



**FAKULTA
ŠTROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Analýza únavové životnosti tenkostěnných
svařovaných trubek**

**Fatigue life analysis of thin-walled welded
tubes**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2023

Bc. Roman SADÍLEK

Studijní program: (NDTT) Dopravní a transportní technika

Studijní obor: (N071TTTE) Transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Martin Machač



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sadilek** Jméno: **Roman** Osobní číslo: **475419**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a části strojů**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza únavové životnosti tenkostěnných svařovaných trubek

Název diplomové práce anglicky:

Fatigue life analysis of thin-walled welded tubes

Pokyny pro vypracování:

Cílem diplomové práce bude provést experimentální měření vzorků (svařenců z tenkostěnných trubek) v laboratorních podmínkách a následně vyhodnocení experimentálních dat.

Jednotlivé dílčí úkoly pro diplomovou práci:

- Provést rešerši na přístupy vyhodnocení životnosti tenkostěnných svařovaných konstrukcí
- Provedení experimentálních měření
- Vyhodnocení experimentálních dat
- Vyhodnocení životnosti dle vybrané metody přístupu vyhodnocení životnosti
- Porovnání s experimentálními daty

Seznam doporučené literatury:

Růžička, M., Hanke, M., Rost, M. Dynamická pevnost a životnost. ČVUT, 1987.
Hobbacher A, The IIW recommendations for fatigue design of welded joints and components, The International Institute of Welding, IIV-1823-07 ex XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07 (2008).
Xiao-Ling Zhao, Packer, J.A. and International Institute Of Welding (2000). Fatigue design procedure for welded hollow section joints : IIW Document XIII-1804-99 and IIW Document XV-1035-99 : recommendations of IIW Subcommittee XV-E. Cambridge, England: Abington Publishing.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Martin Machač ústav konstruování a části strojů FS

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **11.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce:

Ing. Martin Machač
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. František Čopot, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) konzultace

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použitých literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

28.4.2023

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 21.6.2023

.....

Bc. Roman Sadílek

Poděkování

Na prvním místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Martinovi Macháčovi, za trpělivost, odborné rady, a především za vedení k cíli. Dále bych chtěl poděkovat za umožnění, zabývat se tímto tématem závěrečné práce, Ing. Janovi Papugovi, Ph.D.. Také bych rád poděkoval Ing. Martinovi Nesládkovi, Ph.D. a Ing. Martinovi Matušů, za jejich ochotu vykonávat odborný dozor při testování v laboratorních prostorách a za jejich poznatky a odborné rady.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Roman Sadílek
Název DP:	Analýza únavové životnosti tenkostěnných svařovaných trubek
Anglický název:	Fatigue life analysis of thin-walled welded tubes
Rok:	2023
Studijní program:	(NDTT) Dopravní a transportní technika
Obor Studia:	(N071TTTE) Transportní technika
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí DP:	Ing. Martin Machač
Bibliografické údaje:	počet stran 109 počet obrázků 96 počet tabulek 35 počet příloh 1
Klíčová slova:	svary, svařované konstrukce, cyklické zatěžování, životnost, tenkostěnné konstrukce, experimentální měření, experimentální data, vzorek, napětí, počty cyklů
Key words:	welds, welded structures, cyclic loading, service life, thin-walled structures, experimental measurements, experimental data, specimen, stresses, cycle counts
Anotace:	Svary jsou velmi často využívané konstrukční prvky. U cyklicky zatěžovaných konstrukcí dochází často k porušení v oblasti svaru. Úkolem bude provést rešerši na téma vyhodnocení životnosti tenkostěnných konstrukcí. Cílem této práce pak bude provést experimentální měření vzorků v laboratorních podmínkách a následně vyhodnocení experimentálních dat.
Abstrakt:	Welds are very frequently used structural elements. In cyclically loaded structures, failure often occurs in the weld area. The task will be to carry out a research on the evaluation of the service life of thin-walled structures. The aim of this work will then be to perform experimental measurements of the specimens under laboratory conditions and subsequent evaluation of the experimental data.

1. Obsah

1.	Představení motivace.....	1
2.	Únava materiálu	2
2.1.	Historie.....	2
2.2.	Dělení únavy	4
2.3.	Únavová životnost svařovaných komponent	4
2.4.	Doporučení a metodika	5
3.	Vzorky pro testování	7
4.	Svarové spoje	8
4.1.	Historie.....	8
4.2.	Způsoby svařování	10
4.2.1.	Tavné svařování	10
4.2.2.	Tlakové svařování	12
4.2.3.	Tlakové svařování za studena.....	13
4.3.	Typy svarů	13
4.3.1.	Pevnostní výpočet svarových spojů dle ČSN.....	14
4.3.1.1.	Tupý svar na tah	14
4.3.1.2.	Tupý svar na smyk	15
4.3.1.3.	Tupý svar na ohyb	15
4.3.1.4.	Koutový svar	16
4.3.2.	Návrh svarových spojů se statickým zatížením	18
4.3.2.1.	Návrh hodnoty pevnosti dle normy BSK 07	18
4.3.2.2.	Návrh hodnoty pevnosti dle normy Eurocode 3.....	21
4.4.	Značení svarů	24
5.	Metody pro hodnocení životnosti.....	26
5.1.	Metoda nominálních napětí	26
5.1.1.	Výpočet nominálních napětí.....	26
5.2.	Metoda strukturálních hot spot napětí	27
5.2.1.	Výpočet strukturálních hot spot napětí.....	29
5.3.	Metoda efektivního vrubového napětí	30
5.4.	Vliv tloušťky stěny	30
5.5.	Vliv středního napětí.....	32

6.	Laboratorní testování.....	34
6.1.	Laboratorní vybavení	34
6.2.	Testované vzorky	38
6.3.	Průběh testování.....	42
6.4.	Data získaná z testování.....	50
7.	Analýza výpočetní metody.....	58
7.1.	Metoda nominálních napětí	58
7.1.1.	Vyhodnocení metody nominálních napětí.....	60
7.2.	Metoda strukturálních hot spot napětí	62
7.2.1.	Příprava pro analýzu MKP	62
7.2.2.	Výsledky analýzy MKP.....	66
7.2.3.	Vyhodnocení metody strukturálních hot spot napětí.....	70
7.3.	Metoda efektivního vrubového napětí	72
7.3.1.	Příprava pro analýzu MKP	72
7.3.2.	Výsledky analýzy MKP.....	77
7.3.3.	Vyhodnocení metody efektivního vrubového napětí	82
8.	Závěr.....	86
	Použitá literatura	89
	Seznam zkratk	91
	Seznam obrázků	93
	Seznam tabulek	96

1. Představení motivace

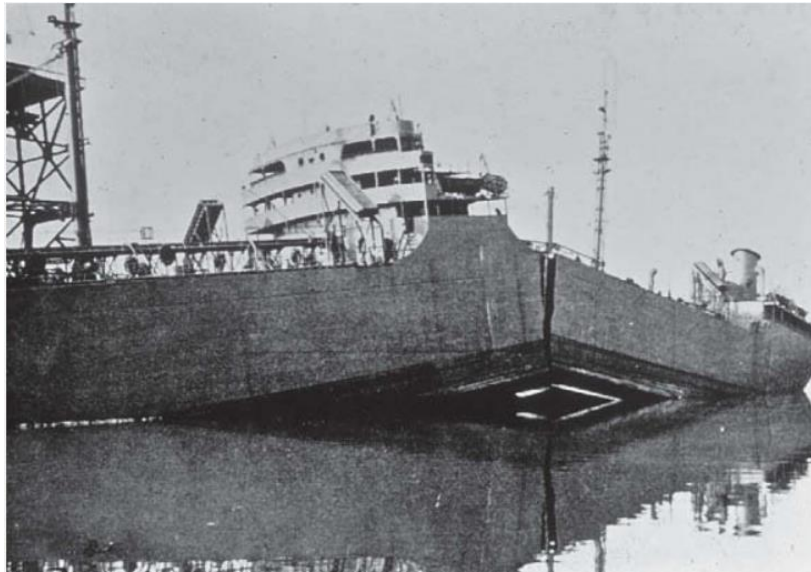
Na úvod mé diplomové práce bych rád uvedl několik bodů, díky kterým jsem si vybral dané téma. Jedním z důvodů je možnost se zapojit do výzkumného projektu, který navazuje na další práce, které jsou mému tématu práce nadřazené a díky tomu se mohu, jako student, podílet na testování vzorků a následné práci při jejich zpracování. A především získat znalosti z širší problematiky, ke které se během vyučování studenti nedostanou. Téma práce Analýza únavové životnosti mi nebyla cizí, jelikož jsem během magisterského studia absolvoval předmět Dynamická pevnost a životnost. Tento předmět se zabýval také tématem únavové životnosti, a tudíž mě dané téma zaujalo natolik, že jsem si pro mojí závěrečnou práci vybral právě toto téma.

Dalším podnětem volby mé závěrečné práce bylo zjištění, že pro tenkostěnné materiály, konkrétně pro trubkové spoje, které jsou spojovány svarovými spoji, jsou doposud zpracované metodiky výpočtu a vyhodnocení, pro únavovou životnost trubkových spojů, příliš konzervativní a vedou na příliš předimenzované konstrukce. Pro svařené trubkové konstrukce o tloušťce trubkové stěny více než 4 až 5 milimetrů, existuje velké množství experimentálních dat, na kterých je možné dosud známé výpočetní metody validovat. Výpočetní metody na odhad únavové životnosti je však obtížné validovat pro trubkové svařence s tloušťkou trubkové stěny menší než 4 milimetry z důvodu absence volně dostupných experimentálních dat. Tím vzniká potřeba laboratorního testování svařenců s tloušťkou stěny menší než 4 milimetry a jejich vyhodnocení pomocí dosud známých výpočetních metod na odhad únavové životnosti. Z těchto důvodů se v této práci budu věnovat testování trubkového svařence s tloušťkou stěny 1,5 milimetru.

Dalším tématem je udržitelnost a s ní spojená spotřeba pohonných hmot, kterou přímo ovlivňuje hmotnost dopravního prostředku. Z těchto důvodů by má práce mohla mít potenciál při tvorbě odlehčené konstrukce, jako je například motorové lože letounu L 410, odkud testovaný vzorek v této práci pochází. Výstupem mé práce bude ověření výpočetních metod na odhad únavového života trubkového svařence, kdy mé výpočty poskytnou konstruktérům zpětnou vazbu o spolehlivosti a přesnosti dosud známých výpočetních metod, při použití na tenkostěnných svařencích.

2. Únava materiálu

Ve vědě o materiálech je únava definována jako iniciace a šíření trhliny v materiálu, vlivem cyklického zatěžování. V okamžiku, kdy únavová trhlina roste vlivem zatěžovacích cyklů, dochází k vytváření rýhy. Nárůst trhliny trvá až do stavu, kdy dochází k nabytí kritické velikosti. K tomuto stavu dojde poté, co faktor intenzity napětí trhliny K překročí lomovou houževnatost materiálu a dojde k rychlému šíření a narušení struktury. Jako úkaz únavového selhání materiálu je Liberty ship Cargo (Obrázek 1). [1]



Obrázek 1 Liberty ship Cargo [13]

2.1. Historie

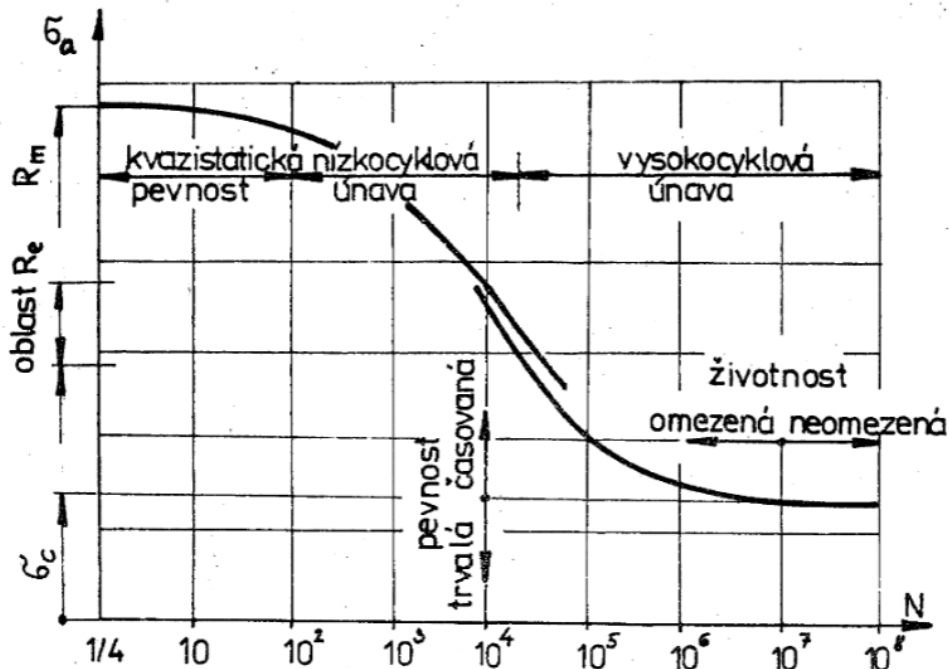
Z historického hlediska se o tématu únavy materiálu, pojednávalo již v dobách, kdy se jako nejčastější dopravní prostředky využívaly lodě. Poruchy na stěžních a plachtách lodí, které cestovaly na dlouhé vzdálenosti, se označují jako jevy únavy. Ovšem, výraznější nárůst pozornosti se pojmu únava dostalo s příchodem průmyslové revoluce. Dříve problém únavy neměl velký význam, jelikož dříve využívané dopravní nebo pracovní prostředky, byly poháněny ručně, nebo zvířaty. Hlavní historické popisy únavy byly zmíněny německými, anglickými a americkými inženýry a vědci. [1]

První významnější zmínka byla v roce 1830, W. Albertem, v dolech Oberharz. V roce 1937 byly zveřejněny první výsledky únavových zkoušek, které byly realizovány zkušebním strojem pro dopravní řetězky, které selhaly v provozu. Z důvodu vysokých nákladových cen, těchto konstrukčních prvků, W. Albert vynalezl ocelové lano. Čím více se rozvíjely kovové materiály a jejich aplikace na mostech a železnicích, tím více se únavové trhliny začaly jevit jako velmi důležité, a to především kvůli stávajícím se nehodám.

Jednou z významných nehod, díky které byl proveden výzkum, byla nehoda ve Francii, poblíž Versailles. Tato nehoda si vyžádala 60 lidských životů a stalo se tak v roce 1842. V této souvislosti byli navrženi vědci a výzkumníci, kteří se měli zabývat a studovat únavu v mostech a železničních zařízeních. [1]

Mezi významné výzkumy, které se uskutečnily v letech 1850 a 1860, patřil výzkum A. Wöhlera. A. Wöhler byl německý inženýr, který prováděl průzkumy os náprav železničních vozů. Zkoušky byly prováděny při opakovaném namáhání ohybem, krutem a axiálním zatížením. Wöhler své výsledky prezentoval ve formě buněk. L. Spangenberg vykreslil výsledky Wöhlera jako formy křivek, ve formě lineární úsečky a pořadnice, čímž získal křivky S-N (Stress-Number of cycles). S-N křivky byly od roku 1936 nazývány jako Wöhlerovy křivky. [2]

Dalším významný průzkum v roce 1842, který proslavil W. J. M. Rankine, byl v oblasti koncentrace napětí. Studie vykazovaly, že únavová životnost rostla s klesajícím polem napětí, takže pod určitým množstvím složky napětí se zdálo, že má nekonečnou životnost. Také zjistil, že únavová životnost byla výrazně snížena vlivem přítomnosti vrubů. V roce 1910 představil O. H. Basquin, Basquinův matematický popis šikmé větve Wöhlerovi křivky. [2]



Obrázek 2 Wöhlerova křivka – členění oblastí únavy [3]

2.2. Dělení únavy

Základní členění únavy se dělí na vysokocyklovou únavu a nízkocyklovou únavu viz. (Obrázek 2). Rozsah nízkocyklové únavy je v rozmezí $10^3 - 10^4$ cyklů a vyznačuje se výraznou plasticitou a růstem trhlin. Vysokocyklová únavu představuje rozsah $10^6 - 10^7$ cyklů. U tohoto typu únavy se jeví jako charakteristické nízké a elastické napětí. V obou případech únavy je stejný princip vzniku a šíření trhliny. Nejprve dochází k iniciaci trhliny, dále k růstu trhliny ve fázích I a II, a nakonec ke konečnému selhání. K zahájení tohoto procesu musí praskliny v materiálu nukleovat. Tento proces se může vyskytovat buď na vzestupech napětí, nebo v oblastech s vysokou pórovitostí. Trhliny se šíří nejprve pomalu a až dosáhnou kritické velikosti, začnou se šířit vyšší rychlostí. Tyto praskliny mohou vést k selhání materiálu. [4]

Únava je obvykle spojena s tahovým napětím, ale vyskytoval se případ, kdy vznikla trhlina v důsledku tlakového zatížení. Únavová životnost nesvařovaných dílů je ovlivněna řadou faktorů, jako je teplota, povrchová úprava, mikrostruktura, přítomnost chemikálií, zbytková napětí, nebo poškození povrchu materiálu. [4]

2.3. Únavová životnost svařovaných komponent

Ve svařované konstrukci namáhané cyklicky dochází výhradně k porušení v oblasti svaru. Svary jsou velmi náchylné na únavu, jelikož od výroby obsahují vruby. Také ve svarech zůstávají velká zbytková napětí a vlivem koncentrace napětí dochází k iniciaci trhliny. Predikci únavové životnosti lze provést několika způsoby, kterými se budu zabývat v dalších kapitolách mé práce. Výstupem z těchto napěťových metod je velikost rozkmitu amplitudy napětí, která se porovnává s S-N únavovou křivkou. [4]

FAT únavová S-N křivka se využívá k popisu životnosti svarového spojení. Popisuje životnost, jako závislost počtu cyklů do porušení na rozkmitu amplitudy napětí. Pro malé testovací vzorky se jako přerušení uvažuje, kompletní roztržení vzorku. U velkých komponentů nazýváme porušením stav, kdy je pozorován průchod trhliny skrze celou tloušťku materiálu. Křivky FAT se liší v únavových třídách značených jako FATXX. XX představuje hodnotu rozkmitu amplitudy napětí, pro kterou je 97,7% pravděpodobnost přežití svaru při $2 \cdot 10^6$ cyklech. FAT křivka vzniká vyhodnocením únavových experimentů cyklicky zatěžovaných svařovaných vzorků. Šikmá část únavové křivky je definována vztahem $\Delta\sigma^m \cdot N = C$, kde $\Delta\sigma$ je rozkmit amplitudy napětí, N je počet cyklů do porušení a m a C jsou konstanty. U svarů, pro tenkostěnné materiály je při normálovém namáhání konstanta $m = 5$ a při smykovém namáhání $m = 7$. Pro silnostěnné materiály, při normálovém namáhání je $m = 3$ a při smykovém namáhání $m = 5$. Konstantu C lze dopočítat statickým vyhodnocením experimentálních dat. [4]

Trhlina může vzniknout buď v kořeni, nebo v patě svaru. Tyto dvě lokality už od výroby představují místo s vrubem, a tudíž koncentraci napětí. Místo vzniku trhliny ovlivní především poměr mezi tloušťkou těla svaru a a tloušťkou plechu t . Vlivem zvětšování poměru $\frac{a}{t}$ se zvyšuje pravděpodobnost vytvoření trhliny v patě svaru. Také závisí na typu zatěžování, tvaru svaru, zbytkových napětí. Rozdíl mezi trhlinou v patě svaru a v kořeni svaru je takový, že při vzniku trhliny v patě svaru lze porušení vidět vizuálně i ve stavu, kdy svařená součást není více porušena. Trhlinu v kořeni svaru lze vidět pouze v situaci, kdy dojde k celkovému porušení svaru, a tedy oddělení svařených dílů. Trhliny v kořenu svaru vidět nejsou. Tudíž jsou trhliny v kořeni považovány za nebezpečnější. [4]

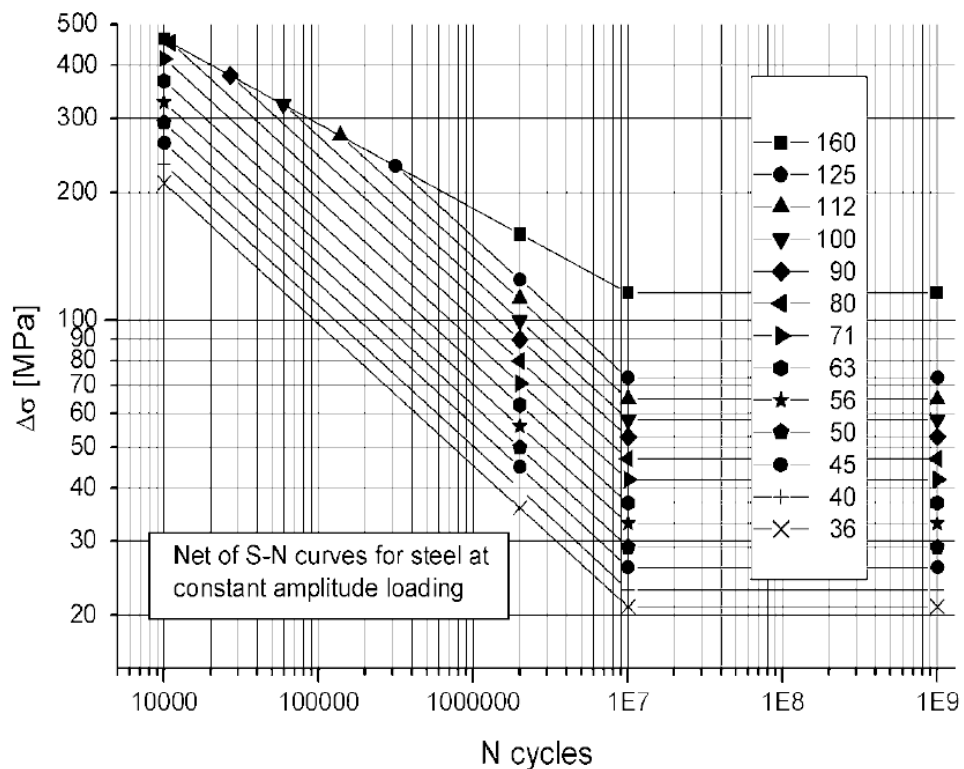
2.4. Doporučení a metodika

Pro lepší možnosti návrhu konstrukce se svařovanými součástmi byly vytvořeny dokumenty, které slouží jako základy pro návrh a analýzu svařovaných součástí zatížených kolísavými silami, aby se zabránilo porušení únavou. Jedním z dokumentů je IIW (International Institute of Welding) [5]. Dalšími dokumenty, které se zabývají svařováním a únavu jsou Design Guide for Cirkular and Rectangular Hollow Section Welded Joints Under Fatigue Loading [20], Fatigue Design Procedur for Welded Hollow Section Joints [19], nebo Introduction to Metal Fatigue [21]. [5]

Výše zmíněné dokumenty obsahují různé postupy posouzení, z nichž výběr závisí na počátečních informacích o svarovém spoji a použitém zatížení. Také jsou v dokumentech uvedeny údaje o únavovém působení a údaje o odolnosti proti únavě. Mimo jiné, v dokumentu od IIW [5], jsou pro jednotlivé profily o různých tloušťkách stěn, předdefinovány hodnoty FAT křivek, které byly zjištěny experimentálně a v průběhu let zaznamenávány viz. (Obrázek 3). V dnešní době můžeme dohledat ideální hodnoty FAT křivky, pro různé konstrukční detaily. FAT křivky pro výchozí tloušťky stěn 25 milimetrů nebo 16 milimetrů, se volí podle závislosti na typu zdroje. Pro doporučení IIW [5], je výchozí tloušťka 25 milimetrů. Výchozí tloušťka 16 milimetrů náleží eurokódu 3 [22]. Pro výpočet adekvátní hodnoty FAT křivky jsou použity korekční součinitele, u nichž je vždy uvedeno, pro kterou určitou tloušťku jsou součinitele použitelné. Rozmezí tlouštěk stěn je od 4 milimetrů až do 50 milimetrů. U tlouštěk stěn menších 4 milimetry již nedochází k nárůstu předpokládaných počtu cyklů, jelikož dochází k zesílení vlivu vad ve svarech, které začínají převládat nad samotnou geometrií svaru. Z obavy nalezení poruchy ve svaru, není doporučeno používat korekční součinitel, pro tloušťky menší 4 milimetry. Z těchto důvodů zatím nelze získat adekvátní hodnoty FAT křivky (Obrázek 4), pro tloušťky menší 4 milimetry. Zde bude navazovat má diplomová práce, kde se budu zabývat vyhodnocením a získáním ideálních hodnot FAT křivky, pro profily pohybující se okolo tloušťky 1,5 milimetrů. [5]

No.	Structural Detail	Description (St.= steel; Al.= aluminium)	FAT St.	FAT Al.
422		Splice of circular hollow section with intermediate plate, single-sided butt weld, potential failure from toe wall thickness > 8 mm wall thickness < 8 mm	56 50	22 20
423		Splice of circular hollow section with intermediate plate, fillet weld, potential failure from root. Analysis based on stress in weld throat. wall thickness > 8 mm wall thickness < 8 mm	45 40	16 14
424		Splice of rectangular hollow section, single-sided butt weld, potential failure from toe wall thickness > 8 mm wall thickness < 8 mm	50 45	20 18
425		Splice of rectangular hollow section with intermediate plate, fillet welds, potential failure from root wall thickness > 8 mm wall thickness < 8 mm	40 36	16 14

Obrázek 3 Doporučené hodnoty FAT křivky [5]



Obrázek 4 FAT únavová S-N křivka pro ocel [5]

3. Vzorky pro testování

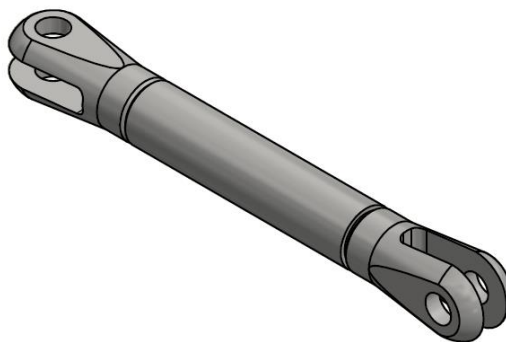
Pro experimentální část závěrečné práce byly použity vzorky (Obrázek 6) od firmy Aircraft Industries z letounu L 410 (Obrázek 5). Vzorky představují jednu z částí motorového lože letounu. Jedná se o kusy, které nejsou použitelné k instalaci na letouny a ČVUT je může použít výhradně k únavovým zkouškám. Experimentální únavové zkoušky svarových spojů na těchto vzorcích jsou součástí výzkumně vývojových aktivit projektu CK02000025 Pokročilé svařované konstrukce pro zvýšení bezpečnosti v letectví. Tento projekt je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci Programu DOPRAVA 2020+. Letouny řady L 410 jsou turboprotulové, celokovové hornoplošníky. Jejich výroba započala v letech 1969. [6]

Letouny jsou provozovány ve více než 60 zemích, na pěti kontinentech. Nejvíce tyto letouny byly dodávány do Ruska, Afriky a následně do Asie, Jižní Ameriky a do Evropy. Letouny jsou víceúčelové, jelikož jsou využívány jak pro civilní účely, tak i pro vládní či armádní účely. Také jsou vyráběny v mnoha variantách a to i ve sportovním zaměření. Je možné využívat letouny pro krátké a středně dlouhé vzdálenosti. Další výhodou těchto letounů je, že mohou vzlétat a přistávat na krátkých nezpevněných drahách. [6]

Při výrobě letounů L 410, se vychází z filozofie safe-life. Tato filozofie udává, že konstrukce má bezpečnou životnost a není dovolen vznik únavového defektu během doby provozu. [6]



Obrázek 5 L 410 Turbolet [17]

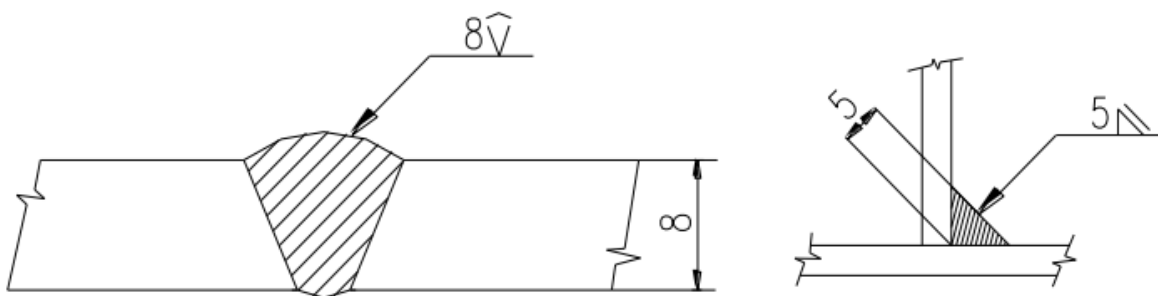


Obrázek 6 Vzorek pro testování

4. Svarové spoje

Svařování je proces, který se využívá k vytvoření trvalého, nerozebíratelného spoje dvou nebo více součástí. Hlavním požadavkem na proces svařování je vytvoření určitých termodynamických podmínek, díky kterým je možné vytvořit nové vazby mezi atomárních vazeb. Při svařování je nutné působit buď tlakem, teplem nebo oběma faktory najednou. Důvodem je fakt, že prakticky je velmi obtížné dosáhnout spojení na úrovni mezi atomových vazeb za okolních podmínek, jako jsou běžná teplota nebo tlak, ve stavu, kdy je termodynamický stav materiálů stabilní neboli metastabilní a je tudíž nutné tento termodynamický stav změnit. [7]

Svarové spoje lze použít pro kovové i nekovové materiály, materiály podobných i různých vlastností. Ovšem, pro různé typy spojů a materiálů jsou vhodné jiné metody svařování. Při svařování dojde pokaždé ke změně fyzikálních nebo mechanických vlastností, základního spojovaného materiálu, v okolí spoje. [7]



Obrázek 7 Na levém obrázku je příklad tupého svaru, vpravo je svar koutový [9]

4.1. Historie

První výskyt svarového spojení se udává z období 3000 let př. n. l., v oblasti Egypta, kdy docházelo ke spojování materiálů pomocí tvrdého pájení. V té době se tento způsob spojování materiálu využíval především ve zlatnictví. Měkké pájení se začalo využívat okolo roku 2000 let př. n. l., převážně pro spojování vodovodních trubek. Prvním typem svařování se začalo využívat kovářského svařování, které se realizovalo pomocí výhně a kladiva. Zmíněný způsob svařování se postupně rozvíjel spolu s rozvojem zpracování kovů. Výraznější rozvoj ve svařování a požadavky na další metody svařování se odehrály v období průmyslové revoluce, v 18. a 19. století a s objevením elektrického proudu. Velkým impulsem pro rozvoj nových metod, především elektrického oblouku, bylo období obou světových válek, ve 20. století. [7]

Na českém území, se datuje první použití elektrického obloukového svařování, ve Vítkovických železárnách a ve Škodových závodech v Plzni, okolo roku 1900. Obloukové svařování se využívalo na opravy ocelových odlitků. Vlivem nekvalitní jakosti svarů, byla tato metoda na nějaký čas nahrazena svařováním plamenem vodíko-kyslíkovým. Ve zmíněné problematice jakosti obloukových svarů se angažoval O. Kjellberg, který v roce 1904 představil vynález obalené elektrody. Na zmíněný vynález se vztahoval rozvoj strojů pro obloukové svařování. Na rozvoji se podílel český inženýr A. Bloch, který roku 1906 představil návrh nového typu svařovacího stroje, pro ruční obloukové svařování stejnosměrným proudem. [7]

Po první světové válce se z nutnosti obnovy strojů a zařízení, rozvoj opět urychlil a vyřešil se problém se spolehlivostí svařovacího zdroje a kvality elektrod. V důsledku zmíněného rozvoje se stanovily zásady správného navrhování a zkoušení svařovaných konstrukcí. V důsledku toho se rozšířilo nahrazování některých konstrukcí, které byly nýtované nebo lité, svařovanými konstrukcemi. Prvním výrazným počinem svarového spoje, na českém území, bylo svaření mostu o rozpětí 49,2 m. Most byl svařen roku 1931 Škodovými závody v Plzni a v té době byl největším celosvařovaným mostem na světě. [7]

Velkým rozvojem prošly též elektrody obloukového svařování. Původní elektrody byly stříhané dráty a skládaly se z různých materiálů. Obalené elektrody se začaly vyrábět ve Vítkovických železárnách v roce 1928. Výroba elektrod se zprvu prováděla máčením a až od roku 1938 se využívaly lisy. Další výroby elektrod byly ve Vamberku značky BH, na Kladně značky Poldi a Děčíně značky Philips. V roce 1954 byl založen Výzkumný ústav svařovacích strojů a technologií – VÚSSTS v Praze. První stroje pro svařování pod tavidlem byly vyvinuty v Chotěboři v roce 1952. Používání svařování v argonu se datuje do roku 1954, ale první svařování v argonu wolframovou elektrodou bylo až v roce 1957. Ve stejném roce se začalo rozvíjet poloautomatické svařování v ochranném plynu CO₂. Elektrostruskové svařování se začalo využívat v roce 1956. Od roku 1962 se začal používat elektrický oblouk pro řezání plazmatem. [7]



Obrázek 8 Tyršův most z roku 1931 [10]

4.2. Způsoby svařování

U všech způsobů svařování je účelem spojit dva až tři materiály kompaktním spojem, tady svarem, při působení z vnějšku dodávané energie, která překoná daný termodynamický stav látky. Energií, kterou dodáváme do spoje, může být teplo (elektrický oblouk, plasma, plamen), radiace (elektronové nebo iontové záření) nebo plastická deformace (kovářská činnost, výbuch, tření). Při svařování nastává interakce mnoha vlivů, jako jsou např. deformace, difúze, precipitace, rekrystalizace, rozpouštění nebo vznik nových fází, jejichž existence a vývoj závisí na dané použité metodě. Po skončení procesu svařování dostáváme nerozebíratelný spoj. Způsoby svařování se dělí buď podle směru, anebo podle polohy. Dělení a definice způsobů jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 1), (Tabulka 2). [8] [11]

Tabulka 1 Definice svařovacích ploch [11]

Polohy při svařování jsou normovány v ČSN EN ISO 6947		
POLOHA	POZNÁMKA	ZNAČENÍ
vodorovná shora	elektroda svisle	symbol PA
vodorovná šikmo shora	elektroda pod 45°	symbol PB
vodorovná na svislé stěně	elektroda vodorovně	symbol PC
šikmo nad hlavou	elektroda pod 45°, nahoru	symbol PD
nad hlavou	elektroda svisle, nahoru	symbol PE
na svislé stěně nahoru	elektroda vodorovně	symbol PF
na svislé stěně dolů	elektroda vodorovně	symbol PG
svařování nahoru k vrcholu svaru		symbol H-L045
svařování od vrcholu svaru dolů		symbol J-L060

Tabulka 2 Rozdělení dle směrů svařování [11]

SMĚR	POZNÁMKA	ÚHEL
vpřed	osa elektrody svírá se směrem svařování tupý úhel	110° - 125°
vzad	osa elektrody svírá se směrem svařování ostrý úhel	60° - 70°

4.2.1. Tavné svařování

Tento způsob svařování lze definovat jako postup, při kterém se přivádí energie ve formě tepla a ke spojení materiálů dochází při jejich roztavení, v tzv. svarové lázni. Tavné svařování se dále dělí na tyto typy.



- Obloukové svařování
 - Pro tento typ svařování materiálu se získává energie pro roztavení při hoření elektrického oblouku v ionizovaném plynu.
 - Velmi rozšířená metoda s řadou výhod, jako jsou nízké investiční ceny, vysoká kvalita svarů.
 - Generátorem svařovacího proudu a napětí jsou svařovací zdroje. [8] [11]

- Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou
 - Nejstarší metoda obloukového svařování.
 - Možnost svařování ve všech polohách.
 - Nízká výkonnost a nutnost manuální zručnosti. [8] [11]

- Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře
 - Tato metoda skrývá několik metod založených na stejném principu při použití různých svařovacích drátů:
 - ◆ Plná elektroda v inertním plynu – MIG
 - ◆ Plná elektroda v aktivním plynu – MAG
 - ◆ Plněnou elektrodou v aktivním plynu
 - ◆ Plněnou elektrodou v inertním plynu
 - Automatické podávání svařovacího drátu, značný výkon odtavování.
 - Široká paleta ochranných plynů a přídavných materiálů.
 - Při svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu – WIG nebo TIG. [8] [11]

- Svařování pod tavidlem
 - Využívá se pro svařování dlouhých svarů (lodě, mosty).
 - Plně automatizovaná metoda, lázeň je chráněna plyny vzniklými při hoření a tavením tavidla ve svarové lázni.
 - Přídavným materiálem jsou plné dráty nebo svařovací pásy. [8] [11]

- Laserové svařování
 - Umožňuje vysoké svařovací rychlosti, minimální deformace a úzkou tepelně ovlivněnou oblast. [8] [11]

- Plamenové svařování
 - Zdrojem tepla je spalování hořlavého plynu ve směsi s kyslíkem
 - Pro různé kovy se používají různé hořlavé plyny:
 - ◆ Kyslíko-acetylenové svařování
 - ◆ Kyslíko-propanové svařování
 - ◆ Kyslíko-vodíkové svařování [8] [11]

- Elektronové svařování
 - Využívá se pro svařování vysoce chemicky aktivních (titan, zirkon, niob, wolfram aj.) nebo vysokotavitelné a žárupevné slitiny (inconel, nimonic). [8] [11]

4.2.2. Tlakové svařování

Tlakové svařování je charakterizováno působením jak tlaku, tak tepla za vzniku plastických deformací a ke spojení dochází i při částečně natavených materiálech.

- Odporové svařování
 - Metoda se využívá pro spojení materiálů, které jsou umístěny (leží) na sobě.
 - Nejčastější využití je pro bodování ocelových plechů nebo spojení drátů do mříží. [8] [11]
- Svařování třením
 - Princip svařování je takový, že využívá vzniklé tepelné energie, která vznikne třením dvou ploch o sebe. Jedno těleso je upevněno k stacionární části a druhé těleso je připevněno k rotační části.
 - Na kontaktní ploše dochází ke vzniku vysoké teploty, kontaktním třením, dále k natavení ploch a vlivem tlaku ke spojení těles. [8] [11]
- Třecí svařování promíšením [8] [11]
- Kovářské svařování
 - Ke spojení dochází při zahřátí kovů na teplotu okolo 50 až 90 % teploty tání a působením vnějšího tlaku údery kladivem nebo lisu. [8] [11]
- Difúzní svařování
 - Proces probíhá kontaktem dvou hladkých ploch, které jsou ohřáté na 50 až 90 % teploty tání a působením tlakové síly.
 - Výhodami jsou kvalitní spoje bez negativních vlivů tavného svařování, jako jsou vnitřní pnutí a deformace. [8] [11]
- Svařování výbuchem
 - Metoda se využívá zejména pro navařování neboli plátování.
 - Pro správný spoj je potřeba rychlost exploze nižší než rychlost šíření zvuku.
 - Využívá se pro spojení materiálů, které metodami tavného svařování nelze spojovat, např. ocel a titan. [8] [11]

4.2.3. Tlakové svařování za studena

Tento způsob svařování je založen na principu, ve kterém je přiváděnou energií pouze tlak a ke spojení dojde v tuhém stavu materiálů.

- Svařování ultrazvukem
 - Svařování využívá mechanického rozkmitání o vysoké frekvenci při současném působení tlakové síly, která zaručuje přenos kmitů ze sonotrod do spojovaných materiálů. Rozkmitáním dochází i k relativně malému ohřevu v daní oblasti a vzniku plastických deformací.
 - Využívá se především u svařování plastů, ale také pro svařování vodičů u kabelových svazků. [8] [11]
- Svařování tlakem za studena
 - Metoda probíhá při přiblížení povrchů svařovaných těles na vzdálenosti atomů v mřížkách, přičemž svařování je dosaženo za působení vysokého tlaku. V oblasti spojení musí dojít k tečení, aby bylo možné tělesa spojit. [8] [11]

4.3. Typy svarů

Podle tvaru, průřezu a úpravy svaru se svary dělí na dva základní druhy. Na tavné a tlakové. [9]

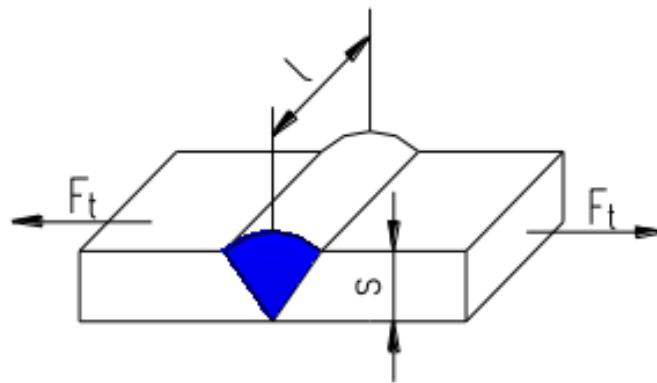
- Tavné svary
 - Tupé
 - ◆ Lemový
 - ◆ Svar I
 - ◆ Svar V
 - ◆ Svar U
 - ◆ Svar X
 - ◆ Svar UU
 - ◆ Svar 1/2V
 - ◆ Svar 1/2X
 - Koutové
 - ◆ Koutový
 - ◆ Rohový
 - ◆ Děrový
 - ◆ Žlábkový [9]

- Tlakové svary
 - Tupé
 - ◆ Tupý tlakem
 - ◆ Tupý odtavením
 - Překlátované
 - ◆ Bodový
 - ◆ Bradavkový
 - ◆ Švový [9]

4.3.1. Pevnostní výpočet svarových spojů dle ČSN

Výpočty provedeny dle ČSN 05 0120 [9]

4.3.1.1. Tupý svar na tah



Obrázek 9 Pevnostní výpočet – tupý svar na tah [9]

$$\sigma_t = \frac{F_t}{s \cdot l} \leq \sigma_{t DOV_{sv}} \quad (4.1)$$

$$\sigma_{t DOV_{sv}} = 0,85 \cdot \sigma_{t DOV} \quad (4.2)$$

kde:

σ_t = napětí tahové [MPa]

$\sigma_{t DOV_{sv}}$ = napětí tahové dovolené svaru [MPa]

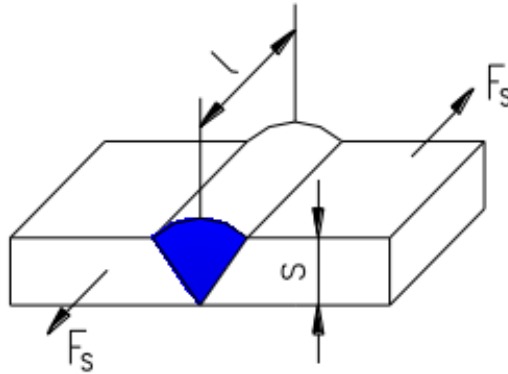
$\sigma_{t DOV}$ = napětí tahové dovolené [MPa]

F_t = síla tahová [N]

s = tloušťka plechu [mm]

l = délka svaru [mm] [9]

4.3.1.2. Tupý svar na smyk



Obrázek 10 Pevnostní výpočet – tupý svar na smyk [9]

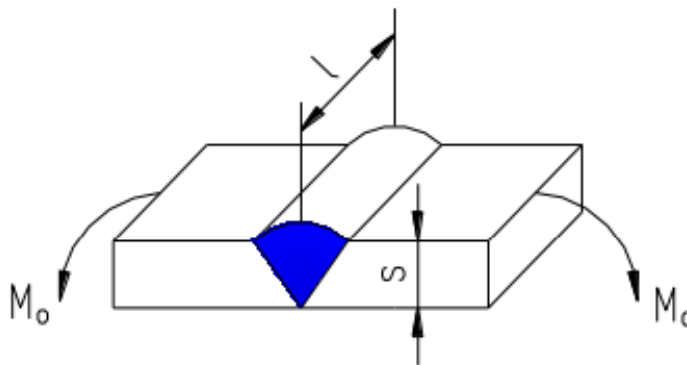
$$\tau_S = \frac{F_S}{S \cdot l} \leq \tau_{S \text{ DOV}_{sv}} \quad (4.3)$$

$$\tau_{S \text{ DOV}_{sv}} = 0,75 \cdot \sigma_{t \text{ DOV}} \quad (4.4)$$

kde:

τ_S = napětí smykové	[MPa]
$\tau_{S \text{ DOV}_{sv}}$ = napětí smykové dovolené svaru	[MPa]
$\sigma_{t \text{ DOV}}$ = napětí tahové dovolené	[MPa]
F_S = síla smyková	[N]
s = tloušťka plechu	[mm]
l = délka svaru	[mm] [9]

4.3.1.3. Tupý svar na ohyb



Obrázek 11 Pevnostní výpočet – tupý svar na ohyb [9]

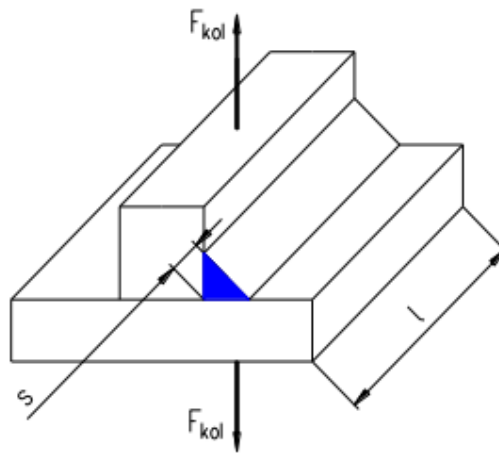
$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{M_o}{\frac{1}{6} \cdot S^2 \cdot l} \leq \sigma_{o \text{ DOV}_{sv}} \quad (4.5)$$

$$\sigma_{o \text{ DOV}_{sv}} = 0,85 \cdot \sigma_{t \text{ DOV}} \quad (4.6)$$

kde:

σ_o = napětí ohybové	[MPa]
$\sigma_{o DOV_{sv}}$ = napětí ohybové dovolené svaru	[MPa]
$\sigma_{t DOV}$ = napětí tahové dovolené	[MPa]
M_o = ohybový moment	[MPa]
W_o = průřezový modul v ohybu	[mm ³]
s = tloušťka plechu	[mm]
l = délka svaru	[mm] [9]

4.3.1.4. Koutový svar



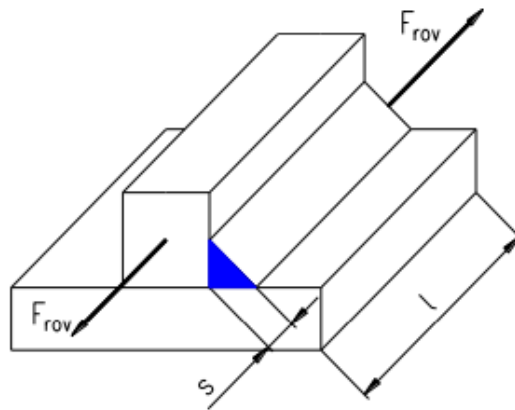
Obrázek 12 Pevnostní výpočet – koutový svar – síla kolmá [9]

$$\tau_{kol} = \frac{F_{kol}}{2s \cdot l} \leq \tau_{kol DOV} \quad (4.7)$$

$$\tau_{kol DOV} = 0,65 \cdot \sigma_{t DOV} \quad (4.8)$$

kde:

τ_{kol} = napětí kolmé	[MPa]
$\tau_{kol DOV}$ = napětí kolmé dovolené	[MPa]
$\sigma_{t DOV}$ = napětí tahové dovolené	[MPa]
F_{kol} = síla kolmá	[N]
s = tloušťka plechu	[mm]
l = délka svaru	[mm] [9]



Obrázek 13 Pevnostní výpočet – koutový svar – síla rovinná [9]

$$\tau_{rov} = \frac{F_{rov}}{2s \cdot l} \leq \tau_{rov DOV} \quad (4.9)$$

$$\tau_{rov DOV} = 0,75 \cdot \sigma_t DOV \quad (4.10)$$

$$\tau = \sqrt{\tau_{rov}^2 + \tau_{kol}^2} \leq \tau_{sv DOV} \quad (4.11)$$

$$\tau_{sv DOV} = 0,65 \cdot \sigma_t DOV \quad (4.12)$$

kde:

τ_{rov} = napětí rovinné [MPa]

$\tau_{rov DOV}$ = napětí rovinné dovolené [MPa]

$\sigma_t DOV$ = napětí tahové dovolené [MPa]

τ = napětí [MPa]

τ_{kol} = napětí kolmé [MPa]

$\tau_{sv DOV}$ = napětí svaru dovolené [MPa]

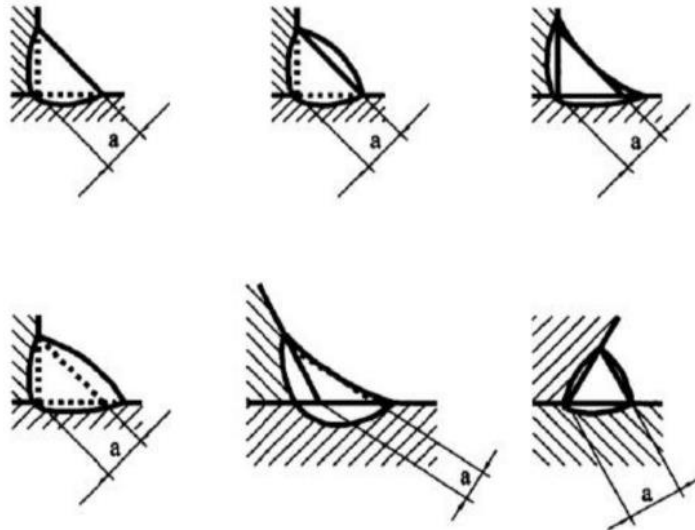
F_{rov} = síla rovinná [N]

s = tloušťka plechu [mm]

l = délka svaru [mm] [9]

4.3.2. Návrh svarových spojů se statickým zatížením

Při návrhu svarových spojů stačí vypočítat kapacitu na základě konečné pevnosti f_{uk} . Dále mohou být plasticky deformované průřezy akceptovány jako statické klouby. Nominální tloušťka hrdla a , která je dána dle ISO 5817, představuje výšku největšího rovnooramenného trojúhelníku, který lze vepsat mezi povrchy spoje a horní povrch svarů (Obrázek 14). [15]



Obrázek 14 Nominální tloušťka hrdla [15]

4.3.2.1. Návrh hodnoty pevnosti dle normy BSK 07

Návrh podle této normy se dělí podle typu plochy. Návrh se provádí na základě hrubé plochy A_{gr} rovnicí (4.13), čisté plochy A_{net} rovnicí (4.14), nebo pro základní materiál. [15]

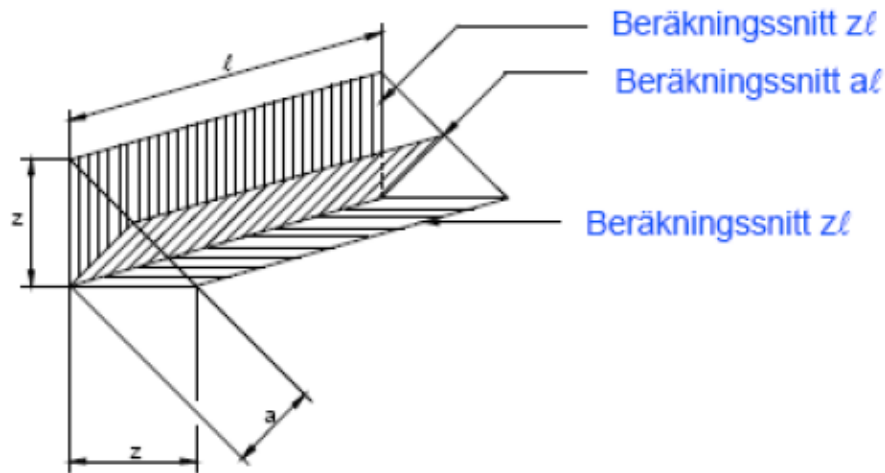
$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_m \cdot \gamma_n} \quad (4.13)$$

$$f_{ud} = \frac{f_{uk}}{1,2 \cdot \gamma_m \cdot \gamma_n} \quad (4.14)$$

Dále se navrhuje pevnost svarového kovu f_{wd} dle rovnice (4.15). Kde úhel φ má hodnoty 1.0 pro třídu svaru B, 0.9 pro třídu svaru C a 0.45 pro třídu svaru D. Značka f_{wuk} udává pevnost svaru při porušení. Součinitel γ_n závisí na možných následcích poruchy. Parciální součinitel γ_m udává odrážející nejistotu při stanovení odolnosti. [15]

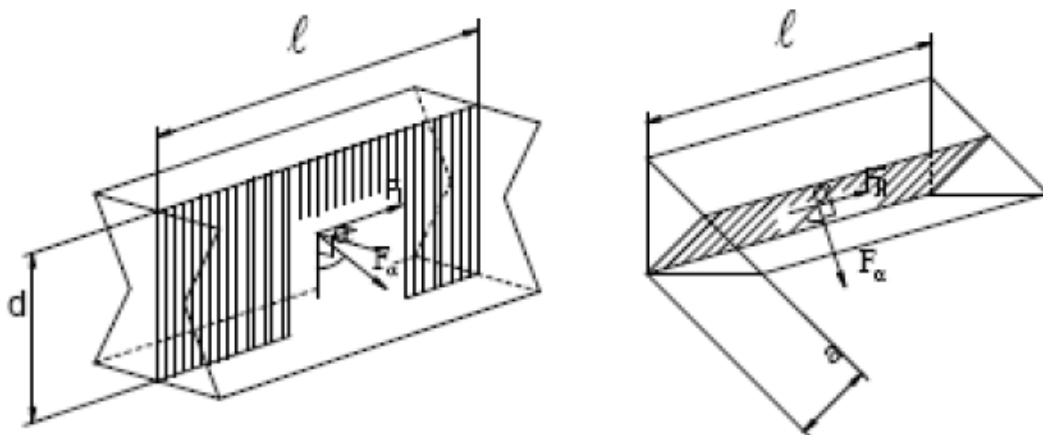
$$f_{wd} = \frac{\varphi \cdot f_{wuk}}{1,2 \cdot \gamma_n} \quad (4.15)$$

Charakteristická pevnost svaru při porušení se udává buď pro základní materiály charakteristické konečné pevnosti značící se f_{uk} , nebo pro svarové materiály charakteristické konečné pevnosti značící se f_{euk} . Hodnota pevnosti f_{wd} by neměla být větší než f_{ud} pro základní materiál, pro řez na straně svaru (Obrázek 15). Pokud tento stav nastane, dochází k nahrazení f_{wd} pevností f_{ud} , ve vzorcích pro pevnostní kapacitu svarových spojů. [15]



Obrázek 15 Řez na straně svaru [15]

Podmínky návrhu jsou takové, že v případě překrytí přídavného materiálu a pokud charakteristická mez pevnosti základních materiálů bude $f_{uk} \leq 500$ MPa, pak by mohl být tupý svar třídy C považován za stejně pevný jako základní materiál. Ostatní svarové spoje by měly být navrženy proti silám F_{\parallel} a F_{α} (Obrázek 16). Síla F_{\parallel} je síla smyková rovnoběžná se svarem a síla F_{α} je síla normálová v úhlu α proti výpočtovému řezu ($0^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$). [15]



Obrázek 16 Zobrazení sil výpočtového řezu [15]

Na zmíněné síly F_{\parallel} a F_{α} navazuje výpočet kapacity svarových spojů $F_{R\parallel}$ rovnicí (4.16) a $F_{R\alpha}$ rovnicí (4.17). Kde d udává výpočet výšky řezů a l efektivní délku svaru. [15]

$$F_{R\parallel} = 0,6 \cdot d \cdot l \cdot f_{wd} \quad (4.16)$$

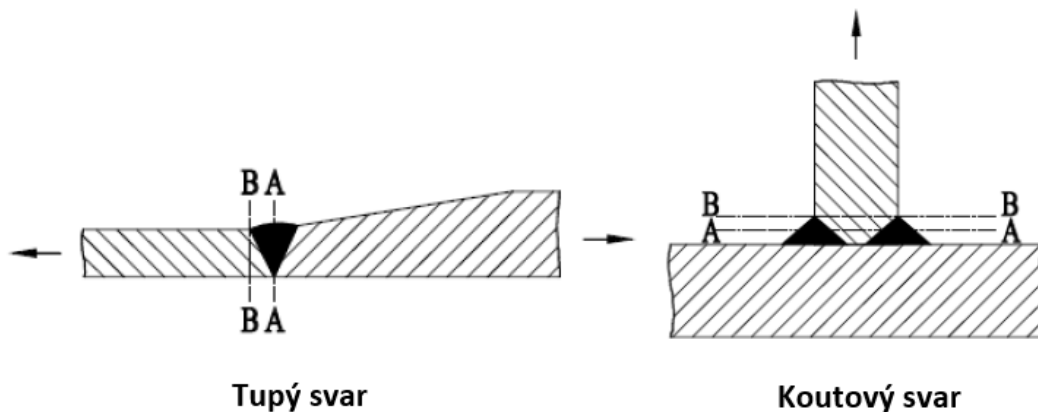
$$F_{R\alpha} = \frac{d \cdot l \cdot f_{wd}}{\sqrt{2 + \cos 2\alpha}} \quad (4.17)$$

Pro podélné i příčné síly platí vztah daný rovnicí (4.18).

$$\left(\frac{F_{S\parallel}}{F_{R\parallel}}\right)^2 + \left(\frac{F_{S\alpha}}{F_{R\alpha}}\right)^2 \leq 1,0 \quad (4.18)$$

Výpočty průřezu (Obrázek 17) jsou podmíněny několika body, aby bylo možné napětí považovat za rovnoměrně rozložené, po výpočtovém průřezu (Obrázek 15). [15]

- $l > 10 \cdot a$
- $l < 100 \cdot a$, při statickém zatížení
- $l < 60 \cdot a$, při únavovém zatížení
- $a > 3 \text{ mm}$
- $a < 15 \text{ mm}$



Obrázek 17 Výpočty průřezu [15]

4.3.2.2. Návrh hodnoty pevnosti dle normy Eurocode 3

Návrh se řídí dle normy EN 1993-1-8: Design of joints. U tohoto návrhu je potřeba dbát na konstrukční předpoklady. Předpokládané rozložení vnitřních sil by mělo být reálné s ohledem na relativní tuhosti ve spoji. Dále by se mělo brát v potaz, že pokud bude spoj namáhaný smykem vystaven nárazu nebo významným vibracím, měla by se použít jedna z následujících metod spojování. [15]

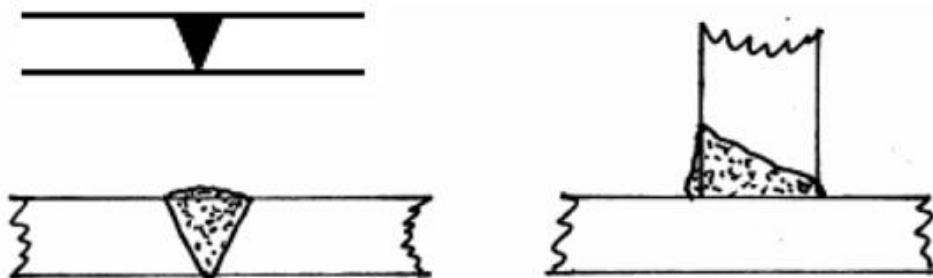
- Svařování
- Šrouby s aretačním zařízením
- Předepjaté šrouby
- Vstřikovací šrouby
- Nýtování

Pro návrh se svarovým spojem je doporučeno použít konstrukční oceli dle EN 1993-1-1, kde je mez kluzu 235-460 MPa. Pro materiály s vyšší mezí kluzu S500-S700 MPa, dle EN 1993-1-12. Materiály jsou vhodné pro tloušťky ≥ 4 mm. Výplňový materiál by měl mít minimálně stejné pevnostní vlastnosti jako základní materiál, podle EN 1993-1-8. Pro materiál S500-S700 MPa je však povolen odpovídající výplňový materiál. Tyto pravidla jsou platná pro svary tupé, koutové i zátkové. [15]

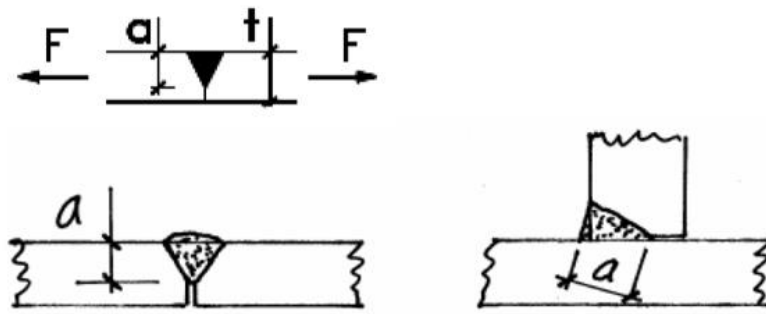
Tupé svary mohou být buď s plným průvarem (Obrázek 18) nebo částečně penetrované tupé svary (Obrázek 19). Svary s plným průvarem mají přídavný materiál, který dává minimálně stejné pevnostní vlastnosti jako základní materiál. Částečně penetrovaný svar je navržen a analyzován jako koutový svar a je excentricky zatížen. Návrh tohoto svaru je ovlivněn normálovou silou a momentem viz. rovnice (4.19), (4.20). Tento svar lze považovat za centricky zatížený, pokud jsou svařované díly zatíženy silou od tuhých konstrukcí. [15]

$$N = F \quad (4.19)$$

$$M = F \cdot \left(\frac{t}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (4.20)$$

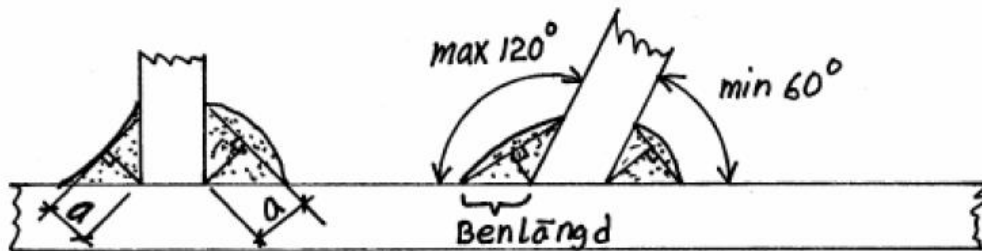


Obrázek 18 Tupý svar s plným průvarem [15]



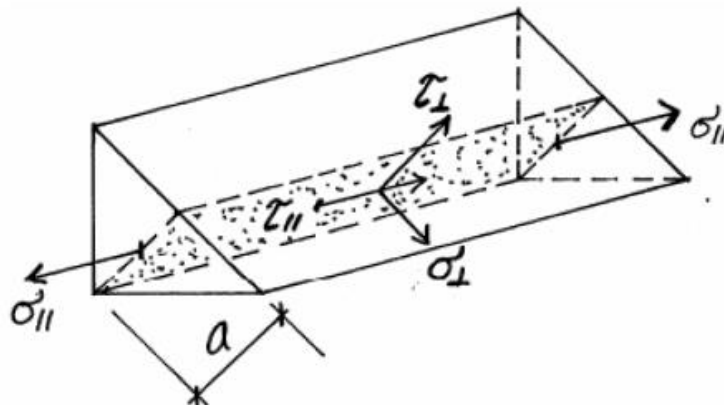
Obrázek 19 Tupý svar částečně penetrovaný [15]

Návrh pro koutové svary je podmíněn, zda je úhel mezi svařovanými deskami $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ (Obrázek 20). Pokud je úhel menší než 60° nebo větší než 120° , svar se navrhne jako částečně penetrovaný tupý svar. Tloušťka hrdla koutového svaru je ≥ 3 mm. Pokud má svar plný a rovnoměrný rozměr, jedná se o efektivní délku l_{eff} . Efektivní délku lze také určit jako dvojnásobek tloušťky hrdla. [15]



Obrázek 20 Úhlové rozmezí koutového svaru [15]

Nejmenší efektivní délka svaru pro zátěžové koutové svary by měla být alespoň 30 mm a to v případě tloušťky hrdla < 5 mm. Pro případ, že tloušťka hrdla bude > 5 mm je třeba l_{eff} dopočítat jako $6 \cdot a$. Návrhový průřez se skládá z tloušťky hrdla, efektivní délky svaru a 4 složek napětí. Složky σ_{\perp} , τ_{\perp} a τ_{\parallel} jsou způsobeny vnějšími silami, které svar přeneše a je potřeba je brát v úvahu při návrhu (Obrázek 21). Zbytkové napětí se neuvažuje. Složka σ_{\parallel} nepřenáší žádné zatížení a nemělo by se brát v úvahu. [15]



Obrázek 21 Složky napětí koutového svaru [15]

Návrh odolnosti koutových svarů lze realizovat dvěma alternativními metodami. Směrovou metodou, nebo Zjednodušenou metodou. Směrová metoda spočívá v tom, že se vypočítají složky napětí způsobené silou přenášenou svarem a sestaví se do efektivního srovnávacího napětí. Efektivní napětí by nemělo překročit návrhovou hodnotu pevnosti svarových spojů. Normálové napětí se ve směru svaru přes průřez nepřenáší a v analýze se nebere v úvahu. Hodnota napětí se vypočítá dle rovnice (4.21). Pevnost přídatných materiálů by měla být alespoň podobná, jako pevnost základního materiálu. Pevnost svarových spojů lze vypočítat dle rovnice (4.22), kde f_u je maximální pevnost základního materiálu, β_w je korelační faktor a γ_{M2} je faktor bezpečnosti. Zmíněné konstanty mají různé hodnoty podle typu materiálu, které se volí z tabulek. [15]

$$\sigma_j = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \quad (4.21)$$

$$\frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.22)$$

Pro napětí v návrhovém průřezu platí dvě kritéria. [15]

- Efektivní napětí by mělo být maximální návrhovou hodnotou pro pevnost svarových spojů. Vycházet by se mělo z rovnice (4.23).

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.23)$$

- Normální napětí kolmé na návrhový průřez by mělo být maximální návrhovou hodnotou pro pevnost základního materiálu. Vycházet by mělo z rovnice (4.24).

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (4.24)$$

U Zjednodušené metody pro koutové svary je pevnost svarového spoje nejnižší, při čistém smykovém napětí. Tuto hodnotu pevnosti lze použít nezávisle na směru zatížení v návrhovém průřezu. Výpočet lze provést pomocí rovnice (4.25). [15]

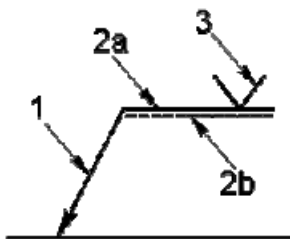
$$\frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} \approx 0,6 \cdot \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.25)$$

4.4. Značení svarů

Svarové spoje se označují tak, aby označení odpovídalo všeobecným pravidlům používaným pro technické výkresy. Značení je dle ČSN EN 22 553.

Označení zahrnuje základní značku, která může být doplněna:

- Doplnkovou značkou
- Údajem o rozměru spoje
- Dalšími doplňujícími údaji



Legenda:

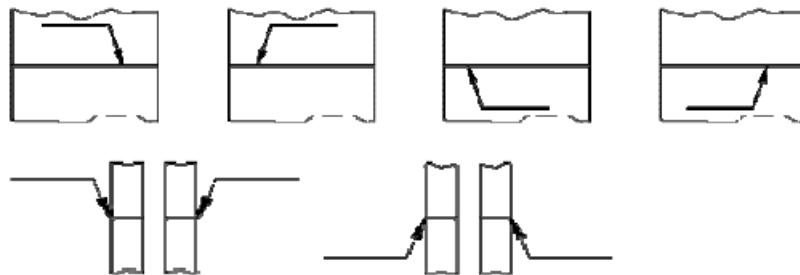
1 ... odkazová čára

2a ... praporek odkazové čáry (plná čára)

2b ... identifikační čára (čárkovaná čára)

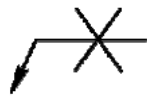
3 ... značka svaru

Obrázek 22 Úplné značení svaru [12]

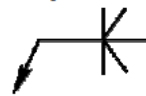


Obrázek 23 Poloha odkazové čáry [12]

Označení oboustranně symetrických svarů:

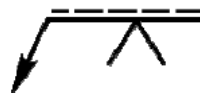


Oboustranný V-svar

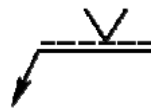


Oboustranný 1/2V-svar (K-svar)

Povrch svaru je na straně odkazové čáry:



Povrch svaru je na straně protilehlé k odkazové čáře:



Obrázek 24 Poloha značky vůči praporku odkazové čáry [12]



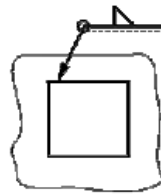
Obrázek 25 Rozměry svarů [12]

- Vlevo od značky svaru se uvádí hlavní rozměr svaru vztahující se k příčnému řezu svaru
- Vpravo od značky svaru se uvádějí rozměry týkající se délky svaru

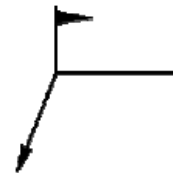


Obrázek 26 Označování hlavních rozměrů [12]

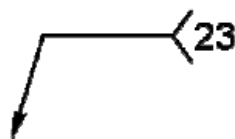
Obvodový svar



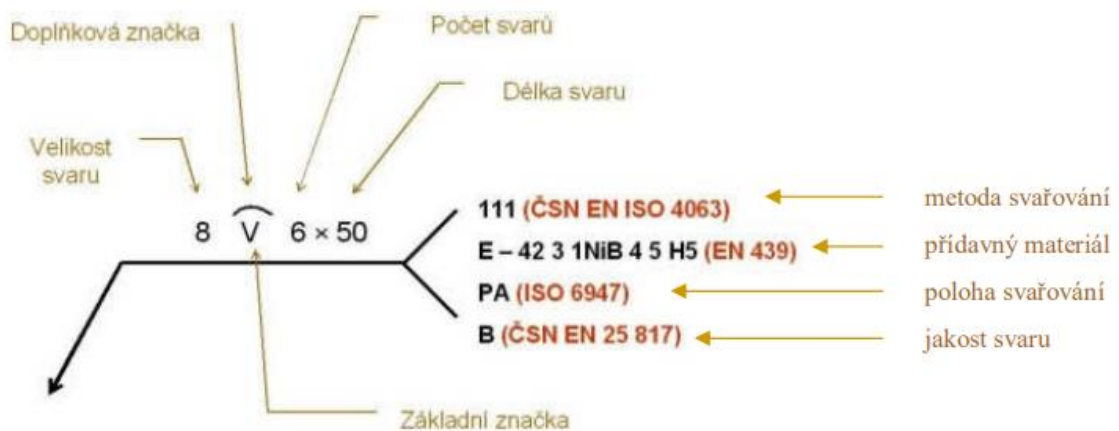
Montážní svar



Označení metody svařování



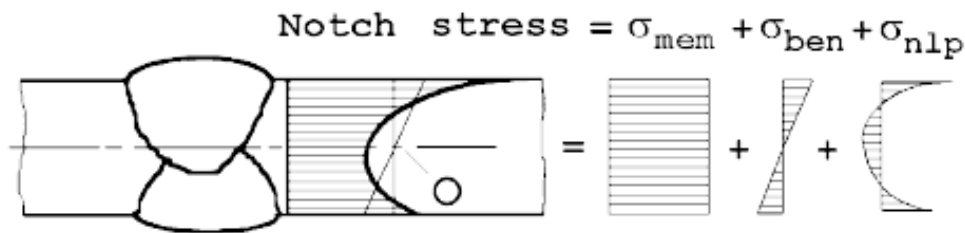
Obrázek 27 Doplnkové značky [12]



Obrázek 28 Příklad značení svarů [12]

5. Metody pro hodnocení životnosti

Svarový spoj představuje místo, ve kterém dochází ke koncentraci napětí. Obecný průběh napětí v patě svaru je zobrazen na (Obrázek 29). Toto napětí se nazývá vrubové neboli notch stress a skládá se z membránového σ_{mem} , ohybového σ_{ben} a nelineárního špičkového napětí σ_{nlp} . V dalších podkapitolách jsou zmíněny metody určení životnosti, které by mohly být nebo byly použity, ve vyhodnocování mého experimentu. Tytéž metody se liší uvažovaným zjednodušením vrubového napětí. [5]



Obrázek 29 Obecný průběh napětí [5]

5.1. Metoda nominálních napětí

Nominální napětí představuje napětí elastické, které se počítá pro daný uvažovaný průřez. Lokální nárůst napětí vlivem svarového spojení není uvažován. Pro tuto metodu se uvažuje vliv lokální koncentrace napětí od geometrie svaru, svarových nedokonalostí nebo zbytkového napětí v únavových FAT křivkách. Nominální napětí lze určit v místě svaru buď analyticky, nebo pomocí MKP. Pomocí MKP se určuje v místě, které nebude ovlivněno koncentrací napětí od svaru. Tuto metodu lze použít pouze pro geometrické konfigurace a způsoby zatěžování svaru, které jsou již popsány v tabulkách, doporučeních anebo v kódech. MKP lze též použít pro extrapolování lepších výsledků, když máme složitější model nebo zatížení. V případě vzniku trhliny, v kořeni svaru, se použije nominální napětí v rovině efektivní tloušťky svaru. Praktičnost této metody umožňuje vyhodnotit svar analyticky. Nevýhodou této metody je, že jí nelze použít na svary složitějších tvarů. [5]

5.1.1. Výpočet nominálních napětí

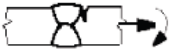
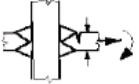
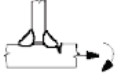
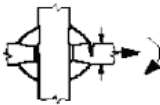
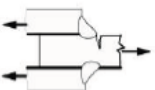
Nominální napětí, značené σ_w nebo τ_w , se vypočítá podle rovnice (5.1), kde F udává působící sílu, a představuje šířku svaru a l_w délku svaru. [5]

$$\sigma_w \text{ nebo } \tau_w = \frac{F}{A_w} = \frac{F}{a \cdot l_w} \quad (5.1)$$

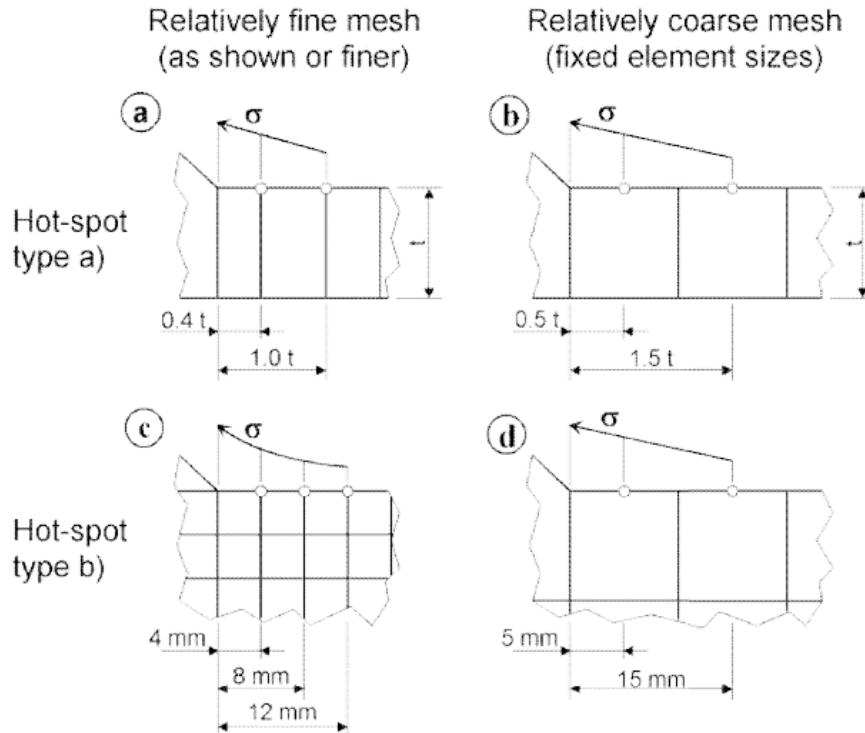
5.2. Metoda strukturálních hot spot napětí

Strukturální napětí je elastické napětí linearizované na povrchu pomocí délky a násobku tloušťky daného průřezu. Výpočet je tvořen součtem membránového a ohybového napětí. Tato metoda zahrnuje, pro zjištění strukturálního napětí, nárůst napětí vlivem konstrukčních detailů a dodatečného ohybu plechu. Neuvažuje se lokální koncentrace napětí, která je způsobená geometrií svaru. Funguje na principu linearizace napětí v daném průřezu. [5]

Metoda hot spot napětí je jednou z metod strukturálního napětí. Linearizace pro tuto metodu se provádí v blízkosti svaru. Započítává se nárůst napětí vlivem konstrukčních detailů, v okolí svaru. Naopak se neuvažuje lokální koncentrace napětí, která je způsobená vrubovým efektem. Použití této metody je doporučeno pro případy, kde není jasně definovatelné nominální napětí. Dále je použití podmíněno pouze za předpokladu, že iniciační trhlinka vznikne v patě svaru. Metoda funguje na principu extrapolace povrchových napětí před svarem. Povrchové napětí se získává experimentálně nebo pomocí MKP. Přístupy pro získávání povrchového napětí jsou citlivé na různé okolnosti. Experimentální přístup je citlivý na přesnost umístění tenzometrů a MKP přístup je citlivý na kvalitu sítě. Výhodou této metody je potřeba menšího množství FAT křivek, v porovnání s metodou nominálního napětí. V tomto případě se uvažují křivky FAT 90, pro nosné součásti a FAT 100, pro nenosné součásti (Obrázek 30). Doporučení pro umístění tenzometrů a nastavení sítě jsou zobrazena na (Obrázek 31). [5]

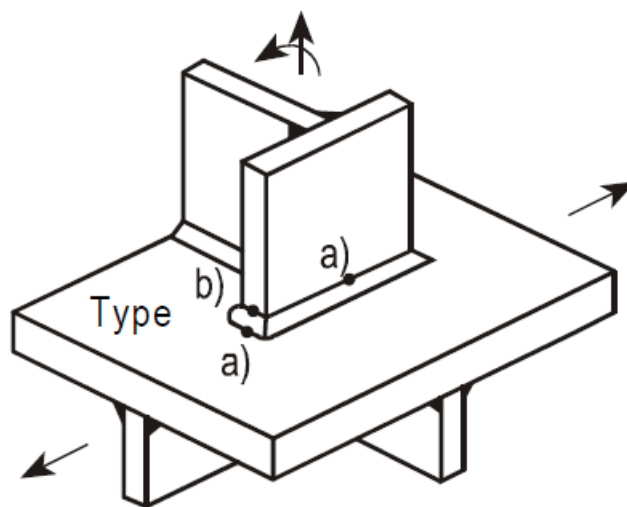
No.	Structural detail	Description	Requirements	FAT Steel	FAT Alu.
1		Butt joint	As welded, NDT	100	40
2		Cruciform or T-joint with full penetration K-butt welds	K-butt welds, no lamellar tearing	100	40
3		Non load-carrying fillet welds	Transverse non-load carrying attachment, not thicker than main plate, as welded	100	40
6		Cruciform joints with load-carrying fillet welds	Fillet welds, as welded	90	36
7		Lap joint with load carrying fillet welds	Fillet welds, as welded	90	36

Obrázek 30 Třídy FAT křivky pro Hot spot napětí [14]



Obrázek 31 Způsoby extrapolace pro různé typy hot spot míst [5]

Na (Obrázek 32) jsou zobrazeny 2 typy hot spot míst. Pro místo *a*) a místo *c*) se napětí zjišťuje z napětí, na přiléhající ploše. Pro místo *b*) se napětí zjišťuje po hraně plechu. Dle (Obrázek 31) se napětí extrapoluje lineárně nebo kvadraticky, z rohových uzlů nebo z uzlů uprostřed hrany prvku. Typ *a*) z (Obrázek 31) se aplikuje na hot spot místa *a*) a *c*), z (Obrázek 32). Pro tyto hot spot místa je vzdálenost extrapoláčních bodů od paty svaru funkcí tloušťky stěny. Pro hot spot místo *b*) není funkcí tloušťky stěny. [5]



Obrázek 32 Typy hot spot míst [5]

5.2.1. Výpočet strukturálních hot spot napětí

Strukturální hot spot napětí σ_{hs} , pro typ a, lze vypočítat následujícími variantami.

- 1) Jemná síť s délkou prvku ne větší než 0,4 t na místě hot spot. Vyhodnocení uzlových napětí ve dvou referenčních bodech 0,4 t a 1,0 t a lineární extrapolace rovnicí (5.2). $\sigma_{0,4-t}$ a $\sigma_{1,0-t}$ jsou napětí změřené nebo spočítané ve vzdálenosti 0,4 nebo 1 násobku tloušťky stěny od paty svaru.

$$\sigma_{hs} = 1,67 \cdot \sigma_{0,4-t} - 0,67 \cdot \sigma_{1,0-t} \quad (5.2)$$

- 2) Jemná síť definovaná v bodě 1). Vyhodnocení uzlových napětí ve třech referenčních bodech 0,4 t, 0,9 t, a 1,4 t a kvadratická extrapolace rovnicí (5.3). $\sigma_{0,4-t}$, $\sigma_{0,9-t}$ a $\sigma_{1,4-t}$ jsou napětí změřené nebo spočítané ve vzdálenosti 0,4, 0,9 nebo 1,4 násobku tloušťky stěny od paty svaru.

$$\sigma_{hs} = 2,52 \cdot \sigma_{0,4-t} - 2,24 \cdot \sigma_{0,9-t} + 0,72 \cdot \sigma_{1,4-t} \quad (5.3)$$

- 3) Hrubá síť s prvky vyššího řádu, které mají délky rovnající se tloušťce desky v místě hot spot. Vyhodnocení napětí ve středních bočních bodech nebo středech povrchu, tj. ve dvou referenčních bodech 0,5 t a 1,5 t a lineární extrapolace rovnicí (5.4).

$$\sigma_{hs} = 1,5 \cdot \sigma_{0,5-t} - 0,5 \cdot \sigma_{1,5-t} \quad (5.4)$$

Strukturální hot spot napětí σ_{hs} , pro typ b, lze vypočítat následujícími variantami. Rozložení napětí není závislé na tloušťce desky. Proto jsou referenční body uvedeny v absolutních vzdálenostech od špičky svaru nebo konce svaru, pokud svar nepokračuje kolem konce přivedené desky.

- 4) Jemná síť s délkou ne větší než 4 mm v místě hot spot. Vyhodnocení uzlových napětí ve třech referenčních bodech 4 mm, 8 mm a 12 mm a kvadratická extrapolace rovnicí (5.5).

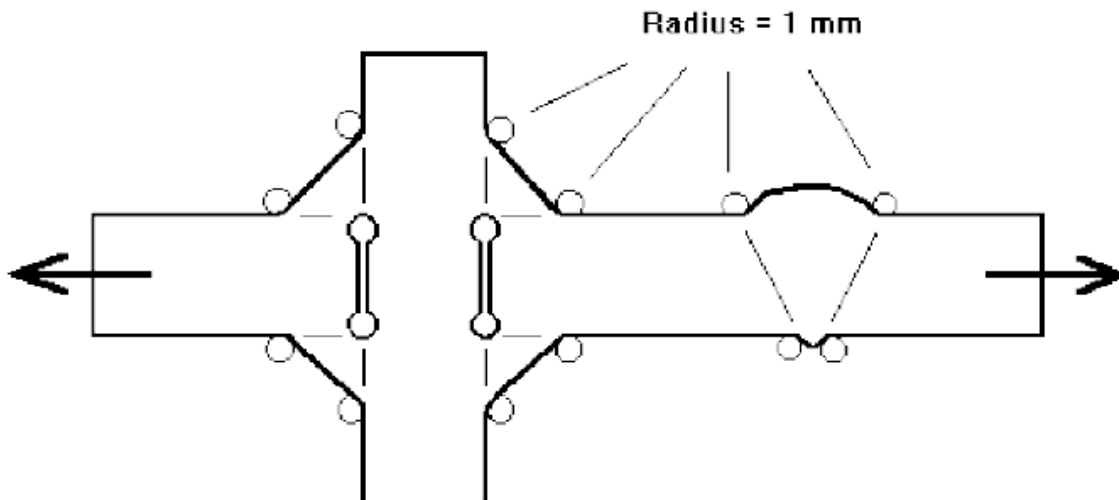
$$\sigma_{hs} = 3 \cdot \sigma_{4 \text{ mm}} - 3 \cdot \sigma_{8 \text{ mm}} + \sigma_{12 \text{ mm}} \quad (5.5)$$

- 5) Hrubá síť s prvky vyššího řádu o délce 10 mm na místě hot spot. Vyhodnocení napětí v bodech střední strany dvou prvků a lineární extrapolace rovnicí (5.6).
[5]

$$\sigma_{hs} = 1,5 \cdot \sigma_{5 \text{ mm}} - 0,5 \cdot \sigma_{15 \text{ mm}} \quad (5.6)$$

5.3. Metoda efektivního vrubového napětí

Metoda efektivního vrubového napětí neboli effective notch stress, zahrnuje koncentraci napětí ve vrubu, která vznikne v patě a v kořeni svaru, a to z důvodu vrubového účinku. Tato metoda uvažuje chování materiálu jako čistě elastické. Vrubové napětí je počítáno pomocí MKP softwaru. V MKP modelu je v patě nebo v kořeni svaru vytvořen kruhový vrub (Obrázek 33). Ten je buď pro plechy o tloušťce $t \geq 5$ mm a jeho poloměr 1 mm, nebo pro plechy menších tlouštěk $t < 5$ mm. Pro tyto plechy se modelují vruby s menším poloměrem, a to s poloměrem 0,05 mm. MKP síť je v okolí vrubu velmi jemná, což znamená velký počet stupňů volnosti a vysokou výpočetní náročnost. Z tohoto důvodu není obecně vhodné, používat tuto metodu pro vyhodnocování velkých sestav, jako celku. Pro tuto metodu je časté ji kombinovat s metodou tvorby submodelů. Výsledné efektivní vrubové napětí se porovnává s únavovou křivkou FAT 225, pro poloměr vrubu 1 mm nebo FAT 630, pro poloměr vrubu 0,05 mm a pro hlavní napětí. Křivka FAT 225 se využívá pro první hlavní napětí. Výhodou metody je geometrická obecnost, jelikož je modelován detail, a je tak možno hodnotit životnost pro místa se složitou geometrií, kde by dříve prezentované metody nebyly použitelné. [4] [5]



Obrázek 33 Fiktivní zaoblení špiček a kořenů svaru [5]

5.4. Vliv tloušťky stěny

Vliv tloušťky materiálu (plechu), kterým bude ocel, na únavovou pevnost, by měl být brán v úvahu, pokud bude místem, ve kterém bude potencionální únavové praskání, špička svaru. Níže uvedené hodnoty odolnosti proti únavě pro ocel, se vztahují k tloušťce stěny do 25 mm. Nižší únavová pevnost u tlustších prvků se bere v úvahu, když se vynásobí třídy FAT konstrukčního detailu, faktorem redukce tloušťky $f(t)$, který je dán rovnicí (5.7). [5]

$$f(t) = \left(\frac{t_{ref}}{t_{eff}} \right)^n \quad (5.7)$$

Referenční tloušťka je dána $t_{ref} = 25$ mm. Korekční exponent n je závislý na efektivní tloušťce t_{eff} a kategorii spoje viz. (Tabulka 3). Stejným způsobem lze uvažovat o efektu benigní tenkosti, ale to by mělo být ověřeno testem součástí. [5]

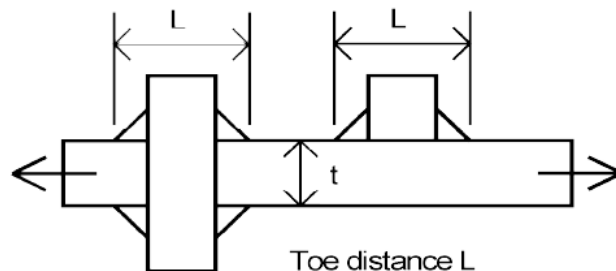
Korekční faktor tloušťky plechu se nevyžaduje v případě posouzení založeného na postupu efektivního vrubového napětí nebo lomové mechanice. Naopak pro metodu hot spot se korekční faktor liší, jak pro typ místa a , tak pro typ místa b . A také se pro hot spot používá, když je napětí získáváno extrapolací povrchu. Poté se ještě liší hodnoty korekčního exponentu podle toho, zda se vyhodnocuje životnost pro kruhové trubkové spoje, nebo jiné profily. Pro zmíněné trubkové spoje, se pro typ a doporučuje $n = 0,4$ a pro typ b $n = 0,1$. Rovněž se korekční součinitel používá i pro nominální napětí. [5]

Pro stanovení efektivní tloušťky t_{eff} je potřeba rozlišovat následující případy závislosti délky ku tloušťce plechu. [5]

- $\frac{L}{t} > 2$, pak $t_{eff} = t$
- $\frac{L}{t} \leq 2$, pak $t_{eff} = 0.5 \cdot L$

Tabulka 3 Exponenty korekce tloušťky [5]

Společná kategorie	Stav	N
Křížové spoje, příčné T – spoje, desky s příčným uchycením, konce podélných výztuh	jako svařené	0.3
Křížové spoje, příčné T – spoje, desky s příčnými nástavci, konce podélných výztuh	upravované	0.2
Příčné tupé svary	jako svařené	0.2
Tupé svary broušené, základní materiál, podélné svary nebo připevnění k okrajům desky	žádné	0.1



Obrázek 34 Definice vzdálenosti špiček [5]

5.5. Vliv středního napětí

Pro efektivní poměry napětí, založené na zohlednění působících i zbytkových napětí, platí $R < 0,5$, kde R je koeficient nesouměrnosti, a lze uvažovat součinitel zvýšení únavy $f(R)$ vynásobením třídy únavy klasifikovaných detailů koeficientem $f(R)$. Tento součinitel závisí na úrovni a směru zbytkových napětí. Zde se zohledňují všechny druhy napětí, které se při únavové analýze neuvažují a které jsou účinné. Během provozního zatížení konstrukce, se považují za zbytková napětí. Pokud nejsou k dispozici spolehlivé informace o zbytkových napětí, doporučuje se použít součinitel zesílení $f(R) = 1$. Ostatní součinitele by měly být použity pouze v případě, pokud jsou k dispozici spolehlivé informace nebo odhady úrovně zbytkového napětí.

Při určení vhodného typu součinitele zesílení, se rozlišují následující kategorie.

- I. Nesvařený základní materiál a svařované výrobky se zanedbatelnými zbytkovými napětími ($< 0,2 \cdot f_y$), svařované součásti odlehčené od napětí, u nichž se projevují účinky omezení nebo sekundární napětí. Napětí byly při analýze zohledněny. Žádná omezení při montáži.

$$\begin{aligned} f(R) &= 1,6 && \text{pro } R < -1 \text{ nebo zcela v tlaku} \\ f(R) &= -0,4 \cdot R + 1,2 && \text{pro } -1 \leq R \leq 0,5 \\ f(R) &= 1 && \text{pro } R > 0,5 \end{aligned} \quad (5.8)$$

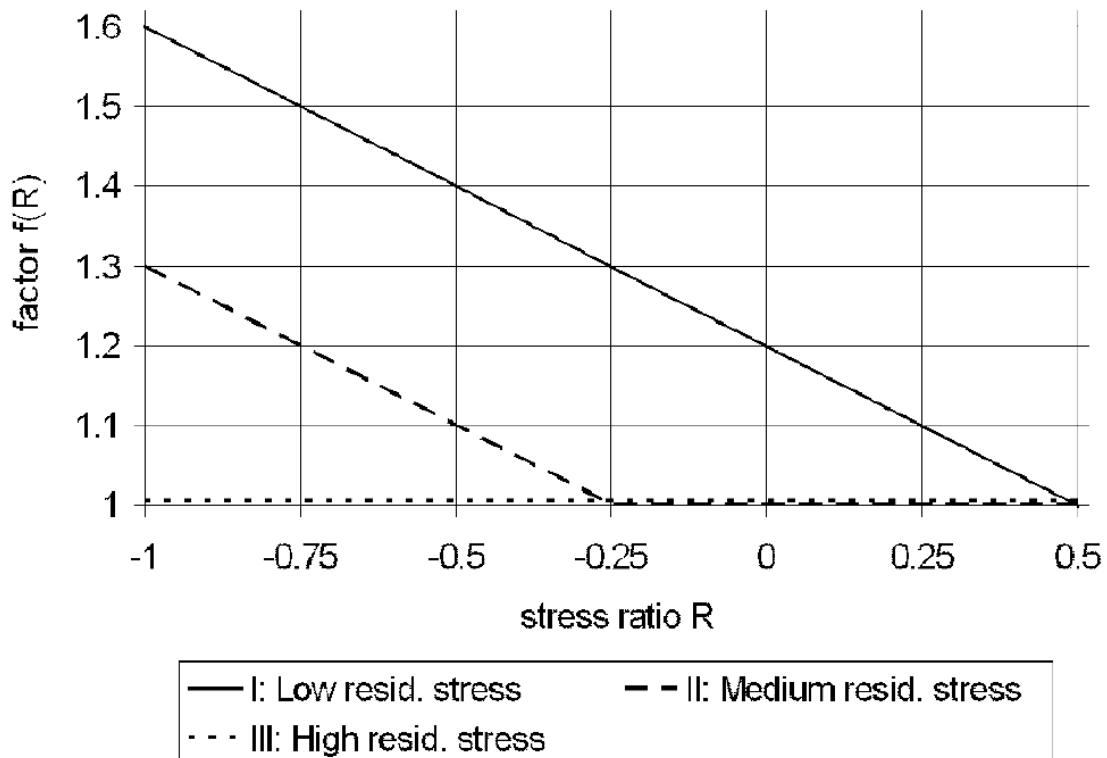
- II. Tenkostěnné jednoduché konstrukční prvky malého měřítka obsahující krátké svary. Dilce nebo součásti obsahující tepelně řezané hrany. Žádná omezení při montáži.

$$\begin{aligned} f(R) &= 1,3 && \text{pro } R < -1 \text{ nebo zcela v tlaku} \\ f(R) &= -0,4 \cdot R + 0,9 && \text{pro } -1 \leq R \leq -0,25 \\ f(R) &= 1 && \text{pro } R > -0,25 \end{aligned} \quad (5.9)$$

- III. Složité dvourozměrné nebo trojrozměrné svařované součásti, součásti s globálním rozměrem a zbytkovými napětími, silnostěnné součásti. Normální případ pro svařované součásti a konstrukce.

$$f(R) = 1 \quad \text{žádné vylepšení} \quad (5.10)$$

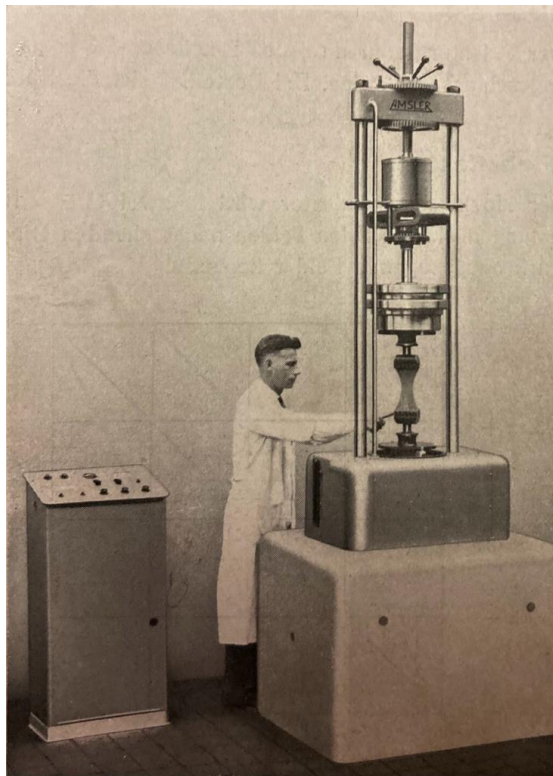
V této souvislosti je třeba poznamenat, že odlehčení napětí ve svařových spojích pravděpodobně nebude funkční. Efektivní a další zbytková napětí mohou vznikat v důsledku nedostatečného uložení při montáži spojů, prefabrikovaných svařovaných dílů, posunem opěr nebo z jiných důvodů. Proto se doporučuje, aby hodnoty $f(R) > 1$ byly přijímány pouze u svařovaných spojů, za velmi zvláštních okolností. Na (Obrázek 35) lze vidět vymezení hodnot součinitele zesílení, podle typu kategorie. [5]



Obrázek 35 Vliv středního napětí – součinitel zesílení [5]

6. Laboratorní testování

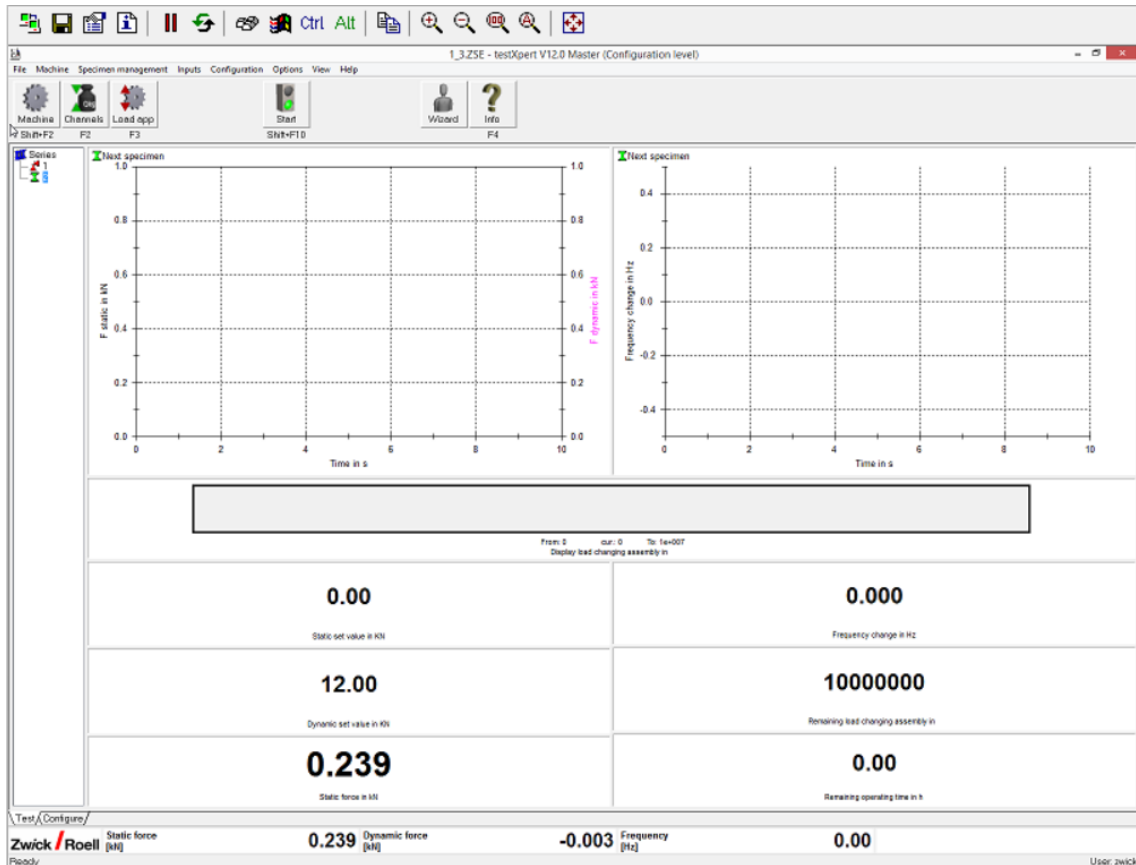
Testování vzorků bylo realizováno v laboratorních prostorách ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, na odboru pružnosti a pevnosti. Vzorky byly testovány na Amslerově vysokofrekvenčním pulzátoru 10 HFP422 (Obrázek 36). Při testování bylo zapotřebí přítomnosti kvalifikované osoby, která bude dohlížet na správnost zacházení se strojem a také vykonávat dozor při průběhu testování. Tohoto úkolu se zhostili Ing. Martin Nesládek, Ph.D. a Ing. Martin Matušů, kteří mi byli po celou dobu testování nápomocni a chtěl bych jim za jejich ochotu poděkovat.



Obrázek 36 Amslerův vysokofrekvenční pulzátor

6.1. Laboratorní vybavení

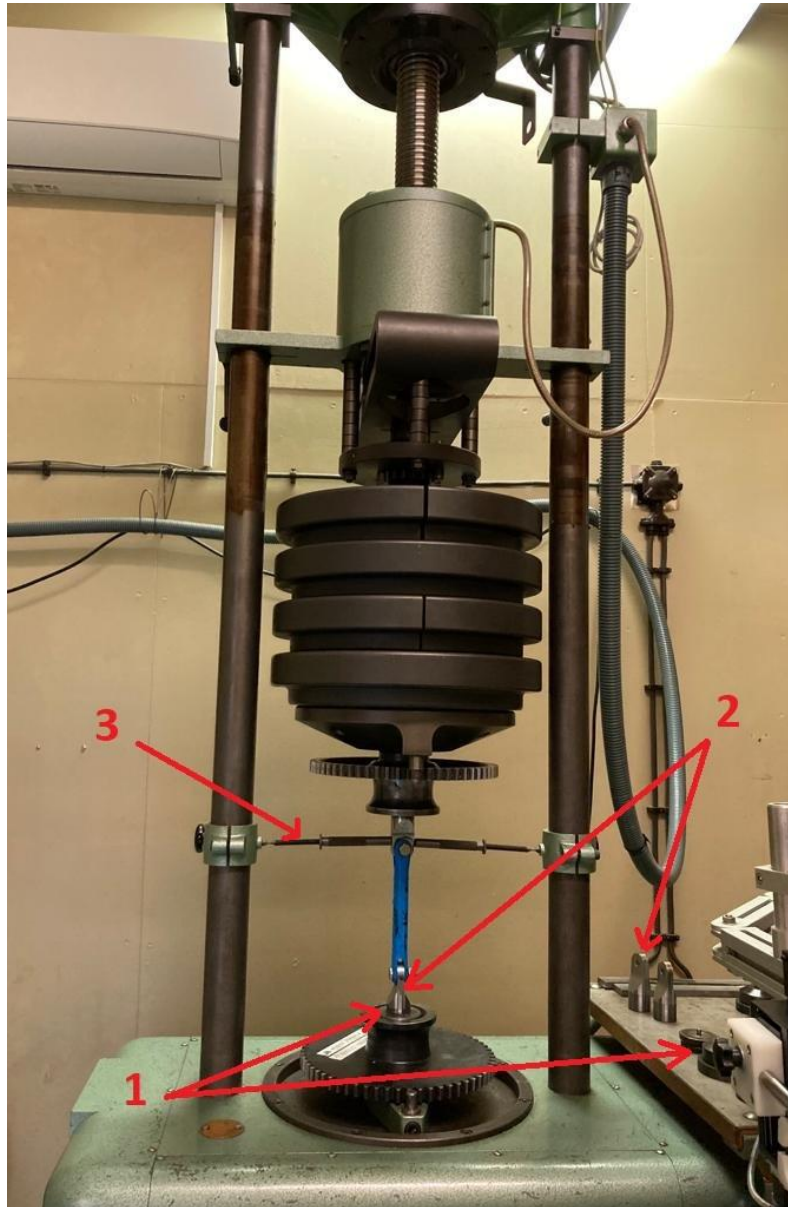
Testovací stroj, Amslerův vysokofrekvenční pulzátor, je umístěn v dřevěné komoře, v laboratorních prostorách ústavu. Umístění ve zmíněné komoře je především z hlediska tlumení zvuků stroje vůči okolí a zamezení vlivů vnějších faktorů, na práci a výsledky stroje. Testovací místnost je klimatizována, aby bylo možné zajistit potřebné klimatické podmínky. Dalším zařízením, které je umístěno v komoře a je nezbytné pro fungování stroje, je stolní počítač zajišťující ovládání a nastavení fungování stroje. Pro nastavení stroje se využívá aplikace ZwickRoell, která je od stejnojmenné firmy a využívá se pro materiálové testování (Obrázek 37).



Obrázek 37 ZwickRoell – aplikace materiálového testování

Součástí laboratoře jsou různé komponenty, které se využívají k upevnění vzorků ke stroji, termokamera a další předměty využívající se při různých typech testování. Při mém testování byly použity dále zmíněné komponenty (Obrázek 38).

- 1) Upínací kameny
 - Využívají se k upevnění závěsů pomocí závitu
 - Zajištění v ozubeném kole pomocí materiálové rozdílnosti rozměrů
- 2) Závěsné redukce
 - Využívají se pro upevnění vzorku do stroje
 - Pro zajištění s vidlicí byly použity čepy, korunové matice a závlačky
- 3) Výstužné trubice
 - Byly použity pro ztlumení vibrací stroje při zatěžování vzorků



Obrázek 38 Amslerův vysokofrekvenční pulzátor – komponenty

Pracovní pohyb stroje je pouze ve svislém směru a lze se pohybovat rychloposuvem, nebo posuvem s malým záběrem motoru, který řídí pohyb. Jednotlivé části stroje jsou popsány čísly a lze je vidět na (Obrázek 39). Motor (1) pomocí ozubeného řemenu pohání ozubené kolo (2), které uvádí do pohybu pracovní část zvanou ladící závaží (3). Ladící závaží se pohybuje po pohybovém šroubu (4) a k zajištění vedení stálého neměnného směru slouží vodící tyče (5). Vodící tyče jsou upevněny k protihmotě neboli základu (6). K upínání zkoušených předmětů se využívají upínací hlavy (7), které jsou jak na protihmotě, tak i na ladícím závaží. Do upínacích hlav se dále upínají upínací kameny (8), které slouží k uchycení zmíněných testovaných předmětů.



Obrázek 39 Amslerův vysokofrekvenční pulzátor – popis stroje

6.2. Testované vzorky

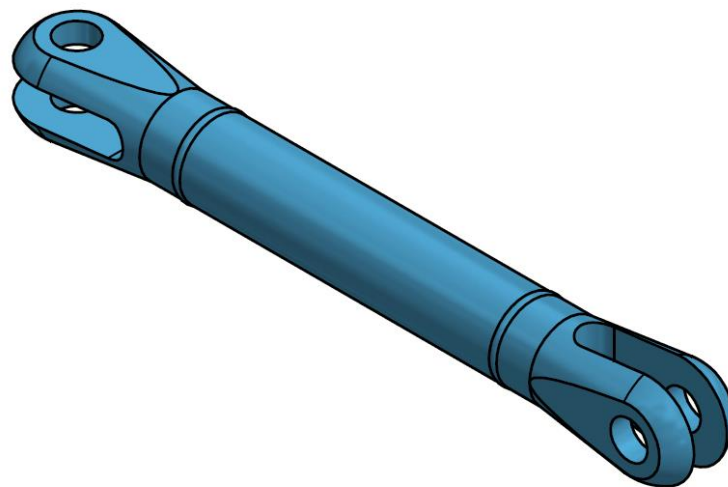
Pro testování byly použity vzorky jedné z částí motorového lože letounu L 410, jak již bylo zmíněno v kapitole 3. Vzorky pro testování. Bylo dodáno celkem 54 vzorků, ovšem pouze 21 vzorků bylo bez rentgenem nalezených svarových vad a bylo možné je použít pro první fázi testování a jejich výsledky použít do závěrečné práce a poskytnout je firmě Aircraft Industries pro hodnocení únavových vlastností tenkostěnných svařovaných konstrukcí použitých u motorového lože v rámci výzkumně vývojových aktivit projektu CK02000025 Pokročilé svařované konstrukce pro zvýšení bezpečnosti v letectví. Podoba vzorku je uvedena na (Obrázek 40). Materiál vzorků byla ocel L-CM3.3 a po svaření byly vzorky tepelně upraveny na L-CM3.7, jejíž chemické vlastnosti jsou v (Tabulka 4) a mechanické vlastnosti v (Tabulka 5).

Tabulka 4 Chemické vlastnosti oceli L-CM3.7 [16]

Chemické vlastnosti oceli L-CM3.3						
C [%]	Cr [%]	Mn [%]	Mo [%]	P [%]	Si [%]	S [%]
0,22 – 0,29	0,9 – 1,2	0,5 – 0,8	0,15 – 0,25	0,03	0,17 – 0,37	0,03

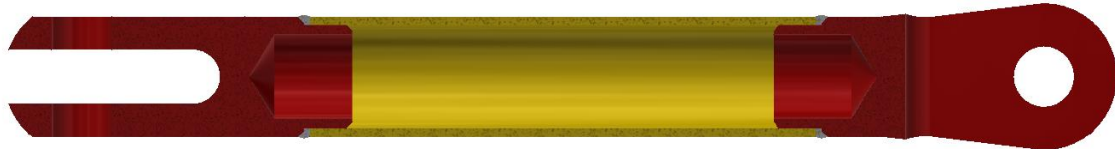
Tabulka 5 Mechanické vlastnosti oceli L-CM3.7 [16]

Mechanické vlastnosti	
E [GPa]	205
Rm [MPa]	880
Re [MPa]	690
HRC	48
A [%]	12
ρ [g/cm ³]	7,85



Obrázek 40 Vzorek pro testování 2

Testovaný vzorek je složen ze 3 částí (Obrázek 41). Tvoří jej tenkostěnná trubka s tloušťkou stěn 1,5 mm a vidlice, které jsou přivařeny tupým svarem. Vidlice jsou vůči sobě natočeny. U vymodelovaného vzorku jsou vidlice vůči sobě natočeny pouze o 90°. Avšak u reálných vzorků je vzájemné natočení vidlic odlišné, a kromě natočení o 90°, jsou vidlice vůči sobě natočeny o dalších 8°, což je dáno výkresem (Obrázek 42). Vidlice byly svařovány v přípravku. Při upínání nebo vyjímání vzorků, musely být závěsné redukce (Obrázek 43), do kterých se vzorky upínaly, povolovány, aby se zajistila dostatečná vůle při dosednutí redukci vůči vzorku a naopak.



Obrázek 41 Vzorek pro testování 3 - poloviční řez

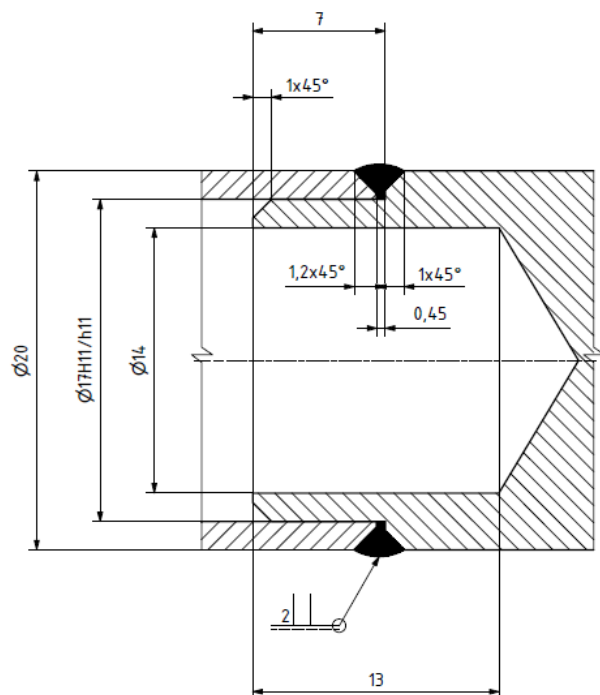


Obrázek 42 Testovaný vzorek – natočení vidlic

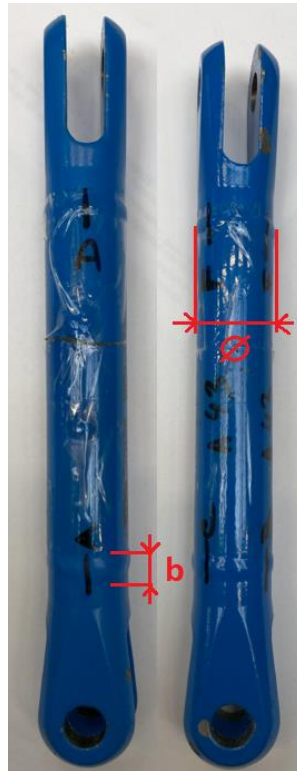


Obrázek 43 Závěsná redukce varianta 2

Pro svaření testovaných vzorků bylo dáno, dle výkresu, že velikost svaru by měla být 2 mm (Obrázek 44). Ovšem, při zahájení testování bylo zjištěno, že vzorky mají rozdílné velikosti svarů. Z tohoto důvodu byly jednotlivé rozměry vzorků, konkrétně šířka svaru a průměr přes svar (Obrázek 45), změřeny a zaznamenány do tabulky. Pro ukázkou rozdílností rozměrů vzorků jsou v (Tabulka 6) zaznamenány změřené hodnoty, pro část vybraných vzorků.



Obrázek 44 Vzorek pro testování – výkres



Obrázek 45 Testovaný vzorek – popis vzorku

Na (Obrázek 45) lze vidět popisky vzorků *A, B, C, D, E, F*, které představují místa, na kterých došlo k rentgenování oblastí svarů. Rentgenování se realizovalo z důvodu určení kvality vytvořených svarů (Obrázek 46). Taktéž bylo na daných popiscích provedeno zmíněné přeměření šířky svaru a průměru vzorku. Není předpoklad, že vyznačené popisky jsou umístěny na všech vzorcích na stejném místě, ale pro zachování stejného postupu, bylo tak učiněno.

Tabulka 6 Kontrolní rozměry vzorků

Vzorek	Šířka – b [mm] (A-C)				Šířka – b [mm] (D-F)				Průměr – Ø [mm] (A-C)				Průměr – Ø [mm] (D-F)			
	A	B	C	xi	D	E	F	xi	A	B	C	xi	D	E	F	xi
48	5,31	5,07	5,2	5,19	5,81	5,75	5,51	5,69	21	21	21,2	21,03	20,8	21,2	21,1	21,01
46	6,23	5,92	5,86	6,00	5,91	6,13	6,98	6,34	20,6	20,6	20,6	20,60	20,5	20,8	20,6	20,62
18	5,9	5,89	5,92	5,90	5,84	5,88	5,82	5,85	20,4	20,9	21	20,75	21,6	21,5	21,5	21,52
27	5,28	5,83	6,33	5,81	5,93	5,07	5,96	5,65	20,9	20,5	20,6	20,69	20,9	20,8	20,6	20,75
30	5,6	5,92	6,41	5,98	5,7	5,28	6,1	5,69	21,5	21,4	21,7	21,52	21,4	20,9	21,3	21,19
41	6,26	6,45	6,42	6,38	6,01	6,1	6,09	6,07	21,2	21,4	21,4	21,31	21	21,3	20,6	20,96
44	5,57	6,25	5,74	5,85	5,82	5,52	6,18	5,84	21,1	21	20,9	20,98	21,2	21,4	21,1	21,23
26	6,95	6,35	6,26	6,52	6,39	5,57	6,41	6,12	21	21,2	21	21,07	20,4	20,8	20,7	20,63
11	5,35	5,79	5,54	5,56	4,8	5,19	4,79	4,93	21,1	21	21,1	21,08	21,4	21,1	20,8	21,11
13	5,83	5,22	5,08	5,38	5,08	5,49	5,52	5,36	21	20,6	20,9	20,81	20,9	20,9	21,2	20,99
17	5,23	5,24	5,12	5,20	4,73	5,56	5,6	5,30	21	20,9	21,1	20,99	21	21,3	20,8	21,00
2	6,48	6,43	6,59	6,50	5,75	6,17	5,93	5,95	21,1	21	21	21,04	20,7	20,6	20,6	20,64
53	6,07	6,24	5,7	6,00	6,37	6,08	6,85	6,43	21,2	21,4	21,5	21,35	21,6	21,3	21,3	21,40
51	5,05	6,14	5,55	5,58	5,64	6,18	5,56	5,79	20,9	21,1	21,1	21,02	21,2	21,1	21,3	21,21

Dále je možné vidět na (Obrázek 45), že vzorky jsou pokryty téměř po celém povrchu, krom vidlic, izolepou. Ta je na vzorcích umístěna z důvodu ochrany popisků, aby nedošlo ke smazání nebo odloupenutí barvy. Popisky byly důležité taktéž pro identifikaci a popis vzniku a šíření trhlin, které vznikly při cyklickém zatěžování. Po dokončení testování vzorků, byl povrch vzorků od izolepy vyčištěn a popisky byly zaneseny na jiná místa, kde přelepení popisků nezasahovalo do testovaných částí.



Obrázek 46 Testovaný vzorek – rentgen

6.3. Průběh testování

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tak vzorky byly dodány od firmy Aircraft Industries v rámci výzkumně vývojových aktivit projektu CK02000025. Rovněž bylo zmíněno na konci minulé kapitoly, že vzorky byly pokryty z ochranných důvodů izolepou, tak bylo potřeba i s tímto faktem pracovat. Jelikož kvalita nalepení izolepy nebyla hlídána, tudíž každý vzorek měl nalepení izolepy odlišně realizován a rozměry, konkrétně průměr, byly u každého vzorku rozdílné. Z tohoto důvodu bylo potřeba zaznamenat hodnoty průměrů vzorků, aby bylo zřejmé, jaké přesné rozměry vzorky mají.

Pro každý vzorek byly změřeny 3 hodnoty, ze kterých byla vyvozena průměrná hodnota (Tabulka 7). Měření bylo provedeno posuvným digitálním měřidlem a místa měření odpovídali již zmíněným označením vzorků (Obrázek 45), tedy místa A, B, C, nebo D, E, F. Po změření se s daty již nepracovalo a jejich význam byl pouze informativní, aby byl vidět rozdíl u jednotlivých vzorků.

V první fázi testování bylo vybráno 21 vzorků, které neobsahovaly žádné poruchy ve svarech. Ve druhé fázi bylo testováno 7 vzorků, s nepatrnými poruchami v oblasti svarů. Při přípravě na testování, bylo vždy potřeba řádně promazat jednotlivé prvky (redukce, čepy, vidlice vzorku) vazelínou, která zajišťovala odpor proti přehřívání prvků při zatížení, konkrétně čepu v kontaktu se vzorkem a vzorku v kontaktu s redukcí, taktéž vazelína zajišťovala menší opotřebení jednotlivých prvků vlivem tření.

Tabulka 7 Měřené průměry vzorků

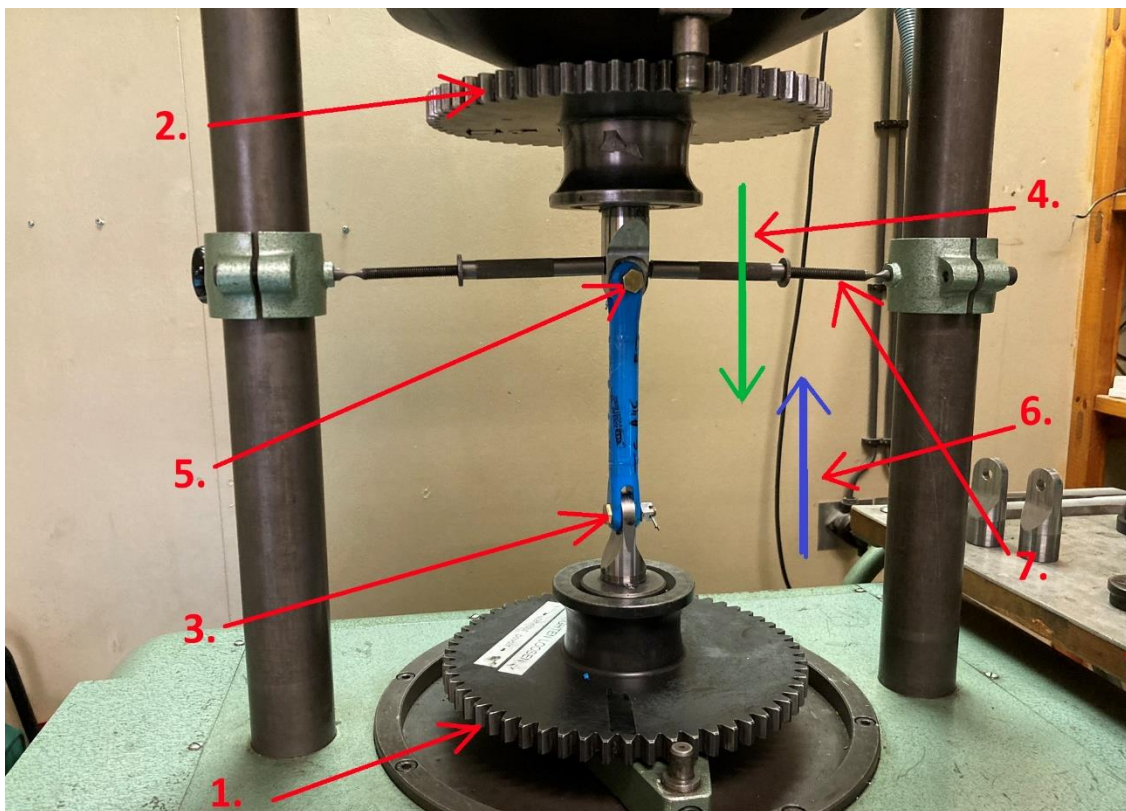
Vzorek	D1 [mm]	D2 [mm]	D3 [mm]	Di [mm]
2	20,51	20,51	20,38	20,47
3	20,46	20,5	20,52	20,49
11	20,47	20,52	20,57	20,52
12	20,34	20,31	20,29	20,31
13	20,37	20,48	20,52	20,46
15	20,47	20,49	20,47	20,48
16	20,45	20,52	20,4	20,46
17	20,3	20,37	20,46	20,38
18	20,27	20,41	20,46	20,38
19	20,4	20,45	20,39	20,41
23	20,3	20,41	20,38	20,36
26	20,39	20,25	20,31	20,32
27	20,55	20,47	20,39	20,47
28	20,74	20,81	20,61	20,72
30	20,34	20,32	20,35	20,34
32	20,75	20,69	20,71	20,72
33	20,22	20,31	20,19	20,24
34	20,56	20,46	20,57	20,53
38	20,53	20,37	20,36	20,42
41	20,46	20,56	20,63	20,55
43	20,3	20,42	20,36	20,36
44	20,31	20,3	20,46	20,36
45	20,18	20,24	20,44	20,29
46	20,26	20,32	20,24	20,27
47	20,39	20,41	20,52	20,44
48	20,22	20,36	20,22	20,27
51	20,4	20,37	20,36	20,38
53	20,46	20,61	20,71	20,59

Jednotlivé úkony, které bylo potřeba postupně a v určitém pořadí vykonávat, jsou zobrazeny na (Obrázek 47) a popsány níže.

- 1) Utažení spodní upínací hlavy, čímž se zajistí taktéž nepohyblivost redukce.
- 2) Povolení horní upínací hlavy, aby bylo možné manipulovat s redukcí a natáčet jí dle potřeby. Zajištění dostatečného odjetí ladícího závaží, aby byl prostor pro vložení vzorku do redukci.
- 3) Vložení vzorku do spodní redukce, zajištění čepem a korunové matice se závlačkou.
- 4) Přiblížení ladícího závaží ke vzorku do takové míry, aby bylo možné vložit čep do děr vidlic vzorku i redukce.
- 5) Zajištění vzorku čepem, korunovou maticí a závlačkou.

- 6) Předepnutí vzorku odjetím do horní pozice. Pohyb byl minimální a hodnota předepnutí byla vždy okolo 0,1 kN. Poté bylo potřeba nastavit v aplikaci ZwickRoell zatěžovací síly a následně nastavit zmíněné zatěžovací hodnoty.
- 7) Upevnění výstužných trubic, aby velikost kmitání vzorku při cyklickém zatěžování, bylo co nejmenší. Zajištění nepohyblivosti ladícího závaží pomocí utahovacích páček, umístěných na vodících tyčích.

Po vykonání uvedených činností bylo možné spustit testování.



Obrázek 47 Amslerův vysokofrekvenční pulzátor – popis postupu při nastavení stroje pro testování

Při zahájení testování byly, pro zajištění vzorků, použity čepy se závitem (Obrázek 48), které byly dodány spolu se vzorky. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tak vzorky byly dodány od firmy Aircraft Industries. Čepy byly zajištěny korunovými maticemi M8 DIN 935 02 1411.55 a závlačkami 2 x 22 DIN 94 4781.05. Celkem byly dodány 4 kusy čepů. V průběhu testování jednotlivých vzorků docházelo k poruchám čepů, kde především docházelo k prasknutí čepu (Obrázek 49), nebo jenom k naprasknutí. Bohužel dodané čepy musely být nahrazeny obdobnými šrouby (Obrázek 50), které byly zakoupeny. Konkrétně byly použity po zbytek testování šroub lícovaný inbus ISO 7379 M8 f9 10x20-12.9 a pro zajištění čepu ve vidlici byly použity kontra matky s podložkami. Také v případě těchto šroubů došlo k porušení, ale již to nemělo výraznější vliv na testování. U těchto šroubů došlo rovněž k výměně způsobené ohnutím šroubů, což zhoršilo realizaci spoje.



Obrázek 48 Dodaný čep – materiál L-CM3.7 – již opotřebované kusy

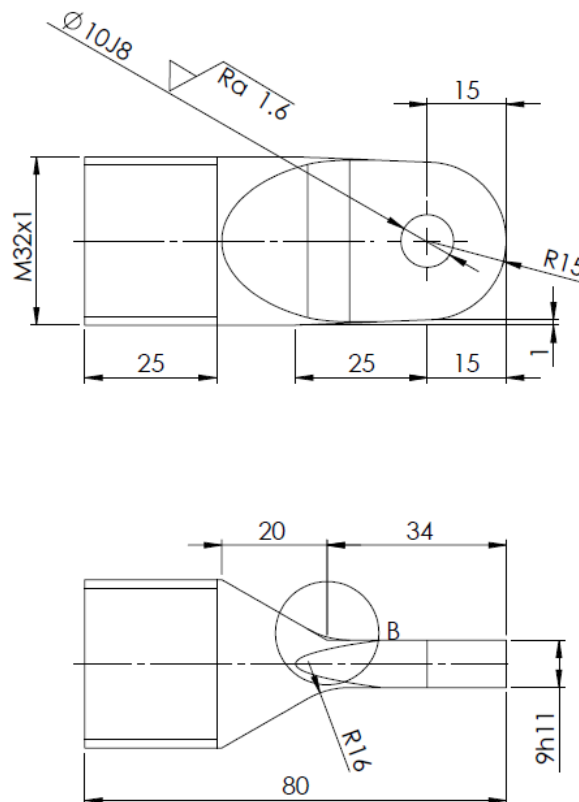


Obrázek 49 Dodaný čep – prasklina



Obrázek 50 Šroub lícovaný

Podobné komplikace nastaly také u závěsných redukci, které sloužily pro upevnění vzorku v upínací hlavě. Při zahájení testování byly použity závěsné redukce (Obrázek 51), které byly navrženy jako první varianta redukci. Materiál redukci byl L-ROI.6 s mezí kluzu 735 MPa a s mezí pevnosti 930 MPa. Redukce byly rovněž vyrobeny v Aircraft Industries a doručeny byly 2 páry. Podle (Tabulka 8) lze vidět, že zvolený návrh závěsných redukci nebyl optimální a příliš mnoho počtu cyklů nevydržel. Ze čtyř použitých redukci byly během testování porušeny 3 redukce. Největší vliv na vznik trhlin (Obrázek 52) byl přisouzen, poddimenzované konstrukci redukce.



Obrázek 51 Závěsná redukce – varianta 1 – výkres

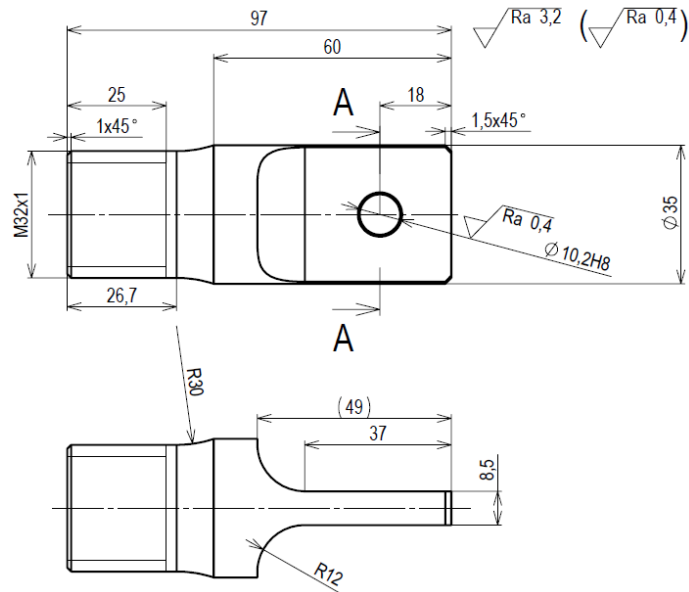
Tabulka 8 Počty cyklů – první varianta redukci – utržené redukce

Utržené redukce	Počet odzkoušených vzorků	Cykly součet	Cykly celkem uvedených vzorků	Cykly celkem první varianty redukci
1	3,45	92646 (vz_3) + 51493 (vz_45)	144139	829907
2	3,45,19	92646 (vz_3) + 54894 (vz_45) + 47070 (vz_19)	194610	
3	19,34,23	78844 (vz_19) + 189876 (vz_34) + 222438 (vz_23)	491158	



Obrázek 52 Závěsné redukce – varianta 1 - zobrazení poškození

V reakci na vzniklé poškození redukci varianty jedna, byla navržena druhá varianta (Obrázek 53), která předešla možnosti poddimenzování a byl změněn tvar konstrukce a byla upravena kvalita povrchu díry. Pro tyto redukce byl použit materiál 4130 QT s mezí kluzu 1002 MPa a mezí pevnosti 1097 MPa. U druhé varianty závěsných redukci nedošlo ke vzniku trhlin ani jiných závažných typů poškození, pouze k otlacení oblastí děr (Obrázek 54). Z tohoto důvodu došlo k výměně jednoho páru redukci. Dohromady byly použity dva páry redukci druhé varianty a počty cyklů které vykonaly, lze vidět v (Tabulka 9).



Obrázek 53 Závěsné redukce – varianta 2 – výkres



Obrázek 54 Závěsné redukce – varianta 2 - zobrazení poškození



Tabulka 9 Počty cyklů – druhé varianta redukcí

Druhý typ redukce	Redukce	Vzorek	Počet cyklů	Fa [N]	Fs [N]	
	1. pár redukcí	28	810555	8500	10389	
		48	1191815	7850	9594	
		32	2000000	6500	7944	
		32B	29057	20000	24444	
		46	3436816	7200	8800	
		51	253606	9800	29400	
		53	60508	11400	34200	
		2	98338	13100	39300	
		13	424710	8500	25500	
		18	204858	9800	11978	
		26	70510	17000	20778	
	celkový počet cyklů		8580773			
	2. pár redukcí	30	537084	8500	10389	
		41	248686	9800	11978	
		17	78385	15000	18333	
		11	11204043	6500	7944	
		11B	16312	23500	28722	
		27	42357	20000	24444	
		44	182391	11400	13933	
		16	637815	8500	10389	
	38	37969	17000	20778		
	12	438388	8500	10389		
	15	103541	12500	15278		
	33	34685	17000	20778		
	43	223147	8500	10389		
	47	44612	17000	20778		
celkový počet cyklů		13829415				
Cykly celkem druhé varianty redukcí			22410188			

Zmíněné počty cyklů v (Tabulka 9) jsou uvedeny pouze informativně. Během testování byly použity celkem 4 páry závěsných redukcí, 4 čepy se 4 korunovými maticemi a 4 závlačkami a 8 lícovaných šroubů se 4 maticemi pro zajištění šroubu a 5 podložkami.

6.4. Data získaná z testování

Během testování se vzorky měřily pro dva různé typy hladin R . R představuje koeficient nesouměrnosti a je dán podílem dolního napětí, kde dolní napětí představuje rozdíl středního napětí a amplitudy a horního napětí, kde horní napětí je dáno součtem středního napětí a amplitudy. Při testování byly dány hladiny $R = 0.1$ a $R = 0.5$. Pro obě hladiny byly zadány jednotlivé hodnoty zatěžování, které se lišily střední hodnotou napětí (F_s), které odpovídala příslušná síla a amplitudovým napětím (F_a), kterému odpovídala amplitudová velikost síly.

Pro hladinu $R = 0.1$ byly zadány hodnoty a testovaly se vzorky jak bez rentgenem nalezené poruchy svarů (Tabulka 10), tak i s rentgenem nalezenými poruchami svarů (Tabulka 11). Vzorků bez poruchy svarů bylo testováno 17 a z toho dva měly testovaný run out. Run out představuje dozkoušení vzorku, který odcykloval určitý počet cyklů, v tomto případě 2 000 000 cyklů a nedojde během té doby k porušení vzorku, tedy zastavení zkoušky. V (Tabulka 12) lze vidět výsledné hodnoty získaných cyklů, dosažené frekvence při jednotlivých hodnotách zatížení a také jednotlivá data, kdy se testování uskutečnilo, pro hladinu $R = 0.1$, pro vzorky bez svarových vad. Pro hladinu $R = 0.1$, pro vzorky se svarovými vadami, bylo testováno 7 vzorků a lze vidět výsledky v (Tabulka 13).

Tabulka 10 Hladina $R = 0.1$ – vzorky bez svarových vad – hodnoty zatěžování

Vzorek	F_a [N]	F_s [N]
3	15000	18333
45	17000	20778
19	13100	16011
34	11400	13933
23	9800	11978
28	8500	10389
48	7850	9594
32	6500	7944
32B	20000	24444
46	7200	8800
18	9800	11978
30	8500	10389
41	9800	11978
17	15000	18333
26	17000	20778
11	6500	7944
11B	23500	28722
27	20000	24444
44	11400	13933

Tabulka 11 Hladina $R = 0.1$ – vzorky se svarovými vadami – hodnoty zatěžování

Vzorek	Fa [N]	Fs [N]
16	8500	10389
38	17000	20778
12	8500	10389
15	12500	15278
33	17000	20778
43	8500	10389
47	17000	20778

Tabulka 12 Hladina $R = 0.1$ – vzorky bez svarových vad – výsledky testování

Datum	Vzorek	Nf [cykly]	frekvence [Hz]
20.03.2023	3	92646	95
21.03.2023	45	54894	96,7
21.03.2023	19	125914	92,7
21.03.2023	34	189876	92
22.03.2023	23	459732	90,5
05.04.2023	28	810555	92
05.04.2023	48	1191815	91,6
04.04.2023	32	2000000	90,5
11.04.2023	32B	29057	95
06.04.2023	46	3436816	87,9
11.04.2023	18	204858	92
18.04.2023	30	537084	88,1
18.04.2023	41	248686	89,9
14.04.2023	17	78385	92,4
12.04.2023	26	70510	92,7
14.04.2023	11	11204043	88,9
18.04.2023	11B	16312	95
18.04.2023	27	42357	93,6
18.04.2023	44	182391	91,2

Tabulka 13 Hladina $R = 0.1$ – vzorky se svarovými vadami – výsledky testování

Datum	Vzorek	Nf [cykly]	frekvence [Hz]
20.04.2023	16	637815	88,9
19.04.2023	38	37969	92,2
20.04.2023	12	438388	89,2
20.04.2023	15	103541	90,4
19.04.2023	33	34685	92,6
20.04.2023	43	223147	89,4
20.04.2023	47	44612	91,7



Po skončení zkoušky, bylo potřeba vyhodnotit stav vzorku. Zda došlo k trhlině v oblasti svaru nebo v jiné části vzorku, případně kde vznikla iniciace trhliny a v jakých místech se trhlina vyskytovala. Pro určení iniciace a polohy trhliny byly použity značky na vzorku *A, B, C, D, E, F* (Obrázek 55). Pro hladinu $R = 0.1$, pro vzorky bez rentgenem nalezených svarových vad, bylo úspěšně odzkoušeno 12 vzorků a 5 vzorků bylo poškozeno ve vidlici vzorku (Obrázek 56). Veškeré poznámky k těmto vzorkům jsou v (Tabulka 14). Pro hladinu $R = 0.1$, pro vzorky s rentgenem nalezenými svarovými vadami, byl úspěšně odzkoušen 1 vzorek, 4 vzorky měly poruchu ve vidlici vzorku a 2 vzorky byly porušeny v bodovém svaru. Poznámky pro tyto vzorky lze vidět v (Tabulka 15).

Tabulka 14 Hladina $R = 0.1$ – vzorky bez svarových vad – stav vzorků

Vzorek	Iniciace trhliny	Poloha čela trhliny	Poznámky
3	A-C	C-B z jedné strany, A	Porušení závěsné redukce
45	F	D, E	Porušení závěsné redukce
19	E	F-D	Porušení závěsné redukce
34	D	E-F	Porušení závěsné redukce
23	prasklina ve vidlici		Porušení závěsné redukce
28	D-B	D-E	
48	D-F	D-F	
32			
32B	prasklina v celém řezu svaru		
46	B-C	A-B, A-C	
18	prasklina ve vidlici		
30	prasklina v celém řezu svaru		
41	F	D-E	
17	porušení v celém svaru		
26	prasklina ve vidlici		
11			při 3382779 cyklech prasknul čep
11B	prasklina ve vidlici		neúspěšné dotržení
27	prasklina ve vidlici		
44	A-C	B-A, B-C	

Tabulka 15 Hladina $R = 0.1$ – vzorky se svarovými vadami – stav vzorků

Vzorek	Iniciace	Poloha čela trhliny	Poznámky
16	A	A-C	
38	prasklina ve vidlici		prasklina v označení F
12	prasklina ve vidlici		prasklina v označení C
15	prasklina v bodovém svaru		při 91464 prasknul čep
33	prasklina ve vidlici		prasklina v označení B; při zatížení není prasklina viditelná
43	prasklina v bodovém svaru		
47	prasklina ve vidlici		prasklina v označení A-C



Obrázek 55 Testovaný vzorek – popis vzorku



Obrázek 56 Testovaný vzorek – prasklina ve vidlici

Pro hladinu $R = 0.5$ byly zadány hodnoty a testovaly se vzorky bez rentgenem nalezené poruchy svarů. Zkoušky byly realizovány pro 4 vzorky (Tabulka 16). Výsledky zkoušek zmíněných vzorků lze vidět v (Tabulka 17). Výsledkem pro všechny 4 testované vzorky bylo vzniknutí trhliny ve vidlici (Obrázek 56). Takovéto výsledky nebyly žádoucí a ve smyslu realizace testování byly tyto výsledky klasifikovány jako nezdařilé, a tudíž bylo od hladiny $R = 0.5$ odstoupeno a realizovali se pouze zkoušky na hladině $R = 0.1$. Poznámky ke vzorkům jsou v (Tabulka 18).

Tabulka 16 Hladina $R = 0.5$ – vzorky bez svarových vad – hodnoty zatěžování

Vzorek	Fa [N]	Fs [N]
51	9800	29400
53	11400	34200
2	13100	39300
13	8500	25500

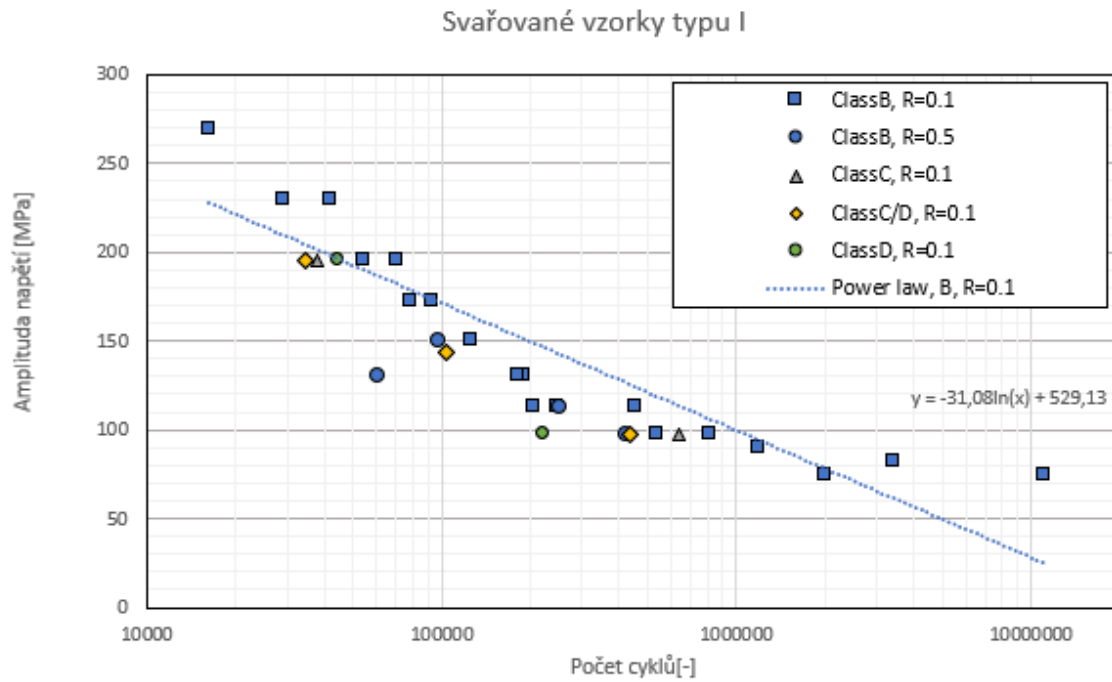
Tabulka 17 Hladina $R = 0.5$ – vzorky bez svarových vad – výsledky testování

Datum	Vzorek	Nf [cycles]	Frekvence [Hz]
11.04.2023	51	253606	96,2
11.04.2023	53	60508	96,1
11.04.2023	2	98338	96,4
12.04.2023	13	424710	94,5

Tabulka 18 Hladina $R = 0.5$ – vzorky bez svarových vad – stav vzorků

Vzorek	Iniciace	Poloha čela trhliny	Poznámky
51	prasklina ve vidlici		neúspěšné dotržení
53	trhlina v odvodušňovacím svaru		prasklé v celém průřezu
2	prasklina ve vidlici		
13	prasklina ve vidlici		

Na (Obrázek 57) můžeme vidět graf pro všechny odzkoušené vzorky. Ve zmíněném grafu jsou zaneseny hodnoty jak pro úspěšně odzkoušené vzorky, tak i pro vzorky s poruchami. Z grafu lze vidět, že jednotlivé typy vzorků, které se rozdělily podle stupně porušení svarů, byly označeny *ClassB*, $R=0.1$, nebo jiným písmenem. Označení typu *B* s modrým čtvercem, bylo použito pro vzorky bez svarových poruch a hladinu $R = 0.1$. Pro vzorky bez svarových poruch s hladinou $R = 0.5$, byly použity značky s modrým kruhem. Označení typu *C*, *C/D* a *D*, bylo použito pro vzorky s hladinou $R = 0.1$, z rentgenu nalezenými vadami ve svaru. Na (Obrázek 58) lze vidět, ve kterých označeních (*A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F*) došlo ke vzniku poruchy svaru a o jaký typ poruchy se jedná. Podle množství a závažnosti poruchy byly vzorky označeny. Pro zjištění, zda se ve svaru vyskytuje porušení, byl použit rentgen (Obrázek 59). Pokud množství a závažnosti poškození byly natolik rozsáhlé, byly vzorky označeny typem *E*. Takto označené vzorky nebyly testovány.



Obrázek 57 Svařované vzorky typu I – graf – zobrazení počtu cyklů

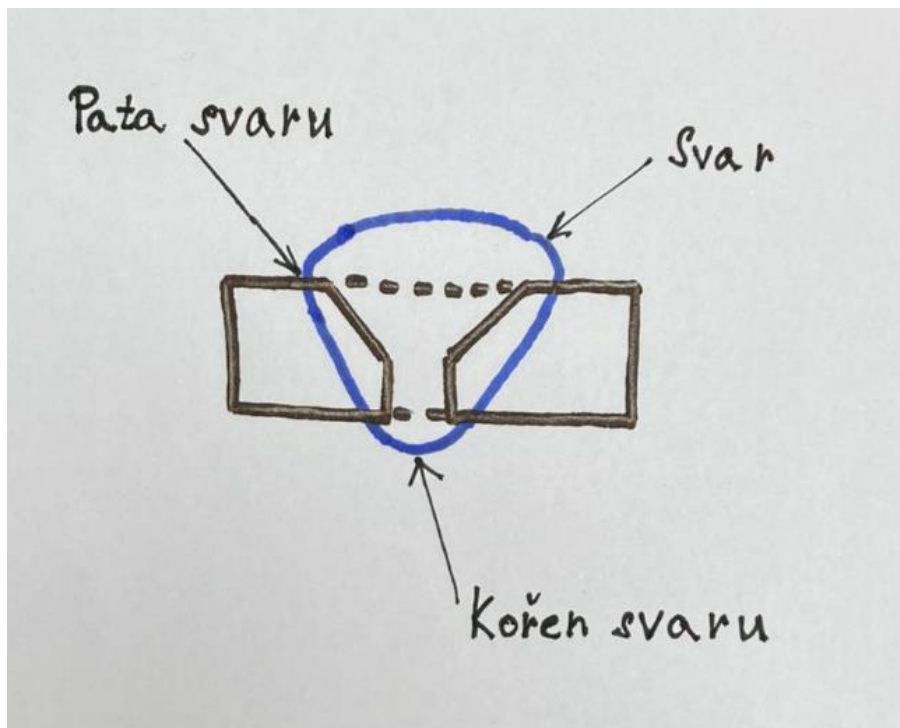
		A	B	C	Závěr levé strany	D	E	F	Závěr pravé strany	Třídy označení	číslo vzorku
51	Green Red									B	20
53	Green Red									B	21
16	Green Red		P0.6		G					C	1
38	Green Red					P0.6			G	C	2
12	Green Red	TWR			R					C-D	1
15	Green Red					P0.5		TWR 4	R	C-D	2
33	Green Red						TWR		R	C-D	3
43	Green Red							P0.4 a P0.5 a P0.7	R	D	1
47	Green Red							P0.3 a P0.7	R	D	2
1	Green Red	IP 17	2x P0.9 IP 5	P1.1 P 1.2 a IP	R	IP 9	P1.7	P1	R	E	1
4	Green Red		IP 3		R	2xP0.7	P1.2	P1 and P0 2xP1.2	R	E	2

Obrázek 58 Svařované vzorky typu I – popis a určení kvality svarů



Obrázek 59 Testovaný vzorek – rentgen

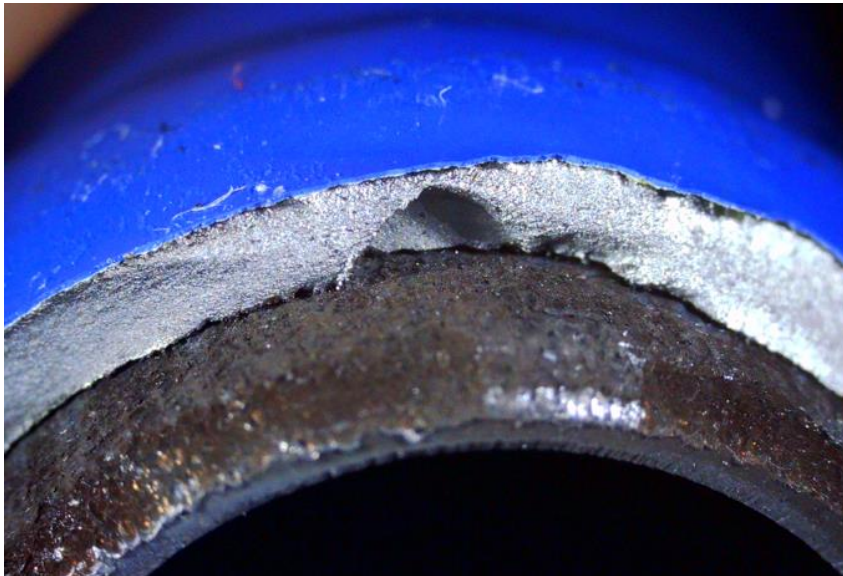
Před zahájením testování byl předpoklad, že iniciace trhliny bude vznikat v patě svaru (Obrázek 60). V průběhu testování a z průběžných výsledků vyplývalo, že iniciace trhliny bude vznikat v kořeni svaru. Proto bylo otestováno 13 vzorků, které nebyly přetrženy při zkoušení cyklickým zatěžováním, aby byl ověřen vznik iniciace trhliny v kořeni svaru. Testování, konkrétně dotržení zmíněných vzorků, pro získání vizuálních výsledků lomových ploch, bylo na universálním stroji TIRA Test 2300, se siloměrem 100 kN. Na (Obrázek 61), (Obrázek 62) a (Obrázek 63) lze vidět výsledky lomových ploch získaných pomocí mikroskopu, které prokazují vznik iniciace v kořeni svaru.



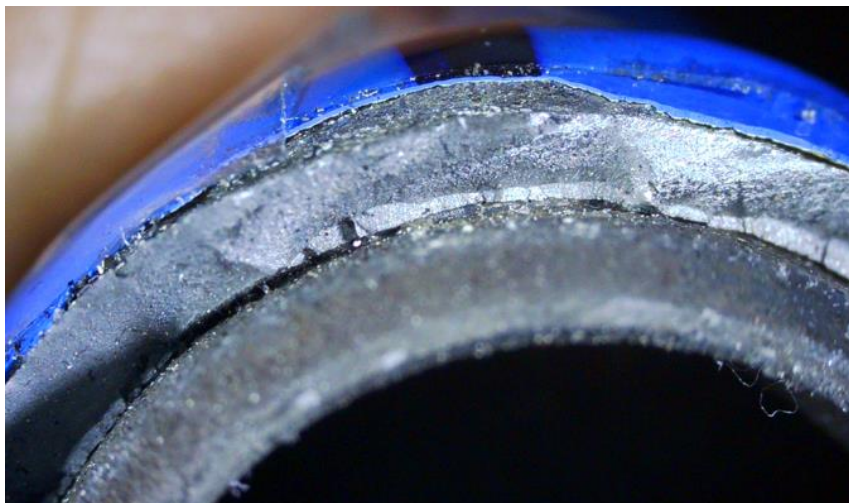
Obrázek 60 Zobrazení tupého svaru



Obrázek 61 Vznik iniciace trhliny – výsledky z mikroskopu - 1



Obrázek 62 Vznik iniciace trhliny – výsledky z mikroskopu - 2



Obrázek 63 Vznik iniciace trhliny – výsledky z mikroskopu - 3

7. Analýza výpočetní metody

V této kapitole byly vyhodnoceny metody pro hodnocení životnosti. Metoda nominálních napětí byla vypočítána bez pomoci výpočetního programu. Dále byly vyhodnoceny metody strukturálního hot spot napětí a metoda efektivního vrubového napětí. Pro tyto dvě metody bylo vyhodnocení realizováno v programu Abaqus 6.14-5.

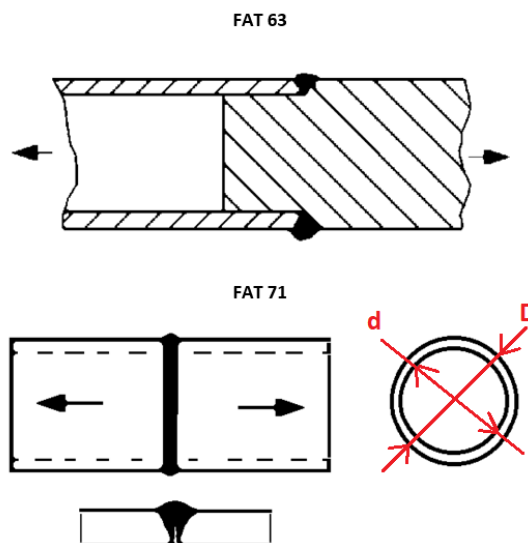
7.1. Metoda nominálních napětí

Pro vyhodnocení metody nominálních napětí a vypočítání počtu cyklů, byla použita rovnice (7.1). Pro výpočet σ_{nom} , byla použita rovnice (7.2). Rozkmit síly ΔF a plocha A byly použity z (Tabulka 19), které byly vytvořeny pro testování vzorků. Plocha A představovala obsah mezikruží trubky viz. (Obrázek 64) a byla vypočítána dle rovnice (7.3). Sklon křivky $m = 4$. Hodnoty FAT byly použity ze zdroje [5], IIW. Pro vybrané profily (Obrázek 64), které mohou být konstrukčně obdobné, jako testované vzorky, byly použity hodnoty FAT 63 a 71.

$$N_{FAT} = \left(\frac{FAT}{\sigma_{nom}} \right)^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad (7.1)$$

$$\sigma_{nom} = \frac{\Delta F}{A} \quad (7.2)$$

$$A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2) \quad (7.3)$$



Obrázek 64 Metoda nominálních napětí – FAT hodnoty [5]



Tabulka 19 Metoda nominálních napětí – hodnoty pro výpočet

Vzorek	D [mm]	d [mm]	A [mm ²]	ΔF [N]
3	20	17	87,1792	30000
45	20	17	87,1792	34000
19	20	17	87,1792	26200
34	20	17	87,1792	22800
23	20	17	87,1792	19600
28	20	17	87,1792	17000
48	20	17	87,1792	15700
32	20	17	87,1792	13000
32B	20	17	87,1792	40000
46	20	17	87,1792	14400
18	20	17	87,1792	19600
30	20	17	87,1792	17000
41	20	17	87,1792	19600
17	20	17	87,1792	30000
26	20	17	87,1792	34000
11	20	17	87,1792	13000
11B	20	17	87,1792	47000
27	20	17	87,1792	40000
44	20	17	87,1792	22800
16	20	17	87,1792	17000
38	20	17	87,1792	34000
12	20	17	87,1792	17000
15	20	17	87,1792	25000
33	20	17	87,1792	34000
43	20	17	87,1792	17000
47	20	17	87,1792	34000
51	20	17	87,1792	19600
53	20	17	87,1792	22800
2	20	17	87,1792	26200
13	20	17	87,1792	17000

Pro zvolené FAT hodnoty, zadaný rozkmit síly a hodnoty plochy, byly vypočteny hodnoty nominálního napětí σ_{nom} a počty cyklů pro FAT 63 a FAT 71. Výsledky lze vidět v (Tabulka 20).

Tabulka 20 Metoda nominálních napětí – vypočítané hodnoty

Vzorek	N_FAT 71 [-]	N_FAT 63 [-]	σ_{nom} [MPa]
3	3624	2247	344
45	2197	1362	390
19	6230	3862	301
34	10864	6734	262
23	19893	12332	225
28	35149	21790	195
48	48319	29953	180
32	102788	63719	149
32B	1147	711	459
46	68275	42325	165
18	19893	12332	225
30	35149	21790	195
41	19893	12332	225
17	3624	2247	344
26	2197	1362	390
11	102788	63719	149
11B	602	373	539
27	1147	711	459
44	10864	6734	262
16	35149	21790	195
38	2197	1362	390
12	35149	21790	195
15	7515	4659	287
33	2197	1362	390
43	35149	21790	195
47	2197	1362	390
51	19893	12332	225
53	10864	6734	262
2	6230	3862	301
13	35149	21790	195

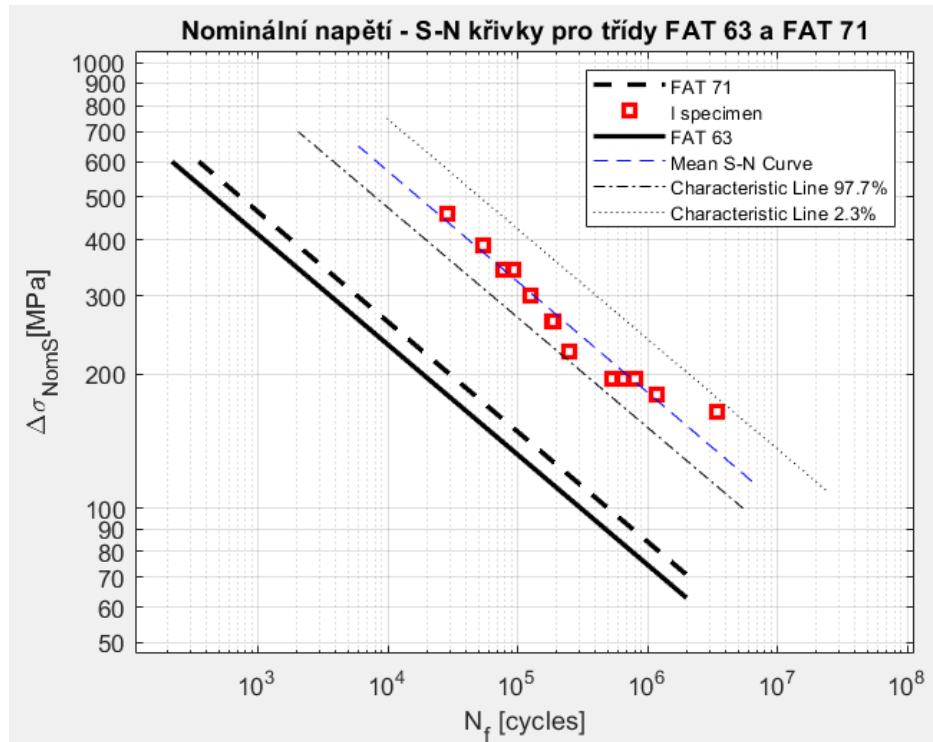
7.1.1. Vyhodnocení metody nominálních napětí

Pro metodu nominálních napětí, byly vytvořeny únavové S-N křivky. Pro vytvoření bylo potřeba nominální napětí σ_{nom} a počty cyklů N_f , jednotlivých vzorků. Hodnoty lze vidět v (Tabulka 21). Ve zmíněné tabulce lze vidět zvýrazněné hodnoty, které zobrazují hodnoty otestovaných vzorků, které byly úspěšně porušeny ve svaru a byly zaneseny do S-N křivky.

Tabulka 21 Metoda nominálních napětí – vypočítané hodnoty – hodnoty pro únavové S-N křivky

Vzorek	Nf [cykly]	σ_{nom} [MPa]
3	92646	344
45	54894	390
19	125914	301
34	189876	262
23	459732	225
28	810555	195
48	1191815	180
32	2000000	149
32B	29057	459
46	3436816	165
18	204858	225
30	537084	195
41	248686	225
17	78385	344
26	70510	390
11	11204043	149
11B	16312	539
27	42357	459
44	182391	262
16	637815	195
38	37969	390
12	438388	195
15	103541	287
33	34685	390
43	223147	195
47	44612	390
51	253606	225
53	60508	262
2	98338	301
13	424710	195

Na (Obrázek 65) lze vidět únavové S-N křivky pro nominální napětí s třídami FAT 63 a FAT 71. Obě hodnoty byly vyhodnoceny pouze pro první hlavní napětí.



Obrázek 65 Metoda nominálních napětí – S-N křivky pro třídy FAT 63 a FAT 71

7.2. Metoda strukturálních hot spot napětí

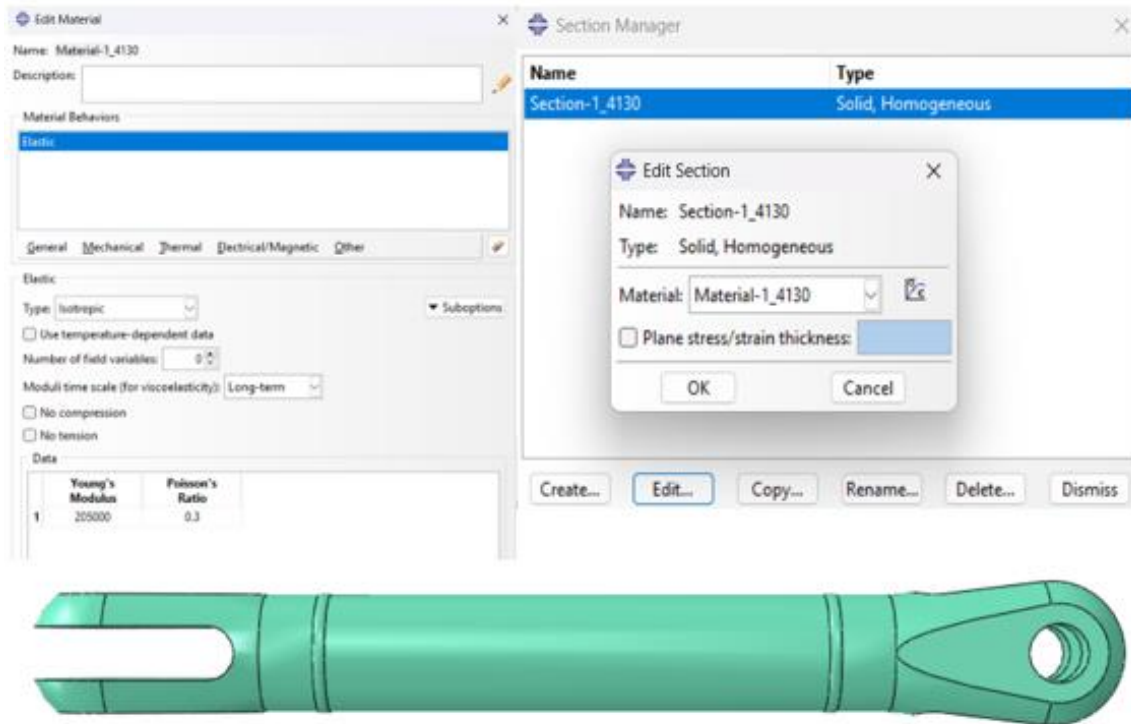
7.2.1. Příprava pro analýzu MKP

Pro určení hot spot napětí byla provedena analýza pomocí MKP. Nejprve byl vymodelován vzorek v aplikaci Autodesk Inventor (Obrázek 66) a naimportován do programu Abaqus 6.14-5, ve formátu binární soubor parasolid.



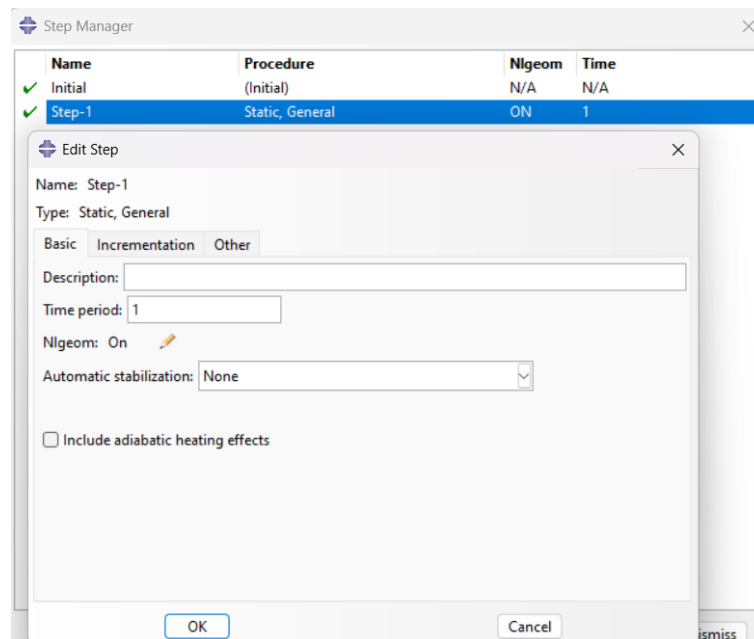
Obrázek 66 Metoda strukturálních hot spot napětí – příprava vzorku v Abaqusu

Pro realizaci analýzy, bylo potřeba nejprve nastavit jednotlivé parametry, aby mohla být analýza úspěšně provedena. Prvním krokem bylo definování materiálu, který byl následně pomocí sekce, přiřazen modelu vzorku (Obrázek 67).



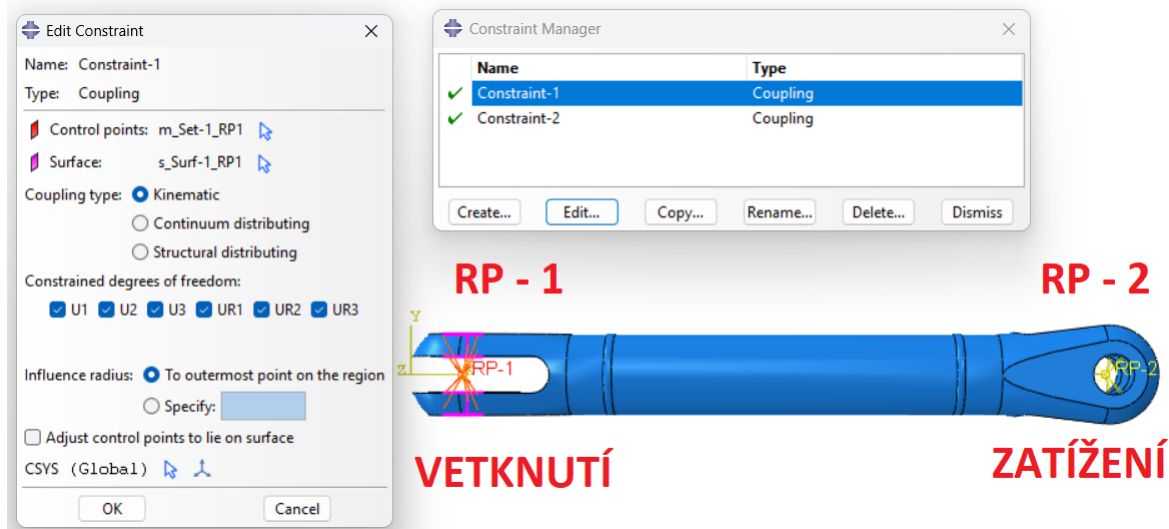
Obrázek 67 Metoda strukturálních hot spot napětí – nastavení parametrů – přiřazení materiálu a sekce

Druhým krokem bylo nastavení krokování (Obrázek 68), které bylo vytvořeno pro základní statickou proceduru.



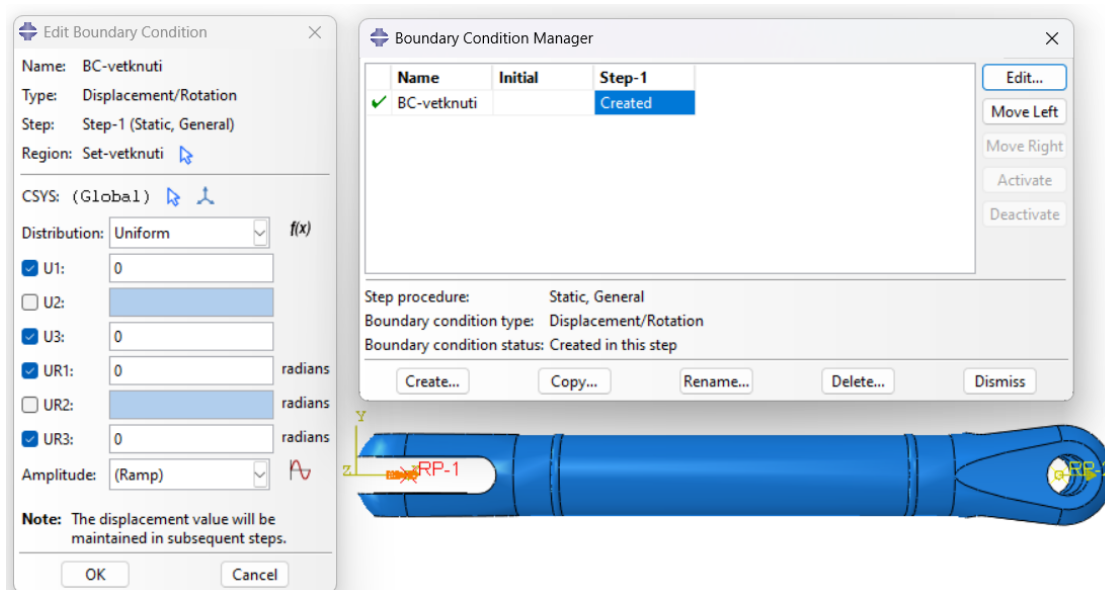
Obrázek 68 Metoda strukturálních hot spot napětí – nastavení parametrů – nastavení krokování

Ve třetím kroku bylo potřeba nastavit interakce neboli vzájemné vazby. Bylo potřeba vytvořit referenční body $RP-1$ a $RP-2$, aby bylo možné nastavit jednotlivé vazby. Referenční body a následně vazby byly vytvořeny v oblastech vidlic vzorku (Obrázek 69). Vazby byly provedeny typem vazby coupling. Vytvoření vazeb bylo důležité pro sjednocení vybraných částí vzorku, aby bylo možné s nimi dále pracovat.



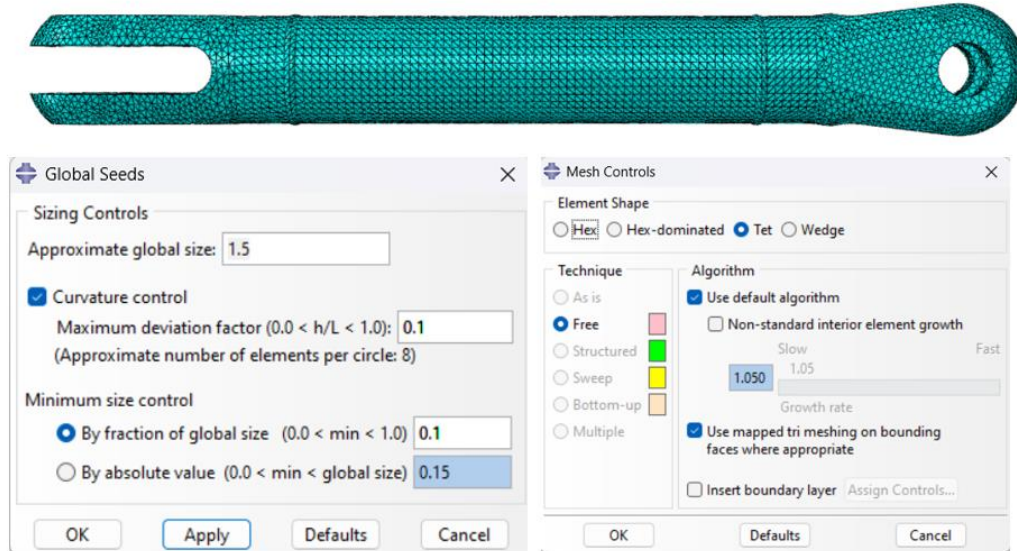
Obrázek 69 Metoda strukturálních hot spot napětí – nastavení parametrů – nastavení vzájemných vazeb

Čtvrtým krokem bylo nastavení zatížení. Prvně bylo nastaveno v bodě $RP-1$ vetknutí vzorku, které představovalo uchycení v pevné části testovacího stroje (Obrázek 70). Taktéž byla nastavena síla, kterou byl vzorek cyklicky zatěžován. V bodě $RP-2$ byla nastavena síla zatížení 34 kN, která byla použita ze zadaných hladin zatížení, pro testované vzorky.



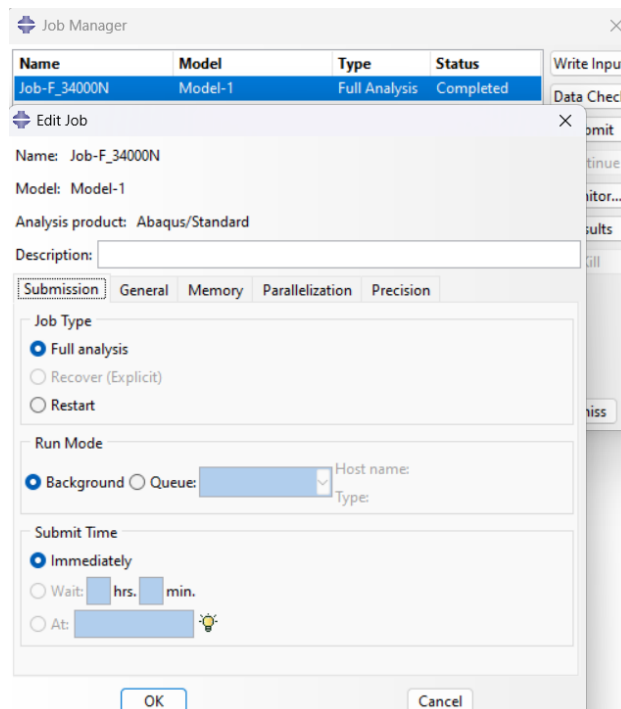
Obrázek 70 Metoda strukturálních hot spot napětí – nastavení parametrů – nastavení zatížení – vetknutí

V pátém kroku byla nastavena síť vzorku (Obrázek 71), aby bylo možné zobrazit výsledky analýzy. Velikost elementů byla nastavena na velikost 1.5 a typ elementu byl zvolen Kvadratický tet. Typ elementu vzhledem k účelu vytvoření globálního modelu pro submodel, byl shledán jako vyhovující. Dále byl vytvořen submodel, kde velikost i typ elementů již byly změněny na jiné. Typ elementu byl zvolen Kvadratický hexagonální.



Obrázek 71 Metoda strukturálních hot spot napětí – nastavení parametrů – nastavení sítě

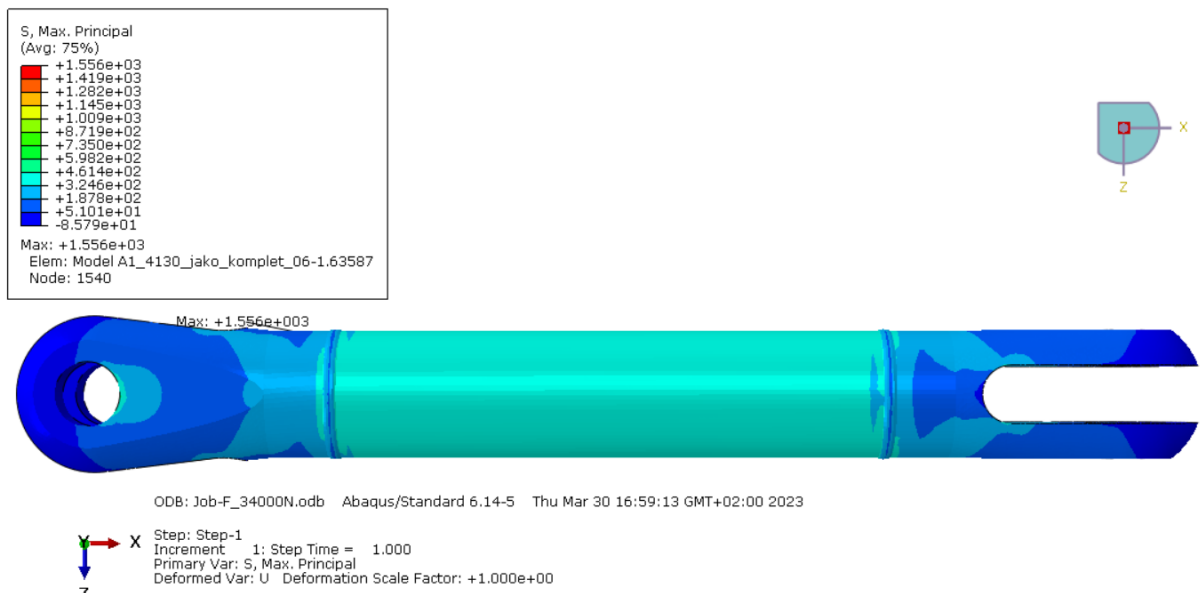
Posledním krokem bylo vytvoření sekce job (Obrázek 72), ve které byly nastaveny podmínky, kterými se řídil výpočet analýzy.



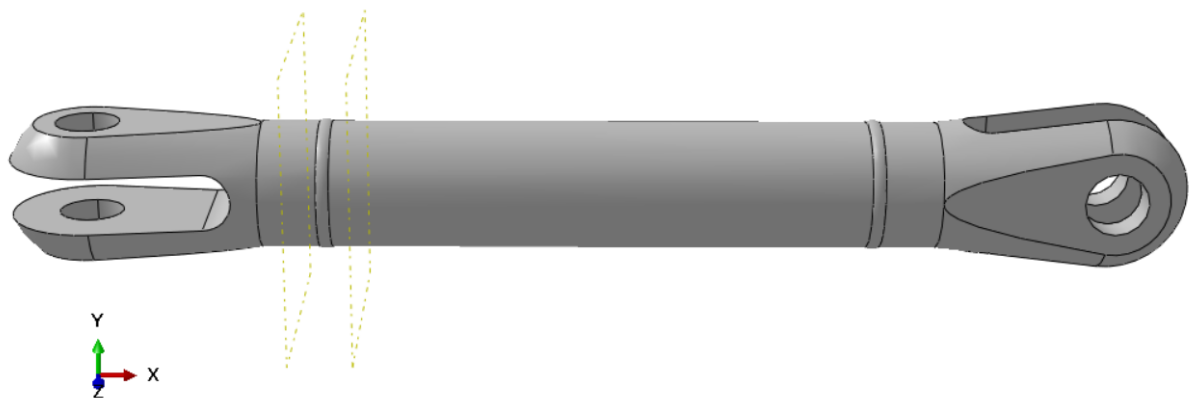
Obrázek 72 Metoda strukturálních hot spot napětí – nastavení parametrů – vytvoření sekce job

7.2.2. Výsledky analýzy MKP

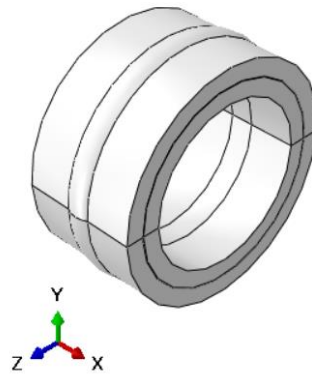
Při vyhodnocení metody strukturálních napětí hot spot, bylo dosaženo výsledku, pro analýzu celého modelu vzorku dle (Obrázek 73). Nejvyšší hodnotou prvního hlavního napětí bylo $\sigma_{\max} = 1556$ MPa a nejnižší získanou hodnotou prvního hlavního napětí bylo $\sigma_{\min} = -85,8$ MPa. Jelikož byla velká pravděpodobnost, že získané hodnoty z analýzy nebudou natolik přesné, ať už vlivem nastavení jednotlivých kroků, tak především velikostí sítě, bylo potřeba vytvořit submodel na kterém byly nastaveny rozdílné parametry. Na (Obrázek 74) lze vidět, ve které části vzorku došlo k vyjmutí submodelu (Obrázek 75). Pro zmíněnou část modelu byly nastaveny pouze okrajové podmínky (Obrázek 76), aby byly vymezeny plochy, které byly odebrány.



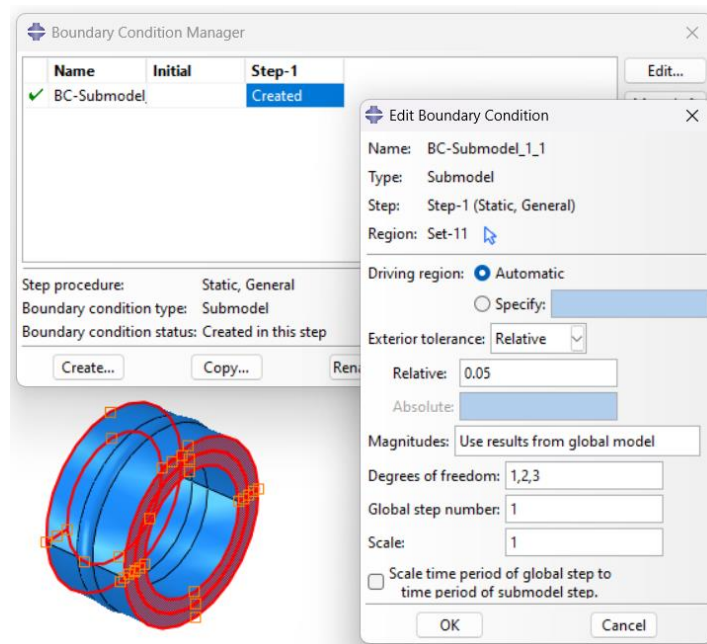
Obrázek 73 Metoda strukturálních hot spot napětí – vyhodnocení – výsledky 1. hlavního napětí v globálním modelu



Obrázek 74 Metoda strukturálních hot spot napětí – vyhodnocení – zobrazení řezu submodelu



Obrázek 75 Metoda strukturálních hot spot napětí – vyhodnocení – submodel



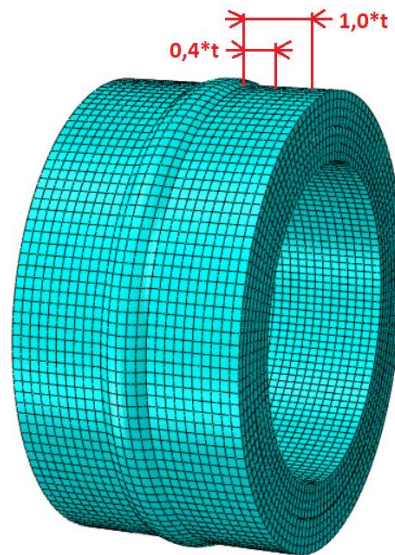
Obrázek 76 Metoda strukturálních hot spot napětí – vyhodnocení – submodel – okrajové podmínky

Vytvořením submodelu bylo dosaženo možnosti, rozřezat submodel na jednotlivé části, čímž bylo zajištěno výběru lepšího typu elementu, čímž byl typ Kvadratický hexagonální. Pro analýzu byl zvolen typ elementu hexagonální, strukturovaná technika elementu a kvadratická geometrie elementu. Metoda hot spot napětí, vyhodnocuje hodnoty napětí získané z analýzy, v násobku vzdálenosti. Konkrétně v násobku 0,4 a 1,0 tloušťky vzorku. Vzorek měl v testované části tloušťku 1,5 mm, takže vzdálenosti, ve kterých byly naměřeny hodnoty, byly 0,6 mm a 1,5 mm (Obrázek 77). Pro analýzu modelu byla zvolena velikost elementu 0,6. Pro porovnání rozdílnosti získaných hodnot, při různých velikostech elementu, byly spočítány analýzy rovněž pro velikosti elementu 0,5 a 0,4. Získané hodnoty lze vidět v (Tabulka 22). Hot spot napětí bylo vypočítáno dle rovnice (7.4).

$$\sigma_{hs} = 1,67 \cdot \sigma_{0,4 \cdot t} - 0,67 \cdot \sigma_{1,0 \cdot t} \quad (7.4)$$

Tabulka 22 Metoda strukturálních hot spot napětí – vyhodnocení – submodel – napětí pro velikosti elementu

vzorek - 45	referenční bod	
	1	2
	0,4*t	1,0*t
$\sigma_{0,6}$ [MPa]	353,986	360,556
$\sigma_{0,5}$ [MPa]	353,542	362,865
$\sigma_{0,4}$ [MPa]	350,697	364,244
$\sigma_{hs0,6}$ [MPa]	349,584	
$\sigma_{hs0,5}$ [MPa]	347,296	
$\sigma_{hs0,4}$ [MPa]	341,621	



Obrázek 77 Metoda strukturálních hot spot napětí – vyhodnocení – submodel – zobrazení vzdáleností vyhodnocení

Jak již bylo zmíněno, při analýze modelu bylo nastaveno zatěžování silou 34 kN. Tato síla představuje rozkmit pro vzorek č. 45. Pro vzorek č. 45 byla zadána amplituda síly $F_a = 17$ kN. Pro hodnoty zmíněného vzorku, byla spočítána hodnota napětí na 1 N, pomocí rovnice (7.5). Tímto způsobem byly vypočteny hodnoty, pro referenční body $\sigma_{0,6}$ (Tabulka 23).

$$MPa_{na\ 1\ N} = \frac{\sigma_{0,6ref}}{F} \quad (7.5)$$

Tabulka 23 Metoda strukturálních napětí – vyhodnocení – submodel – hot spot napětí vzorků

MPa na 1 N = $\sigma_{0,6ref1}/F$	MPa na 1 N = $\sigma_{0,6ref2}/F$
0,01041135	0,01060459

Pro získání hot spot napětí u zbylých vzorků, aniž by se musela realizovat analýza pomocí programu, byly hodnoty hot spot napětí dopočítány, dle rovnice (7.6). Dopočítané výsledky pro všechny vzorky, jsou uvedeny v (Tabulka 24).

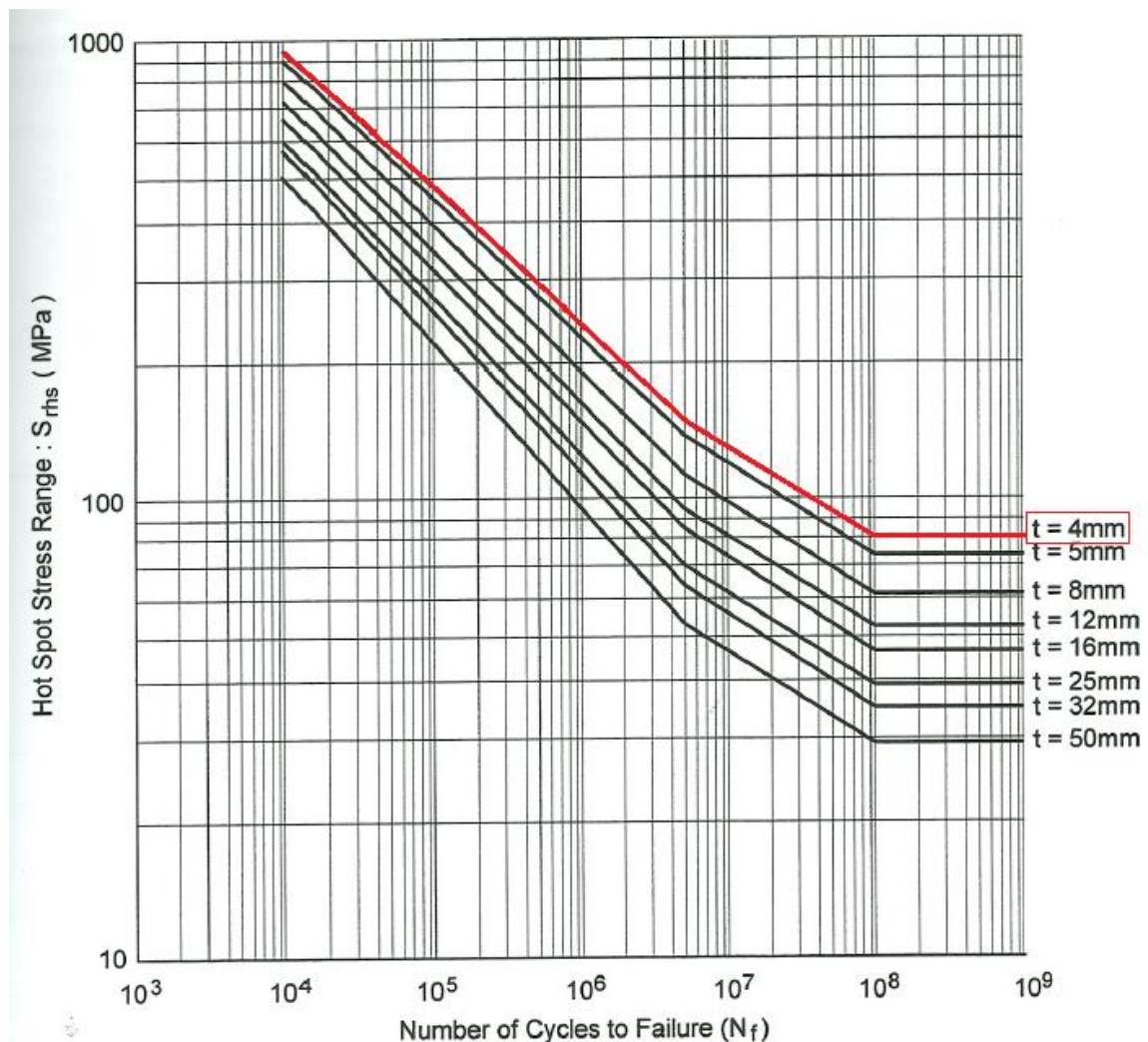
$$\sigma_{0,6ref} = MPa_{na 1 N} \cdot \Delta F \quad (7.6)$$

Tabulka 24 Metoda strukturálních napětí – vyhodnocení – submodel – hot spot napětí vzorků

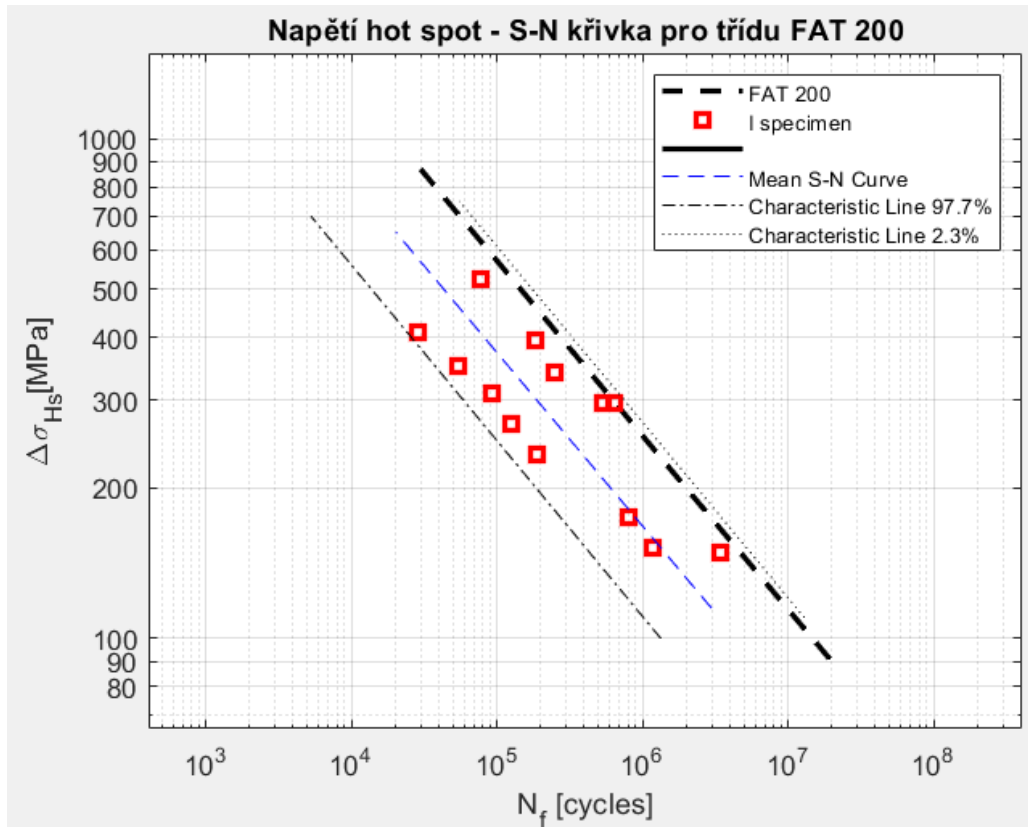
R=0.1							
Vzorek	Fa [N]	ΔF [N]	σ_{0,6ref1} [MPa]	σ_{0,6ref1}/F	σ_{0,6ref2} [MPa]	σ_{0,6ref2}/F	σ_{hs0,6} [MPa]
3	15000	30000	312,341	x	318,138	x	308,457
45	17000	34000	353,986	0,01041135	360,556	0,01060459	349,584
19	13100	26200	272,777	x	277,840	x	269,385
34	11400	22800	237,379	x	241,785	x	234,427
23	9800	19600	204,063	x	207,850	x	201,525
28	8500	17000	176,993	x	180,278	x	174,792
48	7400	14800	154,088	x	156,948	x	152,172
32	6500	13000	135,348	x	137,860	x	133,665
32B	20000	40000	416,454	x	424,184	x	411,275
46	7200	14400	149,923	x	152,706	x	148,059
18	9800	19600	204,063	x	207,850	x	201,526
30	8500	17000	176,994	x	180,278	x	174,793
41	9800	19600	204,063	x	207,850	x	201,526
17	15000	30000	312,342	x	318,138	x	308,459
26	17000	34000	353,988	x	360,556	x	349,587
11	6500	13000	135,348	x	137,860	x	133,665
11B	23500	47000	489,336	x	498,416	x	483,252
27	20000	40000	416,456	x	424,184	x	411,278
44	11400	22800	237,380	x	241,785	x	234,429
16	8500	17000	176,994	x	180,278	x	174,793
38	17000	34000	353,988	x	360,556	x	349,587
12	8500	17000	176,994	x	180,278	x	174,793
15	12500	25000	260,285	x	265,115	x	257,049
33	17000	34000	353,988	x	360,556	x	349,587
43	8500	17000	176,994	x	180,278	x	174,793
47	17000	34000	353,988	x	360,556	x	349,587
R=0.5							
Vzorek	Fa [N]	F [N]	σ_{0,6ref1} [MPa]	σ_{0,6ref1}/F	σ_{0,6ref2} [MPa]	σ_{0,6ref2}/F	σ_{hs0,6} [MPa]
51	9800	19600	204,063	x	207,850	x	201,526
53	11400	22800	237,380	x	241,785	x	234,429
2	13100	26200	272,779	x	277,841	x	269,387
13	8500	17000	176,994	x	180,278	x	174,793

7.2.3. Vyhodnocení metody strukturálních hot spot napětí

V (Tabulka 24) lze vidět zvýrazněné hodnoty vzorků, které byly otestovány úspěšně s porušením ve svaru. Pro zmíněné hodnoty byla vytvořena únavová křivka S-N a porovnána s třídou FAT 200, která odpovídá tloušťce stěny 4 milimetry a počtu cyklů 2000000, pro napětí hot spot. Při vyhodnocení S-N křivky pro FAT 200, se postupovalo dle zdroje [19] a křivky podle kterých lze určit hodnotu napětí a třídu FAT, lze vidět na (Obrázek 78). Jak lze vidět na (Obrázek 79), téměř všechny vzorky leží pod křivkou třídy FAT 200. Výsledné vynesené hodnoty lze považovat za hodnoty nekonzervativní. Vlivem těchto výsledků lze předpokládat, že docházelo ke vzniku iniciace trhliny dříve, a nikoliv v patě svaru, ale v kořeni svaru. V návaznosti na získané výsledky, byla realizována rovněž metoda efektivního vrubového napětí.



Obrázek 78 Metoda strukturálních hot spot napětí – S-N křivky [19]



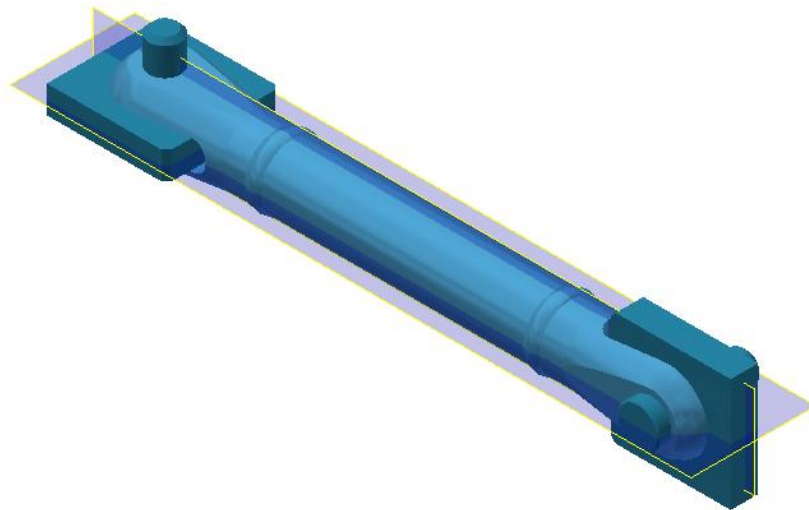
Obrázek 79 Metoda hot spot napětí – S-N křivka pro třídu FAT 200

7.3. Metoda efektivního vrubového napětí

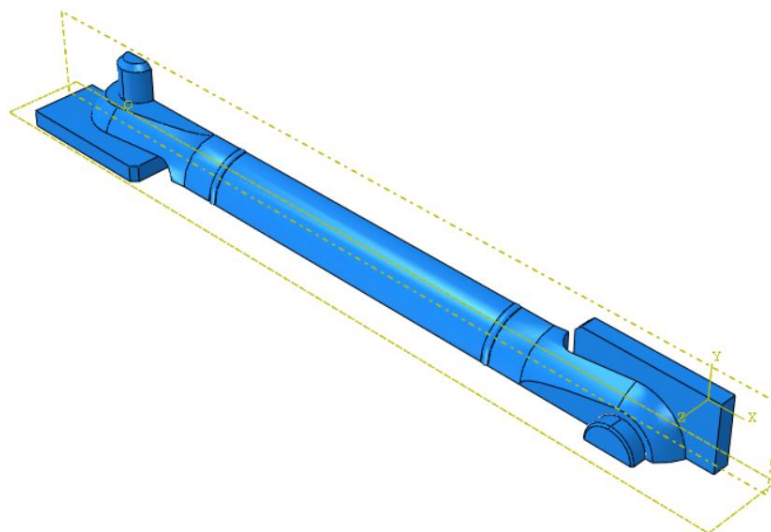
Jelikož během testování vzorků docházelo k iniciaci trhliny v kořeni svaru, pro vyhodnocení byla použita také metoda efektivního vrubového napětí.

7.3.1. Příprava pro analýzu MKP

Pro tuto metodu analýzy, byl model pozměněn, oproti metodě strukturální hot spot napětí. Pro získání přesnějších hodnot, byly použity vymodelované komponenty, čepy a redukce, které simulovaly skutečné komponenty, použité při testování v laboratoři. Při nastavování jednotlivých kroků analýzy, byl model rozdělen na čtvrtiny (Obrázek 80) a pro základní vyhodnocení, byla použita pouze jedna čtvrtina modelu (Obrázek 81).



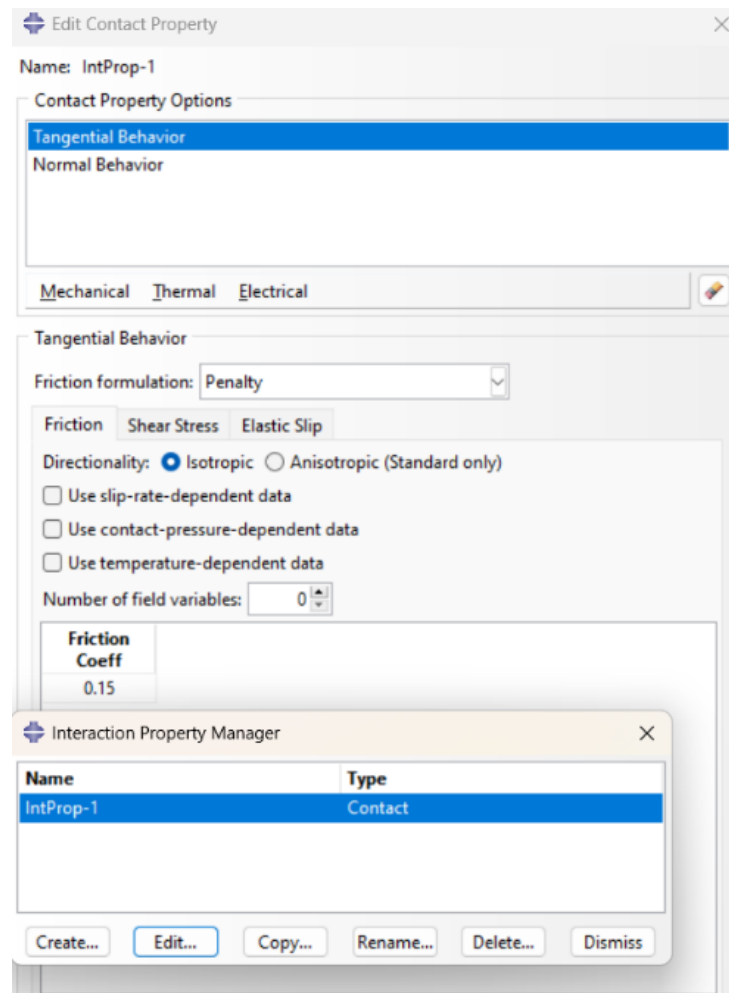
Obrázek 80 Metoda efektivního vrubového napětí – příprava vzorku



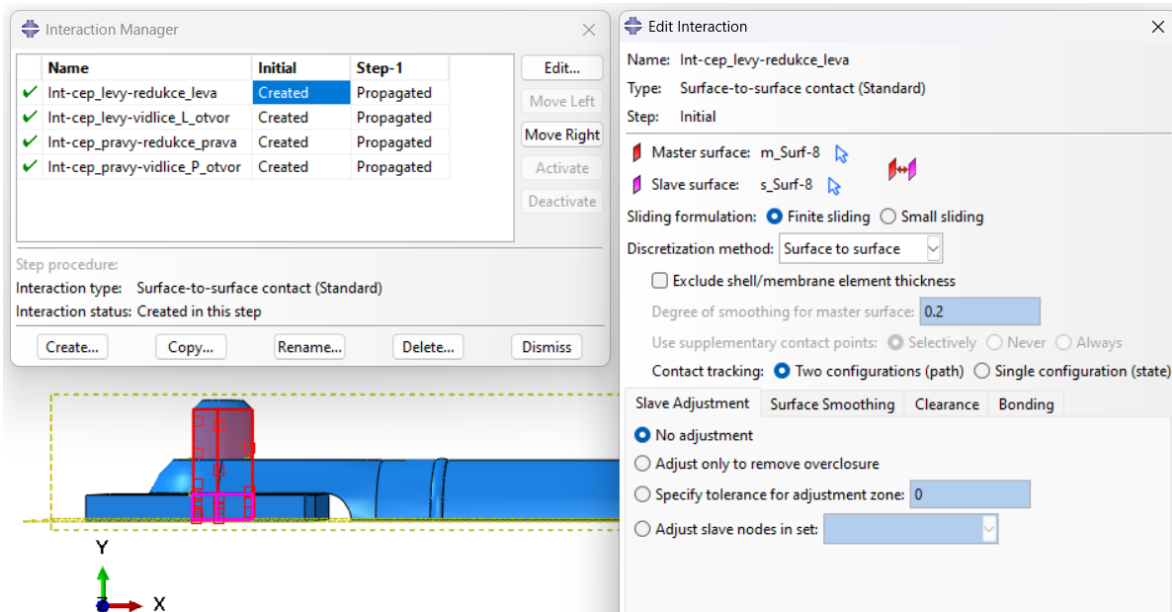
Obrázek 81 Metoda efektivního vrubového napětí – příprava vzorku – čtvrtina modelu

Nastavení jednotlivých kroků, v programu Abaqus, bylo totožné jako u předchozí metody strukturální hot spot napětí. V prvním kroku byl definován materiál, pro jednotlivé části modelu a všem částem byla vytvořena a přiřazena sekce. Ve druhém kroku bylo nastaveno krokování, pro základní statickou proceduru.

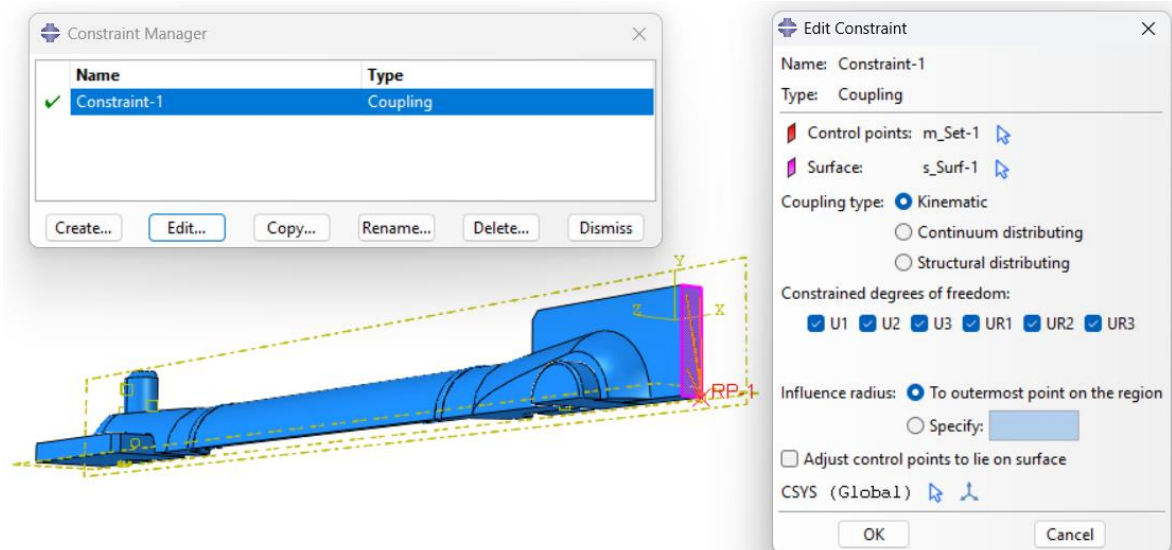
Ve třetím kroku byly vytvořeny vzájemné vazby, mezi jednotlivými částmi modelu. V této fázi se nastavení analýzy liší, oproti nastavení metody strukturálních hot spot napětí. Pro model byl vytvořen kontakt, který byl tangenciálního a normálového typu (Obrázek 82). Dále byly vytvořeny jednotlivé vazby, mezi částmi modelu. Byly vytvořeny vazby mezi oběma stranami vzorku a čepy, a také mezi čepy a redukcemi. Pro všechny vazby byl použit typ, plocha na plochu (Obrázek 83). Další rozdílné nastavení, oproti předchozí vyhodnocovací metodě, bylo vytvoření vazby typu coupling (Obrázek 84). Pro tuto metodu bylo potřeba vytvořit referenční bod RP-1, ke kterému se vázala zmíněná vazba a v tomto bodě byla rovněž definována zátěžná síla.



Obrázek 82 Metoda efektivního vrubového napětí – nastavení parametrů – kontakt

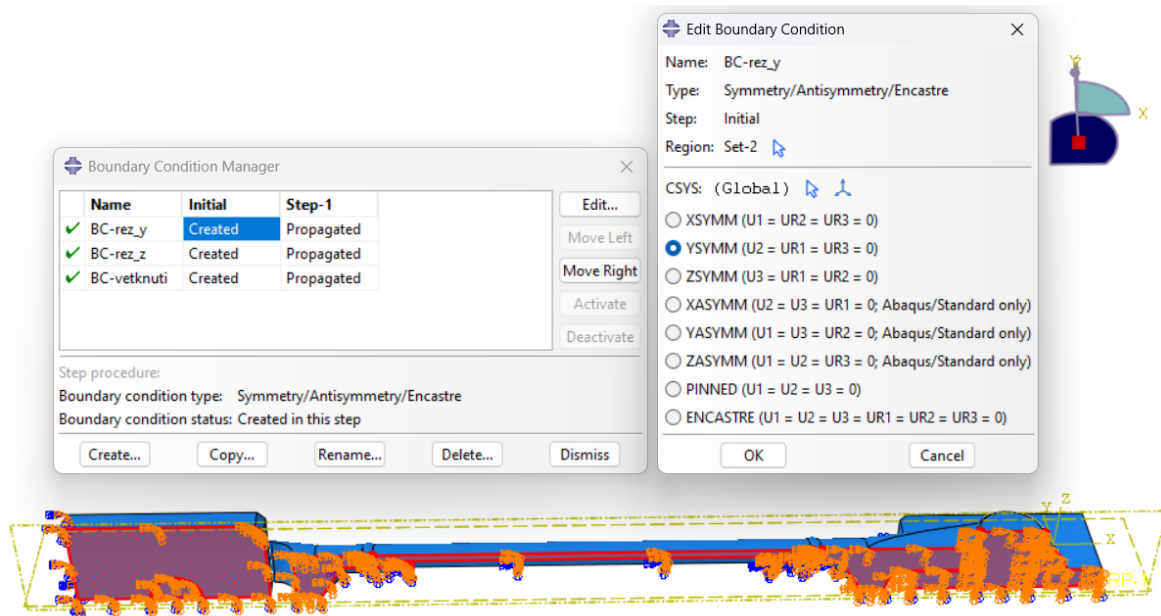


Obrázek 83 Metoda efektivního vrubového napětí – nastavení parametrů – nastavení vazeb



Obrázek 84 Metoda efektivního vrubového napětí – nastavení parametrů – nastavení coupling

Ve čtvrtém kroku byly nastaveny jak okrajové podmínky symetrie, pro oddělené části modelu (Obrázek 85), tak i zatěžující síla. Okrajové podmínky symetrie byly definovány ve směru osy y a z , tedy ve směru, ve kterém byly části modelu odebrány. Zatěžovací síla byla stanovena dle hladin pro testování vzorků v laboratoři, na 37, 777 kN. Jelikož se pro analýzu využívala pouze jedna čtvrtina modelu, rovněž se použila i jedna čtvrtina síly, tedy 9, 44425 kN. Zatěžující síla byla nastavena v referenčním bodě RP-1.



Obrázek 85 Metoda efektivního vrubového napětí – nastavení parametrů – nastavení symetrie

V pátém kroku byla vytvořena síť modelu. Pro všechny části modelu, konkrétně dva čepy, dvě redukce a vzorek, byl vybrán typ elementu Tet a velikost elementů byla nastavena na 1,5. V posledním kroku byla vytvořena sekce job, ve kterém byly nastaveny podmínky, kterými se řídil výpočet analýzy.

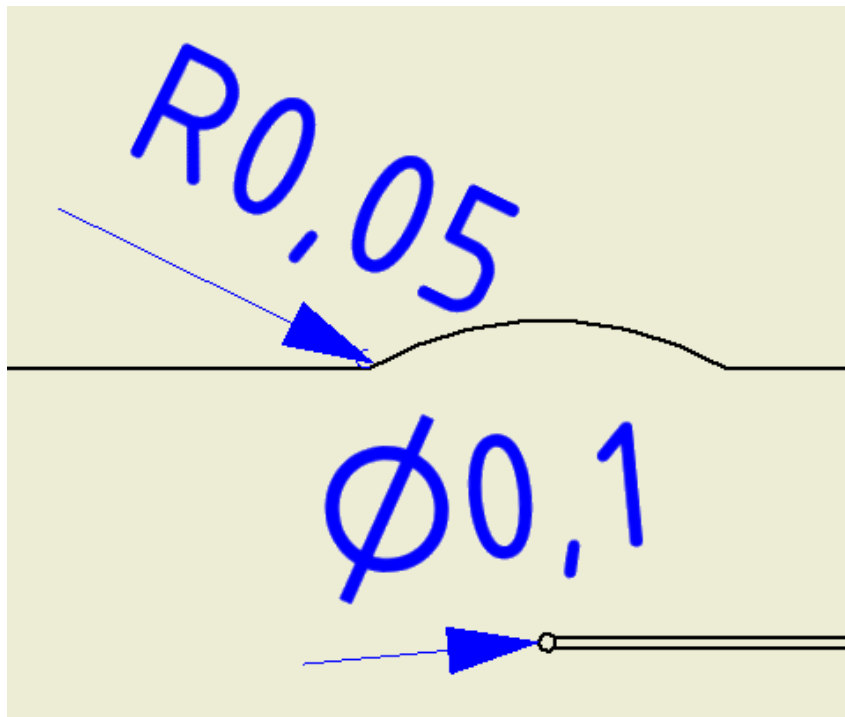
Pro vyhodnocení metody efektivního vrubového napětí, byly vytvořeny dvě varianty analýzy. Varianty se lišily hodnotami šířky svaru a průměrem přes svar. První variantou byl vzorek, který vycházel ze zadané šířky svaru, dle výkresové dokumentace. Druhou variantou byl vzorek, pro který byl svar vymodelován, podle změřených hodnot, pro vybrané vzorky testování (Tabulka 26). Z uvedených hodnot byly vybrány hodnoty šířky svaru a průměru přes svar. Hodnotou šířky svaru byla vybrána nejmenší průměrná hodnota a hodnotou průměru přes svar, byla vybrána největší průměrná hodnota. Zvolené hodnoty pro obě varianty, lze vidět v (Tabulka 25). Metoda efektivního vrubového napětí rovněž požaduje upravit rozměry modelu, konkrétně oblast svaru, a především oblast kořene svaru (Obrázek 86).

Tabulka 25 Metoda efektivního vrubového napětí – geometrie svaru vzorku

vzorek	varianta 1	varianta 2
šířka b [mm]	2	4,93
průměr Θ [mm]	20,54	21,52

Tabulka 26 Metoda efektivního vrubového napětí – kontrolní rozměry vzorků

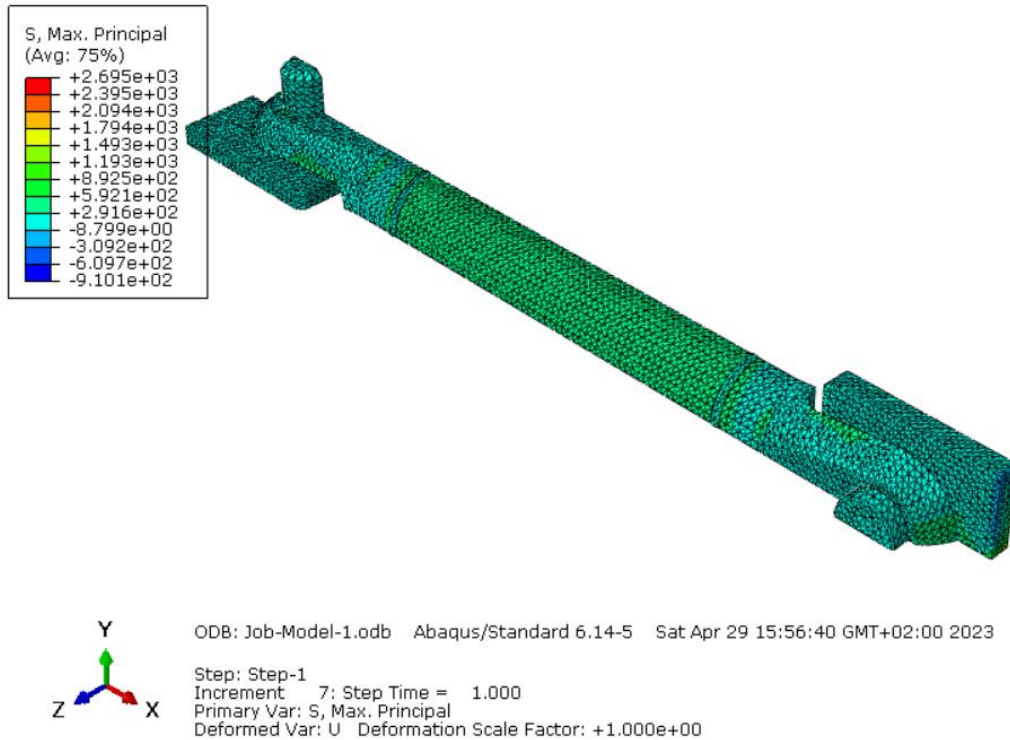
Vzorek	šířka (A-C)				šířka (D-F)				průměr (A-C)				průměr (D-F)			
	A	B	C	xi	D	E	F	xi	A	B	C	xi	D	E	F	xi
48	5,31	5,07	5,2	5,19	5,81	5,75	5,51	5,69	21	21	21,2	21,03	20,8	21,2	21,1	21,01
46	6,23	5,92	5,86	6,00	5,91	6,13	6,98	6,34	20,6	20,6	20,6	20,60	20,5	20,8	20,6	20,62
18	5,9	5,89	5,92	5,90	5,84	5,88	5,82	5,85	20,4	20,9	21	20,75	21,6	21,5	21,5	21,52
27	5,28	5,83	6,33	5,81	5,93	5,07	5,96	5,65	20,9	20,5	20,6	20,69	20,9	20,8	20,6	20,75
30	5,6	5,92	6,41	5,98	5,7	5,28	6,1	5,69	21,5	21,4	21,7	21,52	21,4	20,9	21,3	21,19
41	6,26	6,45	6,42	6,38	6,01	6,1	6,09	6,07	21,2	21,4	21,4	21,31	21	21,3	20,6	20,96
44	5,57	6,25	5,74	5,85	5,82	5,52	6,18	5,84	21,1	21	20,9	20,98	21,2	21,4	21,1	21,23
26	6,95	6,35	6,26	6,52	6,39	5,57	6,41	6,12	21	21,2	21	21,07	20,4	20,8	20,7	20,63
11	5,35	5,79	5,54	5,56	4,8	5,19	4,79	4,93	21,1	21	21,1	21,08	21,4	21,1	20,8	21,11
13	5,83	5,22	5,08	5,38	5,08	5,49	5,52	5,36	21	20,6	20,9	20,81	20,9	20,9	21,2	20,99
17	5,23	5,24	5,12	5,20	4,73	5,56	5,6	5,30	21	20,9	21,1	20,99	21	21,3	20,8	21,00
2	6,48	6,43	6,59	6,50	5,75	6,17	5,93	5,95	21,1	21	21	21,04	20,7	20,6	20,6	20,64
53	6,07	6,24	5,7	6,00	6,37	6,08	6,85	6,43	21,2	21,4	21,5	21,35	21,6	21,3	21,3	21,40
51	5,05	6,14	5,55	5,58	5,64	6,18	5,56	5,79	20,9	21,1	21,1	21,02	21,2	21,1	21,3	21,21



Obrázek 86 Metoda efektivního vrubového napětí – zobrazení svaru – geometrie pro vrubové napětí

7.3.2. Výsledky analýzy MKP

Výsledky pro základní vyhodnocení (Obrázek 87) obou variant, jsou uvedeny v (Tabulka 27).



Obrázek 87 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – základní vyhodnocení – varianta 1 – První hl. napětí

Tabulka 27 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – základní vyhodnocení

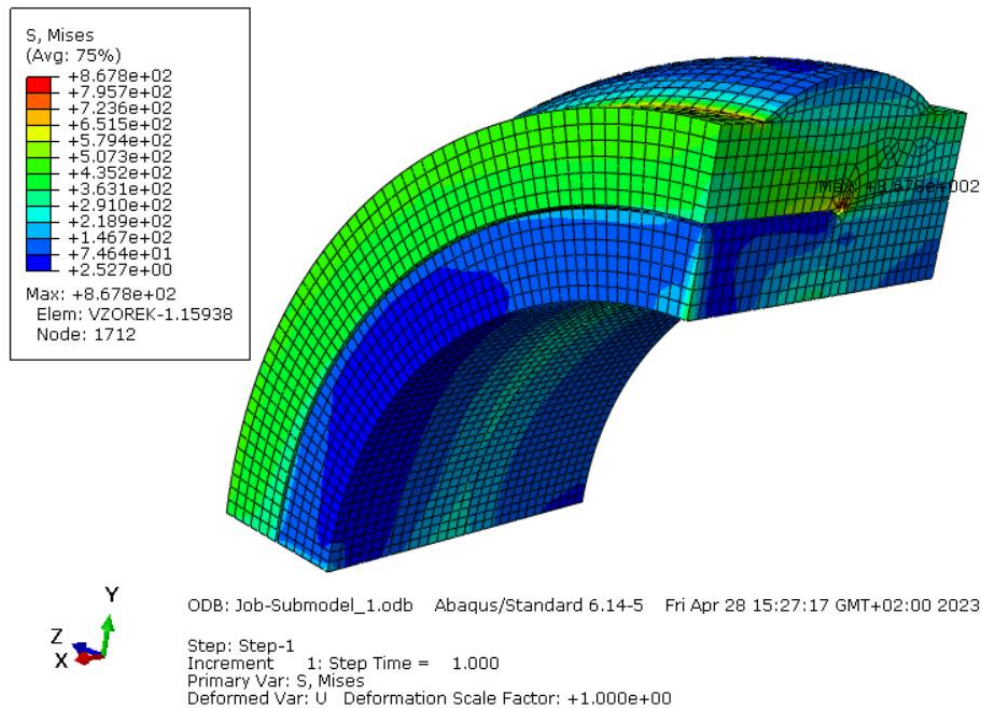
Typ modelu	Typ napětí			
	von Mises		První hlavní napětí	
	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]
varianta 1				
základní vyhodnocení	2105	0,354	2695	-910,1
varianta 2				
základní vyhodnocení	1649	0,419	1699	-913,5

Dále bylo potřeba, pro získání přesnějších hodnot analýzy, vytvořit submodel čtvrtiny modelu. Pro vytvoření submodelu byl vymezen rozsah (Obrázek 88), podle kterého byl submodel vymodelován. Pro submodel byly vytvořeny okrajové podmínky, které vymezily oblasti odebrání částí modelu.



Obrázek 88 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – základní vyhodnocení – zobrazení výřezu submodelu

Pro výpočty analýz submodelu byly změněny parametry elementů. Byl zvolen typ elementu hexagonální, strukturovaná technika elementu, kvadratická geometrie elementu a velikost elementu byla zvolena 0,3. Vizuální výsledek analýzy, pro napětí von Mises, lze vidět na (Obrázek 89) a všechny hodnoty získané pro tuto analýzu, byly uvedeny v (Tabulka 28).

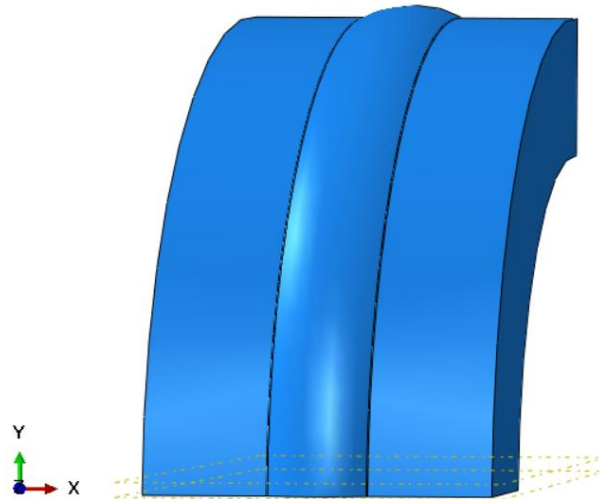


Obrázek 89 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – submodel – varianta 2 - von Mises

Tabulka 28 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – submodel

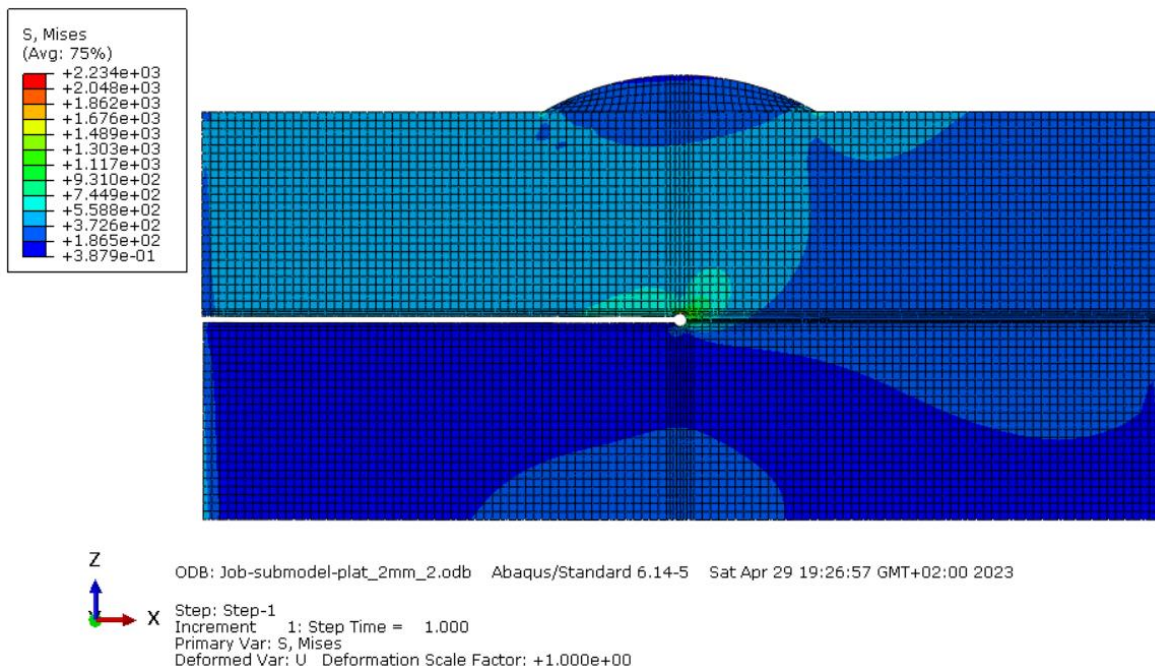
Typ modelu	Typ napětí			
	von Mises		První hlavní napětí	
	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]
varianta 1				
submodel	1630	4,334	1844	-287,7
varianta 2				
submodel	867,8	2,527	1126	-179,7

Po získání předešlých hodnot z analýzy, byl vytvořen mezikrok pro nalezení maximálního napětí. Z tohoto důvodu byl vytvořen pouze plát submodelu, který byl vytvořen z původního submodelu (Obrázek 90) na který bude možné aplikovat požadovaný rozměr sítě, dle IIW [5] pro Notch Stress Approach.

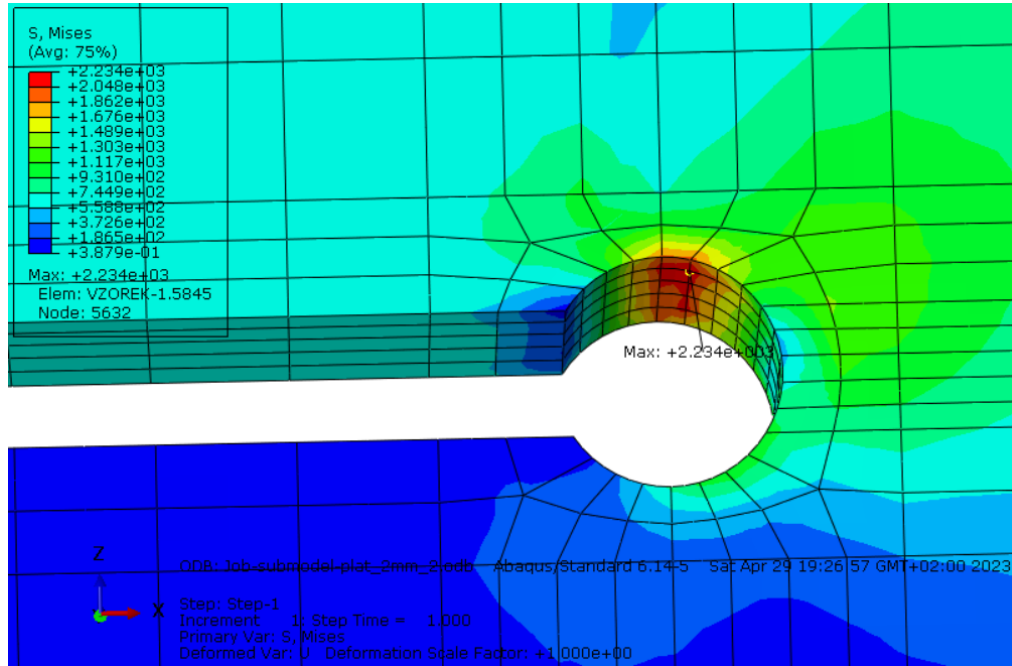


Obrázek 90 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – submodel – zobrazení výřezu plátu

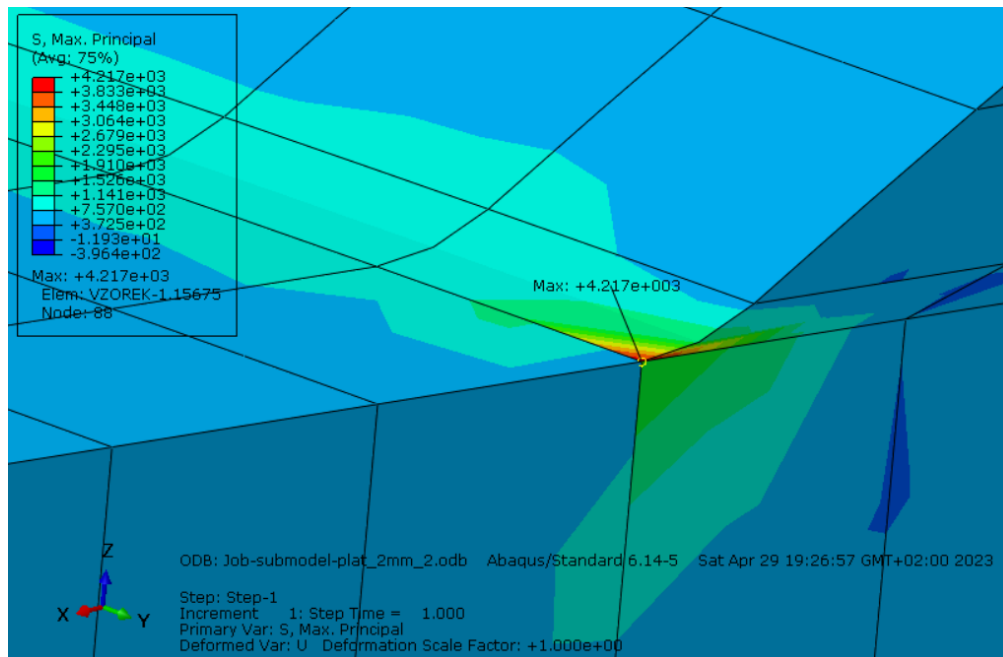
Plát submodelu byl vytvořen v místě, kde byla zjištěna maximální hodnota napětí. Taktéž pro plát byly definovány okrajové podmínky a byla změněna velikost elementů na 0,06. Pro oblast okolo kořene svaru, byla vytvořena jemnější síť, s velikostí 0,012. Zvolené velikosti elementů byly voleny dle IIW [5].



Obrázek 91 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – plát – varianta 1 - von Mises



Obrázek 92 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – plát – varianta 1 - von Mises – detail



Obrázek 93 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – plát – varianta 1 - První hl. napětí – detail

Na (Obrázek 92) lze vidět, že maximální napětí pro von Mises je v kořeni svaru, kdežto pro První hlavní napětí, je maximální hodnota napětí v patě svaru (Obrázek 93). Výsledné hodnoty jsou uvedeny v (Tabulka 29).

Tabulka 29 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – plát

Typ modelu	Typ napětí			
	von Mises		První hlavní napětí	
	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]
varianta 1				
plát	2234	0,388	4217	-396,4
varianta 2				
plát	2778	0,664	3152	-221

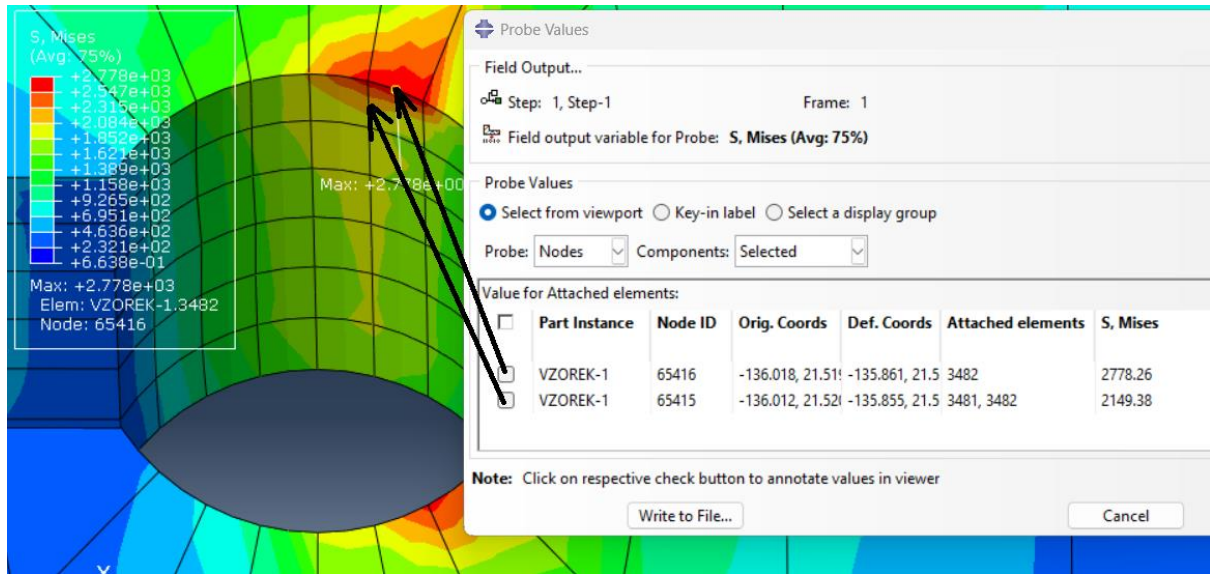
V (Tabulka 30) lze vidět pohromadě, veškeré získané maximální a minimální hodnoty, z provedených analýz. Vzhledem k působení okrajových podmínek pro submodel, které vnáší posuvy z globálního modelu do submodelu, je možné pozorovat zvýšené napětí na okraji hrany díry, kde je tato okrajová podmínka aplikována. Za účelem vyhodnocení vrubového napětí byly takto ovlivněné oblasti od okrajové podmínky ignorovány, viz. (Obrázek 94) a hodnoty které lze použít pro vyhodnocení variant svaru i napětí, lze vidět v (Tabulka 31).

Tabulka 30 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – celkový přehled

Typ modelu	Typ napětí			
	von Mises		První hlavní napětí	
	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]
varianta 1				
základní vyhodnocení	2105	0,354	2695	-910,1
submodel	1630	4,334	1844	-287,7
plát	2234	0,388	4217	-396,4
varianta 2				
základní vyhodnocení	1649	0,419	1699	-913,5
submodel	867,8	2,527	1126	-179,7
plát	2778	0,664	3152	-221

Tabulka 31 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – hodnota pro výpočet

Typ modelu	Typ napětí			
	von Mises		První hlavní napětí	
	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]
varianta 1				
hodnota pro výpočet	2234		2455,94	
varianta 2				
hodnota pro výpočet	2149,38		2482,14	



Obrázek 94 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – plát – varianta 2 - von Mises – detail výběru hodnot

7.3.3. Vyhodnocení metody efektivního vrubového napětí

Pro tuto metodu, byly vytvořeny únavové S-N křivky. Pro První hlavní napětí, které má třídu FAT 630, tak pro napětí von Mises, které má třídu FAT 560. Pro jejich realizaci, bylo potřeba vypracovat následující kroky. V (Tabulka 32) lze vidět vypočítané napětí na 1 N, které bylo vypočítáno dle rovnice (7.7) a bylo použito pro výpočet rozkmitu napětí $\Delta\sigma$. Napětí σ_{MKP} , které bylo získáno z analýzy v programu Abaqus, bylo vybráno jak pro První hlavní napětí, tak i pro napětí von Mises. Hodnoty lze vidět v (Tabulka 33), kde pro variantu 1 bylo použito napětí von Mises, a pro variantu 2 bylo použito První hlavní napětí. Hodnoty F_a a F_s , byl použity z (Tabulka 34), pro První hlavní napětí a z (Tabulka 35), pro napětí von Mises. Rozkmit napětí byl vypočítán dle rovnice (7.8) a výsledky lze vidět, v již zmíněných tabulkách.

$$MPa_{na\ 1\ N} = \frac{\sigma_{MKP}}{(F_a + F_s)} \quad (7.7)$$

$$\Delta\sigma = MPa_{na\ 1\ N} \cdot 2 \cdot F_a \quad (7.8)$$

Tabulka 32 Metoda efektivního vrubového napětí – efektivní vrubové napětí – MPa na 1 N

MPa na 1 N	
von Mises	První hlavní napětí
0,059135	0,065703

Tabulka 33 Metoda efektivního vrubového napětí – efektivní vrubové napětí – napětí MKP

σ_{MKP} [MPa]	
von Mises	První hlavní napětí
2234	2482,12

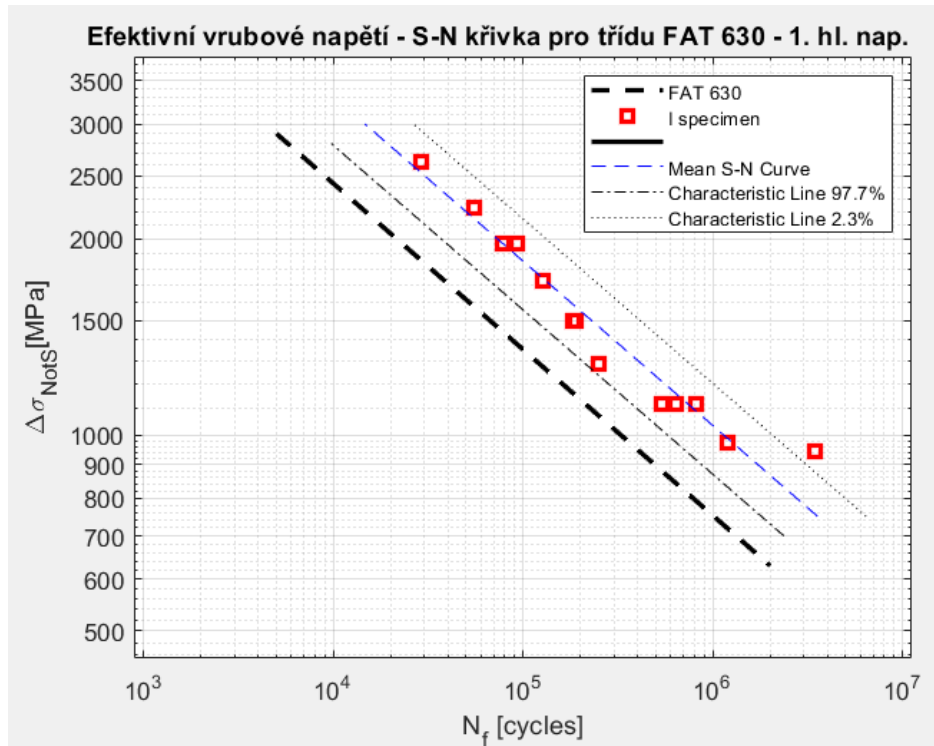
Tabulka 34 Metoda efektivního vrubového napětí – efektivní vrubové napětí – První hlavní napětí

R=0.1				
Vzorek	Fa [N]	Fs [N]	$\Delta\sigma$ [MPa]	Nf [cykly]
3	15000	18333	1971,09	92646
45	17000	20778	2233,90	54894
19	13100	16011	1721,42	125914
34	11400	13933	1498,03	189876
23	9800	11978	1287,78	459732
28	8500	10389	1116,95	810555
48	7400	9594	972,40	1191815
32	6500	7944	854,14	2000000
32B	20000	24444	2628,12	29057
46	7200	8800	946,12	3436816
18	9800	11978	1287,78	204858
30	8500	10389	1116,95	537084
41	9800	11978	1287,78	248686
17	15000	18333	1971,09	78385
26	17000	20778	2233,90	70510
11	6500	7944	854,14	11204043
27	20000	24444	2628,12	42357
44	11400	13933	1498,03	182391
16	8500	10389	1116,95	637815
38	17000	20778	2233,90	37969
12	8500	10389	1116,95	438388
15	12500	15278	1642,58	103541
33	17000	20778	2233,90	34685
43	8500	10389	1116,95	223147
47	17000	20778	2233,90	44612
R=0.5				
Vzorek	Fa [N]	Fs [N]	$\Delta\sigma$ [MPa]	Nf [cykly]
51	9800	29400	1287,78	253606
53	11400	34200	1498,03	60508
2	13100	39300	1721,42	98338
13	8500	25500	1116,95	424710

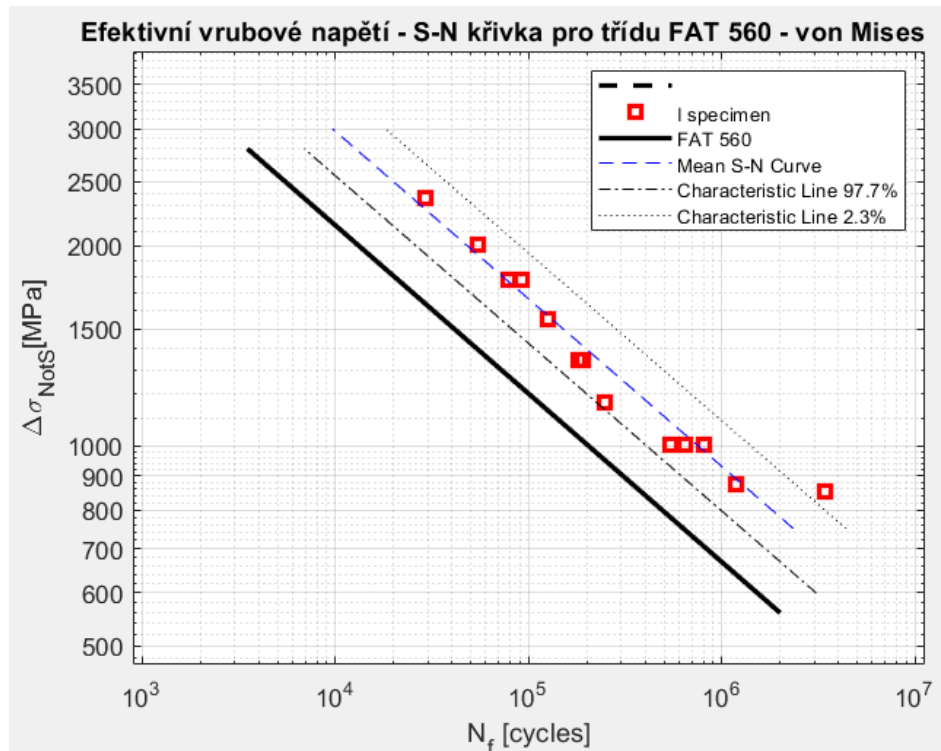
Tabulka 35 Metoda efektivního vrubového napětí – efektivní vrubové napětí – Napětí von Mises

R=0.1				
Vzorek	Fa [N]	Fs [N]	$\Delta\sigma$ [MPa]	Nf [cykly]
3	15000	18333	1774,05	92646
45	17000	20778	2010,59	54894
19	13100	16011	1549,34	125914
34	11400	13933	1348,28	189876
23	9800	11978	1159,05	459732
28	8500	10389	1005,30	810555
48	7400	9594	875,20	1191815
32	6500	7944	768,76	2000000
32B	20000	24444	2365,40	29057
46	7200	8800	851,54	3436816
18	9800	11978	1159,05	204858
30	8500	10389	1005,30	537084
41	9800	11978	1159,05	248686
17	15000	18333	1774,05	78385
26	17000	20778	2010,59	70510
11	6500	7944	768,76	11204043
27	20000	24444	2365,40	42357
44	11400	13933	1348,28	182391
16	8500	10389	1005,30	637815
38	17000	20778	2010,59	37969
12	8500	10389	1005,30	438388
15	12500	15278	1478,38	103541
33	17000	20778	2010,59	34685
43	8500	10389	1005,30	223147
47	17000	20778	2010,59	44612
R=0.5				
Vzorek	Fa [N]	Fs [N]	$\Delta\sigma$ [MPa]	Nf [cykly]
51	9800	29400	1159,05	253606
53	11400	34200	1348,28	60508
2	13100	39300	1549,34	98338
13	8500	25500	1005,30	424710

Výsledné únavové S-N křivky lze vidět na následujících obrázcích a pro jejich realizaci byly použity zvýrazněné hodnoty vzorků, které byly úspěšně testovány s porušením ve svaru, v (Tabulka 34) a (Tabulka 35). Pro První hlavní napětí, na (Obrázek 95) a pro napětí von Mises na (Obrázek 96).



Obrázek 95 Metoda efektivního vrubového napětí – S-N křivka pro třídu FAT 630 – 1. hl. napětí



Obrázek 96 Metoda efektivního vrubového napětí – S-N křivka pro třídu FAT 560 - napětí von Mises

8. Závěr

V teoretické části byla představena motivace výběru tématu práce. Na úvod byla sepsána část práce, která se zabývala únavou materiálů. Nejprve byla představena ve stručném shrnutí, dle mého názoru, důležitá část historie a následně dělení únavy a popis únavové životnosti. Důležitou částí bylo představení a uvedení rozdílů, doporučení a metodik, které slouží k vyhodnocování zmíněné problematiky. Byly představeny vzorky, které byly v experimentální části testovány. Vzorky, které nebylo možné použít k instalaci na letouny, byly poskytnuty výhradně pro experimentální testování, od firmy Aircraft Industries, aby mohly posloužit pro únavové testování tenkostěnných svařovaných trubek a jejich hodnocení z hlediska únavy.

V další kapitole, zabývající se teoretickou částí, byly představeny svarové spoje. Byla představena historie a počátky tohoto nerozebíratelného spojení materiálů na našem území, základní způsoby svařování a typy svarů. Taktéž byly představeny metody, kterými lze provést statickou kontrolu svarového spoje. Poslední kapitolou teoretické části, byly metody pro vyhodnocování odhadu únavového života svařovaných konstrukcí. Byly použity metody nominálních napětí, hot spot napětí a efektivního vrubového napětí. Všechny tři zmíněné metody, byly následně použity v praktické části, pro vyhodnocení odhadu únavové životnosti experimentálně testovaných vzorků.

V praktické části, v kapitole laboratorní testování, bylo nejprve popsáno, vnitřní vybavení laboratoře včetně aparatury použité při testování vzorků. Především testovací stroj, Amslerův vysokofrekvenční pulzátor, na kterém bylo testování realizováno. Dále byly podrobně popsány a zdokumentovány testované vzorky, jaké byly jednotlivé detailní odlišnosti a jak se se vzorky pracovalo, než došlo na testování. Vzorky se lišily především v rozměrech, konkrétně v šířce svaru. Testování bylo pomyslně rozděleno do několika fází z důvodu výskytu defektů komponent, nebo nedostatku nepoužitých spojovacích prvků, které sloužily k zajištění vzorků při testování. Tím byly vytvořeny časové prodlevy mezi testováními. Závěrem kapitoly, ve které byl popsán průběh testování, byly prezentovány výsledky testování. Pro testování bylo použito celkem 28 vzorků, z toho 21 vzorků bez rentgenem nalezené vady svaru a 7 vzorků s rentgenem nalezené vady svaru. Testováními bylo dosaženo výsledků, kde ze zmíněných 28 vzorků, bylo úspěšně testováno, dle předpokladů, pouze 13 vzorků. U zbylých vzorků došlo k porušení v nežádoucích místech. Při určení zatěžovacích sil, kterými byly vzorky cyklicky namáhány, byly vzorky rozděleny do dvou skupin, které se lišily hodnotou koeficientu nesouměrnosti cyklu R . Hodnoty koeficientu nesouměrnosti cyklu R byly nastaveny na $R=0.1$ a $R=0.5$. Pro hladinu $R=0.5$ byly otestovány pouze 4 vzorky, jelikož vlivem středního napětí vznikalo kritické místo pouze na vidličce a nikoliv v místě svaru, kde svar není až tak citlivý na vliv středního napětí a ve zmíněných kritických místech docházelo ke vznikům trhlin. Proto bylo od hladiny $R=0.5$ odstoupeno a vzorky se nadále testovaly pouze pro hladinu $R=0.1$.

V poslední kapitole praktické části, byla provedena analýza výpočetní metody. První metodou, která byla vyhodnocena, byla metoda nominálních napětí. Pro metodu byly vypočítány hodnoty napětí, ze zadaných hodnot pro testování a vytvořeny únavové S-N křivky s pravděpodobnostními mezemi, určenými dvěma standardními odchylkami. Křivky byly vytvořeny pro První hlavní napětí, pro třídy FAT 63 a FAT 71. Výsledky této metody byly značně konzervativní oproti počtům cyklů z experimentu. V návaznosti na tyto výsledky byly realizovány vyhodnocení pomocí složitějších metod, které by měly být blíže realitě.

Další metodou, kterou byly výsledky testování vyhodnoceny, byla metoda strukturálních hot spot napětí. Tato metoda byla realizována v programu Abaqus a pro její realizaci, byl vytvořen model odpovídající experimentálnímu vzorku. Postupy pro nastavení a realizaci analýzy byly detailně popsány ve zmíněné kapitole. Výsledkem této metody bylo získání hodnot hot spot napětí. Výsledky byly získány z analýzy MKP pro jednu hladinu zatížení a pro ostatní hladiny lineárním přepočtem. Získání výsledků tímto způsobem bylo možné vzhledem k linearitě výsledků a pro ostatní hladiny zatížení není třeba provádět simulace, pro každou hladinu zvlášť. Pro tuto vyhodnocovací metodu byla použita S-N křivka pro třídu FAT 200, která odpovídá tloušťce stěny 4 milimetry. Křivka byla použita pro porovnání s výslednými hodnotami napětí hot spot, které byly získány pro tloušťku vzorku 1,5 milimetru. Výsledky z analýzy pomocí hot spot napětí vykazaly hodnoty, které neodpovídaly očekávání a byly značně nekonzervativní. To lze pozorovat na (Obrázek 79), kde jsou zobrazeny výsledky hot spot napětí v místě paty svaru. Během experimentálního testování bylo zjištěno, z makrografie v odtrženém místě svaru vzorku, že iniciace trhliny svaru nevzniká v patě svaru, což je pro tuto metodu zásadní, ale že vzniká v kořeni svaru. V důsledku tohoto zjištění bylo realizováno další vyhodnocení experimentálních dat, metodou efektivního vrubového napětí.

U vzorků byla provedena makrografie, která potvrdila iniciaci trhliny v kořeni svaru. Na základě tohoto zjištění byla provedena analýza pomocí metody efektivního vrubového napětí, jelikož metodu hot spot napětí nelze použít pro vyhodnocení v kořeni svaru. Metoda efektivního vrubového napětí je založena na tvorbě fiktivního poloměru, který byl stanoven pro tenkostěnné konstrukce na hodnotu 0,05 milimetrů, dle zdroje [17]. Pro vyhodnocení byly použity odvozené FAT křivky pro napětí von Mises FAT 560 a pro První hlavní napětí FAT 630, dle zdroje [17]. Výsledkem analýzy v programu Abaqus bylo získáno efektivní vrubové napětí v oblasti kořene svaru. Výsledné hodnoty ležely jak nad hodnotami FAT 560, tak i nad hodnotami FAT 630 a to včetně pravděpodobnostní čáry pro 97,7% pravděpodobnosti přežití vzorku. Na základě výsledků lze konstatovat, že FAT křivky pro metodu efektivního vrubového napětí mohou být použity pro odhad únavového života tenkostěnné svařované trubkové konstrukce testované v této práci.



Výsledky obsažené v této diplomové práci byly poskytnuty firmě Aircraft Industries pro hodnocení únavových vlastností tenkostěnných svařovaných konstrukcí použitých u motorového lože v rámci výzkumně vývojových aktivit projektu CK02000025 Pokročilé svařované konstrukce pro zvýšení bezpečnosti v letectví. Tento projekt je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci Programu DOPRAVA 2020+.

Použitá literatura

- [1] SCHIJVE, J. *Fatigue of Structures and Materials in the 20th Century and the State of the Art* [online]. Cracow, 2002 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/esis/ECF14/paper/viewFile/7980/5243>. Akademická práce. Delft University of Technology.
- [2] RIBEIRO, Alfredo Silva, José A.F.O. CORREIA, António L. L. SILVA a Abilio M.P. DE JESUS. *EVOLUTION OF FATIGUE HISTORY* [online]. Brazil, 2011 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/299397997_EVOLUTION_OF_FATIGUE_HISTORY. Akademická práce. Brazilian Congress of Mechanical.
- [3] Wöhlerova křivka – členění oblastí únavy [online]. Praha: docplayer, Dana Müllerová, 2016 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/23985916-Wohlerova-krivka-uhlikove-oceli-vyrazna-mez-unavy.html>
- [4] VANCL, Daniel. *Výpočetní metody pro predikci únavové životnosti rozsáhlých svařovaných konstrukcí*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [5] HOBACHER A., *International Institute of Welding. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joint and Components*. France, 2008. IIW Fatigue Recommendations. International Institute of Welding.
- [6] *Aircraft Industries - L410 NG*. [Http://www.let.cz](http://www.let.cz) [online]. Kunovice: Aircraft Industries, 2015 [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: <http://www.let.cz/l410ng>
- [7] DVOŘÁK, Karel. *Historie svařování*. [Http://www.cws-anb.cz](http://www.cws-anb.cz) [online]. Praha: Česká svářečská společnost ANB, 2008 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=239>
- [8] TEMIZ, Vedat. *Welded Joints*. In: [Https://priodeep.weebly.com](https://priodeep.weebly.com) [online]. Istanbul: Istanbul Technical University, 2007 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: https://priodeep.weebly.com/uploads/6/5/4/9/65495087/welding_2.pdf
- [9] PALÁT, Hynek. *Svarové spoje*. In: [Https://www.sspu-opava.cz](https://www.sspu-opava.cz) [online]. Opava: Střední škola průmyslová a umělecká, Opava, příspěvková organizace, 2011 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablon/SPS_II/VY_32_INOVACE_C-07-08.pdf
- [10] *Tyršův most*. In: [Https://pamatkovykatalog.cz](https://pamatkovykatalog.cz) [online]. Plzeň: Národní památkový ústav, 2015 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://pamatkovykatalog.cz/tyrsuv-most-15022784>
- [11] BARTOŠ, Libor. *Svařování* [online]. Praha, 2007 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://oulipova.cz/storage/user-70/module-349/technologie-svarovani-2roc-15851559370phpwfpzpd.pdf>. Projektová práce. ODBORNÉ UČILIŠTĚ A PRAKTICKÁ ŠKOLA, LIPOVÁ – LÁZNĚ.
- [12] *Značení svarů* [online]. Opava: SST Opava [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: https://sst.opava.cz/schreier/csn_svar.pdf



- [13] *Liberty ship Cargo*. Metallurgyandmaterials.wordpress.com [online]. metallurgyandmaterials, 2015 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://metallurgyandmaterials.wordpress.com/2015/12/25/liberty-ship-failures/>
- [14] *TOMEK, Martin. Fatigue Life Prediction in Welded Structures*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [15] *KHURSHID, Mansoor. Design of welded joints with predominantly static loading*. Švédsko. Akademická publikace. KTH-Royal Institute of Technology.
- [16] *Přehled vlastností oceli 25CrMo4* [online]. Kladno: Bohdan Bolzano, 2020 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1/prehled-vlastnosti-oceli-25crmo4>
- [17] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Let L-410 Turbolet* [online]. c2022 [citováno 18. 05. 2023]. Dostupný z WWW: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Let_L-410_Turbolet&oldid=22211677
- [18] *FRICKE, Wolfgang. Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures*. Hamburg, 2010. Akademická publikace. Hamburg University of Technology.
- [19] *ZHAO, Xiao-Ling a Jeffrey A. PACKER. Fatigue Design Procedure for Welded Hollow Section Joints*. England, 2000. Akademická publikace. The International Institute of Welding.
- [20] *ZHAO, X.-L., S. HERION, J. A. PACKER, et al. Design Guide for Circular and Rectangular Hollow Section Welded Joints Under Fatigue Loading*. Köhn, 2001. Akademická práce. Unternehmensgruppe TÜV Rheinland/Berlin-Brandenburg.
- [21] *PEDERSEN, Mikkel Melters. Introduction to Metal Fatigue*. Aarhus, 2018. Akademická práce. Department of Engineering – Mechanical Engineering, Aarhus University.
- [22] *EN 1993-1-9: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue*. In: www.phd.eng.br [online]. Sao Paulo: PhD Engenharia, 2015 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.1.9.2005-1.pdf>

Seznam zkratek

Název	Značka	Jednotka
Amplituda napětí	σ_a	MPa
Rozkmit napětí	$\Delta\sigma$	MPa
Napětí tahové	σ_t	MPa
Napětí tahové dovolené	σ_{tDOV}	MPa
Napětí tahové dovolené svaru	σ_{tDOVsv}	MPa
Napětí smykové	τ_s	MPa
Napětí smykové dovolené svaru	τ_{sDOVsv}	MPa
Napětí ohybové	σ_o	MPa
Napětí ohybové dovolené svaru	σ_{oDOVsv}	MPa
Napětí kolmé	τ_{kol}	MPa
Napětí kolmé dovolené	τ_{kolDOV}	MPa
Napětí rovinné	τ_{rov}	MPa
Napětí rovinné dovolené	τ_{rovDOV}	MPa
Napětí svaru dovolené	τ_{svDOV}	MPa
Napětí membránové	σ_{mem}	MPa
Napětí ohybové	σ_{ben}	MPa
Napětí nelineární špičkové	σ_{nlp}	MPa
Napětí nominální	σ_{nom}	MPa
Napětí hot spot	σ_{hs}	MPa
Faktor intenzity napětí	K	MPa*mm ^{1/2}
Počet cyklů	N _f	cykly
Materiálová konstanta	C	MPa ³
Materiálová konstanta	m	-
Sklon křivky	m	-
Koeficient nesouměrnosti	R	-
Moment síly	M	Nm
Ohybový moment	M _o	Nm
Průřezový modul v ohybu	W _o	mm ³
Síla tahová	F _t	N
Síla smyková	F _s	N
Síla statická	F _s	N
Amplituda síly	F _a	N
Rozkmit síly	ΔF	N
Síla kolmá	F _{kol}	N
Smyková rovnoběžná síla	F	N
Síla normálová v úhlu α	F _{α}	N
Výkon	P	kW
Otáčky	N _f	ot/min
Frekvence	f	Hz
Hmotnost	m	kg
Plocha	A	mm ²



Průměr	\varnothing	mm
Tloušťka těla svaru	a	mm
Tloušťka plechu	t	mm
Tloušťka plechu	s	mm
Délka svaru	l	mm
Efektivní délka svaru	leff	mm
Výška řezu	d	mm
Referenční tloušťka	tref	mm
Efektivní tloušťka	teff	mm
Faktor redukce tloušťky	f(t)	-
Korelační faktor	β_w	-
Faktor bezpečnosti	γ_{M2}	-
Kapacita svarových spojů	FR	-
Charakteristická pevnost pro základní materiál	fuk	-
Charakteristická pevnost pro svarový materiál	feuk	-
Hodnota pevnosti pro svar	f _{wd}	-
Hodnota pevnosti pro zákl. mat.	f _{ud}	-

Seznam obrázků

Obrázek 1 Liberty ship Cargo [13]	2
Obrázek 2 Wöhlerova křivka – členění oblastí únavy [3].....	3
Obrázek 3 Doporučené hodnoty FAT křivky [5]	6
Obrázek 4 FAT únavová S-N křivka pro ocel [5].....	6
Obrázek 5 L 410 Turbolet [17]	7
Obrázek 6 Vzorek pro testování.....	7
Obrázek 7 Na levém obrázku je příklad tupého svaru, vpravo je svar koutový [9].....	8
Obrázek 8 Tyršův most z roku 1931 [10]	9
Obrázek 9 Pevnostní výpočet – tupý svar na tah [9].....	14
Obrázek 10 Pevnostní výpočet – tupý svar na smyk [9].....	15
Obrázek 11 Pevnostní výpočet – tupý svar na ohyb [9].....	15
Obrázek 12 Pevnostní výpočet – koutový svar – síla kolmá [9].....	16
Obrázek 13 Pevnostní výpočet – koutový svar – síla rovinná [9].....	17
Obrázek 14 Nominální tloušťka hrdla [15]	18
Obrázek 15 Řez na straně svaru [15]	19
Obrázek 16 Zobrazení sil výpočtového řezu [15]	19
Obrázek 17 Výpočty průřezu [15].....	20
Obrázek 18 Tupý svar s plným průvarem [15]	21
Obrázek 19 Tupý svar částečně penetrovaný [15]	22
Obrázek 20 Úhlové rozmezí koutového svaru [15]	22
Obrázek 21 Složky napětí koutového svaru [15]	22
Obrázek 22 Úplné značení svaru [12].....	24
Obrázek 23 Poloha odkazové čáry [12]	24
Obrázek 24 Poloha značky vůči praporku odkazové čáry [12].....	24
Obrázek 25 Rozměry svarů [12]	25
Obrázek 26 Označování hlavních rozměrů [12]	25
Obrázek 27 Doplnkové značky [12]	25
Obrázek 28 Příklad značení svarů [12]	25
Obrázek 29 Obecný průběh napětí [5]	26
Obrázek 30 Třídy FAT křivky pro Hot spot napětí [14].....	27
Obrázek 31 Způsoby extrapolace pro různé typy hot spot míst [5]	28
Obrázek 32 Typy hot spot míst [5]	28
Obrázek 33 Fiktivní zaoblení špiček a kořenů svaru [5].....	30
Obrázek 34 Definice vzdálenosti špiček [5]	31
Obrázek 35 Vliv středního napětí – součinitel zesílení [5]	33
Obrázek 36 Amslerův vysokofrekvenční pulzátor.....	34
Obrázek 37 ZwickRoell – aplikace materiálového testování.....	35
Obrázek 38 Amslerův vysokofrekvenční pulzátor – komponenty.....	36
Obrázek 39 Amslerův vysokofrekvenční pulzátor – popis stroje	37
Obrázek 40 Vzorek pro testování 2.....	38



Obrázek 41 Vzorek pro testování 3 - poloviční řez	39
Obrázek 42 Testovaný vzorek – natočení vidlice	39
Obrázek 43 Závěsná redukce varianta 2	40
Obrázek 44 Vzorek pro testování – výkres	40
Obrázek 45 Testovaný vzorek – popis vzorku	41
Obrázek 46 Testovaný vzorek – rentgen.....	42
Obrázek 47 Amslerův vysokofrekvenční pulzátor – popis postupu při nastavení stroje pro testování	44
Obrázek 48 Dodaný čep – materiál L-CM3.7 – již opotřebované kusy.....	45
Obrázek 49 Dodaný čep – prasklina	45
Obrázek 50 Šroub lícovaný	46
Obrázek 51 Závěsná redukce – varianta 1 – výkres.....	46
Obrázek 52 Závěsné redukce – varianta 1 - zobrazení poškození	47
Obrázek 53 Závěsné redukce – varianta 2 – výkres.....	48
Obrázek 54 Závěsné redukce – varianta 2 - zobrazení poškození	48
Obrázek 55 Testovaný vzorek – popis vzorku	53
Obrázek 56 Testovaný vzorek – prasklina ve vidlici	53
Obrázek 57 Svařované vzorky typu I – graf – zobrazení počtu cyklů.....	55
Obrázek 58 Svařované vzorky typu I – popis a určení kvality svarů.....	55
Obrázek 59 Testovaný vzorek – rentgen.....	56
Obrázek 60 Zobrazení tupého svaru	56
Obrázek 61 Vznik iniciace trhliny – výsledky z mikroskopu - 1.....	57
Obrázek 62 Vznik iniciace trhliny – výsledky z mikroskopu - 2.....	57
Obrázek 63 Vznik iniciace trhliny – výsledky z mikroskopu - 3.....	57
Obrázek 64 Metoda nominálních napětí – FAT hodnoty [5].....	58
Obrázek 65 Metoda nominálních napětí – S-N křivky pro třídy FAT 63 a FAT 71..	62
Obrázek 66 Metoda strukturálních hot spot napětí – příprava vzorku v Abaqusu.....	62
Obrázek 67 Metoda strukturálních hot spot napětí – nastavení parametrů – přiřazení materiálu a sekce	63
Obrázek 68 Metoda strukturálních hot spot napětí – nastavení parametrů – nastavení krokování	63
Obrázek 69 Metoda strukturálních hot spot napětí – nastavení parametrů – nastavení vzájemných vazeb	64
Obrázek 70 Metoda strukturálních hot spot napětí – nastavení parametrů – nastavení zatížení – vetknutí	64
Obrázek 71 Metoda strukturálních hot spot napětí – nastavení parametrů – nastavení sítě	65
Obrázek 72 Metoda strukturálních hot spot napětí – nastavení parametrů – vytvoření sekce job.....	65
Obrázek 73 Metoda strukturálních hot spot napětí – vyhodnocení – výsledky 1. hlavního napětí v globálním modelu.....	66



Obrázek 74 Metoda strukturálních hot spot napětí – vyhodnocení – zobrazení řezu submodelu	66
Obrázek 75 Metoda strukturálních hot spot napětí – vyhodnocení – submodel	67
Obrázek 76 Metoda strukturálních hot spot napětí – vyhodnocení – submodel – okrajové podmínky.....	67
Obrázek 77 Metoda strukturálních hot spot napětí – vyhodnocení – submodel – zobrazení vzdáleností vyhodnocení	68
Obrázek 78 Metoda strukturálních hot spot napětí – S-N křivky [19].....	70
Obrázek 79 Metoda hot spot napětí – S-N křivka pro třídu FAT 200	71
Obrázek 80 Metoda efektivního vrubového napětí – příprava vzorku	72
Obrázek 81 Metoda efektivního vrubového napětí – příprava vzorku – čtvrtina modelu	72
Obrázek 82 Metoda efektivního vrubového napětí – nastavení parametrů – kontakt	73
Obrázek 83 Metoda efektivního vrubového napětí – nastavení parametrů – nastavení vazeb	74
Obrázek 84 Metoda efektivního vrubového napětí – nastavení parametrů – nastavení coupling.....	74
Obrázek 85 Metoda efektivního vrubového napětí – nastavení parametrů – nastavení symetrie	75
Obrázek 86 Metoda efektivního vrubového napětí – zobrazení svaru – geometrie pro vrubové napětí.....	76
Obrázek 87 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – základní vyhodnocení – varianta 1 – První hl. napětí.....	77
Obrázek 88 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – základní vyhodnocení – zobrazení výřezu submodelu	78
Obrázek 89 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – submodel – varianta 2 - von Mises	78
Obrázek 90 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – submodel – zobrazení výřezu plátu	79
Obrázek 91 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – plát – varianta 1 - von Mises	79
Obrázek 92 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – plát – varianta 1 - von Mises – detail	80
Obrázek 93 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – plát – varianta 1 - První hl. napětí – detail	80
Obrázek 94 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – plát – varianta 2 - von Mises – detail výběru hodnot	82
Obrázek 95 Metoda efektivního vrubového napětí – S-N křivka pro třídu FAT 630 – 1. hl. napětí.....	85
Obrázek 96 Metoda efektivního vrubového napětí – S-N křivka pro třídu FAT 560 - napětí von Mises	85

Seznam tabulek

Tabulka 1 Definice svařovacích ploch [11]	10
Tabulka 2 Rozdělení dle směrů svařování [11].....	10
Tabulka 3 Exponenty korekce tloušťky [5]	31
Tabulka 4 Chemické vlastnosti oceli L-CM3.7 [16].....	38
Tabulka 5 Mechanické vlastnosti oceli L-CM3.7 [16]	38
Tabulka 6 Kontrolní rozměry vzorků.....	41
Tabulka 7 Měřené průměry vzorků.....	43
Tabulka 8 Počty cyklů – první varianta redukcí – utržené redukce.....	47
Tabulka 9 Počty cyklů – druhé varianta redukcí.....	49
Tabulka 10 Hladina R = 0.1 – vzorky bez svarových vad – hodnoty zatěžování.....	50
Tabulka 11 Hladina R = 0.1 – vzorky se svarovými vadami – hodnoty zatěžování..	51
Tabulka 12 Hladina R = 0.1 – vzorky bez svarových vad – výsledky testování	51
Tabulka 13 Hladina R = 0.1 – vzorky se svarovými vadami – výsledky testování ...	51
Tabulka 14 Hladina R = 0.1 – vzorky bez svarových vad – stav vzorků.....	52
Tabulka 15 Hladina R = 0.1 – vzorky se svarovými vadami – stav vzorků	52
Tabulka 16 Hladina R = 0.5 – vzorky bez svarových vad – hodnoty zatěžování.....	54
Tabulka 17 Hladina R = 0.5 – vzorky bez svarových vad – výsledky testování	54
Tabulka 18 Hladina R = 0.5 – vzorky bez svarových vad – stav vzorků.....	54
Tabulka 19 Metoda nominálních napětí – hodnoty pro výpočet	59
Tabulka 20 Metoda nominálních napětí – vypočítané hodnoty	60
Tabulka 21 Metoda nominálních napětí – vypočítané hodnoty – hodnoty pro únavové S-N křivky.....	61
Tabulka 22 Metoda strukturálních hot spot napětí – vyhodnocení – submodel – napětí pro velikosti elementu	68
Tabulka 23 Metoda strukturálních napětí – vyhodnocení – submodel – hot spot napětí vzorků.....	68
Tabulka 24 Metoda strukturálních napětí – vyhodnocení – submodel – hot spot napětí vzorků.....	69
Tabulka 25 Metoda efektivního vrubového napětí – geometrie svaru vzorku.....	75
Tabulka 26 Metoda efektivního vrubového napětí – kontrolní rozměry vzorků	76
Tabulka 27 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – základní vyhodnocení	77
Tabulka 28 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – submodel	78
Tabulka 29 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – plát.....	81
Tabulka 30 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – celkový přehled	81
Tabulka 31 Metoda efektivního vrubového napětí – vyhodnocení – hodnota pro výpočet.....	81
Tabulka 32 Metoda efektivního vrubového napětí – efektivní vrubové napětí – MPa na 1 N	82



Tabulka 33 Metoda efektivního vrubového napětí – efektivní vrubové napětí – napětí MKP	83
Tabulka 34 Metoda efektivního vrubového napětí – efektivní vrubové napětí – První hlavní napětí	83
Tabulka 35 Metoda efektivního vrubového napětí – efektivní vrubové napětí – Napětí von Mises	84