto metodu rozšířil i pro vyhodnocování únavy v kořenu svaru při šíření trhliny v noze svaru (svarová plocha – znázorněna červenou úsečkou na obr. 5) [6,15]. Pro kořen svaru se používá únavová křivka FAT80.

2.6.1.3 Frickeho metoda pro vyhodnocení únavy v kořeni svaru pomocí strukturálního napětí v noze svaru

Tato metoda je použitelná pro jednostranný koutový svar. Předpokládá se, že svar bude zatěžován převážně ohybem, protože pak se trhlina šíří z kořene svaru v noze svaru. Pro šíření trhliny v noze svaru musí být smykové napětí menší než 20 % strukturálního napětí, protože v případě většího smykového napětí se změní směry hlavních napětí a změní se směr šíření trhliny. Tato metoda spočívá na principu linearizace skutečného nelineárního normálového napětí (napětí $\sigma_x(z)$) v noze svaru (obr. 5). Tím vznikne napětí lineárně rozložené po délce nohy svaru. Smykové napětí v rovině nohy svaru se získává také z uzlových sil. Délka nohy svaru by neměla být větší než šířka plechu, protože pak by mohlo spíše docházet k šíření trhliny z paty svaru.



Obr. 5 Schéma pro určení strukturálního napětí v noze svaru [4]

2.6.1.4 Použití uzlových sil a momentů k určení strukturálního napětí

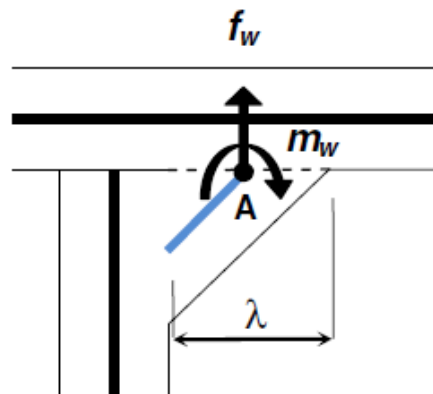
Složky strukturálního napětí se vypočítají z vnitřních silových účinků f_w a m_w (obr. 6) nazývaných „line forces“ tj. čárové síly. Čárové síly se vypočítají vztažením uzlových sil na jednotku délky hrany prvku paty svaru. Způsob výpočtu čárových sil z uzlových sil bude popsán v kapitole 2.6.4.

Strukturální napětí je součtem ohybového a membránového napětí a platí:

$$\sigma_{s,w} = \sigma_{b,w} + \sigma_{m,w},$$

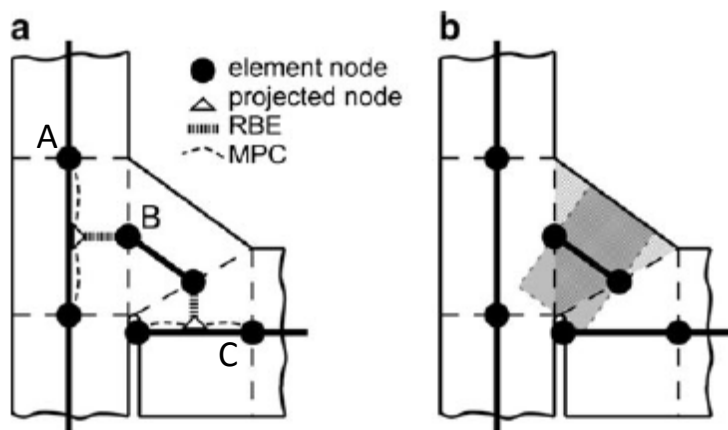
kde složky membránového a ohybového napětí se rovnají:

$$\sigma_{m,w} = \frac{f_w}{\lambda}, \quad \sigma_{b,w} = \frac{6m_w}{\lambda^2}.$$



Obr. 6 Schéma pro získání strukturálního napětí z uzlových sil a momentů [4]

Plechys jsou převedeny na střednicová tělesa. Ty jsou diskretizovány skořepinovými prvky. Uzly paty a nohy svaru jsou na obr. 7 popsány písmeny A a C, resp. B.



Obr. 7 Modelování skořepinových prvků pro optimální nahrazení svaru [7]

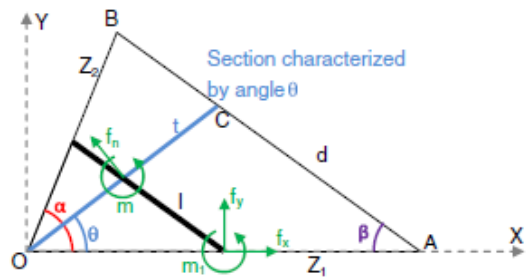
2.6.1.5 Alternativní přístupy pro zjištění strukturálního napětí v kořeni svaru

Frickeho metoda popsaná výše nevyhovuje některým geometrickým a zátěžným konfiguracím. Podle výsledků únavových experimentů jsou navrženy další postupy.

2.6.1.6 Metoda nalezení kritického průřezu svaru s maximálním strukturálním napětím

Tato studie vychází z Maddoxových experimentálních testů. Použil ultrazvukovou technologii pro úpravu struktury svařované oceli v místě paty svaru [11]. Ta je označena zkratkou UIT („ultrasonic impact treatment“). Tato technologie je založena na deformování povrchu materiálu v patě svaru [18]. Deformování je prováděno nárazy malých válečků na povrch svaru. Válečky jsou z vysokopevnostní oceli a nárazy se opakují s vysokou frekvencí.

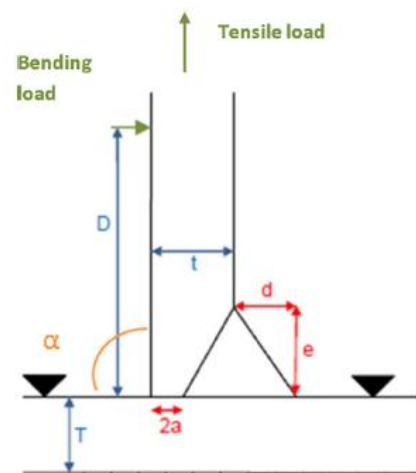
Tím dojde k plastizaci materiálu na povrchu a k změně zbytkového napětí v patě svaru. Po této technologické úpravě a při určité konfiguraci svaru dochází ke vzniku trhliny v kořeni svaru. Pro svar obecných rozměrů nemusí dojít k šíření trhliny v noze svaru, protože smykové napětí v noze svaru může být větší než 20 % strukturálního napětí. Proto se v této metodě hledá kritický průřez svaru (na obr. 8 je zobrazen modře), kde je strukturální napětí maximální. Pro tento případ byl v publikaci [4] odvozen vztah pro strukturální napětí v závislosti na úhlu θ . Pokud je v daném kritickém průřezu smykové napětí menší než 20% strukturálního napětí, může být únavová křivka FAT80 považována za konzervativní únavovou třídu pro predikci životnosti.



Obr. 8 Schéma pro určení kritického průřezu přes tělo svaru [4]

2.6.1.7 Korekce na dvouosý stav napětí

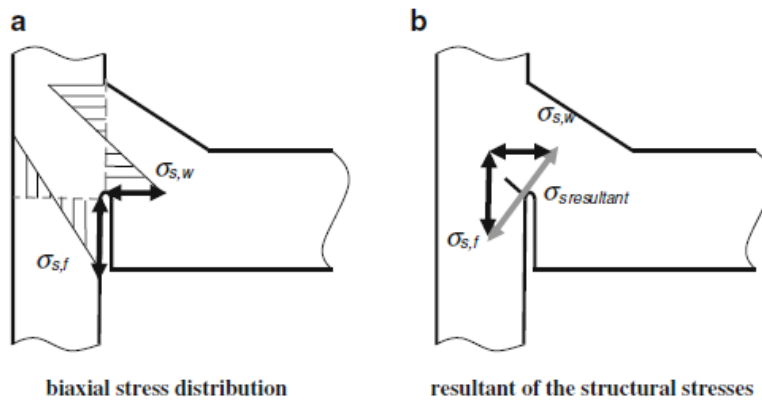
Při experimentálních únavových testech se při určitých kombinacích zatížení a rozměrů svarů došlo k tomu, že se trhlina z kořene svaru šíří jiným směrem než tělem svaru nebo nohou svaru. Za podmínek, kdy je délka nohy svaru větší než tloušťka plechu, zatížení je tahové a podpory jsou blízko u sebe (obr. 9), dochází k šíření trhliny šikmo z kořene svaru skrz tloušťku plechu T [4]. Směr šíření trhliny leží ve výšce mezi směrem tloušťky plechu a nohou svaru. Ze strukturálního napětí spočítaného kolmo skrz tloušťku plechu byla predikována životnost vzhledem k únavové křivce FAT80. Ta nevycházela konzervativní. Dále pro případ, kdy je délka nohy svaru větší než tloušťka plechu a zatížení je ohybové, se trhlina sice šíří po noze svaru, ale predikovaná životnost ze strukturálního napětí počítaného v noze svaru není konzervativní v porovnání s křivkou FAT80.



Obr. 9 Schéma svaru s jeho rozměry [4]

Pro správné vyhodnocení těchto případů se v kořeni svaru zkombinují příspěvky strukturálního napětí ve směru nohy svaru ($\sigma_{s,w}$) a ve směru tloušťky plechu ($\sigma_{s,f}$) (obr. 10a). Pro výsledné strukturální napětí (obr. 10b) platí:

$$\sigma_{s,resultant} = \sqrt{\sigma_{s,f}^2 + \sigma_{s,w}^2}$$

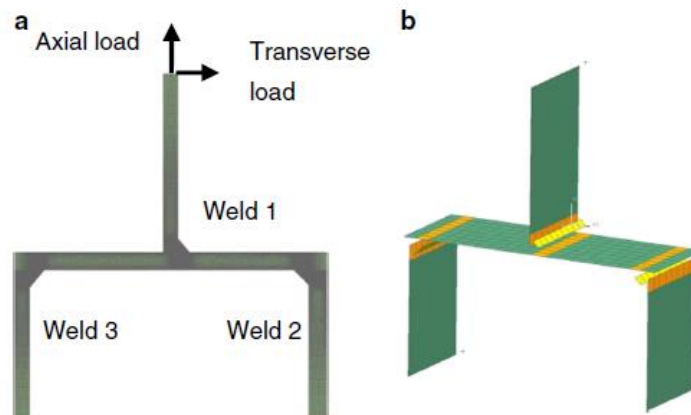


Obr. 10 Šíření trhliny obecným směrem přes tloušťku plechu [4]

Pokud jsou napětí $\sigma_{s,w}$ a $\sigma_{s,f}$ řádově stejně velká, tak lze predikovanou životnost z výsledného strukturálního napětí $\sigma_{s,resultant}$ považovat za konzervativní vzhledem k FAT80. Touto metodou lze také určit počáteční směr šíření trhliny. Ten bude kolmý na výslednici strukturálního napětí v kořeni svaru.

2.6.1.8 Verifikace skořepinových modelů

Uzlová posunutí vypočtená na skořepinovém 3-D modelu (obr. 11b) byla porovnána s posunutími na 2-D rovinném modelu s hustou sítí (obr. 11a). V tomto modelu se počítá s rovinným napětím a předpokládá se, že výsledky jsou v dobré shodě se skutečností. Kritériem shody je tuhost a vypočtené strukturální napětí.

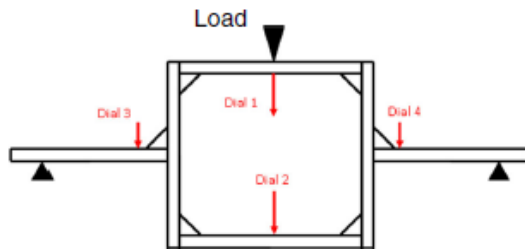


Obr. 11 Porovnání MKP metod pro predikci životnosti svarů [4]

Na obr. 11a je velikost rovinných prvků ve svaru 0,25 mm. Na skořepinovém modelu (obr. 11b) je nastavena globální velikost prvků na 10 mm. Výsledná posunutí ve svarech jsou počítána pro dva způsoby zatěžování (obr. Obr. 11a – axiální a příčné zatěžování). Ve svaru 1 (označen jako „weld 1“) není v posunutí mezi rovinným a skořepinovým modelem žádný rozdíl. U zbylých dvou svarů se rozdíl v posunutích pohybuje okolo 2%. Pro napětí je maximální rozdíl 5%, což je zanedbatelný rozdíl. Přestože je skořepinový model modelován 40x většími prvky, tak poskytuje výsledky, které jsou ve velmi dobré shodě s výsledky rovinného modelu.

2.6.1.9 Validace skořepinových modelů

Model byl ověřován několika experimentálními měřeními. A to tříbodovým ohybem při statickém zatížení pro porovnání tuhosti (obr. 12), a tahovým a ohybovým únavovým testem na jednom konci přivařeného nosníku obdélníkového průřezu (obr. 13).



Obr. 12 Tříbodový ohybový experiment se statickým zatížením [4]

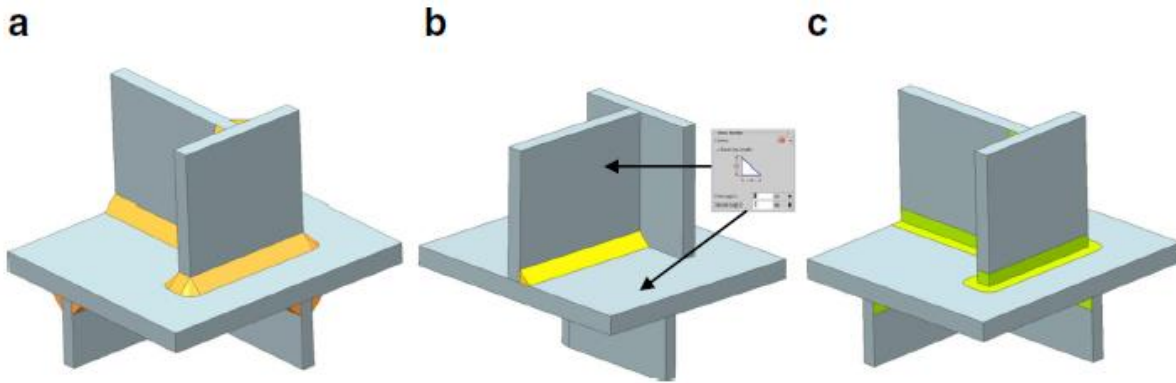


Obr. 13 Ohybový únavový test [4]

Z měření tříbodovým statickým ohybem vyšlo, že posunutí měřených bodů se od výpočtu liší maximálně o 2,3%, a že svary modelované skořepinovými prvky mají odpovídající tuhost. Z únavového měření vyšlo, že vzniklé body v S-N grafu leží okolo FAT127 S-N křivky [4], která dobře odpovídá Frickeovým výsledkům v publikaci [6]. S-N křivka FAT80 může být použita jako konzervativní únavová křivka. Vyhodnocování únavy skořepinovými prvky je tedy možné i pro namáhání svaru ohybem, kdy se trhлина iniciuje v kořeni svaru a podle Frickeho postupuje směrem po noze svaru.

2.6.1.10 Příprava MKP modelů

Velké konstrukce jsou modelovány v NX CAD programu. Tento program se také využívá na tvorbu MKP sítě. Manuální vytváření svarových spojení je velmi neefektivní a lze automatizovat. Částečná automatizace byla provedena v C++ programech, které používají NX Open API (Application Programming Interface) příkazy. Postup přípravy 3-D CAD modelu je zobrazen na obr. 14a. Nejprve se vytvoří 3-D geometrie svaru pomocí NX nástroje na tvorbu svarů (obr. 14a,b). Poté program obtiskne svarovou plochu na svařované plechy (obr. 14c). Plechy a svar jsou poté idealizovány pomocí střednicových ploch. Poté je manuálně vytvářena manuálně MKP síť. Po vytvoření sítě se automaticky vytvoří spojení mezi hranou skořepinových prvků svaru a mezi plochou skořepinových prvků plechu. Spojení pomocí tuhých 1-D prvků bylo popsáno v kapitole 2.6.1.1.



Obr. 14 Postup přípravy modelů pro MKP vyhodnocení životnosti [4]

2.6.2 Metoda Verity in FE-safe [12,16]

FE-safe je výkonný, komplexní a jednoduše použitelný software pro predikci únavy. Používá se spolu s komerčními MKP programy pro zjištění:

- místa, kde mohou nastat únavové lomy,
- času, kdy se únavové trhliny iniciují,
- koeficientu bezpečnosti při pracovním zatížení,
- pravděpodobnosti porušení daných provozních režimech.

Výsledky se zobrazují jako barevné kontury, které je možno zobrazit ve standartních MKP prohlížečích.

2.6.2.1 Verity in fe-safe

Verity je přídatný modul v fe-safe softwaru pro řešení únavových analýz svařovaných konstrukcí. Počítá ekvivalentní strukturální napětí založené na Battelle metodě pro strukturální napětí [17], což je metoda vyvinutá Battelle institutem založená na stejném principu jako metoda Seam Sim. Ze strukturálního napětí se predikuje životnost. Pro správné použití Verity in FE-safe se přepokládá pracovní zkušenost s FE-safe. Tato metoda je nezávislá diskretizaci modelu a používá jedinou FAT křivku.

2.6.2.2 Modelování svarů ve Verity in fe-safe

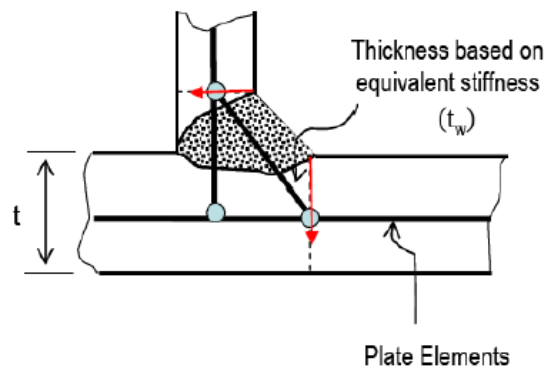
V tomto programu není svarové spojení nahrazováno kontaktem podle Seam Sim metody, ale přímým napojením prvků těla svaru na prvky přivařovaných plechů. Tímto modulem je možno vyhodnocovat životnost následujících konfigurací svaru:

- plně provařeného koutového svaru,
- částečně provařeného koutového svaru,
- přeplátovaných svarů.

Postup tvorby modelu je pro všechny typy obdobný. Jako příklady zde budou popsány koutové svary.

2.6.2.3 Plně provařený koutový svar

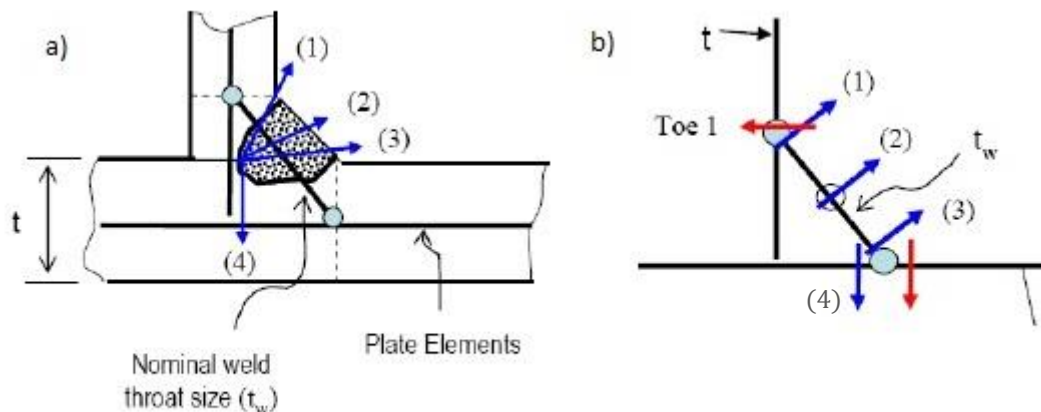
Jeden z podporovaných typů koutového svaru je koutový plně provařený svar. Ten je zobrazen na obr. 15. Tento typ svaru se nahrazuje skořepinovými prvky sestavenými do trojúhelníku. V této konfiguraci svaru dochází k porušení v patě svaru. Vertikální prvek trojúhelníkové konfigurace vznikne protažením přivařovaného plechu. Tento prvek má stejnou tloušťku jako vertikální plech. Prvku nahrazujícímu svar je přiřazena tloušťka $t_w = l/\sqrt{2}$, kde l je délka nohy svaru. Tato tloušťka odpovídá efektivní tloušťce svaru. Pro tuto tloušťku strukturální napětí odpovídá přesněji referenčnímu strukturálnímu napětí na objemovém modelu než pro tloušťky $t_w = t$ nebo $t_w = l * \sqrt{2}$. Ale v důsledku tuhosti trojúhelníkové konfigurace nehraje zvolená tloušťka prvku svaru výraznou roli. Podrobný postup výpočtu strukturálního napětí v patě svaru bude popsán v kapitole 2.6.4.



Obr. 15 Schéma plně provařeného svaru s uvažovanými směry šíření trhliny [16]

2.6.2.4 Částečně provařený svar

Další podporovaný typ svaru je částečně provařený svar. Tento typ svaru je zobrazen na obr. 16a. Svar je modelován skořepinovým prvkem o tloušťce $t_w = l/\sqrt{2}$ přímo napojeným na skořepinové prvky plechu. Uzel spojující prvek svaru s prvky plechu musí být na úrovni paty svaru (zobrazeno tenkou čárkovanou čarou na obr. 16a). V takto provařeném svaru může dojít ke vzniku trhliny i v kořeni svaru. Trhlina z kořene se může šířit čtyřmi směry podle obr. 16a. Modře naznačené směry na obr. 16b zobrazují směr šíření trhliny z kořene svaru, červeně označené směry ve vztahují k patě svaru. Pro kořen svaru se strukturální napětí určí v místech nakreslených směrů jako normálové napětí k danému směru. Pro zjištění strukturálního napětí pro šíření trhliny ve směru (2) by musel být vytvořen uzel uprostřed těla svaru. Z toho důvodu se strukturální napětí pro směr (2) určí jako průměrné napětí ze směrů (1) a (3). Obecně platí, že se zvyšující se tloušťkou svaru je dominantnější vliv strukturálního napětí v patách svaru. Také platí, že se zvětšující se délkou nohy svaru se zvyšuje nepřesnost predikce životnosti pro směr (4), protože se uzel, ze kterého se vyhodnocuje strukturální napětí pro (4), posune daleko od skutečného místa kořene svaru. Také pro částečně provařený svar bude podrobný postup výpočtu strukturálního napětí uveden v kapitole 2.6.4.



Obr. 16 Schéma částečně provařeného svaru a podporované směry šíření trhliny [16]

Metody obsažené v modulu Verity in FE-safe jsou méně komplexní než metody Seam Sim představené firmou Lohr. Geometrii svaru aproximují méně přesně. Nenabízí možnost šíření trhliny z kořene svaru pro případ plně provařeného koutového svaru. Pro částečně provařený svar nenabízí Verity metoda následující možnosti predikce životnosti při šíření trhliny z kořene svaru:

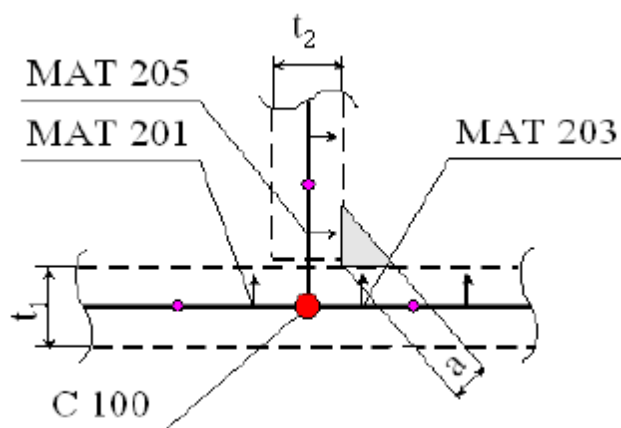
- přes nohu svaru podle Frickeho,
- libovolným směrem přes tělo svaru,
- šikmým směrem přes tloušťku plechu.

Dále s narůstající tloušťkou svaru bude narůstat nepřesnost určení strukturálního napětí v kořeni svaru směrem přes tloušťku plechu, protože se toho strukturální napětí zjišťuje z místa uzlu paty (obr. 16b).

2.6.3 Přístupy programu FEMFAT [14]

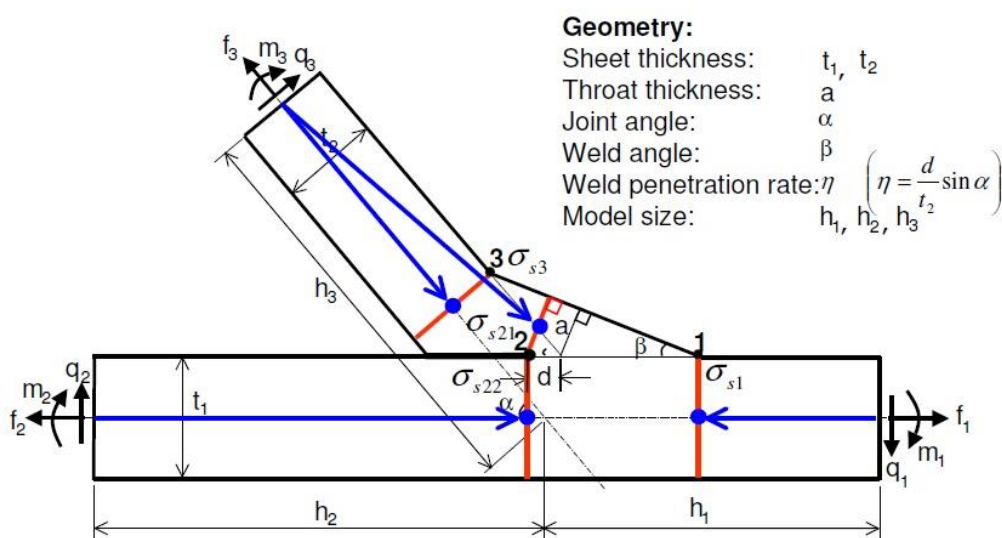
Program FEMFAT nabízí další způsob hodnocení životnosti svarů. Tato metoda podporuje hodnocení životnosti obecného koutového, přeplátovaného a V svaru. Svar se modeluje podle obr. 17. Plechy se převedou na skořepinová tělesa. Tím vznikne mezera mezi spodní hranou přivařovaného (vertikálního) plechu a střednicí druhého (horizontálního) plechu. Následující postup tvorby geometrie a nastavení adekvátní tuhosti modelovaného svaru je odlišný od metod Verity v Fe-safe, Seamweld nCode nebo SeamSim od firmy Lohr. Uzel vertikálního přivařovaného plechu (růžový) se promítne na skořepinový prvek horizontálního plechu. Tím vznikne červený uzel, který je na obr. 17 označený popiskem C 100. Tyto dva uzly se spojí skořepinovým prvkem. Nově vzniklý prvek neodpovídá geometrii svaru, jak je tomu u jiných metod. Pro adekvátní nahrazení tuhosti svaru je měněna tuhost přiléhajících prvků ke svaru. Na obr. 17 se způsob nastavení tuhosti přiléhajících prvků značí jako „MAT 201“, „MAT 203“ a „MAT 205“. Kombinací různě tuhých prvků přiléhajících ke svaru se získává adekvátní nahrazení tuhosti svaru. Popisek „C 100“ znamená, že uzel není krajním uzlem svaru. Krajní uzly se označují popiskem „C 101“ a „C 102“. Také je potřeba rozlišovat

horní a spodní stranu prvku. Proto musí být správně orientované skořepinové plochy, jak naznačují šipky na obr. 17.



Obr. 17 Náhrada koutového svaru v programu FEMFAT [19]

Strukturální napětí se vyhodnocuje z čárových sil a momentů (f_i, m_i, q_i) podle obr. 18. Čárové síly a momenty se získají z uzlových sil a momentů, které se vztáhnou na délku prvku ve směru svaru. Určení čárových sil bude předvedeno v kapitole 2.6.4.



Obr. 18 Schéma určení strukturálního napětí podle FEMFAT [14]

Pro vyhodnocení životnosti ze strukturálního napětí je možno použít jednu ze dvou metod:

- metoda strukturálního napětí podle Zhanga (SSZ),
- metoda master S-N křivky (MSZ).

Pro SSZ je strukturální napětí upraveno vrubovým faktorem z FEMFAT databáze. Napětí se upravuje v závislosti na poměru napětí na horní a spodní straně prvku. To se poté porovnává s FAT křivkou z databáze. Pro MSZ se strukturální napětí upravuje analyticky počítanými vrubovými faktory v závislosti na geometrii daného svaru. Vypočítané napětí je vrubové napětí, které se porovnává s master S-N křivkou.

Pro správnou funkčnost této metody je zapotřebí znát tuhost jednotlivých prvků přiléhajících ke svaru, znát databázi používaných FAT křivek a mít zkušenost s používáním

vrubových faktorů. Tyto informace má FEMFAT experimentálně ověřené a bez koupi jejich software nejsou dostupné. Tento způsob modelování svaru a predikování životnosti nebudu v mé práci dále rozvíjet.

2.6.4 Metoda Seamweld nCode [8]

Seamweld nCode pracuje s výstupy z MKP softwaru jako je třeba Nastran, Abaqus nebo Ansys. Různé typy svarů se analyzují rozdílně. Z toho důvodu se každý svar na vstupu do nCode rozřadí do předdefinovaných kategorií. Následující typy svarů jsou podporované:

- jednostranný koutový svar,
- přeplátovaný svar,
- laserem přeplátovaný svar,
- bodový svar.

Napětí pro vyhodnocení únavové životnosti je možné získat z uzlových sil a momentů, z uzlových posunů nebo přímo z napětí z MKP výpočtu.

2.6.4.1 Modelování svarů pro nCode

Díly tělesa, které mají být analyzovány, by měly být v blízkosti tvořeny přednostně ze 4 uzlových čtyřúhelníkových skořepinových prvků. Tyto skořepinové prvky leží ve střednicích plechů. Svar je modelován jednou nebo dvěma řadami skořepinových prvků (podobně jako u Verity podle obr. 15 na str. 19 a obr. 16a na str. 20). V okolí svaru by měla být velikost sítě okolo 5 mm a neměly by tam ležet trojúhelníkové prvky. Normály prvků svaru by měly směřovat ven ze svaru (směrem ke svářeči).

V patách koutového svaru se únavová trhlinka uvažuje stejně jako ve Verity. V kořeni svaru se ale uvažují jen dva směry porušení. Jeden směr je přes přivařovaný plech a druhý přes střed prvku těla svaru (odpovídá směru (2) na obr. 16b na str. 20), kde se strukturální napětí získá průměrem z krajních uzlů prvku těla svaru. Neuvažuje se šíření trhlinky směrem po noze svaru. Stejně jako u Verity se s zvětšující se šířkou svaru zvyšuje nepřesnost určení životnosti při šíření trhliny přes tloušťku plechu z kořene svaru.

2.6.4.2 Výpočet napětí pro vyhodnocení životnosti

Pro výpočet napětí je potřeba identifikovat prvky paty, kořenu svaru a samotného svaru. Poté zjistit, které uzly prvků paty a kořene jsou sdílené s uzly prvku těla svaru. Poté identifikovat a nastavit horní stranu prvků paty a kořene tak, aby se uvažovaná trhlinka šířila z horní strany, protože se vznik trhliny predikuje právě v horní straně prvku. Napětí pro hodnocení únavy lze určovat přímo z MKP napětí, z deformací nebo z uzlových sil a momentů. Také záleží, zda bude kalkulace probíhat uprostřed hrany prvku nebo v uzlech.

2.6.4.3 Postup přímo z MKP napětí

Nejprve je potřeba zjistit napětí v souřadnicích prvku pro horní i spodní stranu prvku. Pokud je jako lokace pro vypočítání napětí vybrán uzel daného prvku paty svaru, tak je napětí v uzlu vypočteno jako nezprůměrované napětí v lokálních souřadnicích. Pokud je pro

vypočtení napětí vybráno místo uprostřed hrany prvku, tak se napětí zprůměruje z krajních uzlů hrany v lokálním souřadném systému. Ten je definován: osa z' směřuje kolmo vzhůru z prvku paty, osa y' leží na hraně paty svaru a osa x' je kolmá na hranu paty svaru. Pro prvky těla svaru se napětí vypočítává pro těžiště v lokálních souřadnicích.

2.6.4.4 Postup při použití uzlových posunutí

Ze směrových deformací se určí tenzor deformace. Ten se určí v každém uzlu paty a kořene svaru pro každý prvek paty a kořene svaru. V každém uzlu paty a kořene svaru je definován lokální souřadný systém. Rozšířeným Hookeovým zákonem se z tenzoru deformace získá tenzor napětí pro každý uzel svaru.

2.6.4.5 Výpočet strukturálního napětí z uzlových sil

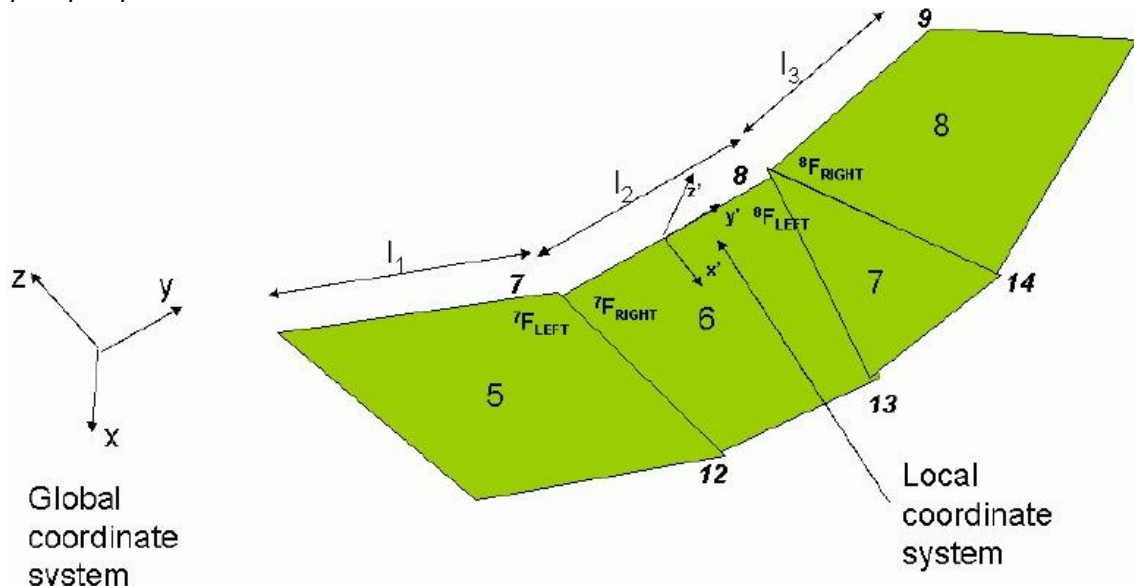
V metodě Seam Sim firmy Lohr je popsáno, že strukturální napětí se vypočítá jako součet membránového a ohybového napětí. To se tedy rovná: $\sigma_{s,w} = \sigma_{m,w} + \sigma_{b,w}$, kde složky ohybového a membránového napětí jsou rovny:

$$\sigma_{m,w} = \frac{f_w}{\lambda},$$

$$\sigma_{b,w} = \frac{6 * m_w}{\lambda^2}.$$

Vypočtení čárových sil f_w a čárových momentů m_w bude předvedeno následně. Ty se vypočítají z uzlových sil a momentů, což je přímo výstup z MKP výpočtu.

Na obr. 19 jsou zobrazeny prvky paty svaru. Body 7,8,9 jsou společné uzly prvků paty svaru a prvků těla svaru. Jako ilustrativní příklad bude uveden postup vypočítání strukturálního napětí pro prvek číslo 6.



Obr. 19 Schéma prvků paty svaru pro vypočítání strukturálního napětí [8]

2.6.4.6 Definování lokálního souřadného systému

Nejprve je potřeba vytvořit lokální souřadný systém na prvku 6. Pro něj platí, že se nachází uprostřed mezi uzly 7 a 8. Osa x' je kolmá na hranu prvku, y' leží na hraně prvku a směr osy z' je zprůměrovaný směr kolmic k prvku 6 v uzlech 7 a 8.

2.6.4.7 Výpočet celkových uzlových sil v uzlu

Výstup z MKP jsou uzlové síly v jednotlivých uzlech prvku. Uzlovou sílu na prvku 6 v uzlu 7 označme 7F . Tato síla je vektor v globálním souřadném systému ${}^7F = ({}^7F_x, {}^7F_y, {}^7F_z)$. Celková uzlová síla v uzlu 7 pak je rovna: ${}^7F = {}^5F + {}^6F$. Analogicky to platí i pro uzel 8, kde se sčítají silové přírůstky od prvků 6,7,8. Stejnou analogií se vypočítají i celkové momenty v uzlech: ${}^7M = {}^5M + {}^6M$.

2.6.4.8 Rozdělení celkové síly v uzlu v poměru k délce hrany prvku

Celková síla v uzlu 7F se proporcionálně rozdělí mezi prvky paty svaru přiléhající k danému uzlu. Rozdělí se v závislosti na délce každého přilehlého prvku. To znamená, že se síla 7F v uzlu 7 rozdělí na dvě síly ${}^7F_{LEFT}$ a ${}^7F_{RIGHT}$. Síla ${}^7F_{LEFT}$ působí na prvek 5 a síla ${}^7F_{RIGHT}$ působí na prvek 6. Vztah pro rozdělení se rovná:

$${}^7F_{LEFT} = {}^7F * \frac{l_1}{l_1 + l_2}, \quad {}^7F_{RIGHT} = {}^7F * \frac{l_2}{l_1 + l_2}$$

Analogicky se rozdělí i momenty.

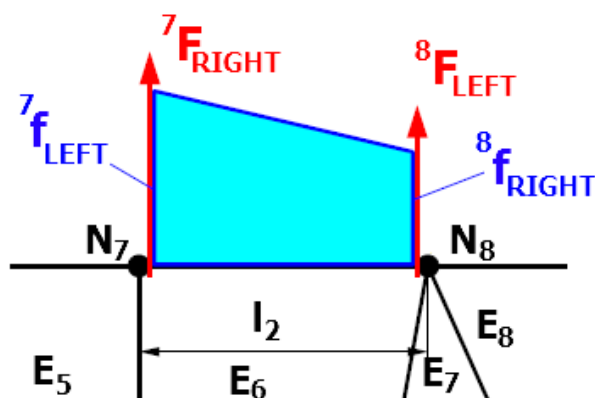
2.6.4.9 Výpočet čárových sil a momentů

Čárové síly jsou síly vztažené na jednotku délky podél hrany prvku paty svaru. Průběh čárové síly po hraně prvku je na obr. 20 zobrazen světle modrou barvou. Ze silové a momentové rovnováhy se zjistí hodnoty čárové síly pro prvek 6 v uzlech 7 a 8. Hodnoty čárových sil pro uzly prvku se pak rovnají:

$${}^8f_{RIGHT} = \frac{2}{l_1} * (2 * {}^8F_{RIGHT} - {}^7F_{LEFT})$$
$${}^7f_{LEFT} = \frac{2}{l_1} * (2 * {}^7F_{LEFT} - {}^8F_{RIGHT})$$

Pro výpočet strukturálního napětí v prvku 6 se použije hodnota čárové síly uprostřed hrany prvku:

$${}_6f = \frac{{}^7f_{LEFT} + {}^8f_{RIGHT}}{2}.$$



Obr. 20 Schéma pro výpočet čárových sil [14]

Analogicky se získá i ohybový moment 6m .

2.6.4.10 Transformace čárových sil

Čárové síly se transformují z globálního souřadného systému do lokálního souřadného systému.

2.6.4.11 Výpočet strukturálního napětí

Pro výpočet výsledného strukturálního napětí se použijí síly ve směru x' (tahové namáhání průřezu plechu v patě svaru) a momenty ve směru y' (ohybové namáhání průřezu plechu v patě svaru). Výsledné strukturální napětí na horní resp. spodní straně skořepinového prvku 6 se rovná:

$${}^6\sigma_{s,horni} = {}^6\sigma_{membránové} + {}^6\sigma_{ohybové} = \frac{{}^6f_{x'}}{t} + 6 * \frac{{}^6m_{y'}}{t^2}$$

$${}^6\sigma_{s,spodni} = {}^6\sigma_{membránové} - {}^6\sigma_{ohybové} = \frac{{}^6f_{x'}}{t} - 6 * \frac{{}^6m_{y'}}{t^2}$$

2.6.4.12 Poznámky

Tímto přístupem není možné vypočítat napětí pro prvky, které mají v patě svaru pouze jeden uzel. To mohou být krajní prvky, nebo také prvek 7 na obr. 19 na str. 23. Pokud se počítá napětí pro prvek 5, což je poslední prvek paty svaru, je možnost vzít v potaz vliv prvku 4, který není zobrazen na obrázku, ale ve skutečnosti může být vlevo od prvku 5. Pokud na skutečném modelu prvek 4 je a zahrne se jeho vliv, tak se prvek 5 počítá stejně jako prvek 6. Pokud prvek 4 na skutečném modelu není nebo se nezahrne jeho vliv, tak se bude proporcionální síla v uzlu 6 na prvku 5 určovat jako: ${}^6F_{RIGHT} = {}^5F$. Analogicky pro momenty. Princip kalkulace strukturálního napětí je stejný pro prvky paty i kořene svaru.

2.7 Výběr vhodné metody pro praktické řešení a její použití

Jako vhodnou metodu pro predikci životnosti rozsáhlých MKP skořepinových modelů jsem vybral metodu strukturálních napětí. Byly prozkoumány způsoby používání metody strukturálních napětí v inženýrské praxi. Nejkomplexnější je metoda Seam Sim od firmy Lohr. Popisuje nejvíce možností směru šíření trhliny. Skořepinové modely byly pro tuto metodu verifikovány a validovány. V dokumentu od nCode je odvozen a popsán celý postup pro

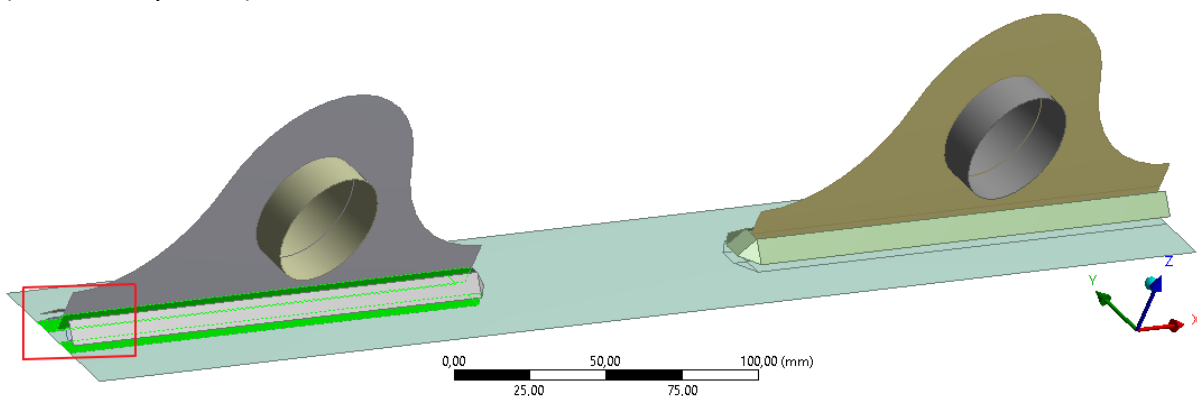
výpočet strukturálního napětí. Jako nejvhodnější způsob modelování svaru skořepinovými prvky se jeví způsob Seam Sim od firmy Lohr, protože touto metodou je geometrie svaru nejbližší skutečnosti a tuhost svaru je ekvivalentní skutečné tuhosti. Pro praktické řešení byla vybrána kombinace Seam Sim modelování svaru a Seam Sim metody pro predikci životnosti. Strukturální napětí pro predikci životnosti bude vypočteno podle metodiky Seamweld nCode. V následujících částech diplomové práce bude zkoumána metoda strukturálních napětí pro určení životnosti pro patu svaru. Zkoumání metody strukturálních napětí pro určení životnosti v kořeni svaru může být námětem jiné diplomové práce.

3. Výpočetní model

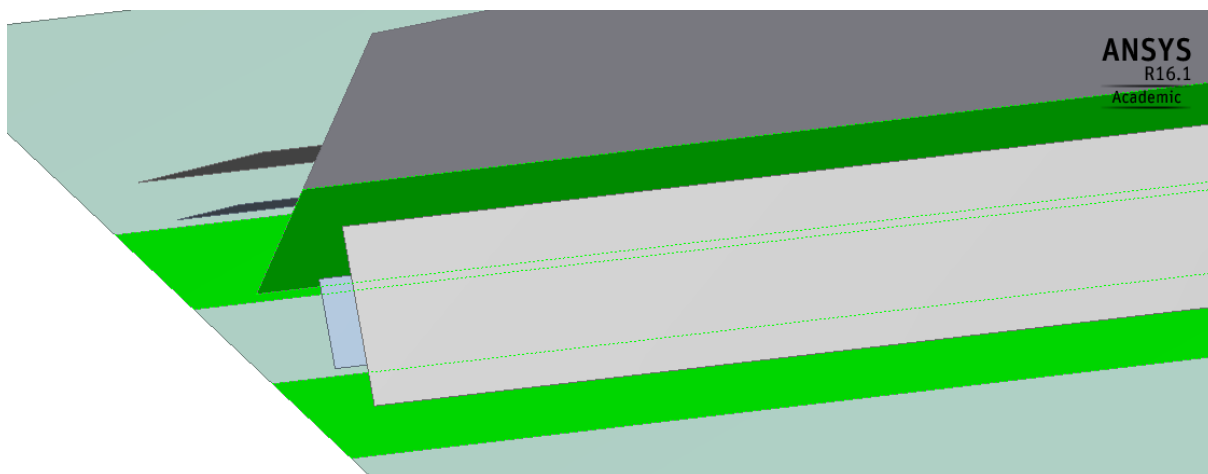
Výpočetní model byl koncipován za základě vzorku použitého v únavovém experimentu. Experiment je popsán v kapitole 0. Vzorek byl modelován pomocí skořepinových prvků. Ve skořepinovém modelu je tělo svaru spojeno s přivařovanými plechy pomocí kontaktu podle obr. 4 na str. 12. V této části bude představen postup tvorby skořepinového modelu se svarovým spojením podle Seam Sim metodiky a postup určení strukturálního napětí. Způsob určení strukturálního napětí bude verifikován na jednoduchém modelu.

3.1 Tvorba modelu podle Seam Sim metodiky

Model byl tvořen ve výpočetním software Ansys. Geometrie byla importována z Creo Parametric 3 CAD software do Ansys CAD modulu, který se nazývá Design Modeler. V Design Modeler modulu byla objemová tělesa převedena na střednicové plochy (obr. 21). Na obr. 22 je vidět detail z obr. 21, na kterém jsou zeleně zobrazeny obtisky svaru na střednice plechů, které jsou nezbytné pro další postup. Tyto obtisky ve skutečnosti odpovídají svarové ploše (rovina nohy svaru).



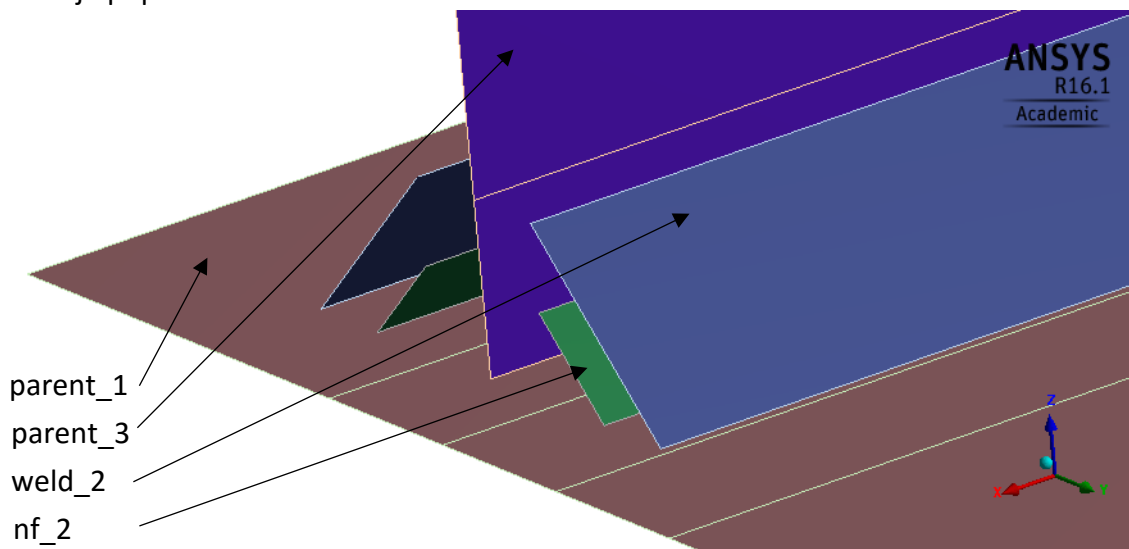
Obr. 21 Geometrie skořepinového modelu



Obr. 22 Detail obtisknutých ploch

Ansys výpočetní modul pro strukturální analýzy se nazývá Mechanical. V Mechanical modulu se vytvoří vazby mezi tělesy, konečněprvková síť a okrajové podmínky. Dále se v Mechanical modulu nastavují možnosti výpočtu, provádí výpočet a poté zobrazují výsledky. Tvorba

kontaktnímu spojení podle Seam Sim metodiky (obr. 4 na str. 12) není v Mechanical modulu dostupná přímo. Proto je potřeba tento kontakt vytvořit pomocí vnitřního programovacího jazyka Ansys Parametric Design Language (APDL). V APDL bylo vytvořeno makro. Toto makro se spouští v tzv. „preprocessor“ fázi (tj. fáze probíhající před samotným výpočtem). Vstupy do makra jsou tzv. „named selections“ (pojmenované výběry), což jsou určité části geometrie uložené pod zvoleným jménem. Na obr. 23 jsou zobrazené named selections potřebné pro správnou funkčnost makra. Parent_1 a parent_3 jsou named selections základních plechů, nf_2 je named selection střednice svaru a weld_2 je named selection povrchy těla svaru. Každý svar na modelu je popsán vlastními named selections.

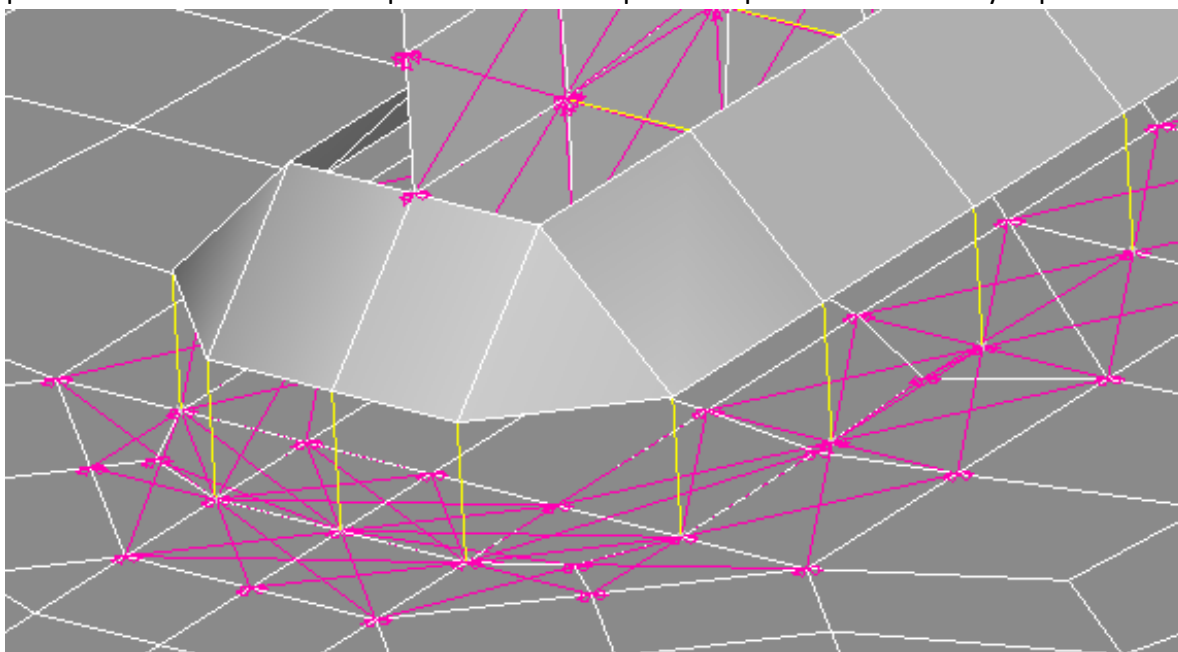


Obr. 23 Named Selections potřebné pro funkčnost makra

Pro správnou funkčnost makra jsou také potřeba obtisky povrchy těla svaru zobrazené na obr. 22. Manuální tvorba named selections a obtisknutých svarů je časově náročná. Lze ji ale automatizovat tak, že při importování geometrie z Creo Parametric 3 do Ansys Design Modeler modulu se named selections a obtisky vytvoří automaticky. Automatické vytvoření named selections a obtisků svaru není dnes ještě plně funkční a s ohledem na jeho důležitost se dalšímu rozvoji hodlám věnovat i v budoucnu.

Po proběhnutí makra dojde k vytvoření svarového spojení podle Seam Sim metodiky. V modulu Ansys Mechanical nelze zobrazit celé kontaktní spojení (nelze zobrazit tuhou RBE vazbu), takže toto kontaktní spojení bude zobrazeno v Ansys Mechanical APDL. Na obr. 24 lze vidět vytvořené MPC vazby (růžová barva) a tuhé RBE vazby (žlutá barva). MPC vazby jsou pro použití ve výpočetní fázi popsány rovnicemi. Tuhé RBE vazby jsou zprostředkovány tuhým 1-D „MPC184“ prvkem. MPC vazba je ovlivněna velikostí tzv. „pinball“ oblasti. Pro velikost pinball oblasti bude zavedena zkratka „VPO“. Její velikost se nastavuje poloměrem „pinball“ oblasti, která má střed v tzv. „contact“ (kontaktním) prvku. Kontaktní prvek má v Ansys Mechanical označení „CONTA175“. Je vytvořen v krajním uzlu MPC184 prvku. Kontaktní prvek je svázán MPC vazebními rovnicemi s tzv. „target“ (cílovými) prvky. Cílové prvky leží na tzv. „target“ (cílové) ploše vzniklé obtisknutím těla svaru na svařovaný plech (zeleně zvýrazněné na obr. 22 na str. 27). Cílový prvek je ten, který má v pinball oblasti daného kontaktního prvku alespoň jeden svůj uzel. Cílový prvek má v Ansys Mechanical označení „TARGE170“. MPC vazebními

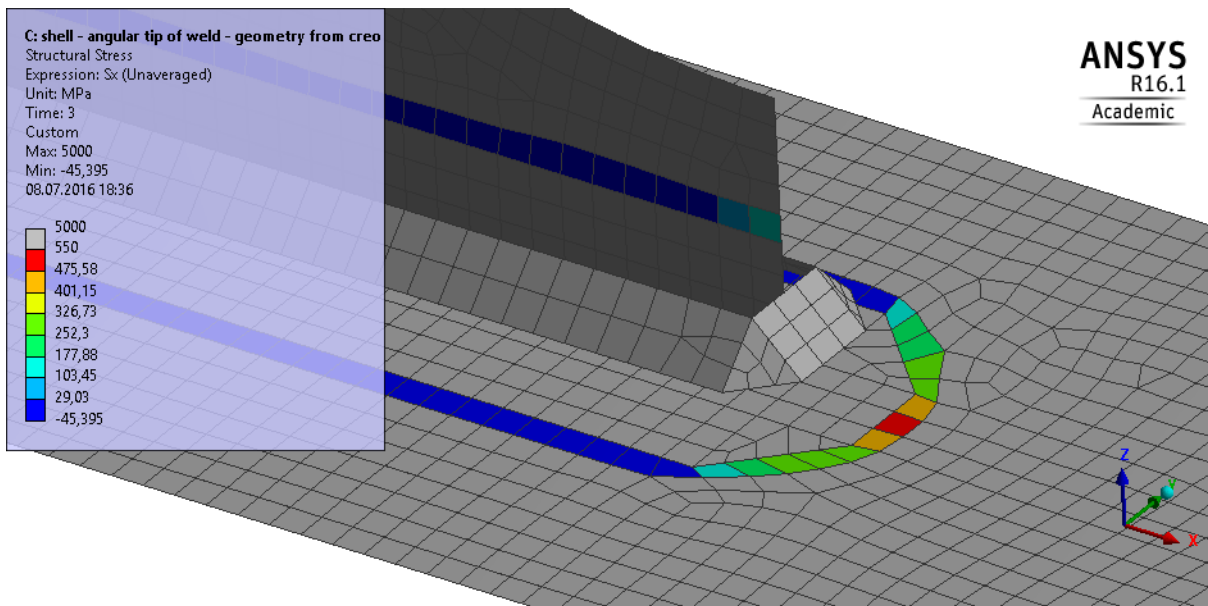
rovnícemi jsou svázány uzlové posuny kontaktního prvku s uzly cílových prvků. Uzlové posunutí kontaktního uzlu odpovídá váženému průměru posunutí uzlů cílových prvků.



Obr. 24 Zobrazení kontaktního spojení podle Seam Sim metodiky

3.2 Postup vypočtení strukturálního napětí

Strukturální napětí není implementováno jako výstupní veličina v Ansys Mechanical software. Proto bude toho napětí vypočteno pomocí makra. Vstup do makra jsou uzlové síly. V „solution“ (tj. výpočetním) modulu je potřeba nastavit ukládání těchto uzlových sil výsledkové databáze. Makro musí být vloženo do tzv. „postprocessor“ fáze (tj. fáze následující po výpočtu). Způsob určení strukturálního napětí v této práci postupuje v jiném pořadí úkonů než postup popsany v kapitole 2.6.4 a to z důvodu programování pomocí APDL. V makru se nejprve identifikují prvky paty svaru (obr. 19 ze str. 23). Trojúhelníkový prvek 7 z obr. 19 na str. 23 není prvkem paty svaru, protože na hraně paty svaru leží pouze jeden jeho uzel. Poté se pro každý prvek paty svaru vytvoří lokální souřadný systém, určí délka hrany, která leží na hraně paty svaru. Poté se zjišťují velikosti uzlových sil v lokálním souřadném systému, z nich se vypočítají čárové síly a z nich strukturální napětí. Strukturální napětí je číslo přiřazené celému prvku paty svaru, které je ukládáno do svého vlastního prázdného výsledkového „stepu“ (kroku). Jelikož strukturální napětí není v Ansys software implicitně dostupný jako výstupní veličina, je nutno zapsat strukturální napětí na místo dostupné výstupní veličiny. Je tedy zapsáno místo napětí ve směru osy x označované jako „Sx“. Výsledné strukturální napětí je na prvcích paty svaru zobrazeno barevně (obr. 25). Ostatní prvky jsou bez výsledných hodnot strukturálního napětí (je rovné 0). Prvky bez výsledků (s výsledkem 0) by v tomto případě nebyly rozlišitelné od prvků paty zobrazených modře, tak je z důvodu zobrazení prvkům bez výsledků přiřazena hodnota 5000 MPa.



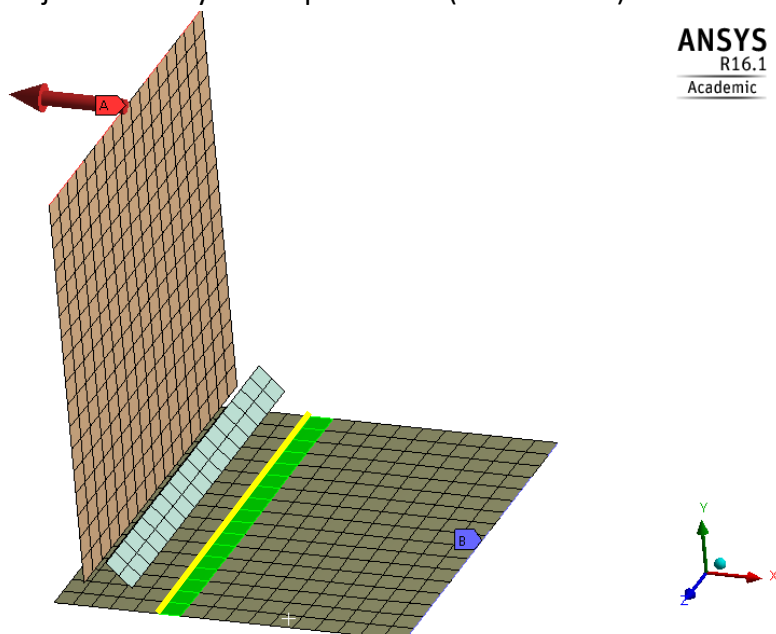
Obr. 25 Strukturální napětí zobrazené na skořepinovém modelu

3.3 Verifikace funkčnosti přístupu strukturálního napětí na jednoduchém modelu

Pro validaci funkčnosti použijí jednoduchý výpočetní model (obr. 26), pro který lze strukturální napětí spočítat analyticky. Strukturální napětí se počítá z uzlových sil. Nejprve bude validována správnost zjištění uzlových sil v patě svaru (žlutá úsečka).

H: Copy of Static Structural
 Static Structural
 Time: 1, s
 08.07.2016 20:28

A Force: 100, N
B Fixed Support



Obr. 26 Geometrie se sítí a okrajové podmínky verifikačního modelu

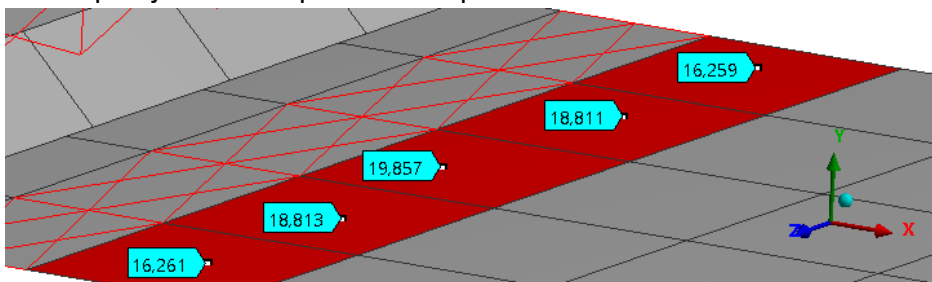
Na hranu označenou červenou značkou s písmenem A byla aplikována síla ve směru osy x o velikosti -100 N. Na hranu označenou modrou značkou s písmenem B byla aplikována pevná vazba. Rameno síly v patě svaru je 53 mm. Ze zákona akce a reakce vychází, že součet uzlových sil a momentů v patě svaru působící na prvky paty svaru (zeleně označené) musí být $F_x =$

–100 N, resp. $M_z = 5300$ N. Při součtu všech uzlových sil pomocí makra se dospělo ke stejným hodnotám. Uzlové síly jsou tedy makrem zjišťovány správně.

Validace správnosti výpočtu strukturálního napětí byla provedena na stejné geometrii jako validace uzlových sil. Pro názornost byla ale zvětšena velikost prvků. Tloušťka a šířka spodního vetknutého plechu je 6 mm, resp. 50 mm. Analyticky se napětí v patě svaru spočítá jako součet tahového a ohybového napětí:

$$\sigma = \sigma_t + \sigma_o = \frac{100}{6 * 50} + \frac{6 * 5300}{6^2 * 50} = 18 \text{ MPa}$$

Vážený průměr strukturálního napětí na modelu z obr. 27 vychází také 18 MPa. Vypočítání strukturálního napětí je makrem provedeno správně.



Obr. 27 Strukturální napětí na jednoduchém validačním modelu

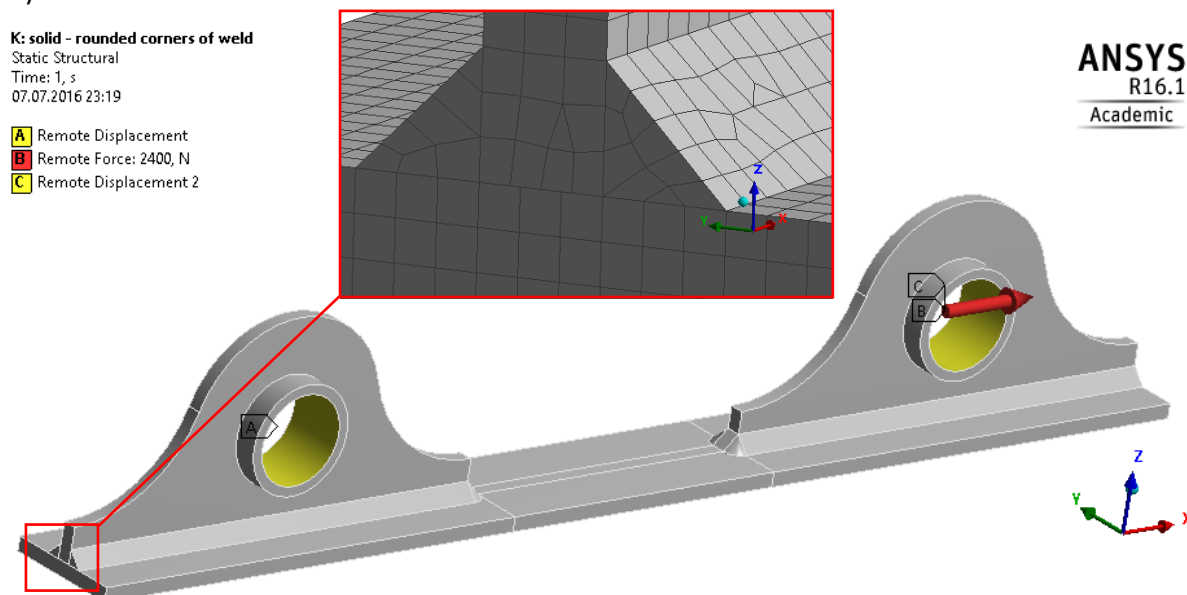
4. Citlivostní studie vybraného výpočetního modelu

V této kapitole budou vyhodnoceny vlivy nastavení MKP modelu na následující vlastnosti modelu a vypočtené výsledky:

- tuhost modelovaného svarového spojení,
- strukturální napětí,
- predikovanou životnost,
- výpočetní náročnost.

4.1 Vliv nastavení MKP modelu na tuhost kontaktního spojení

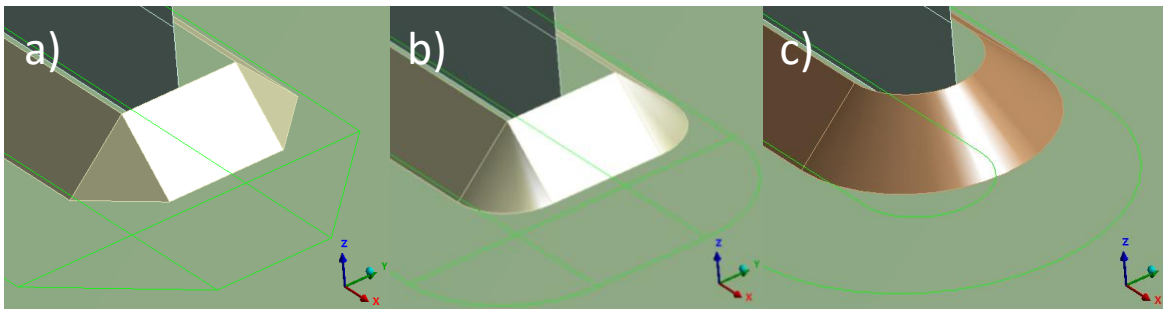
Tuhost modelovaného svarového spojení je ovlivněna velikostí prvků v kontaktní oblasti, velikostí kontaktní oblasti a geometrií čela svaru. Pro vyhodnocení tuhosti svarového spoje budou porovnána uzlová posunutí ve vybraných uzlech MKP modelu. Různá nastavení skořepinového modelu budou porovnáována s referenčním modelem z objemových prvků (obr. 28).



Obr. 28 Okrajové podmínky a detail sítě

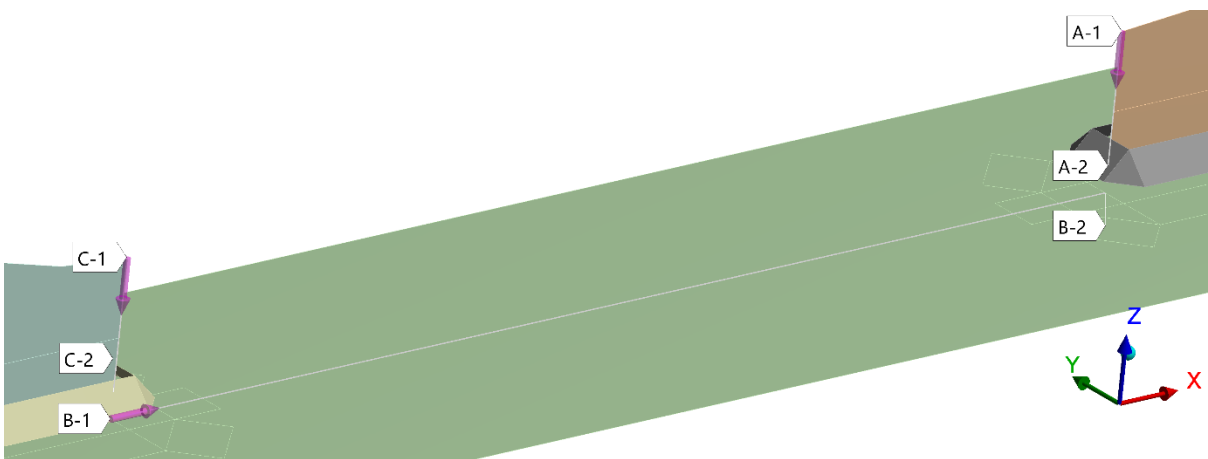
Globální velikost sítě objemového modelu byla nastavena na 2 mm, takže po tloušťce plechu jsou 3 prvky. Síť je tvořena objemovými kvadratickými prvky. Většina z nich je šestistěnná s 20 uzly. V oku označeném písmenem A na obr. 28 je povolena pouze rotace kolem osy y. V oku označeném písmenem C je zakázán pouze posun ve směru osy z. Značkou B je označena síla ve směru osy x o velikosti 2400 N.

Budou otestovány tři možné skořepinové geometrie svaru (obr. 29). Zelenými čarami jsou zvýrazněny obtisky povrchy svaru na střednici svařovaného plechu.



Obr. 29 Geometrie čela svaru – a) ostré rohy, b) oblé rohy, c) zaoblené čelo svaru

Na obr. 30 jsou zobrazeny vybrané cesty pro porovnání uzlových posunutí na skořepinovém a objemovém modelu. Písmeny A,B,C jsou značeny názvy cest a čísla 1, 2 je označen začátek, resp. konec dané cesty.



Obr. 30 Vybrané cesty pro porovnání uzlových posunutí

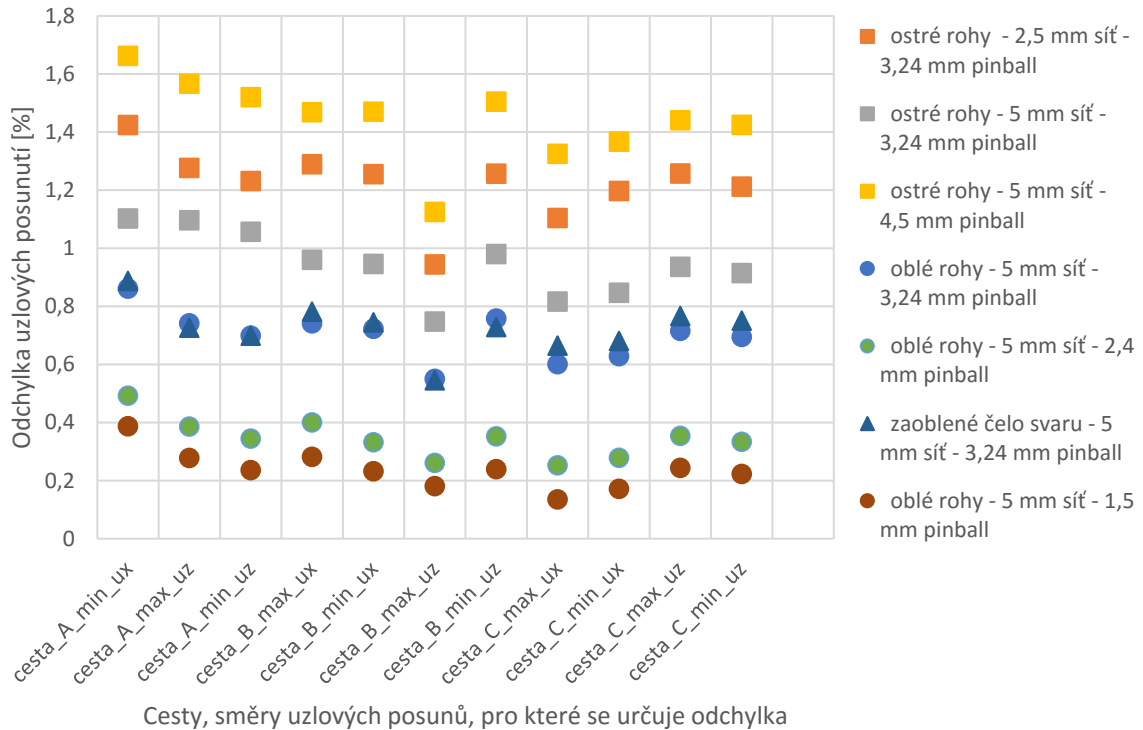
Z důvodu velkého množství dat byly po stanovených cestách porovnávány pouze minimální a maximální hodnoty posuvů. Velikosti pinball oblastí byly vztaženy k délce nohy svaru podle vztahu: $r_{pinb} = C * (\text{délka nohy svaru})$,

kde C je konstanta, pro kterou byly vybrány hodnoty:

- $C = 0,25 \quad \Rightarrow \quad r_{pinb} = 1,5 \text{ mm},$
- $C = 0,4 \quad \Rightarrow \quad r_{pinb} = 2,4 \text{ mm},$
- $C = 0,54 \quad \Rightarrow \quad r_{pinb} = 3,24 \text{ mm},$
- $C = 0,75 \quad \Rightarrow \quad r_{pinb} = 4,5 \text{ mm}.$

Odchylka uzlových posunutí (v %) na skořepinovém modelu od referenčního objemového modelu

komentář: kladná odchylka znamená, že jsou větší uzlová posunutí na skořepinovém modelu

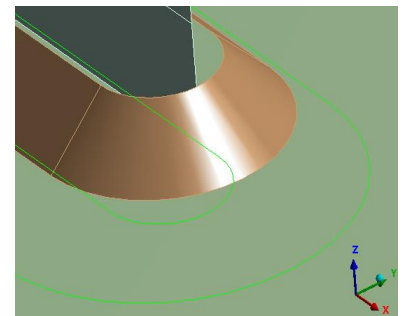
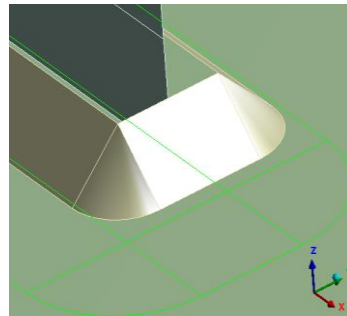
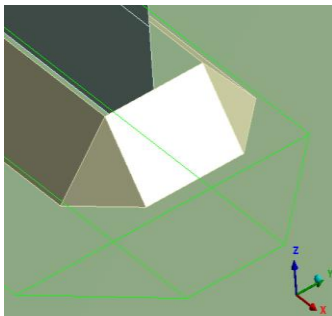


komentář: popis "cesta_A_max_ux" na vodorovné ose grafu znamená, že je zobrazena odchylka pro maximální uzlové posunutí ve směru osy x na cestě A

ostré rohy, značka: ■

oblé rohy, značka: ●

zaoblené čelo, značka: ▲



Obr. 31 Porovnaná uzlová posunutí skořepinového a referenčního objemového modelu

Nejmenší odchylka byla 0,14% na cestě C pro maximum u_x . Ta nastala na skořepinovém modelu s oblými rohy, 5 mm sítí a 1,5mm VPO. V případě hustěji nastavené sítě na čele svaru ale tato velikost pinball oblasti neobsáhla všechny prvky cílové plochy, takže toto nastavení modelu nepoužijí pro vyhodnocení strukturálního napětí. Proto nejmenší odchylka na použitelném modelu byla 0,25% na cestě C pro maximum u_x . Ta nastala na skořepinovém modelu s oblými rohy, 5 mm sítí a 2,4mm VPO. Největší odchylka byla 1,66% na cestě A pro minimum u_x na modelu s hranatými rohy, 5 mm sítí a 4,5mm VPO. Obecně skořepinový model

s oblými rohy vykazuje menší odchylky než model s ostrými rohy. Model se zaobleným čelem je při stejném nastavení sítě a velikosti pinball oblasti velmi blízko k modelu s oblými rohy. Všechny skořepinové modely vykazují z pohledu celkové tuhosti dobrou shodu s referenčním objemovým modelem.

4.2 Vliv nastavení MKP modelu na strukturální napětí, výslednou životnost a výpočetní náročnost

V této kapitole bude hodnocen vliv níže popsaných parametrů MKP modelu na strukturální napětí, výslednou životnost a výpočetní náročnost:

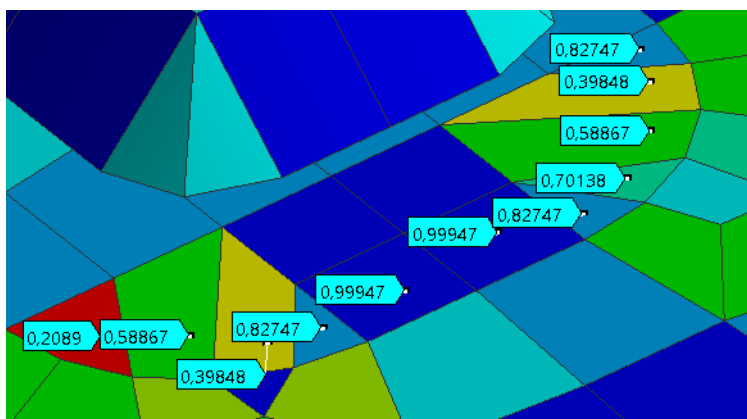
- kvality sítě v kritickém místě,
- nesymetrie sítě,
- globální velikosti sítě,
- lokální velikosti sítě v kritickém místě,
- velikosti pinball oblasti.

4.2.1 Vliv kvality sítě

Kritériem kvality sítě byla zvolena „Mesh quality“ (tj. kvalita sítě), která byla pro zjednodušení popsána veličinou Q . Ta se zobrazuje v Ansys Mechanical a může nabývat hodnot v rozsahu $< 0,1 >$. Hodnota 1 značí dokonalý prvek a hodnota 0 značí prvek s nulovým či záporným objemem či obsahem. Kvalita sítě Q je pro plošné prvky popsána vztahem:

$$Q = C * \frac{\text{obsah prvku}}{\sum(\text{délka hrany})^2},$$

kde konstanta C se rovná - pro trojúhelníkové prvky $C = 6,9282$,
 - pro čtyřúhelníkové prvky $C = 4$.

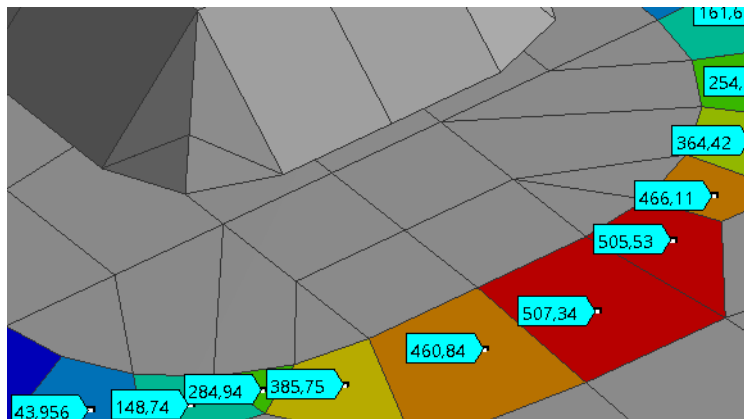


Obr. 32 Zobrazení kvality sítě na čele svaru

Na obr. 32 je zobrazena hodnota veličiny Q v kritickém místě – na čele svaru. Prvek zobrazený červeně je prvek s nejhorší kvalitou $Q = 0,2089$. Tento prvek způsobí, že strukturální napětí vychází pro tento symetrický model velmi nesymetricky (obr. 33). Strukturální napětí je napravo od roviny symetrie podstatně větší. Na pravé straně jsou 3 hodnoty strukturálního

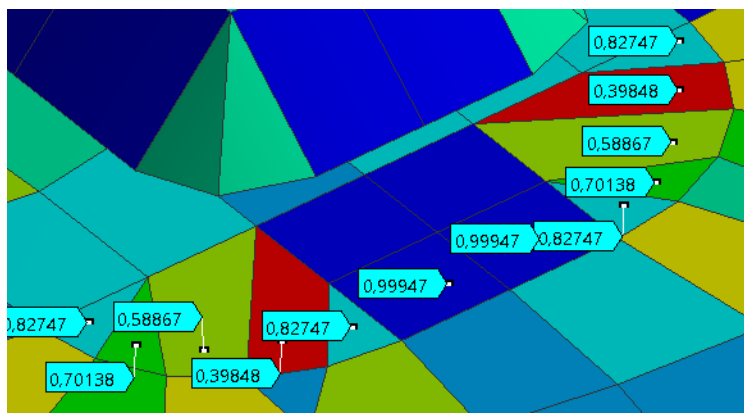
napětí větší než maximální hodnota na levé straně. Maximum na levé straně je 461 MPa oproti 507 MPa na pravé straně. Čtyřúhelníkový prvek s nejhorší kvalitou sítě Q na obr. 32 byl rozdělen na dva trojúhelníkové prvky. Ty mají kvalitu sítě Q přibližně 0,7 a 0,83. Po úpravě je nejhorší hodnota kvality prvku přibližně 0,4. Po provedené změně na síti je strukturální napětí

na čele svaru symetrické a má hodnotu 505 MPa (obr. 35). Hodnoty dále od roviny symetrie

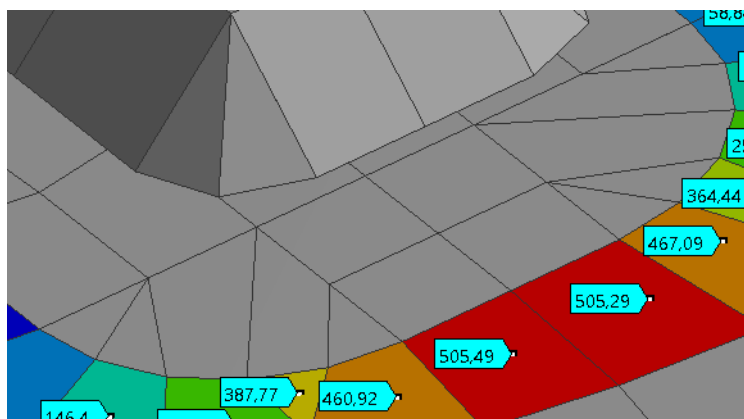


Obr. 33 Nesymetrie strukturálního napětí

nejsou úplně symetrické, což je pravděpodobně způsobeno nesymetrií sítě po stranách. Výsledné strukturální napětí je pro síť s kvalitními prvky a méně kvalitními prvky téměř totožné. Horší kvalita sítě tedy v tomto případě neovlivňuje predikované hodnoty životnosti, ale zkresluje zobrazení místa, kde dojde k porušení. Pro náhodně generovanou síť nelze kvalita sítě plně ovlivnit. Při použití náhodně generované sítě v praxi musí pracovník provádějící výpočet zhodnotit podle zkušeností, zda je kvalita sítě dostatečná, a zda výsledky nebudou ovlivněny lokálně málo kvalitní sítí.

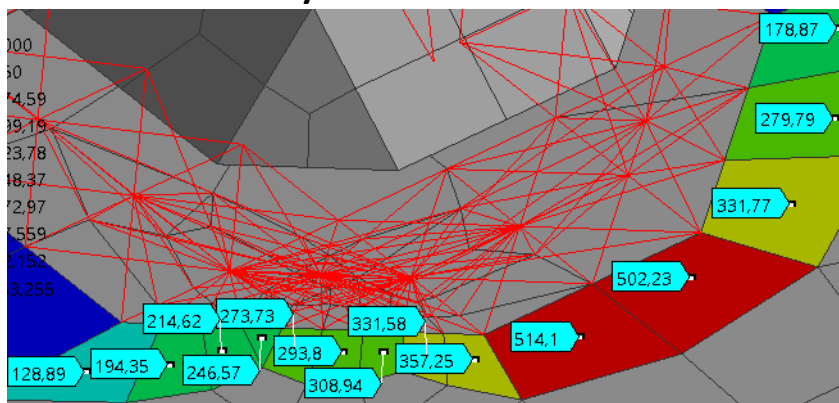


Obr. 34 Zobrazení kvality sítě na čele svaru



Obr. 35 Symetrie strukturálního napětí

4.2.2 Vliv nesymetrické sítě



Obr. 36 Nesymetrická síť a její vazbové rovnice

Na tomto modelu (obr. 36) je síť v levé části hustší. Vazební rovnice jsou zobrazeny červenými čarami. Levá část je viditelně více provázána než část pravá. Nejvyšší hodnota strukturálního napětí na levé straně dosahuje velikosti 514 MPa. Na pravé straně dosahuje 502 MPa. Rozdíl

vážených průměrů ze zobrazených hodnot strukturálních napětí na levé a pravé straně od roviny symetrie je 0,7 MPa. Z toho lze tedy usoudit, že obě strany svaru jako celky přenášejí stejné zatížení. Na straně s hustší sítí však dochází k distribuci větší uzlové síly přes čelo svaru než na straně s hrubší sítí. Z větších uzlových sil se vypočte větší strukturální napětí, které se projeví v levé části čela svaru. Na straně s hrubší sítí jsou naopak distribuovány větší uzlové síly přes šikmou stranu čela svaru. Při zadání stejné velikosti sítě na obou stranách vyjde napětí na čele symetrické. Princip, kterým nesymetrie sítě ovlivňuje strukturální napětí, může být námětem dalšího zkoumání.

4.2.3 Vliv globální velikosti sítě

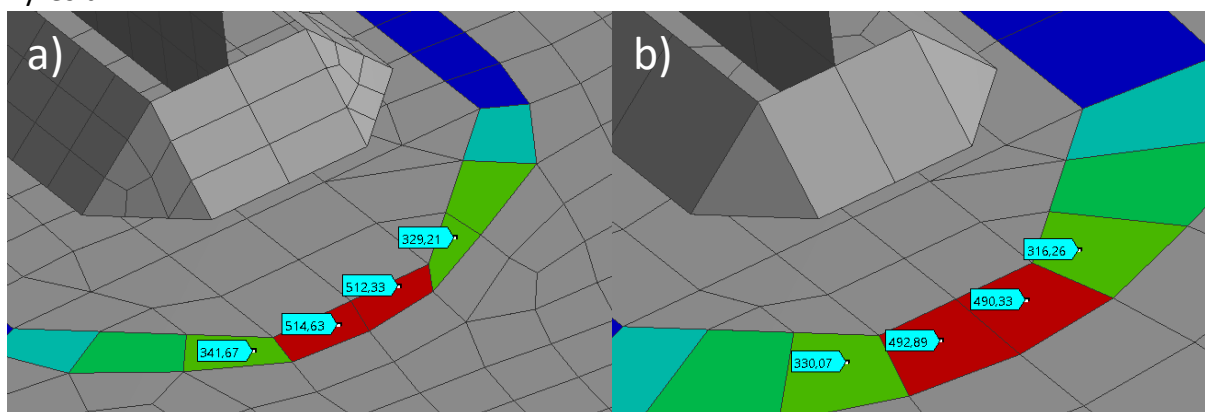
Změnou globální velikosti sítě se výrazně mění celkový počet vytvořených prvků na modelu. Tím je výrazně ovlivněna výpočetní náročnost. Ostatní nastavení lokálních velikostí sítě ovlivňují celkový počet prvků jen minimálně, takže výpočetní náročnost bude vyhodnocena jen pro vliv globální velikosti sítě. Výpočty probíhaly na modelu s ostrými rohy a 3,24mm VPO. Aby strukturální napětí nebylo ovlivněno jinými vlivy než globální velikostí sítě, bylo nastavení sítě na čele svaru pro všechny globální velikosti sítě stejné. Na obr. 37 jsou zobrazeny sítě a na nich vypočtené strukturální napětí pro modely s globální velikostí prvků 2 mm a 5 mm. Strukturální napětí vycházelo symetrické. V závislosti na velikosti globální sítě je v tab. 1 vypsáno strukturální napětí na čele svaru, celkový počet prvků modelu a výpočetní časy „preprocessor“, „solution“ a „postprocessor“ fáze. Výpočetní čas „preprocessor“ fáze je čas potřebný na proběhnutí makra pro tvorbu svarového spojení, čas „postprocessor“ fáze je čas potřebný na proběhnutí makra pro výpočet strukturálního napětí.

Globální velikost sítě [mm]	Strukturální napětí [MPa]	Celkový počet prvků	Preprocessor čas [s]	Solution čas [s]	Postprocessor čas [s]
6	490	1900	4	1	4
5	493	2600	5	2	5
4	496	4700	7	4	8
3	507	6900	12	11	15
2	514	14800	26	38	43

1,5	518	25900	57	48	85
1	-	58000	-	-	-

Tab. 1 Vliv globální velikosti sítě na strukturální napětí a výpočetní náročnost

Se zmenšující se globální velikostí sítě se zvětšují všechny porovnávané parametry. Překvapivý je vliv na strukturální napětí, kde se minimální a maximální hodnota liší o 28 MPa, přestože byla síť na čele svaru nastavena stejně pro všechny globální velikosti sítě. Zjištění více o vlivu globální velikosti sítě na strukturální napětí může být námětem další práce. Výpočetní náročnost narůstá výrazně. Výpočet probíhal na osobním notebooku s velikostí 8 GB RAM operační paměti. Výpočet modelu s velikostí sítě 1 mm nebylo možné na uvedeném hardware vyřešit.

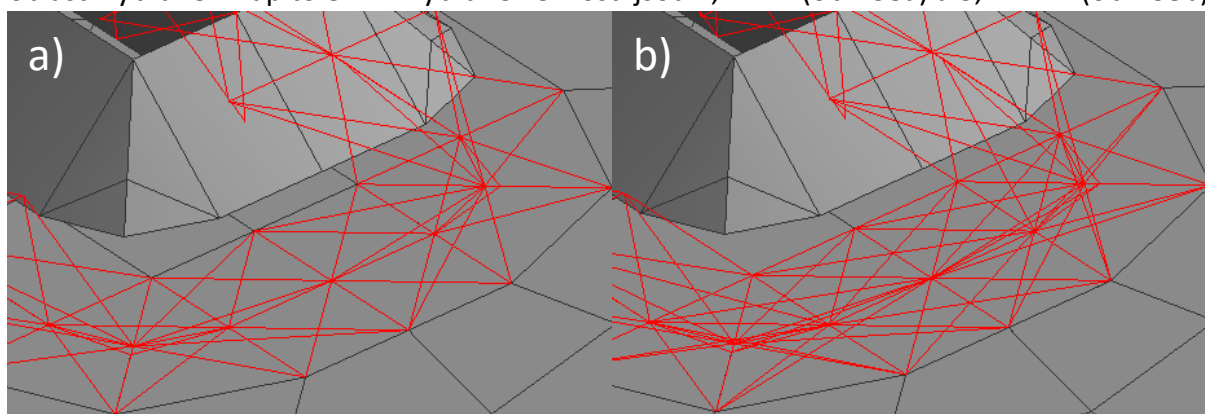


Obr. 37 a) Globální velikost prvků 2 mm

b) Globální velikost prvků 5 mm

4.2.4 Vliv lokální velikosti sítě v kritickém místě, vliv velikosti pinball oblasti a vliv geometrie svaru

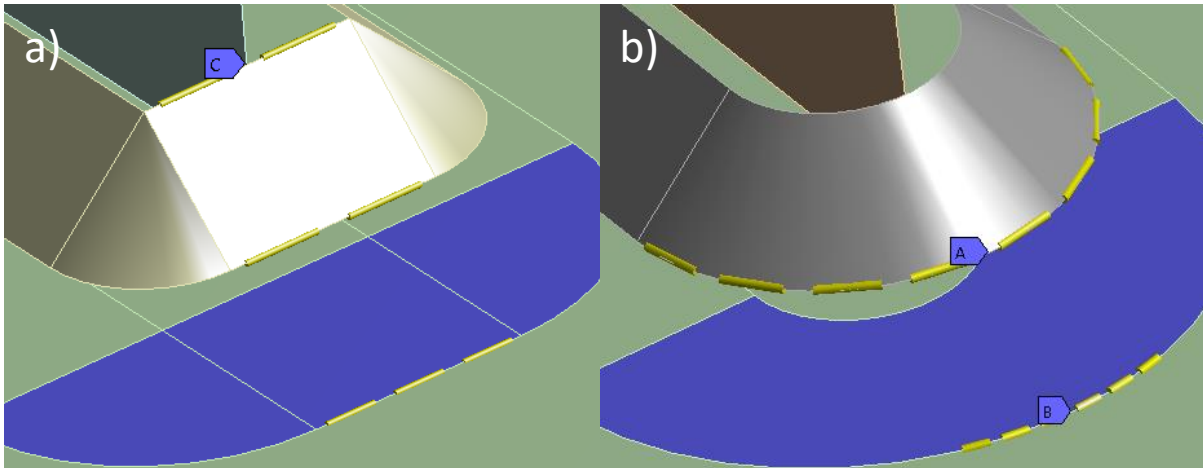
Tyto tři parametry MKP modelů byly vyhodnocovány dohromady, protože se vzájemně ovlivňují. Na obr. 38 jsou červenými čarami zobrazeny vazbové rovnice pro velikosti pinball oblasti vybrané v kapitole 4.1. Vybrané velikosti jsou 2,4 mm (obr. 38a) a 3,24 mm (obr. 38b).



Obr. 38 Zobrazení vazbových rovnic pro velikosti pinball oblasti – a) 2,4 mm, b) 3,24 mm

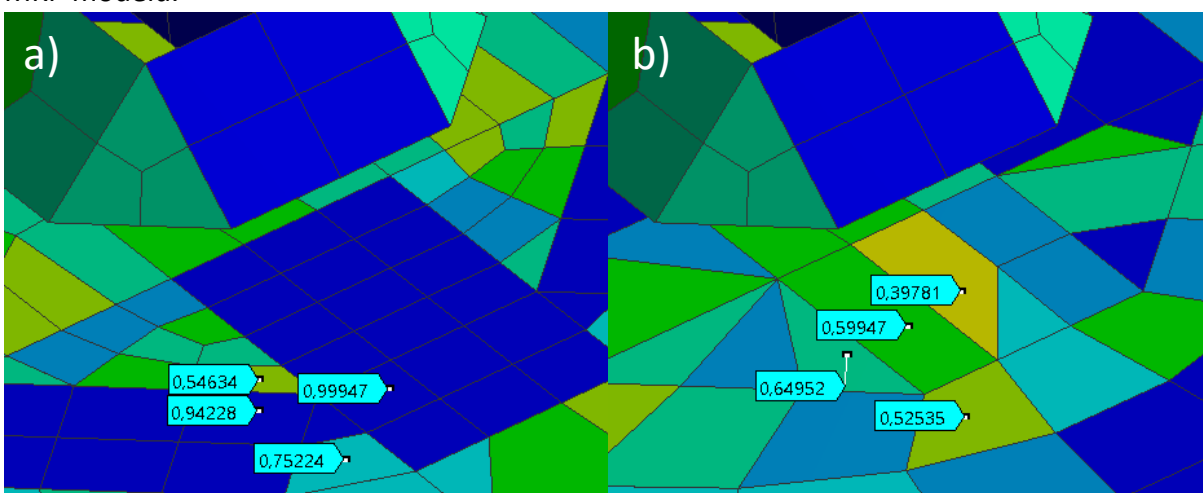
Pro zjištění vlivu lokální velikosti sítě byly provedeny výpočty na síti, jejíž velikost byla na čele svaru lokálně měněna. Žlutými úsečkami jsou na obr. 39 zvýrazněny hrany, jejichž diskretizace se postupně měnila. Na obr. 39a je zobrazeno nastavení pro model s ostrými rohy na čele

svaru a model s oblými rohy na čele svaru. Na obr. 39b je zobrazeno nastavení pro model s oblou geometrií čela svaru. Číselné označení nastavení na obrázku vlevo je 3_2, resp. 6_8 vpravo. Toto označení bude dále používáno. Tato nastavení byla vyhodnocena pro nepravidelnější (nekvalitnější) a pravidelnější (kvalitnější) síť. Pro nepravidelnější síť je na modře zobrazené ploše na obr. 39 nastavena globální velikost sítě (tj. 4 mm), resp. pro pravidelnou 2 mm. Výsledky různě nastavené sítě budou porovnány mezi sebou a s výsledky z referenčního modelu.



Obr. 39 Nastavení sítě pro určení vlivu lokální velikosti sítě

Pro nastavení 2 mm velikosti sítě na modré ploše byly v kontaktní ploše na čele svaru a v patě svaru vytvořeny pravidelné a kvalitní prvky (obr. 40a). Ty byly většinou čtyřúhelníkové s kvalitou přesahující hodnotu 0,9. Příklad sítě na modelu s neovlivňovanou kvalitou sítě na čele svaru je zobrazen na obr. 40b. V modelu byly aplikovány vazebné rovnice obdobně jako v kapitole 4.1. Vyhodnocení vlivu uvedených parametrů je zobrazeno pouze pro vyšší zátěžnou hladinu ($F_{max} = 2\,500\text{ N}$, $F_{min} = 100\text{ N}$), protože pro nižší zátěžnou hladinu ($F_{max} = 2\,200\text{ N}$, $F_{min} = 100\text{ N}$) vycházely hodnoty životnosti v porovnání s experimentem více konzervativní a model je koncipován jako lineární. Za více kritickou byla tedy považována vyšší zátěžná hladina a pro tuto hladinu byla vyhodnocena citlivost výsledné životnosti na nastavení MKP modelu.



Obr. 40 Kvalita sítě na čele svaru

Zmiňovaný referenční skořepinový model měl pro každou ze tří geometrií svaru nastavenou jemnou, symetrickou a kvalitní síť. Pro něj byla nastavena 1,5 mm globální velikost prvků a použity obě velikosti pinball oblasti. Ostatní nastavení sítě nebyla uvažována.

Životnost byla určena pro únavovou křivku uvedenou v kapitole 2.6.1. Pro svar nesoucí zátěž se používá křivka FAT90 (97,7 %). Životnost bude predikována pro 50 % pravděpodobnost přežití, protože množství experimentálně odzkoušených vzorků nedovoluje statistický popis. Dovoluje pouze vypočtení průměrné hodnoty životnosti. Pro určení pravděpodobnosti přežití se v únavě používá logaritmicke normální rozdělení, pro které se přepočítá pravděpodobnosti přežití provádí podle vztahu pro normovanou náhodnou veličinu:

$$u_p = \frac{\log(x_p) - \mu}{S},$$

kde S je směrodatná odchylka,

u_p je kvantil, určený z pravděpodobnosti porušení P ,

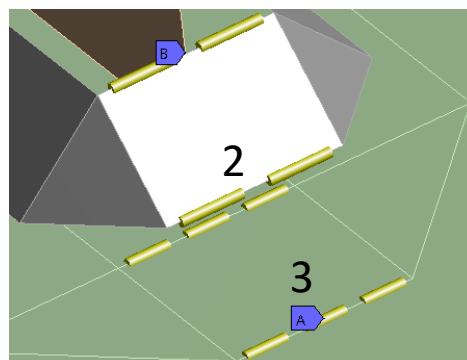
μ je zlogaritmovaná střední hodnota,

x_p je hodnota životnosti na určité napěťové hladině pro danou pravděpodobnost přežití.

Neznámý parametr je střední hodnota μ . Známy jsou odhad směrodatné odchylky $S = 0,25$, dále $x_p = 2 * 10^6$ cyklů a pravděpodobnost porušení P . Pro křivku FAT90 (97,7%) je pravděpodobnost porušení $P = 0,023$. Kvantil u_p se určí z tabulek pro hodnotu $P = 0,023 \rightarrow u_p = -1,99539$. Střední hodnota pro napětí 90 MPa vyjde $\mu = 6,71946$, což je $10^{6,71946} = 5\,241\,293$ cyklů. Po přepočtu na 2 000 000 cyklů vyjde napětí 132 MPa. Takže křivka FAT90 (97,7 %) se pro 50 % pravděpodobnost přežití změní na FAT90 (50 % - 132). Přepočítané FAT křivky na nenormované pravděpodobnosti přežití budou popisovány předvedeným způsobem.

4.2.4.1 Porovnání pro geometrii s ostrými rohy na čele svaru

Na modelu s kvalitnější a pravidelnější sítí na čele svaru (obr. 40a) bylo vyhodnoceno 48 různých nastavení a jejich vliv na strukturální napětí a výslednou životnost. Životnost je predikována podle vztahu popsaného v úvodu: $\Delta\sigma^m * N = C$. Některá nastavení byla porovnána se zmiňovanými modely s nepravidelnější sítí. Toto porovnání bude popsáno v kapitole 4.2.5, kde budou shrnuty výsledky pro všechny 3 geometrie svaru. Výsledky pro modely s pravidelnější sítí jsou vypsány v tab. 2. Veličina „ $\Delta\sigma_s$ “ je rozkmit strukturálního napětí a „N“ je únavová životnost. Popisky typu „3_2“ jsou dříve popsané nastavení sítě. Geometrie s ostrými rohy svaru je spolu s nastavením, které má označení „3_2“, zobrazena na obr. 41. Tabulka popisuje závislost strukturálního napětí a životnosti na nastavené konfiguraci sítě. Pro zobrazení trendu změny rozkmitu strukturálního napětí s měnící se sítí na čele svaru je přiložen obr. 42. Pro zvýraznění rozdílů mezi jednotlivými výsledky byla v grafu na vertikální ose změněna škála hodnot. Výsledný referenční rozkmit strukturálního napětí vyšel pro 3,24mm VPO 534 MPa, resp. 536 MPa pro 2,4 mm VPO. Jako referenční rozkmit napětí byl vybrán průměr z těchto hodnot 535 MPa. Tato hodnota je černou čarou zobrazena v grafu. Výsledky pro nastavení modelu, pro který byla vypočtena nejnižší hodnota rozkmitu napětí a tím pádem predikována nejvyšší životnost, jsou pro obě velikosti pinball oblasti zvýrazněny červenou barvou. Nejvyšší vypočtený rozkmit napětí a tím pádem nejnižší predikovaná životnost jsou pro obě velikosti pinball oblasti zvýrazněny zelenou barvou.

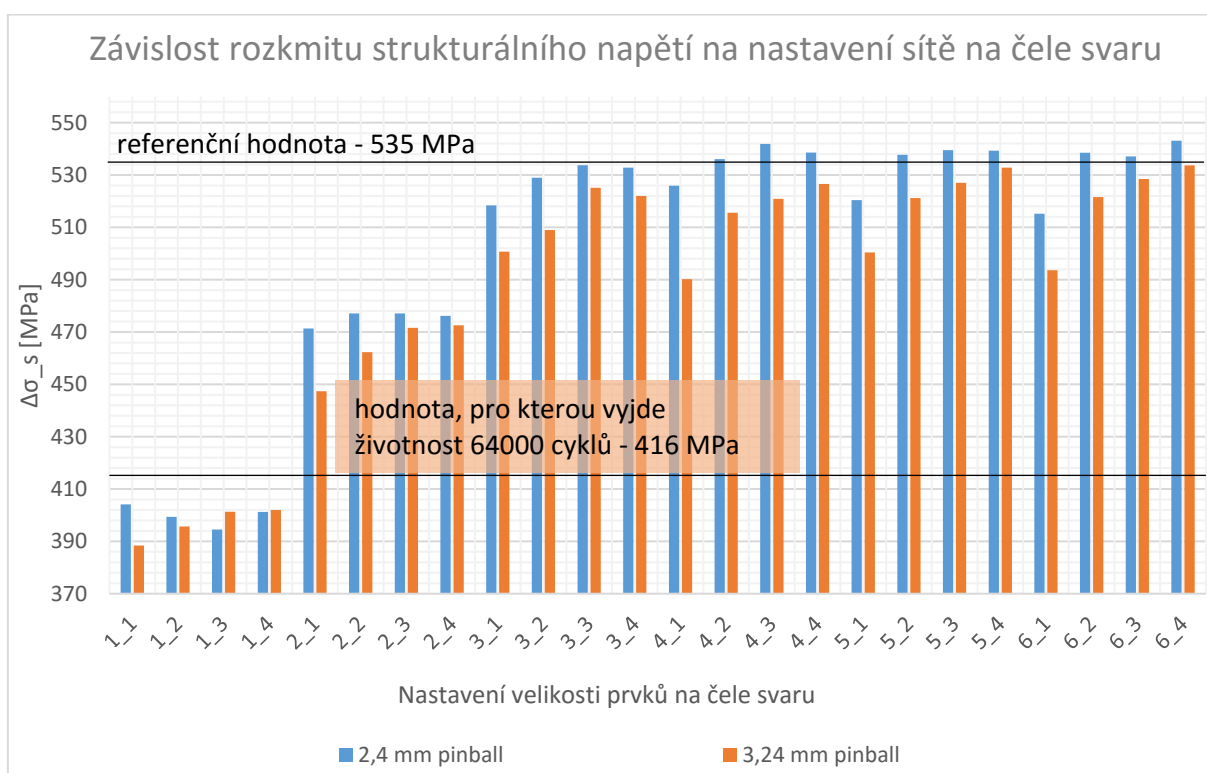


Obr. 41 Svar s ostrými rohy

<i>pinball 2,4 mm</i>	1_1	1_2	1_3	1_4	2_1	2_2	2_3	2_4
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	404	399	395	401	471	477	477	476
N [cyklů]	69 678	72 221	74 889	71 189	43 924	42 352	42 352	42 609
<i>pinball 3,24 mm</i>	1_1	1_2	1_3	1_4	2_1	2_2	2_3	2_4
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	388	396	401	402	447	462	472	473
N [cyklů]	78 509	74 243	71 178	70 807	51 365	46 557	43 857	43 579
<i>pinball 2,4 mm</i>	3_1	3_2	3_3	3_4	4_1	4_2	4_3	4_4
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	518	529	534	533	526	536	542	539
N [cyklů]	33 019	31 081	30 250	30 413	31 626	29 855	28 907	29 441
<i>pinball 3,24 mm</i>	3_1	3_2	3_3	3_4	4_1	4_2	4_3	4_4
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	501	509	525	522	490	516	521	527
N [cyklů]	36 646	34 882	31 771	32 340	39 051	33 560	32 546	31 500
<i>pinball 2,4 mm</i>	5_1	5_2	5_3	5_4	6_1	6_2	6_3	6_4
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	520	538	540	539	515	539	537	543
N [cyklů]	32 640	29 589	29 294	29 327	33 638	29 458	29 689	28 716
<i>pinball 3,24 mm</i>	5_1	5_2	5_3	5_4	6_1	6_2	6_3	6_4
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	500	521	527	533	494	522	529	534
N [cyklů]	36 712	32 490	31 421	30 413	38 250	32 415	31 162	30 260

Tab. 2 Hodnoty strukturálního napětí a životnosti pro model s kvalitnější sítí na čele svaru

Obecně platí, že největší vliv na výsledky má nastavení velikosti prvků paty na čele svaru. To bude pravděpodobně částečně způsobeno průměrováním napětí a částečně změnou distribuce silového zatížení na čele svaru. Vliv velikosti prvků na hraně těla svaru a vliv velikosti pinball oblasti je obecně menší, ne však zanedbatelný. Velikost prvků na hraně těla svaru ovlivňuje hustotu rozmístění 1-D tuhých spojovacích prvků na čele svaru a v případě, že je tato hustota nižší než hustota ve zbytku svaru (nastavení x_1), je negativně ovlivněn silový tok přes čelo svaru. Velikost pinball oblasti pravděpodobně ovlivňuje tuhost svarového spojení a tím ovlivňuje silový tok přes čelo svaru. Pro větší velikost pinball oblasti a tím pádem pro větší provázanost vazebními rovnicemi vycházejí hodnoty napětí na čele nižší. Pro zhušťující se síť až na 0,5 mm velké prvky na čele svaru se výsledné hodnoty rozkmitů napětí ustalují přibližně na hodnotě 540 MPa. Pro ještě menší velikost prvků paty svaru (až 0,5mm), než je zobrazeno v tabulce, zůstávají hodnoty rozkmitu napětí ustáleny kolem ustálené hodnoty.



Obr. 42 Trend výsledného rozkmitu strukturálního napětí pro geometrii s ostrými rohy svaru

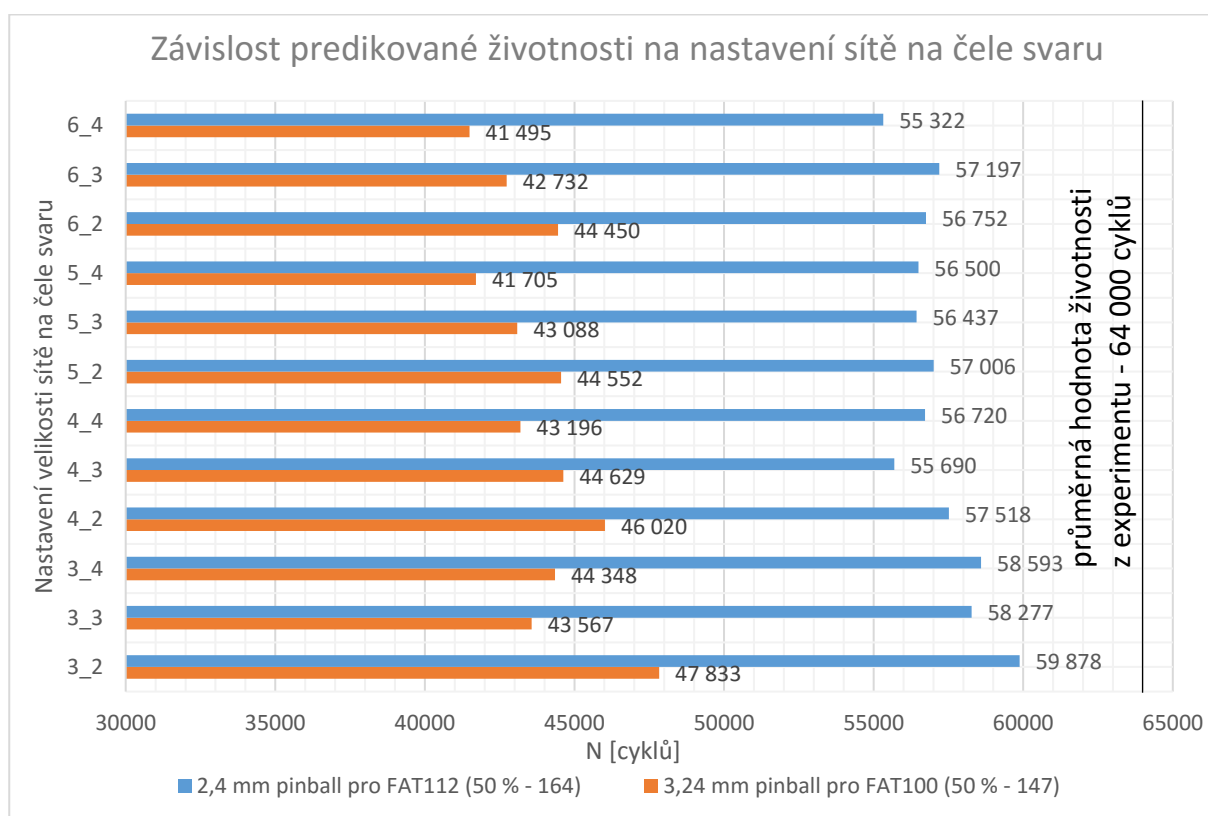
Pro ustálenou hodnotu napětí vychází životnost přibližně 29 000 cyklů, což je velice konzervativní, protože průměrná hodnota životnosti z experimentu je 64 000 cyklů. Konzervativní hodnoty životnosti jsou požadované, ne však příliš, protože mohou vést k přílišnému předdimenzování konstrukce a tím pádem nákladnější výrobě. To je stav nechtěný, avšak stav nepřijatelný je stav, kdy predikované hodnoty nejsou konzervativní vůbec. Nekonzervativní vycházejí životnosti pro obě velikosti pinball oblasti s pouze jedním prvkem na hraně paty na čele svaru (nastavení 1_x). Těmto nastavením modelu by se mělo při vyhodnocování životnosti vyhnout. Dále modely se dvěma prvky na hraně paty svaru (nastavení 2_x) a jedním prvkem na těle svaru (nastavení x_1) se liší výrazně od zbylých nastavení. Odebráním uvedených modelových variant z kompletního souboru nastavení sítě vznikne soubor zbylých „povolených“ nastavení. Ten se tedy skládá z nastavení s 3-6 prvky na hraně paty a 2-4 prvky na hraně těla svaru (např. 5_2) a bude nazýván „zúžený“. Pro tato

nastavení jsou nejméně konzervativní hodnoty životnosti v závislosti na velikosti pinball oblasti a nastavení sítě na čele svaru zobrazeny v tab. 3. Tyto nejméně konzervativní hodnoty jsou oproti průměrné hodnotě – 64 000 cyklů stále velice konzervativní. V případě použití nastavení ze „zúženého“ souboru nastavení je možno pro vyhodnocování životnosti pro tento konkrétní případ svarového spojení změnit třídu únavové křivky na třídu vyšší než FAT90 (50 % - 132). Pro křivku s vyšší únavovou třídou musí všechny nastavení vycházet konzervativně.

pinball [mm]	nastavení	$\Delta\sigma_s$ [MPa]	životnost - N [cyklů]	přepočtená normovaná únavová křivka
2,4	3_2	529	31 081	FAT112 (50 % - 164)
3,24	3_2	509	34 882	FAT100 (50 % - 147)

Tab. 3 Nejméně konzervativní výsledky životnosti pro zúžený soubor nastavení

Nejvyšší normalizovaná třída únavové křivky splňující podmínku, aby predikované životnosti pro nastavení 2,4mm VPO vycházely stále konzervativní, je třída FAT112 (97,7 %) přepočtená na 50% pravděpodobnost přežití, což je křivka FAT112 (50 % - 164). Pro 3,24mm VPO je nejvyšší konzervativní třída únavové křivky třída FAT100 (97,7 %). Ta se pro 50 % pravděpodobnost přežití popíše jako FAT100 (50 % - 147). Tyto křivky jsou uvedeny v posledním sloupci tab. 3.



Obr. 43 Výsledná životnost pro zúžený soubor nastavení sítě

Vyhodnocená životnost pro tyto křivky je zobrazena na obr. 43, kde byla pro zvýraznění rozdílů zmenšena škála hodnot na horizontální ose. Černou svislou čarou je zobrazena průměrná hodnota z experimentu – 64 000 cyklů. Je vidět, že žádná predikovaná životnost tuto hranici nepřekračuje.

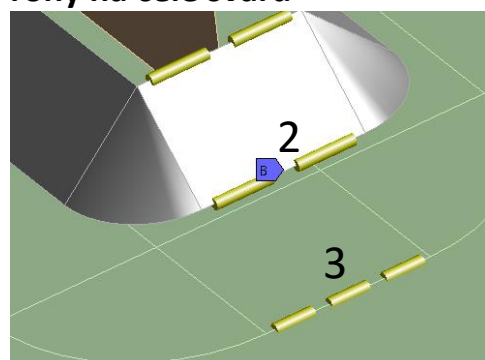
Nevýhoda této geometrie svaru je, že pro vyhodnocování životnosti v praxi je potřeba kontrolovat nastavení sítě ve vyhodnocovaném místě. Pokud se použijí nastavení ze zúženého souboru nastavení, je možno pro tento model a způsob zatížení použít pro model s 2,4mm VPO únavovou křivku FAT112 (50 % - 164) jako konzervativní křivku. Pro model s 3,24mm VPO vychází FAT100 (50 % - 147) jako konzervativní pro všechna nastavení ze zúženého souboru nastavení. V tab. 4 je vidět rozdíl mezi maximálním a minimálním vypočteným rozkmitem strukturálního napětí a rozdíl v predikované životnosti. Zobrazeny jsou rozdíly pro kompletní a zúžený soubor nastavení sítě na čele svaru. Je vidět, že nejmenší rozdíly ve výsledcích a tím pádem nejvíce stabilní nastavení modelu jsou pro nastavení sítě ze zúženého souboru nastavení a 2,4mm VPO a pro praxi se toto nastavení pro podobné konfigurace svarových spojení nabízí jako nejvhodnější.

soubor nastavení	pinball [mm]	rozdíl max $\Delta\sigma_s$ - min $\Delta\sigma_s$ [MPa]	rozdíl max $\Delta\sigma_s$ - min $\Delta\sigma_s$ [%]	rozdíl max N - min N [cyklů]	rozdíl max N - min N [%]
kompletní	2,4	149	27,35	88 955	61,66
	3,24	145	27,23	66 163	61,46
zúžený	2,4	14	2,60	4 556	7,61
	3,24	25	4,63	6 339	13,25

Tab. 4 Absolutní a relativní rozdíly ve výsledcích pro vybraný soubor nastavení

4.2.4.2 Porovnání pro geometrii s oblými rohy na čele svaru

Na modelu s pravidelnější a kvalitnější sítí na čele svaru (obr. 40a) bylo stejně jako pro model s ostrými rohy na čele svaru vyhodnoceno 48 různých nastavení modelu a jejich vliv na strukturální napětí a výslednou životnost. Stejně jako pro model s ostrými hranami, byly některé výsledky pro kvalitnější a pravidelnější síť porovnány s náhodně generovanou sítí, která byla nepravidelnější a nekvalitnější. Toto porovnání bude popsáno v kapitole 4.2.5, kde budou shrnuty výsledky pro všechny 3 geometrie svaru.



Obr. 44 Svar s oblými rohy

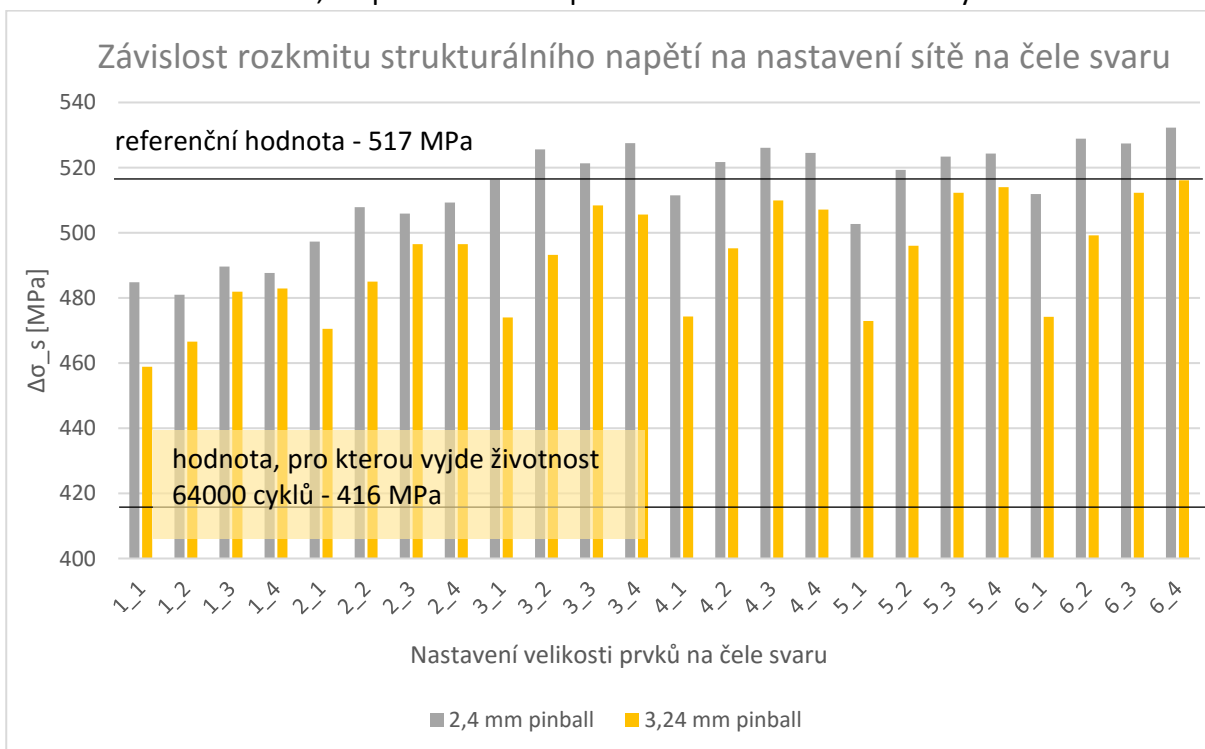
Výsledky pro modely s kvalitnější sítí jsou zobrazeny v tab. 5. Geometrie s oblými rohy svaru je spolu s nastavením sítě „3_2“ zobrazena na obr. 44. Výsledný referenční rozkmit strukturálního napětí vyšel pro 3,24mm VPO 516 MPa, resp. 518 MPa pro 2,4mm VPO. Jako referenční rozkmit napětí byl vybrán průměr z těchto hodnot 517 MPa. Tato hodnota je na obr. 45 zobrazena černou čarou. Pro zvýraznění rozdílů mezi jednotlivými výsledky byla v grafu na vertikální ose změněna škála hodnot.

pinball 2,4 mm	1_1	1_2	1_3	1_4	2_1	2_2	2_3	2_4
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	485	481	490	488	497	508	506	509
N [cyklů]	40 371	41 346	39 195	39 660	37 407	35 122	35 527	34 821
pinball 3,24 mm	1_1	1_2	1_3	1_4	2_1	2_2	2_3	2_4
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	459	467	482	483	471	485	497	497
N [cyklů]	47 606	45 293	41 099	40 854	44 165	40 321	37 584	37 584
pinball 2,4 mm	3_1	3_2	3_3	3_4	4_1	4_2	4_3	4_4

$\Delta\sigma_s$ [MPa]	516	526	521	528	512	522	526	525
N [cyklů]	33 423	31 680	32 471	31 339	34 373	32 396	31 590	31 880
pinball 3,24 mm	3_1	3_2	3_3	3_4	4_1	4_2	4_3	4_4
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	474	493	508	506	474	495	510	507
N [cyklů]	43 194	38 343	35 006	35 591	43 112	37 880	34 698	35 276
pinball 2,4 mm	5_1	5_2	5_3	5_4	6_1	6_2	6_3	6_4
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	503	519	523	524	512	529	527	532
N [cyklů]	36 210	32 847	32 082	31 917	34 293	31 091	31 357	30 499
pinball 3,24 mm	5_1	5_2	5_3	5_4	6_1	6_2	6_3	6_4
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	473	496	512	514	474	499	512	516
N [cyklů]	43 496	37 697	34 212	33 874	43 139	36 977	34 212	33 462

Tab. 5 Hodnoty strukturálního napětí a životnosti pro model s kvalitnější sítí na čele svaru

Pro tuto geometrii vychází všechny výsledky konzervativně. Nejméně konzervativní (červené pole v tabulce) je stejně jako u geometrie s ostrými hranami nastavení 1_1 s 3,24mm VPO. Pro toto nastavení vychází rozkmit strukturálního napětí 459 MPa. Predikovaná životnost má hodnotu $N = 47\,606$ cyklů. Nejvíce konzervativní (zelené pole) je stejně jako u geometrie s ostrými hranami nastavení 6_4 s 2,4mm VPO. Pro toto nastavení vychází rozkmit strukturálního napětí 532 MPa a životnost 30 499 cyklů. Výsledky pro model s nastavením 3,24mm VPO se s zjemňující se sítí ustalují kolem hodnoty referenčního rozkmitu napětí 517 MPa, pro 2,4mm VPO se ustalují kolem hodnoty o téměř 15 MPa vyšší 530 MPa. V tabulce a grafu nejsou zobrazeny hodnoty pro modely s ještě více zmenšujícími se prvky paty svaru (až k velikosti 0,5 mm). Pro tyto nastavení se ale výsledné hodnoty zvyšují maximálně o 4 MPa, takže hodnotu 517 MPa, resp. 530 MPa lze považovat za ustálené hodnoty.



Obr. 45 Trend výsledného strukturálního napětí pro geometrii s oblými rohy svaru

Pro tuto geometrii není potřeba vyřazovat některá nastavení sítě ze souboru povolených nastavení, protože všechny jsou konzervativní a neliší se tak výrazně jako výsledky pro geometrii s ostrými rohy. To může být způsobeno tím, že model s oblými rohy nejlépe odpovídal skutečné geometrii svaru. Jak bylo dříve zmíněno, tak příliš vysoká konzervativnost není vhodná. Žádané tedy je najít nejvyšší třídu únavové křivky takovou, pro kterou budou všechny predikované hodnoty životnosti stále vycházet konzervativně. V tab. 6 jsou zobrazena nastavení z kompletního souboru nastavení s nejméně konzervativní predikcí životnosti. Pro tyto nastavení jsou zobrazeny výsledné hodnoty strukturálního napětí a vypočtené životnosti pro základní únavovou křivku FAT90 (50 % - 132). Pro tyto nastavení byla nalezena nejvyšší použitelná normovaná únavová křivka přepočtená na 50% pravděpodobnost přežití.

<i>pinball [mm]</i>	<i>nastavení</i>	$\Delta\sigma_s$ [MPa]	životnost - N [cyklů]	<i>přepočtená normovaná únavová křivka</i>
2,4	1_2	481	41 346	FAT100 (50 % - 147)
3,24	1_1	459	47 606	FAT90 (50 % - 132)

Tab. 6 Nejméně konzervativní výsledky životnosti z kompletního souboru nastavení

Nejvyšší normovaná třída únavové FAT křivky, pro kterou jsou všechna vyhodnocovaná nastavení na modelu s 2,4mm VPO konzervativní, je třída FAT100 (97,7 %), což je po přepočtu na 50% pravděpodobnost přežití únavová křivka FAT100 (50 % - 147). Pro tuto křivku jsou výsledné životnosti pro nejméně (červenou barvou) a nejvíce (zelenou barvou) konzervativní nastavení zobrazeny v tab. 7. Pro modely s 3,24mm VPO nelze únavovou křivku posunout.

<i>pinball [mm]</i>	<i>nastavení</i>	$\Delta\sigma_s$ [MPa]	životnost - N [cyklů]
2,4	1_2	481	50 200
	6_4	532	37 100

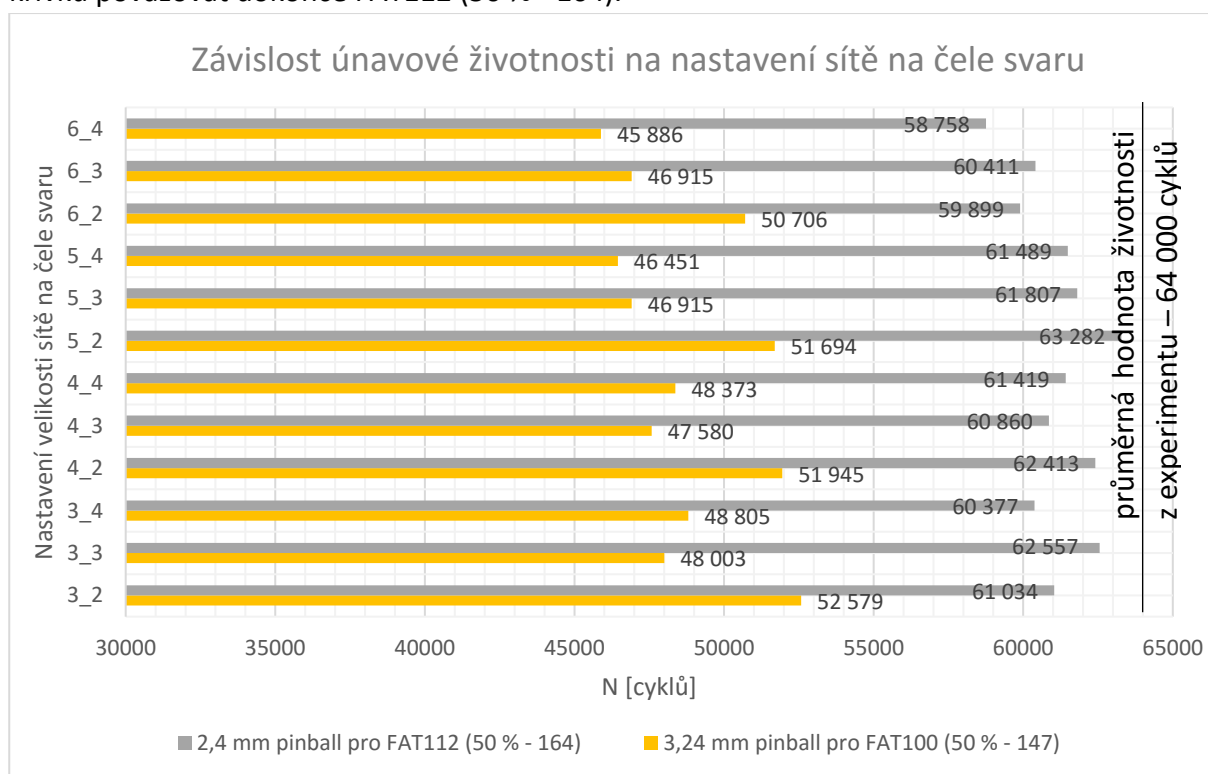
Tab. 7 Výsledky životnosti pro křivku FAT100 (50 % - 147)

Při použití stejného zúženého souboru nastavení jako u geometrie s ostrými rohy (vyřazení nastavení značených jako 1_x, 2_x a x_1) je možné změnit třídu únavové křivky na vyšší než je třída FAT90 (50% - 132). Pro tyto nastavení vyhodnocené pro FAT90 (50 % - 132) jsou nejméně konzervativní hodnoty životnosti zobrazeny v tab. 8. Pro obě nastavení velikosti pinball oblasti byla nalezena nejvyšší použitelná třída únavové křivky, pro kterou vychází všechny životnosti stále konzervativně. Nejvyšší normalizovaná třída FAT křivky přepočtená pro 50% pravděpodobnost přežití, pro kterou budou všechny životnosti konzervativní, je uvedena v posledním sloupci tab. 8.

<i>pinball [mm]</i>	<i>nastavení</i>	<i>strukturální napětí [MPa]</i>	životnost - N [cyklů]	<i>přepočítaná normovaná únavová křivka</i>
2,4	3_2	519	32 847	FAT112 (50 % - 164)
3,24	5_2	493	38 343	FAT100 (50 % - 147)

Tab. 8 Nejméně konzervativní výsledky životnosti ze zúženého souboru nastavení

Na obr. 46 je zobrazena únavová životnost pro geometrii s oblými rohy a s nastavením sítě ze zúženého souboru nastavení. Pro zvýraznění rozdílů mezi jednotlivými výsledky byla v grafu na horizontální ose změněna škála hodnot. Pro model s 2,4mm VPO byla životnost vyhodnocována pro únavovou křivku FAT112 (50 % - 164), resp. FAT100 (50 % - 147) pro VPO 3,24 mm. Výhodou této geometrie je konzervativnost vypočtených životností pro všechna vyhodnocovaná nastavení sítě z kompletního souboru nastavení a pinball oblasti. Pro použití v praxi není pro svary s podobnými geometriemi automaticky potřeba kontrolovat, aby se se na modelu nevyskytovala určitá nastavení sítě, pro která nevychází životnost konzervativní. Dále je možno pro model tohoto konkrétního typu svaru s 2,4mm VPO dosáhnout konzervativních výsledků i pro vyšší třídu únavové křivky – FAT100 (50 % - 147). Pro kompletní soubor nastavení je nevýhodou velký rozdíl ve strukturálním napětí a predikované životnosti mezi nejvíce a nejméně konzervativními nastaveními. Rozdíl je zobrazen v tab. 9. Pokud se použijí pouze nastavení sítě ze zúženého souboru nastavení, bude rozdíl mezi výsledky nejméně a nejvíce konzervativních nastavení značně menší (zobrazeno v tab. 9). Stabilita výsledků těchto povolených nastavení je pro praxi velkou výhodou. A pro tento konkrétní model s 2,4mm VPO je možno pro tento konkrétní typ svarového spojení za konzervativní křivku považovat dokonce FAT112 (50 % - 164).



Obr. 46 Výsledná životnost pro nastavení ze zúženého souboru nastavení sítě

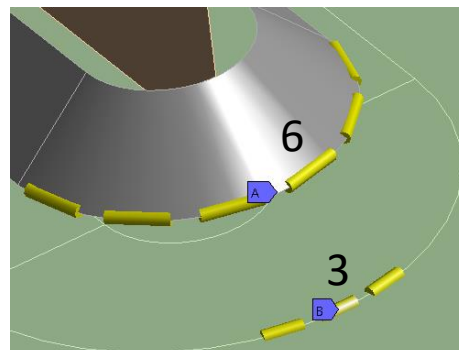
soubor nastavení	pinball [mm]	rozdíl max $\Delta\sigma_s$ - min $\Delta\sigma_s$ [MPa]	rozdíl max $\Delta\sigma_s$ - min $\Delta\sigma_s$ [%]	rozdíl max N - min N [cyklů]	rozdíl max N - min N [%]
kompletní	2,4	51	9,64	20 896	26,23
	3,24	57	11,09	19 395	29,71
zúžený	2,4	13	2,44	4 524	7,15
	3,24	23	4,44	6 693	12,73

Tab. 9 Absolutní a relativní rozdíly ve výsledcích pro vybraný soubor nastavení

Z tab. 9 je vidět, že nejmenší rozdíly ve výsledcích a tím nejvíce stabilní nastavení modelu jsou pro nastavení sítě ze zúženého souboru nastavení a 2,4mm VPO a pro praxi se toto nastavení nabízí jako nejvhodnější.

4.2.4.3 Porovnání pro zaoblenou geometrii na čele svaru

Pro tento model bylo vyhodnoceno 24 různých nastavení modelu a jejich vliv na strukturální napětí a výslednou životnost. Modely se liší ve 12 různých nastaveních rozdělení hran na čele svaru a pro každé toto nastavení ve 2 různých velikostech pinball oblasti. Příklad nastavení rozdělení hran na čele svaru je zobrazen na obr. 47. Tento konkrétní příklad se značí označením 3_6. Modely byly tvořeny s kvalitní a pravidelně uspořádanou sítí (příklad na obr. 40a na str. 40). Výsledný rozkmit strukturálního napětí byl srovnán s referenčním rozkmitem strukturálního napětí, který byl vypočten na modelu s 1,5mm globální velikostí sítě. Tento referenční rozkmit strukturálního napětí vyšel pro obě velikosti pinball oblasti shodně – 527 MPa. Pro tuto geometrii bude termín „zúžený“ soubor nastavení obsahovat nastavení s třemi a více prvky na hraně paty na čele svaru (např. 3_6, 4_8, 5_8, 6_6).



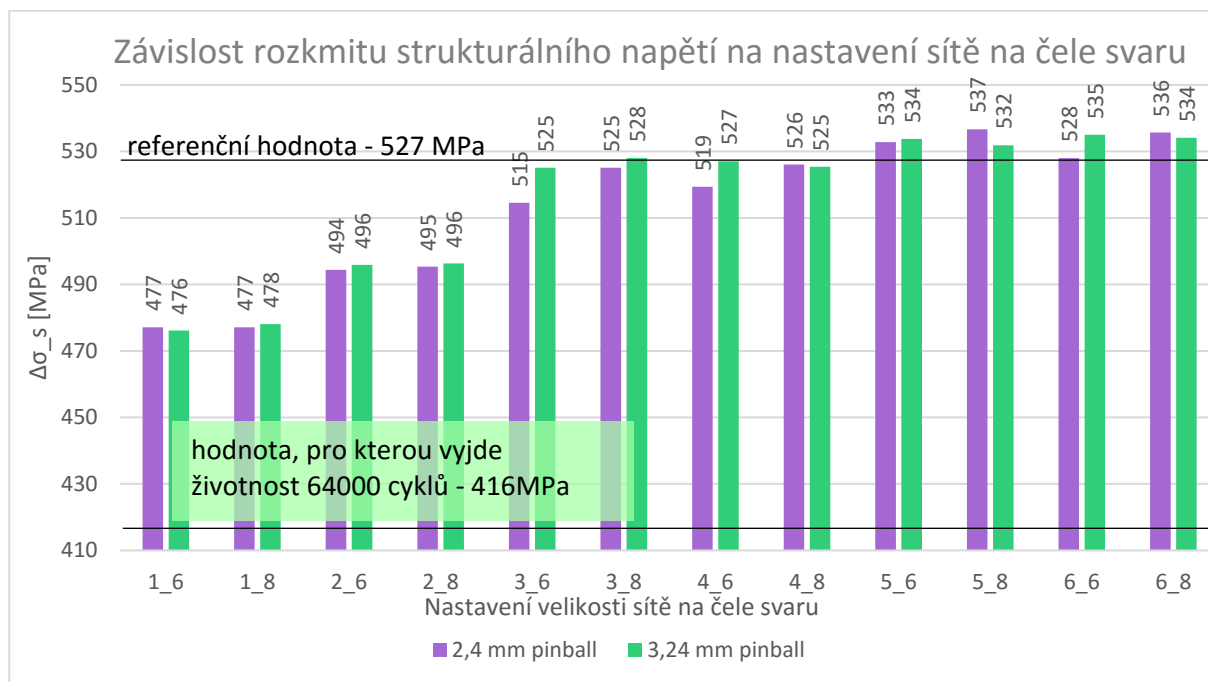
Obr. 47 Geometrie se zaobleným čelem svaru

<i>pinball 2,4 mm</i>	1_6	1_8	2_6	2_8	3_6	3_8
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	477	477	494	495	515	525
N [cyklů]	42352	42352	38065	37844	33764	31767
<i>pinball 3,24 mm</i>	1_6	1_8	2_6	2_8	3_6	3_8
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	476	478	496	496	525	528
N [cyklů]	42609	42097	37720	37625	31767	31250
<i>pinball 2,4 mm</i>	4_6	4_8	5_6	5_8	6_6	6_8
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	519	526	533	537	528	536
N [cyklů]	32836	31594	30413	29765	31250	29925
<i>pinball 3,24 mm</i>	4_6	4_8	5_6	5_8	6_6	6_8
$\Delta\sigma_s$ [MPa]	527	525	534	532	535	534
N [cyklů]	31429	31717	30250	30578	30040	30192

Tab. 10 Hodnoty strukturálního napětí a životnosti pro model s kvalitnější sítí na čele svaru

V tab. 10 jsou uvedeny výsledné rozkmitky strukturálního napětí a z nich predikované životnosti hodnocené pro únavovou křivkou FAT90 (50 % - 132). V červených polích jsou zobrazeny nejméně konzervativní hodnoty, resp. nejvíce konzervativní v zelených. Se zjemňující se sítí se pro obě velikosti pinball oblasti hodnoty napětí ustalují těsně nad referenčním napětím. Na obr. 48 nejsou zobrazeny výsledky pro nejhustší síť na čele svaru. Pro toto nastavení se ale napětí již nezvyšuje. Pro zvýraznění rozdílů mezi jednotlivými výsledky byla v grafu na vertikální ose změněna škála hodnot. Hodnota napětí odpovídající průměrné hodnotě životnosti z experimentu – 64 000 cyklů je pro FAT90 (50 % - 132) hodnota 416 MPa. To je nejnižší možné konzervativní napětí. Na obr. 48 je toto napětí zobrazeno černou čarou. Všechny spočítané rozkmitky strukturálního napětí jsou nad touto hodnotou,

takže predikovaná životnost pro všechna nastavení vychází méně než 64 000 cyklů a tím pádem je konzervativní. Pro žádné nastavení sítě na čele svaru není tedy v praxi u tohoto konkrétního typu svaru potřeba kontrolovat nastavení sítě na čele svaru. Nastavení velikosti pinball oblasti nemá vliv na výsledky. V kapitole 0 je také modelován svar se zaoblením. Poloměr zaoblení sice jiný, ale velikost pinball oblasti také neovlivňuje výsledky. Zjištění, zda to je obecná vlastnost tohoto modelu, může být námětem další práce. Stejně tak nemá téměř žádný vliv, zda je hrana těla svaru na čele rozdělena na 6 či 8 prvků. Pro zabránění širšího spektra možných výsledků je možno použít nastavení s většími rozdíly v diskretizaci hrany těla svaru na čele.



Obr. 48 Trend strukturálního napětí pro model se zaoblenou geometrií na čele svaru

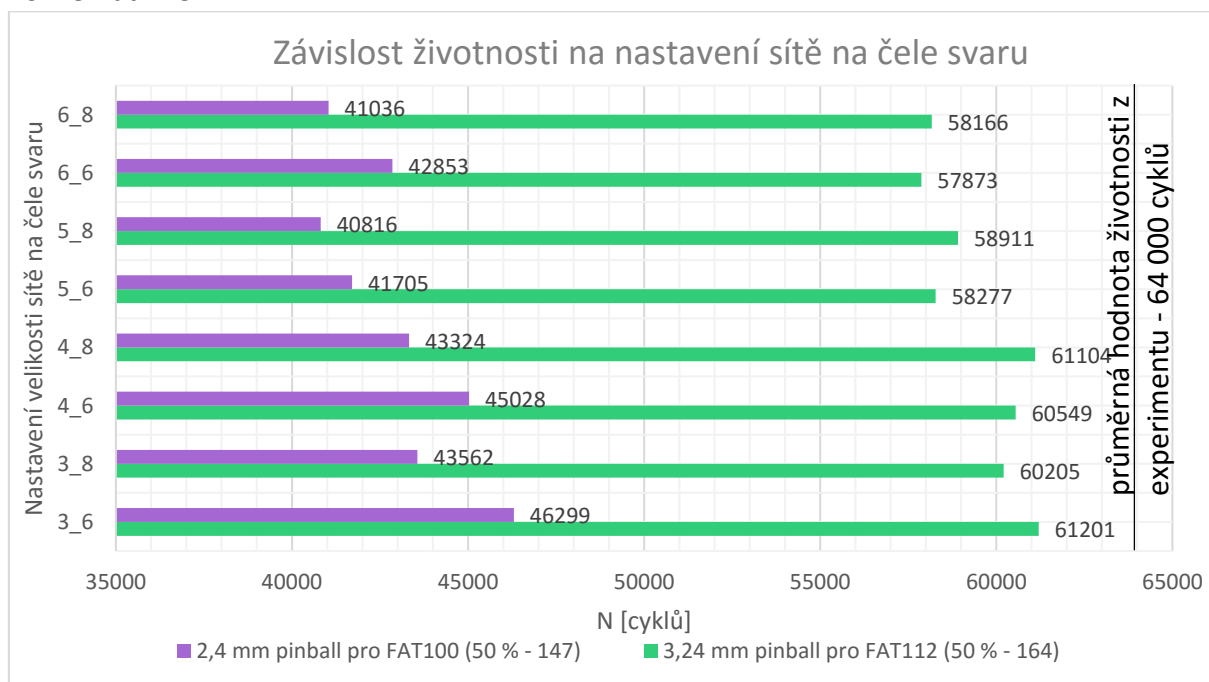
Pro snížení přílišné konzervativnosti je možné změnit třídu únavové křivky. Pro kompletní soubor nastavení lze pro tento konkrétní typ svarového spojení změnit třídu únavové křivky na třídu FAT100 (97,7 %), což pro 50% pravděpodobnost přežití je křivka FAT100 (50 % - 147). Pro únavovou křivku změněnou na FAT100 (50 % - 147) jsou nejvíce a nejméně konzervativní hodnoty životnosti zobrazeny v tab. 11. Nejméně konzervativní jsou zvýrazněny červenou barvou, resp. nejvíce zelenou.

pinball [mm]	nastavení	strukturální napětí [MPa]	životnost - N [cyklů]
2,4	1_8	477	58 120
3,24	1_6	476	58 500
2,4	5_8	537	40 734
3,24	6_6	535	41 200

Tab. 11 Nejméně a nejvíce konzervativní hodnoty životnosti vzhledem k FAT147 (50 %)

Při použití zúženého souboru nastavení sítě na čele svaru je možno pro tento konkrétní model svaru s 3,24mm VPO hodnotit životnost pro křivku FAT112 (97,7 %), což je pro 50%

pravděpodobnost přežití křivka FAT112 (50 % - 164). Pro tyto křivky jsou predikované životnosti pro nastavení sítě ze zúženého souboru nastavení zobrazeny v obr. 49. Pro zvýraznění rozdílů mezi jednotlivými výsledky byla v grafu na horizontální ose změněna škála hodnot. Všechny životnosti vycházejí konzervativně. Pro model s 2,4mm VPO a pro nastavení ze zúženého souboru je možno pro tento konkrétní typ svarového spojení změnit únavovou křivku na FAT100 (50 % - 147). Pro tuto křivku vychází všechny predikované životnosti konzervativně.



Obr. 49 Výsledná životnost pro nastavení ze zúženého souboru nastavení

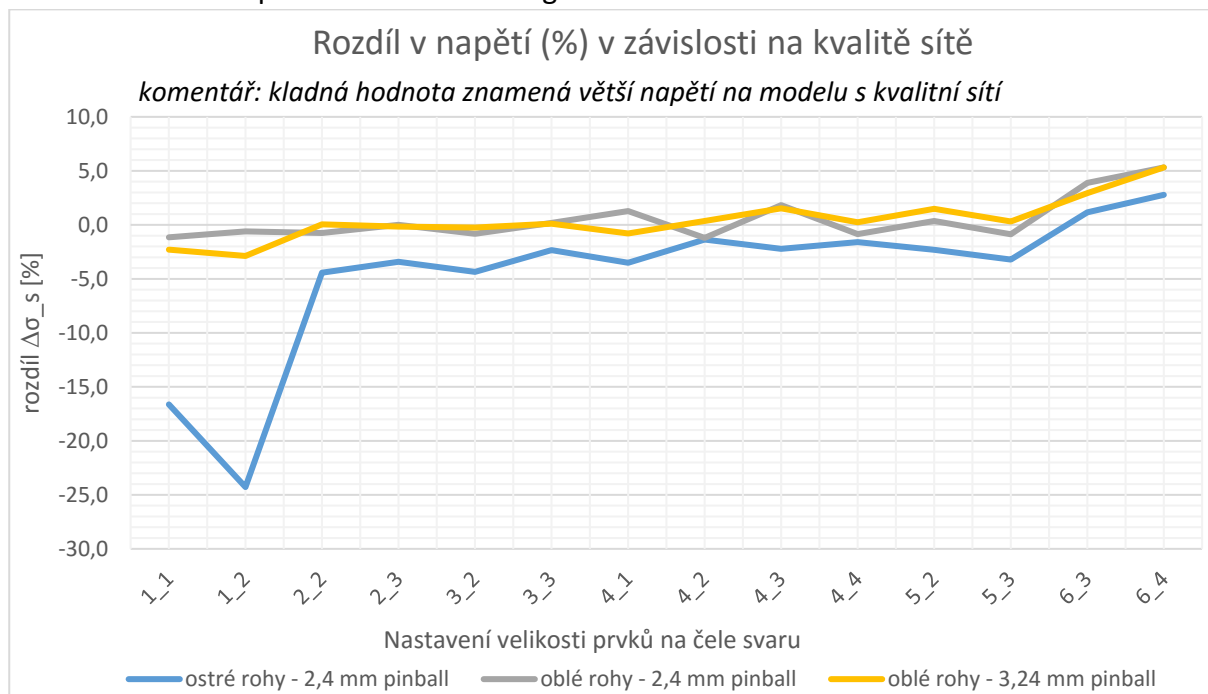
soubor nastavení	pinball [mm]	rozdíl max $\Delta\sigma_s$ - min $\Delta\sigma_s$ [MPa]	rozdíl max $\Delta\sigma_s$ - min $\Delta\sigma_s$ [%]	rozdíl max N - min N [cyklů]	rozdíl max N - min N [%]
kompletní	2,4	60	11,09	17 260	29,72
	3,24	59	11	17 236	29,5
zúžený	2,4	22	4,11	5 483	11,84
	3,24	10	1,85	3 328	5,44

Tab. 12 Absolutní a relativní rozdíly ve výsledcích pro vybraný soubor nastavení

Výhodou této geometrie je konzervativnost všech nastavení modelu vzhledem k doporučené FAT90 (50 % - 132). Pro všechny nastavení je ale pro tento konkrétní model a typ svaru možné jako konzervativní považovat i křivku FAT100 (50 % - 147). Pro zúžený soubor nastavení a VPO 3,24 mm je možno jako konzervativní považovat křivku FAT112 (50 % - 164). Pro zúžený soubor nastavení a VPO 2,4 mm je možno jako konzervativní považovat křivku FAT100 (50 % - 147). Model s 3,24mm VPO vykazuje pro nastavení ze zúženého souboru nastavení nejstabilnější výsledky.

4.2.5 Shrnutí vlivu nastavení sítě, vlivu velikosti pinball oblasti a porovnání výsledků pro různé geometrie

Byly hodnoceny vlivy nastavení velikosti sítě na čele svaru, vlivy velikosti pinball oblasti a vliv geometrie svaru na výsledný rozkmit strukturálního napětí a životnost. Vypočtení rozkmitu strukturálního napětí a výsledné hodnocení životnosti bylo provedeno pro celkem 120 nastavení modelu. Pro těchto 120 nastavení modelu byla vždy vytvořena kvalitní a pravidelná síť (příklad takové sítě na obr. 40a na str. 40). Některá z těchto nastavení byla srovnána s modely, pro které byla síť generována náhodně (příklad takové sítě na obr. 40b na str. 40). Byla porovnávána nastavení pro geometrii s ostrými rohy na čele svaru a 2,4mm VPO a pro geometrii s oblými rohy a oběma velikostmi pinball oblasti. Porovnání modelů se sítí nastavenou kvalitně a sítí generovanou náhodně je zobrazené na obr. 50, kde je zobrazen procentuální rozdíl ve výsledcích mezi těmito modely. Zobrazen je rozdíl ve strukturálním napětí jako závislost na nastavení velikosti prvků na čele svaru. Rozdíl strukturálního napětí se získá odečtením napětí na modelu se sítí generovanou náhodně od modelu s kvalitní sítí.



Obr. 50 Rozdíly ve strukturálních napětích mezi kvalitní a náhodně generovanou sítí

Pro model s oblými rohy je rozdíl téměř pro všechna nastavení blízký nule, pohybuje se mezi hodnotou -2 a 2 %. Výjimkou jsou nastavení 6_3 a 6_4, pro které rozdíl dosahuje velikosti 5 %. Pro model s ostrými rohy se pro většinu nastavení rozdíl pohybuje okolo -4 %, a to v rozmezí -5 % až -2,5 %. To znamená, že pro model s náhodně generovanou sítí vychází napětí větší, a že predikce životnosti bude více konzervativní. Výjimkou jsou hodnoty rozdílu pro nastavení s největšími a nejmenšími prvky na čele svaru. Pro geometrii s ostrými rohy a nastavením 1_1 a 1_2 je rozdíl hluboce v záporných hodnotách a pro nastavením 6_3 a 6_4 je lehce v kladných. To je pravděpodobně způsobeno značnými rozdíly ve velikosti prvků na šikmých stranách čela svaru, protože pro nastavení 6_x je na šikmé straně vytvořeno 6 prvků pro kvalitnější síť, resp. 2 prvky pro nepravidelnější síť a pro nastavení 1_x je na šikmé straně vytvořen 1 prvek pro kvalitnější síť, resp. 2 prvky pro nepravidelnější síť. Zjištění více o těchto negativních vlivech na

výsledky a rozšíření rozsahu porovnávaných velikostí sítě může být námětem další práce. Z dostupných výsledků se zdá, že použití geometrie s oblými rohy v praxi je vhodnější, protože je mnohem méně potřeba kontrolovat kvalitu a pravidelnost sítě.

V této části bude porovnána stabilita výsledků pro různé geometrie a různá nastavení modelu. Byly odlišeny dva soubory nastavení sítě na čele svaru – kompletní a zúžený. Kompletní soubor obsahuje všechna vyhodnocená nastavení. Zúžený soubor nastavení vznikne odebráním nastavení, pro která se výsledky liší výrazně od ostatních výsledků. To v podstatě znamená, že jsou z kompletního souboru nastavení odebrány nastavení, která tvoří hrubou síť na čele svaru.

Jak bylo vidět výše, tak se pro danou geometrii a danou velikost pinball oblasti výsledky liší s měnícím se nastavením velikosti prvků na čele svaru. Čím jsou větší rozdíly ve výsledcích mezi jednotlivými nastaveními velikosti prvků, tím je model méně příznivý pro použití v praxi. Proto jsou v tab. 13 porovnány modely s různými geometriemi svaru. Porovnávány jsou rozdíly mezi nastaveními s maximálními a minimálními hodnotami strukturálního napětí a životnosti pro dané geometrie. Zobrazeny jsou absolutní i poměrné velikosti rozdílů.

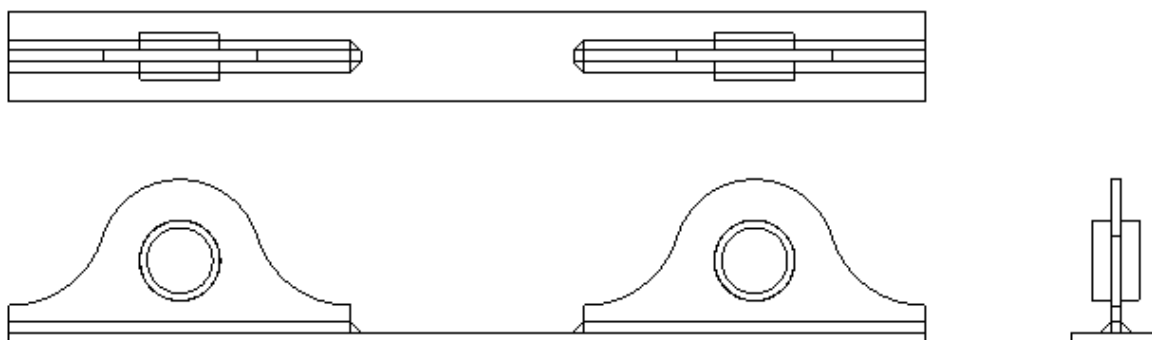
geometrie svaru	soubor nastavení	pinball [mm]	rozdíl $\Delta\sigma_s$ [MPa]	rozdíl $\Delta\sigma_s$ [%]	rozdíl N [cyklů]	rozdíl N [%]
ostré rohy	kompletní	2,4	149	27,35	88 955	61,66
		3,24	145	27,23	66 163	61,46
	zúžený	2,4	15	2,60	4 556	7,61
		3,24	25	4,63	6 339	13,25
oblé rohy	kompletní	2,4	51	9,64	20 896	26,23
		3,24	57	11,09	19 395	29,71
	zúžený	2,4	13	2,44	4 524	7,15
		3,24	23	4,44	6 693	12,73
zaoblené čelo	kompletní	2,4	60	11,09	17 260	29,72
		3,24	59	11	17 236	29,5
	zúžený	2,4	22	4,11	5 483	11,84
		3,24	10	1,85	3 328	5,44

Tab. 13 Rozdíly v rozkmitech strukturálních napětí a životnostech

Z tabulky je vidět, že nejméně vhodné je používat geometrii s ostrými rohy a kompletním souborem nastavení, protože rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou životnosti je až 61,5 %. Mezi geometriemi s oblými rohy a se zaobleným čelem nejsou vidět podstatné rozdíly ve výsledcích. V případě použití zúženého souboru nastavení jsou pro všechny geometrie mezi výsledky jen malé rozdíly. Nejmenší rozdíly mezi výsledky jsou pro modely se zúženým souborem nastavení, geometrií se zaobleným čelem a 3,24mm VPO. Pro ostatní geometrie jsou nejvíce stabilní modely se zúženým souborem nastavení a 2,4mm VPO. Následující doporučení se vztahují pouze k vyhodnocovanému typu svaru. Pro praktické použití této metody by neměly být používány modely s ostrými rohy a kompletním souborem nastavení sítě. Ostatní modely a nastavení jsou použitelné všechny. Rozhodnutí o nejvhodnějším způsobu modelování záleží na náročnosti aplikace daného modelu na modelech skutečných konstrukcí. Tomuto rozhodování bych se chtěl v budoucnu ještě věnovat.

5. Experimentální vzorek a provedení experiment

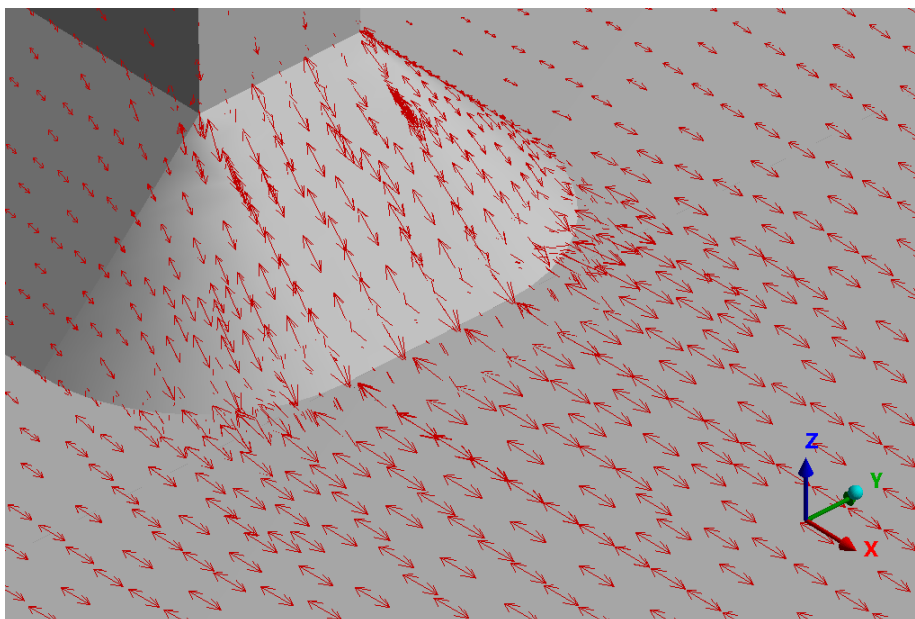
Experimentální vzorek navrhla doktorandka Ústavu pružnosti a pevnosti Ing. Šárka Trubelová ve spolupráci s pracovníky výpočetního oddělení firmy Doosan Bobcat Engineering s.r.o.. Experiment proběhl ve spolupráci ČVUT FS a firmy Doosan Bobcat Engineering s.r.o.. Pro daný typ svaru budou experimentální data použita pro verifikaci použité metody predikce životnosti. Zatěžování experimentálního vzorku probíhalo na dvou zátěžných hladinách podle obr. 52. Z několika možných konfigurací experimentálního vzorku byl vybrán vzorek zobrazený na obr. 51, protože směr prvního hlavního napětí pro horní plochu plechu je kolmý na kritický průřez v patě na čele svaru (obr. 53 - směřuje ve směru osy x). Tento směr prvního hlavního napětí je vhodný pro určení hot spot napětí na čele paty svaru. Pro všechny svary byla délka nohy svaru 6 mm. Tloušťka plechů byla 6 mm.



Obr. 51 Geometrie experimentálního vzorku



Obr. 52 Okrajové podmínky při experimentu



Obr. 53 Zobrazení prvního hlavního napětí na čele svaru

Při experimentu byla oka (místa A a C) byla uložena na čepy. Levý čep byl pevně uchycen a pravý čep působil silou (značka B) ve směru osy x. Odzkoušeno bylo celkem 9 vzorků. Zatěžování vzorků bylo ukončeno v okamžiku, kdy se na povrchu objevila okem viditelná trhlina. Nastavení experimentu je popsáno v tab. 14.

	Nižší zátěžná hladina	Vyšší zátěžná hladina
Počet vzorků	5	4
Maximální síla [N]	2200	2500
Minimální síla [N]	100	100
Amplituda [N]	1050	1200
Střední hodnota [N]	1150	1300
Součinitel nesouměrnosti cyklu R	0,04545	0,04
Frekvence zatěžování [Hz]	1	1

Tab. 14 Nastavení experimentu

Experimentálně zjištěný počet cyklů do porušení „N“ je uveden v tab. 15.

	Nižší zátěžná hladina	Vyšší zátěžná hladina
N [10^3 cyklů]	300, 150, 163, 130, 105	77, 75, 42, 62
Průměrná hodnota N [10^3 cyklů]	137	64

Tab. 15 Výsledky experimentu

Životnost 300 000 cyklů není pro v případě 1. vzorku plně vypovídající, protože průběh zatěžování neodpovídal zvoleným požadavkům. Tento experimentální výsledek nebude tedy uvažován pro určení průměrné hodnoty životnosti (tab. Tab. 15).

6. Porovnání s jinými metodami predikce únavového života

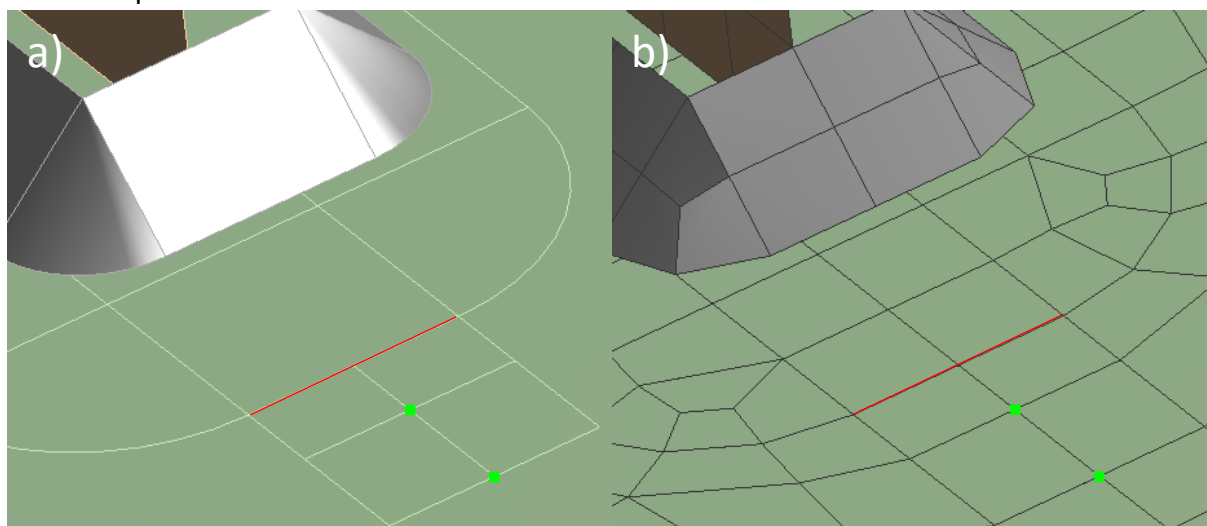
V kapitole 0 byly popsány metody pro výpočetní predikci životnosti. Pro predikci životnosti na velkých MKP modelech byla vybrána metoda strukturálního napětí. Tato metoda byla široce popsána a výpočetně odzkoušena na menším modelu. Její výsledky z vyšší zátěžné hladiny budou porovnány s metodou hot spot napětí

6.1 Porovnání s metodou hot spot napětí [13]

Metoda hot spot napětí byla stručně popsána v kapitole 2.3. Na výpočetním modelu byla čele svaru vytvořena hustá síť, takže podle obr. 3a byl vybrán vztah pro extrapolaci ve tvaru:

$$\sigma_{hs} = 1,67 * \sigma_{0,4*t} - 0,67 * \sigma_{1*t} ,$$

kde $\sigma_{0,4t}$ je zprůměrované první hlavní napětí v uzlu ve vzdálenosti 0,4 násobku tloušťky plechu od paty svaru, resp. σ_{1*t} ve vzdálenosti 1 násobku tloušťky. Zatížení ($F_{max} = 2500$ N a $F_{min} = 100$ N) a okrajové podmínky byly nastaveny stejně jako pro modely vyhodnocované metodou strukturálních napětí. Pro tento model a toto zatížení vychází první hlavní napětí kolmé na patu svaru.

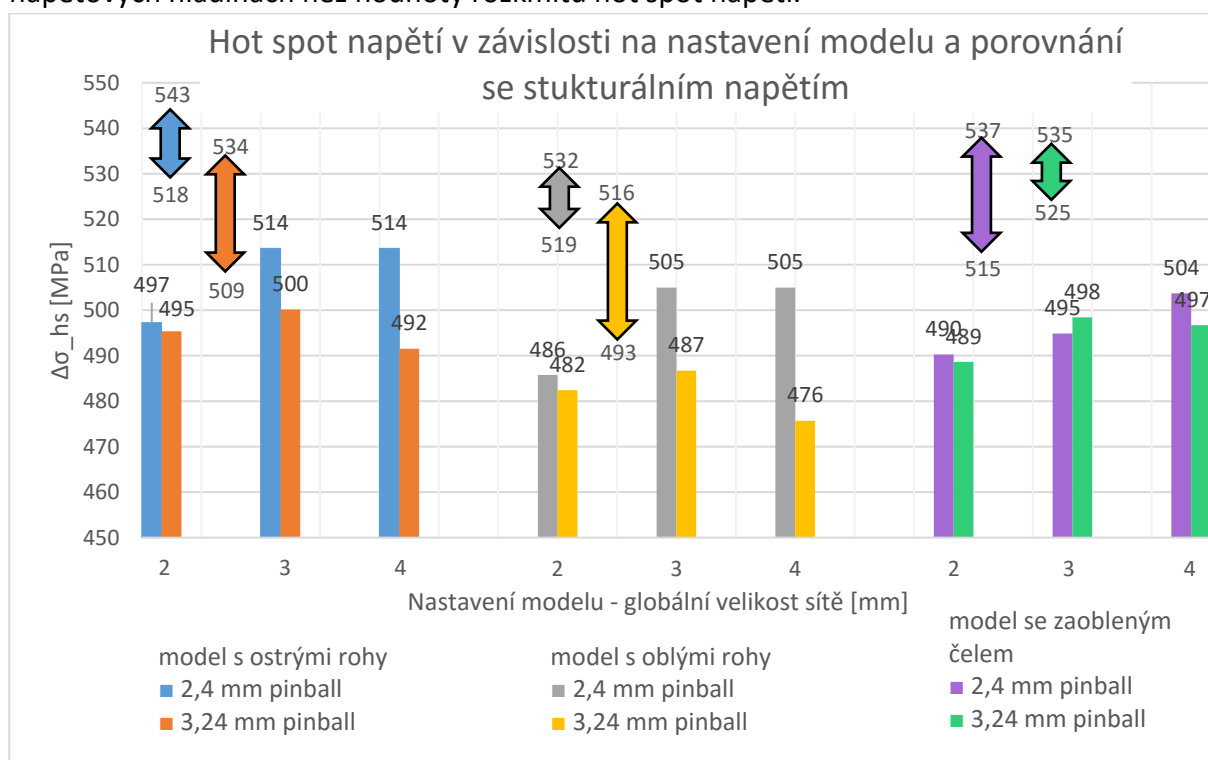


Obr. 54 a) Geometrie, b) síť pro vyhodnocení metodou hot spot napětí

Tloušťka plechu je rovna $t = 6$ mm, takže $\sigma_{0,4*t}$ bude napětí zjištěno z uzlu ve vzdálenosti 2,4 mm od paty svaru a σ_{1*t} bude zjištěno z uzlu ve vzdálenosti 6 mm od paty svaru. Tyto body jsou zobrazeny zeleně na obr. 54. Červeně je zobrazena hrana paty svaru na čele. Vytvořená geometrie spolu s vytvořenými hranami pro tvorbu přesné sítě podle IIV [13] je zobrazena na obr. 54a. Vytvořená síť na čele svaru je vidět na obr. 54b. Mezi patou svaru a bližším uzlem musí být použit přesně jeden prvek a mezi bližším a vzdálenějším uzlem od paty svaru musí být podle IIV použit také jen jeden prvek. Pro tuto hustší síť stačí použít lineární prvky. Tato metoda byla odzkoušena pro všechny tři testované geometrie.

Hot spot napětí bylo vypočítáno pro modely různými nastaveními globální velikosti sítě a pro obě nastavení velikosti pinball oblasti. Výsledky jsou zobrazeny na obr. 55. Pro zvýraznění rozdílů mezi jednotlivými výsledky byla v grafu na vertikální ose změněna škála hodnot. V grafu je zobrazeno také porovnání hodnot rozkmitu hot spot napětí a rozkmitu

strukturálních napětí určených v kapitole 4.2.4. Rozsah rozkmitů strukturálních napětí je pro daný model s danou geometrií svaru a velikostí pinball oblasti je zobrazen délkou šipek. Barvy šipek odpovídají dané geometrii a dané velikosti pinball oblasti. Šipky zobrazují rozsah výsledků pro zúžený soubor nastavení, protože ten lépe odpovídá nastavením modelů pro vyhodnocení hot spot napětí. Pro modely s oblými a ostrými rohy a pro modely s větší globální velikostí sítě (3 a 4 mm) se rozkmit hot spot napětí pro různé veliké pinball oblasti výrazně liší. Se zmenšující se globální velikostí prvků se rozdíly pro obě velikosti pinball oblasti zmenšují. Geometrie se zaobleným čelem vykazuje mnohem stabilnější výsledky než ostatní dvě geometrie. Pro tyto dvě geometrie vychází hot spot napětí pro všechny vyhodnocované globální velikosti sítě větší pro 2,4mm VPO. Pro geometrii se zaobleným čelem jsou rozdíly ve výsledcích pro větší a menší pinball oblast zanedbatelné. To je v souladu s vypočítanými rozkmity strukturálního napětí. Hodnoty rozkmitu strukturálních napětí se pohybují ve vyšších napěťových hladinách než hodnoty rozkmitu hot spot napětí.



Obr. 55 Hot spot napětí v závislosti na nastavení modelu a porovnání se strukturálním napětím

Predikované životnosti metodou hot spot napětí jsou uvedeny v tab. 16. Budou porovnány s životností (označena jako „metoda SS“ v tab. Tab. 16), která byla predikována z průměrného strukturálního napětí určeného z výsledných hodnot napětí pro zúžený soubor nastavení. Pro výpočet strukturálního napětí byl použit model s 4mm globální velikostí sítě (kapitola 4.2.4). Životnost byla predikována vzhledem k únavové křivce FAT90 (50 % - 132). Průměrná hodnota životnosti z experimentu byla 64 000 cyklů. Všechny hodnoty v tabulce se pohybují pod touto hranicí, takže všechny nastavení jsou konzervativní. Nejméně konzervativní výsledky jsou zvýrazněny červenou barvou, nejvíce konzervativní zelenou. Predikované hodnoty životnosti metodou strukturálních napětí jsou obecně konzervativnější. Pro hustou síť nebo model se zaobleným čelem by mělo jít změnit třídu únavové FAT křivky, stejně jako to bylo provedeno pro metodu strukturálních napětí.

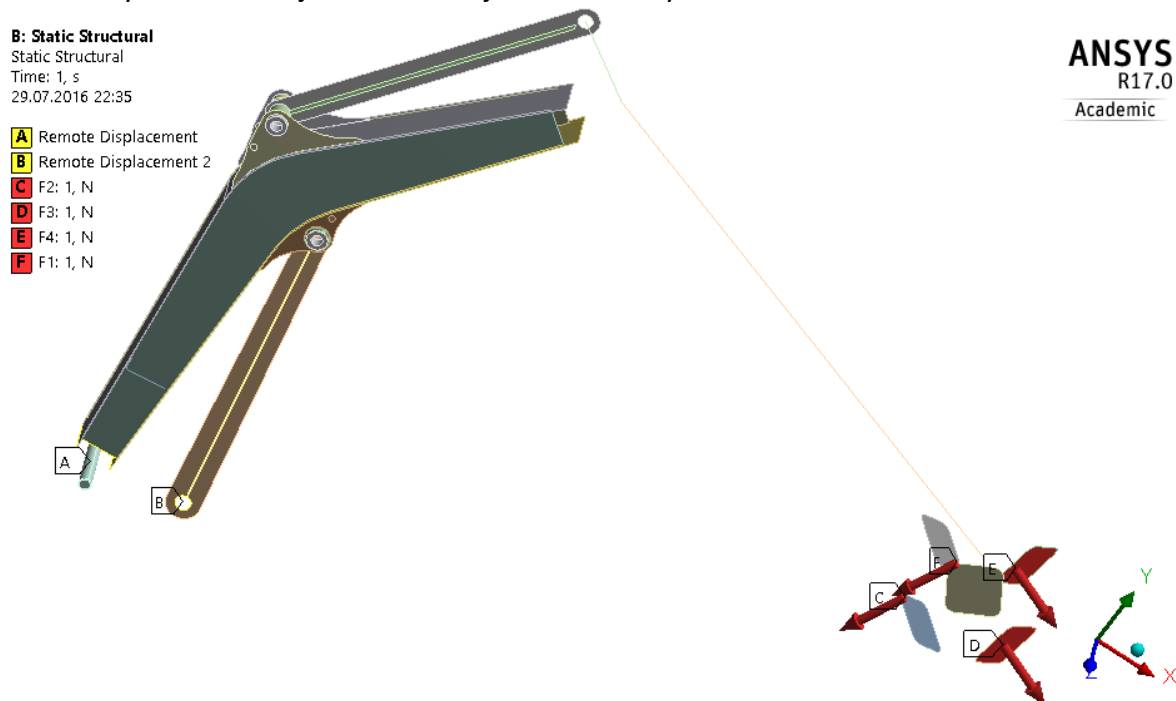
geometrie svaru	pinball poloměr [mm]	globální velikost sítě [mm]			
		2	3	4	
		životnost N [cyklů]			
		metoda hot spot napětí			metoda SS
ostré rohy	2,4	37 407	33 953	33 953	29 705
	3,24	37 844	36 765	38 738	31 972
oblé rohy	2,4	40 132	35 726	35 726	31 789
	3,24	40 977	39 895	42 738	35 506
zaoblené čelo	2,4	39 034	37 954	35 992	31 429
	3,24	39 427	37 148	37 537	30 898

Tab. 16 Výsledná životnost pro metodu hot spot napětí vzhledem ke křivce FAT132 (50 %)

7. Predikce životnosti rozsáhlé svařované konstrukce metodou strukturálních napětí

Na základě únavového experimentu provedeného pracovníky firmy Doosan Bobcat Engineering s.r.o. byla predikována životnost rozsáhlé svařované konstrukce pomocí metody strukturálního napětí. Únavový experiment byl proveden na konstrukci ramene stavebního stroje. Pro predikci byl poskytnut CAD model konstrukce ramena bagru a zatěžovací síly z experimentu. Zatěžovací síly aproximují skutečné provozní silové účinky působící na lžici. Z důvodu duševního vlastnictví firmy Doosan Bobcat Engineering s.r.o. nebudou velikosti zatěžovacích sil uvedeny.

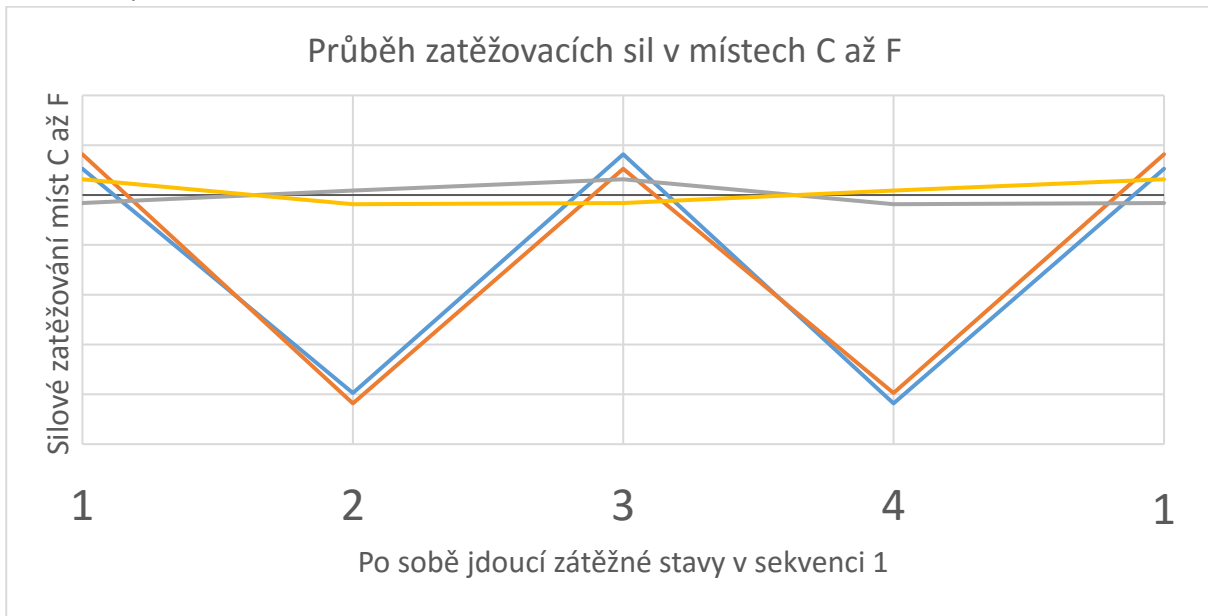
Zjednodušený model konstrukce ramena je zobrazen na obr. 56. Pro nastavení výpočetního modelu v souladu s experimentem byla v místech A a B povolena pouze rotace kolem globální osy z. V místech C až F byla aplikována silová zatížení. Přenos zatížení mezi lžicí a ramenem je zprostředkován dostatečně tuhým nosíkovým tělesem. Toto těleso je zobrazeno tenkými čarami. Na obr. 58 jsou zobrazeny uzlová posunutí způsobená aplikací jednotkových sil. Na stejném obrázku jsou zobrazeny vazbové rovnice.



Obr. 56 Model ramena s okrajovými podmínkami a zatíženími

Kombinací 4 zatěžovacích sil byl definován jeden zatěžovací stav. Na obr. 57 jsou schematicky vidět průběhy zatěžovacích sil v místech C až F. Kombinací 4 zatěžovacích stavů byly definovány zatěžovací sekvence. Každý zatěžovací stav tj. stav 1 až 4 se v zatěžovací sekvenci opakuje 3x. Na obrázku je zobrazena 1/3 průběhu sekvence 1. Kombinací 2 zatěžovacích sekvencí vznikl zatěžovací blok, který se skládá z 9 sekvencí 1 a 11 sekvencí 2. Jako kritické svarové spojení bylo z experimentu určeno přivaření pouzdra čepu ke konstrukci ramene. Hodnocením životnosti kritického svarového spoje byl určen počet opakování zatěžovacího bloku do porušení. Pouzdro je přivařeno k plechu ramene pomocí oboustranného koutového svaru (detail na obr. 59 a 60). Model je symetrický, takže byly vyhodnoceny svary mezi

plechem a pouzdrém pouze na jedné straně ramena. Pro svary na obou stranách plechu bylo predikováno kritické místo (místo s větší zobrazenou hodnotou napětí na zmíněných obrázcích).



Obr. 57 Průběh zatěžovacích sil

V kritických místech byla hodnocena životnost Palmgren – Minerovou metodou ze vztahu:

$$D = \sum_{i=1}^p \frac{n_i}{N_i},$$

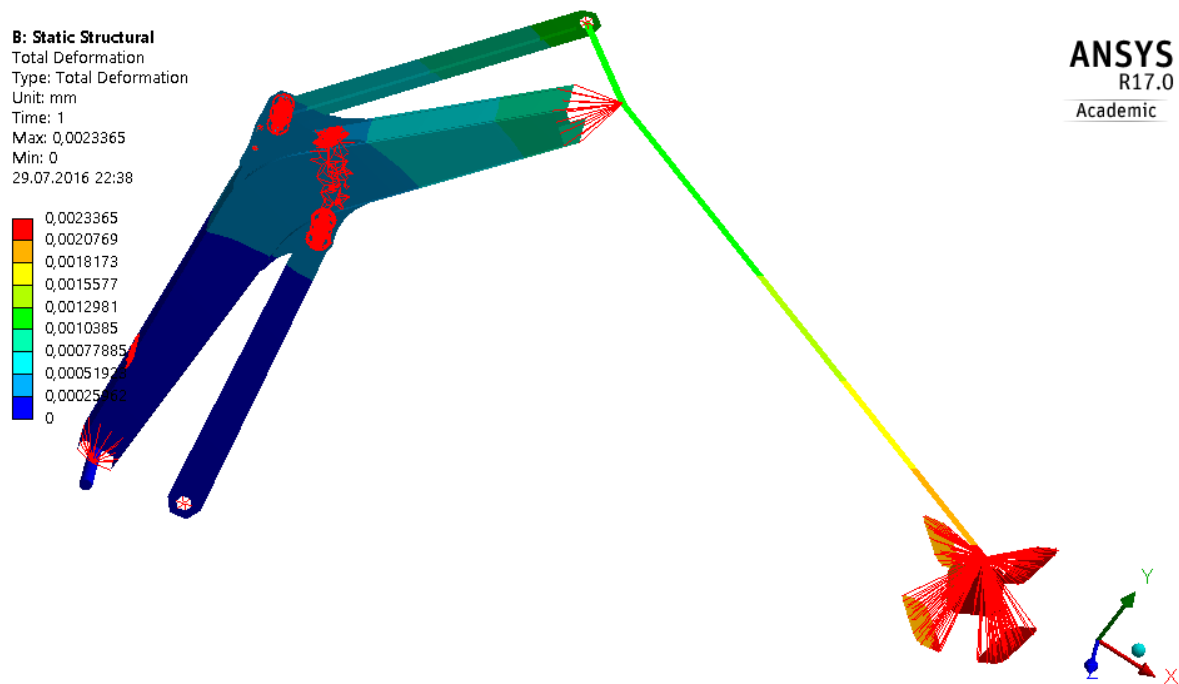
kde $D \in < 0,1 >$ je kumulované poškození,

n_i je skutečný počet zatěžovacích cyklů na dané zátěžné hladině,

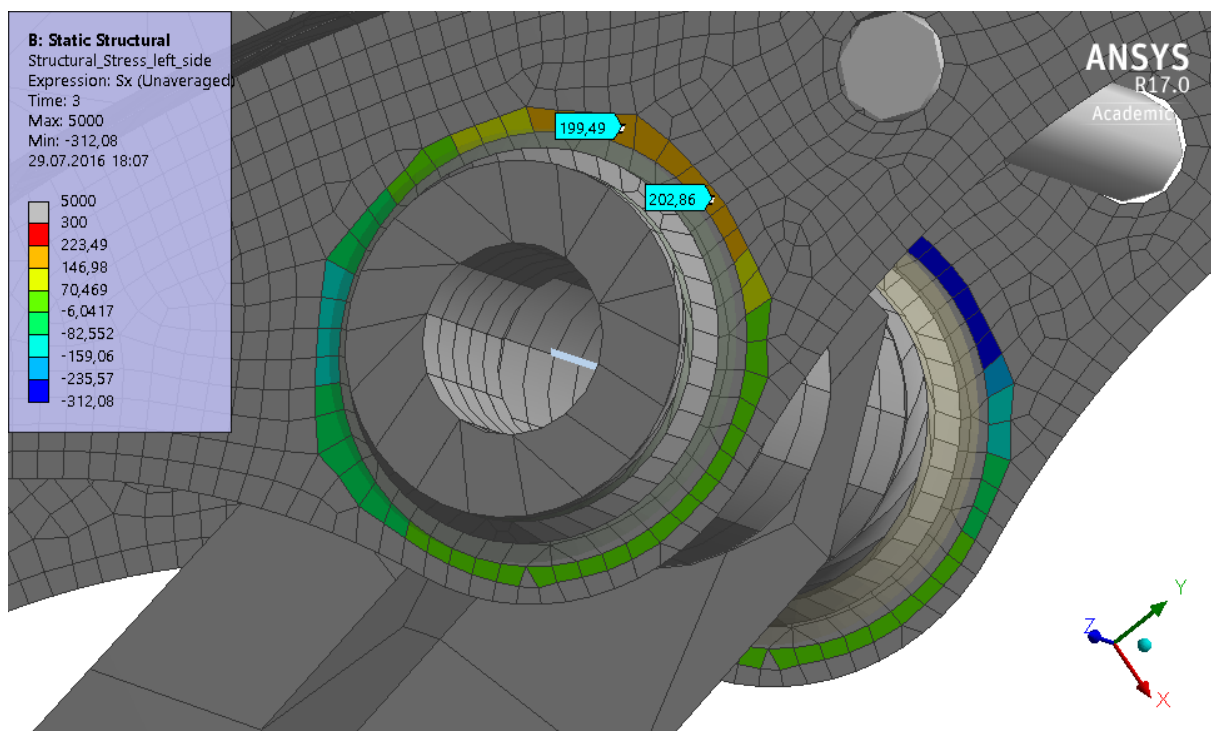
N_i je počet cyklů do porušení na dané zátěžné hladině,

p je počet zatěžovacích sekvencí.

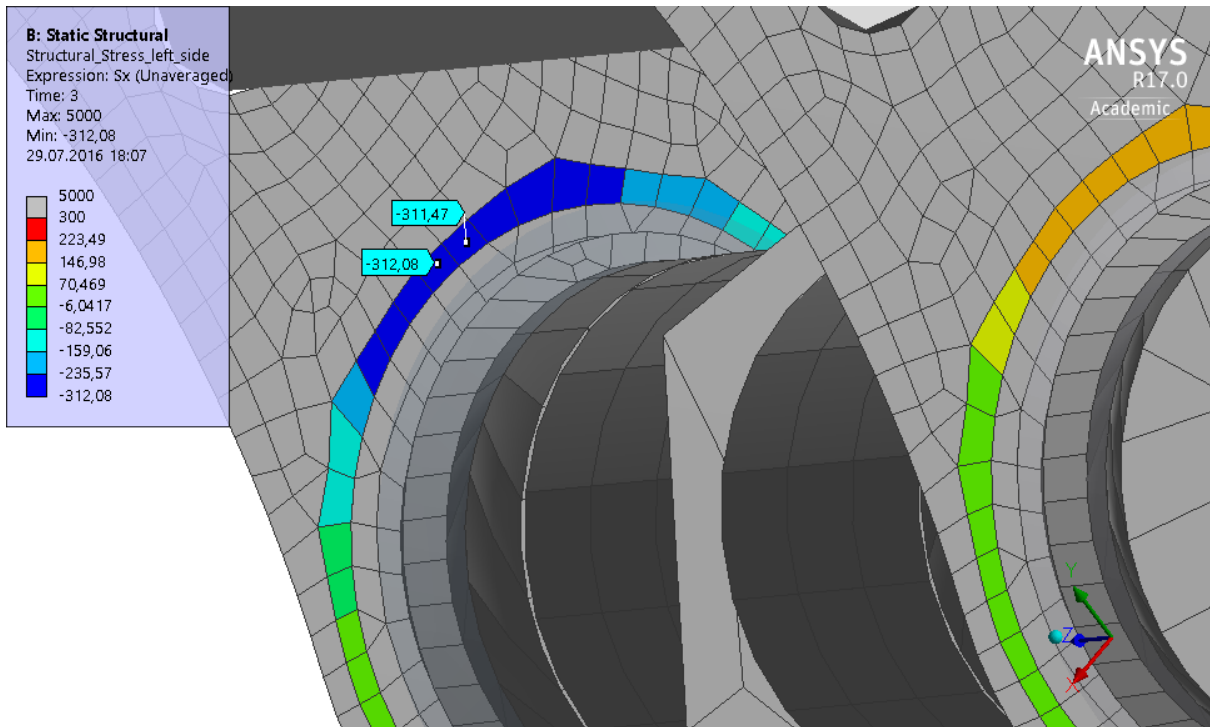
Životnost jako počet opakování zátěžných bloků do porušení byla predikována převrácením hodnoty nakumulovaného poškození po proběhnutí jednoho zatěžovacího bloku.



Obr. 58 Příklad zobrazení uzlových posunutí a nastavení vazbových rovnic mezi tělesy

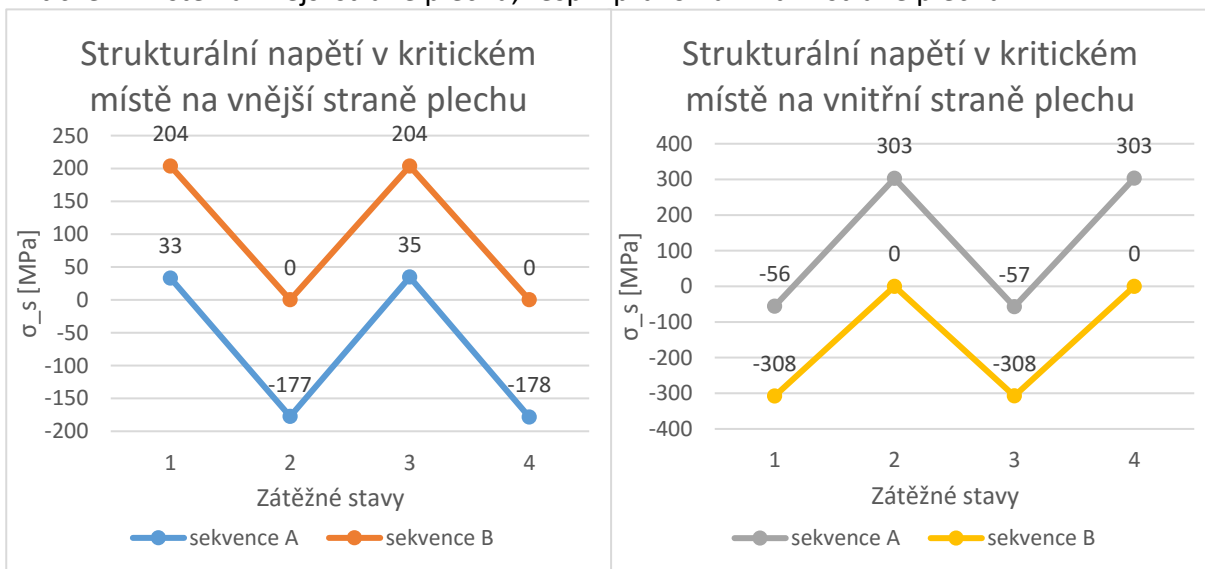


Obr. 59 Detail geometrie svaru se zobrazenými kritickými místy na vnější straně plechu



Obr. 60 Detail geometrie svaru se zobrazenými kritickými místy na vnitřní straně plechu

Efektivní tloušťka modelovaného svaru byla 5 mm. Délka nohy svaru vycházela 7,07 mm. Velikost pinball oblasti byla nastavena nejprve na 3,82 mm, což odpovídá 0,54 násobku délky nohy svaru. Pro nastavení s 2,83mm VPO (tj. 0,4 násobku délky nohy svaru) vycházely hodnoty rozkmitů napětí jen o 1 % méně, takže jsou obě nastavení ekvivalentní a bude vyhodnoceno pouze nastavení s VPO 3,82 mm. Na vyhodnocovaném skořepinovém tělese byly vytvořeny prvky o velikosti 5 mm, protože pro menší prvky se vypočítané strukturální napětí téměř neměnilo a menší prvky by prodlužovaly výpočetní čas. Pro každý zatěžovací stav bylo vypočteno a zaznamenáno strukturální napětí na kritickém prvku po obou stranách plechu. Pro nastavené zatěžné stavy jsou na obr. 61 vlevo zobrazeny hodnoty strukturálních napětí v kritickém místě na vnější straně plechu, resp. vpravo na vnitřní straně plechu.



Obr. 61 Průběh strukturálního napětí v kritickém místě

Metodou stékání deště byl dekomponován průběh napětí a určen rozkmit napětí mezi zátěžnými stavy. Rozdíl v rozkmitech napětí je pro jednotlivé dekomponované cykly u všech zátěžných sekvencí a kritických míst zanedbatelný. Rozkmit napětí jsou pro nejvíce kritické místo uvedeny v tab. 17. Jedna sekvence se skládá z šesti cyklů.

sekvence	$\Delta\sigma_s$ [MPa] na vnější straně plechu	$\Delta\sigma_s$ [MPa] na vnitřní straně plechu
1	212	360
2	204	308

Tab. 17 Výsledné hodnoty průměrných rozkmitů napětí

Pro tyto hodnoty rozkmitů byl predikován celkový počet cyklů N do porušení vzhledem k únavové křivce FAT90 (97,7 %) (tab. 18).

sekvence	N [cyklů] na vnější straně plechu	N [cyklů] na vnitřní straně plechu
1	153 022	31 250
2	171 740	49 901

Tab. 18 Celkový počet cyklů do porušení vzhledem k FAT90 (97,7 %)

Dále byla predikována kumulace poškození D_s po proběhnutí jedné sekvence. Výsledné hodnoty kumulace poškození po proběhnutí jedné sekvence byly vyhodnoceny pomocí Palmgren – Minerova vztahu a jsou uvedeny v tab. 19.

sekvence	D_s [-] na vnější straně plechu	D_s [-] na vnitřní straně plechu
1	$3,91 \cdot 10^{-5}$	$1,91 \cdot 10^{-4}$
2	$3,47 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$

Tab. 19 Výsledné hodnoty kumulace poškození po proběhnutí jedné sekvence

Jeden zatěžovací blok se skládal z 9 sekvencí 1 a z 11 sekvencí 2. Výsledná celková kumulace poškození pro tento zatěžovací blok je popsána v tab. 20.

D [-] na vnější straně plechu	D [-] na vnitřní straně plechu
$7,3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$

Tab. 20 Výsledná kumulace poškození pro jeden celý zatěžovací blok

Výsledný počet opakování zatěžovacích bloků do porušení se určí převrácením hodnoty D . Výsledky jsou zobrazeny v tab. 21.

n [cyklů] na vnější straně plechu	n [cyklů] na vnitřní straně plechu
1 364	329

Tab. 21 Výsledný počet opakování zátěžného bloku do porušení

Na rozsáhlém svařovaném konstrukčním prvku byla predikována životnost metodou strukturálních napětí. Zatěžování probíhalo více zátěžnými stavy a více zatěžovacími sekvencemi, které dohromady vytvořily jeden zatěžovací blok. Na kritickém svarovém spoji byly vyhodnocena dvě kritická místa. Obě místa se na modelu nacházela na stejném skořepinovém prvku. Jedno místo bylo z vnější strany plechu, druhé z vnitřní strany plechu. Životnost byla vyhodnocována pro únavovou křivku FAT90 (50 % - 132). Z predikce vyšlo, že náchylnější na vznik porušení je místo na vnitřní straně plechu. Pro toto místo je predikovaná životnost 329 opakování zátěžných bloků. To znamená 2 961 opakování sekvence 1 a 3 619 opakování sekvence 2, což je celkově 39 480 cyklů. Výsledná životnost je v dobré korelaci s experimentálním měřením.

8. Závěr

V teoretické části této práce byly stručně popsány různé metody predikce životnosti svarových spojů. Cílem bylo vybrat a podrobněji popsat metodu vhodnou pro použití na rozsáhlých svařovaných konstrukcích. Rozsáhlé svařované konstrukce jsou často modelovány skořepinovými prvky. Pro tyto konstrukce byla jako vhodná metoda vybrána metoda strukturálních napětí. Tato metoda funguje na principu linearizování napětí skrz tloušťku plechu nebo těla svaru. Napětí se určuje z uzlových sil v patě nebo v kořenu svaru. V různých variacích je tato metoda používána v technické praxi. Jeden z nejpropracovanějších způsobů použití této metody vyvinula firma Lohr. Jejich metoda se nazývá „Seam Sim“. Součástí této metody je automatická tvorba geometrie těla svaru, kontaktního spojení mezi prvky těla svaru a prvky svařovaných plechů a určení strukturálního napětí, ze kterého se predikuje životnost.

Pro praktickou část této práce byl používán Ansys výpočetní software. V něm byl pomocí Ansys Parametric Design Language vytvořen postup pro automatické vytvoření svarového spojení a vypočtení strukturálního napětí. Byla provedena citlivostní studie nastavení MKP modelu. Pro ni byl vytvořen výpočetní model, který vycházel z experimentálního vzorku. Pro vyhodnocení tuhosti skořepinového modelu s vytvářeným svarovým spojením byly porovnány uzlové posuny na skořepinovém modelu s referenčním objemovým modelem. Uzlové posuny se lišily maximálně o 1,7 %, takže nahrazení svaru pomocí kontaktního spojení odpovídá svojí tuhostí referenčnímu objemovému modelu. V citlivostní studii byly vyhodnocovány vlivy geometrie, velikosti pinball oblasti a diskretizace na výsledné strukturální napětí. Z vyhodnocení vlivu kvality sítě se došlo k závěru, že nekvalitní síť může ovlivnit určení kritického místa. Z vyhodnocení vlivu nesymetrické sítě byl vyvozen závěr, že nesymetrická síť lokálně mění distribuci silového zatížení na čele svaru a může ovlivnit vypočtené strukturální napětí. Z globálního pohledu se distribuce zatížení nemění a v součtu obě strany čela svaru přenášejí stejné zatížení. Z vyhodnocení vlivu globální velikosti sítě bylo zjištěno, že zhušťující se síť ovlivňuje čas výpočetní fáze a k ní proporcionálně také čas preprocesorové a postprocesorové fáze, ve kterých probíhají makra na tvorbu svarového spojení, resp. na výpočet strukturálního napětí. Výpočetní čas postprocesorové fáze je obecně delší než čas ostatních fází. Optimalizováním maker by mělo být možné snížit celkový výpočetní čas. Globální velikost sítě ovlivňuje vypočtené strukturální napětí více než vliv nesymetrické sítě. Pro všechny vyhodnocované geometrie a velikosti pinball oblasti lze obecně říci, že napětí se s zmenšujícími se prvky na čele svaru zvyšuje. Toto zvyšování konverguje k určité hodnotě. Nastavení sítě se 3 a více prvky na čele svaru vykazuje stabilní výsledky. Výsledné strukturální napětí pro modely s hrubší sítí vychází obecně menší. To je pravděpodobně částečně způsobeno průměrováním napětí a částečně jinou distribucí silového zatížení. Od ostatních výsledků se velice liší model s ostrými rohy a nejhrubší sítí. Tento jediný model není konzervativní vzhledem k doporučené únavové křivce FAT90 (50 % - 132). Zjištění, proč tato odlišnost nastává, může být námětem další práce. Pro modely s ostrými a oblými rohy na čele svaru a s 2,4mm VPO vychází strukturální napětí větší než pro modely s 3,24mm VPO. To je pravděpodobně způsobeno tím, že model s 3,24mm VPO více prováže kontaktní plochu a proto se více zatížení přenáší přes ostatní části svaru. Pro model se zaobleným čelem svaru je výsledné strukturální napětí invariantní vůči velikosti pinball oblasti. Je možné, že toto je obecná vlastnost této geometrie. Potvrzení této obecnosti může být námětem další práce. Pro model s ostrou geometrií a více než 3 prvky na čele svaru vycházejí napětí vyšší než pro zbylé geometrie. To může být způsobeno menší kontaktní plochou po stranách čela svaru, která přenese menší zatížení.

Dále byly porovnány modely s pravidelnější a kvalitnější sítí s modely s nepravidelnější a nekvalitnější sítí. Pro modely s oblými rohy jsou menší rozdíly ve výsledcích než pro modely s ostrými rohy. Až na modely s největšími a nejmenšími prvky na čele svaru jsou rozdíly invariantní na pravidelnosti a kvalitě sítě. To je pravděpodobně způsobeno velkými rozdíly v síti mezi modely s pravidelnější a nepravidelnější sítí.

Pro stejný typ svaru jaký byl použit v citlivostní analýze, se pro praxi jako nejvhodnější jeví použití geometrie se oblými rohy nebo zaobleným čelem. Tyto geometrie vykazují výsledky méně závislé na nastavení sítě. V případě řádné kontroly sítě lze použít i geometrii s ostrými rohy. Pro modely s ostrými a oblými rohy je vhodnější použít menší velikost pinball oblasti. Pro svary se zaoblením (bez rohů a hran), které byly například použity pro predikci životnosti na konstrukci ramene, lze na základě výsledků z predikce vycházet ze stejných závěrů jako pro model se zaobleným čelem svaru, protože velikost pinball oblasti neměla na výsledky vliv a vliv velikosti prvků v kritickém místě byl velmi malý.

Následně byla na základě únavového experimentu provedeného ve firmě Doosan Bobcat Engineering s.r.o. predikována životnost rozsáhlé svařované konstrukce pomocí metody strukturálních napětí. Experiment byl proveden na konstrukci ramene stavebního stroje Doosan Bobcat Engineering s.r.o.. Na základě experimentu byl identifikován kritický svar konstrukce. Zatěžování při experimentu probíhalo cyklicky opakujícími se zatěžovacími bloky. Z dekompozice vypočítaného průběhu rozkmitu napětí v kritickém místě svaru bylo predikováno kumulované poškození Palmgren – Minerovou metodou. Z kumulovaného poškození byla predikována životnost. Určení kritického místa a výsledná predikce životnosti je v dobré shodě s experimentálními výsledky.

9. Literatura

- [1] KLEIN, Patrice; TURLIER, Didier; OBER, Jacques. FEA Structural Stress of Modalohr System for Semi-trailer Rail Transportation: Weld Root Fatigue Focus. *Procedia Engineering*, 2013, 66: 79-87.
- [2] AYGÜL, Mustafa. Fatigue analysis of welded structures using the finite element method. 2012.
- [3] SONSINO, Cetin Morris. A consideration of allowable equivalent stresses for fatigue design of welded joints according to the notch stress concept with the reference radii $r_{ref}=1.00$ and 0.05 mm. *Welding in the World*, 2009, 53.3-4: R64-R75.
- [4] TURLIER, Didier; KLEIN, Patrice; BÉRARD, Florent. FEA shell element model for enhanced structural stress analysis of seam welds. *Welding in the World*, 2014, 58.4: 511-528.
- [5] HOBACHER, A. F. The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components—A comprehensive code recently updated. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31.1: 50-58.
- [6] FRICKE, Wolfgang; KAHL, Adrian; PAETZOLD, Hans. Fatigue assessment of root cracking of fillet welds subject to throat bending using the structural stress approach. *Welding in the World*, 2006, 50.7-8: 64-74.
- [7] FRICKE, Wolfgang. IIW guideline for the assessment of weld root fatigue. *Welding in the World*, 2013, 57.6: 753-791.
- [8] ANSYS nCode Manual - Designlife Theory Guide. 2012.
- [9] JURENKA, Josef. Přístupy predikce únavové životnosti svařovaných konstrukcí [online]. 2015. < http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/DPZ_welds_web.pdf >
- [10] DONG, Pingsha. The Mesh-Insensitive Structural Stress and Master S-N Curve Method for Ship Structures [online]. 2004. <<http://www.fpsforum.com/archive/HoustonOmae2004/Session%203a-Dong.pdf> >
- [11] MADDOX, Stephen J.; DORÉ, Mr MJ; SMITH, Simon D. A case study of the use of ultrasonic peening for upgrading a welded steel structure. *Welding in the World*, 2011, 55.9-10: 56-67.
- [12] DONG, Pingsha. VERITY WELD FATIGUE METHOD IN FE-SAFE USING FEA Software [online]. <www.safetechnology.com/downloads.asp?fid=35463> <http://altairatc.com/europe/Presentations_2010/Session_07/Magna_Werkhausen/EHTC_Paris.pdf>
- [13] HOBACHER, Adolf, et al. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. Paris: Welding Research Council, 2008.
- [14] ZHANG, Shicheng, et al. Fatigue Assessment of Welded Structures Based on Nodal Forces [online]. 2007. <http://www.femfat.com/?eID=szdwld&file=Do_08_Zhang_DC.pdf&i=2276 >
- [15] RŮŽIČKA, Milan; HANKE, Miroslav; ROST, Milan. *Dynamická pevnost a životnost*. ČVUT, 1987
- [16] DONG, Pingsha. The Structural Stress Method for the Fatigue Analysis of Welded Structures [online]. 2010. <http://www.utmis.org/en/interest/documents/3b_john_draper_the_structural_stress_method_for_the_fatigue_analysis_of_welded_structures_utmis_2.pdf>

- [17] SELVAKUMAR, P.; HONG, J. K. Robust mesh insensitive structural stress method for fatigue analysis of welded structures. *Procedia Engineering*, 2013, 55: 374-379.
- [18] BRTNÍK, Tomáš; MIKA, Ivan; DOLEJŠ, Jakub. Zvyšování únavové životnosti svarů vysokopevnostních ocelí metodou HFMI [online]. 2016.
<<http://www.konstrukce.cz/clanek/zvysovani-unavove-zivotnosti-svaru-vysokopevnostnich-oceli-metodou-hfmi/>>
- [19] HABENBACHER, Johann; HOFWIMMER, Klaus. Efficient Modeling and Evaluation of Welding Seams [online]. 2010.