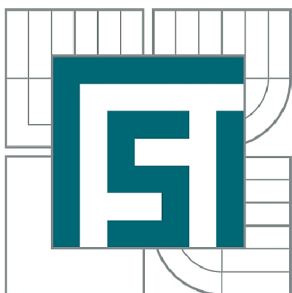


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

## ROZBOR ÚNOSNOSTI VYBRANÝCH SVAŘOVANÝCH KONSTRUKČNÍCH UZLŮ ZATĚŽOVANÝCH STATICKY A CYKlicky

ANALYSIS OF LOAD CAPACITY OF SELECTED WELDED STRUCTURAL JOINTS UNDER  
STATIC AND CYCLIC LOAD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MICHAL PEČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR VOSYNEK

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Michal Peč

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Inženýrská mechanika a biomechanika (3901T041)**

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

### **Rozbor únosnosti vybraných svařovaných konstrukčních uzlů zatěžovaných staticky a cyklicky**

v anglickém jazyce:

### **Analysis of load capacity of selected welded structural joints under static and cyclic load**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Doposud neexistuje jednotný předpis pro vyhodnocení statické únosnosti netypických svařovaných konstrukčních uzlů ocelových konstrukcí. Typické svařované konstrukční uzly jsou většinou posuzovány analytickými metodami, které jsou navrženy tak, aby bylo možné použít nominálních hodnot napětí. Kombinace zatížení většinou není zohledněna. Při použití výpočtového modelování (např.: metoda konečných prvků) je situace také nejasná díky například: geometrickým singularitám vznikajícím na rozhraní housenky svaru a základního materiálu, různě rozloženému zatížení svarového spoje, použití různých prvků (skořepinové prvky, objemové prvky).

Posouzení cyklicky zatěžovaných svarových spojů je v tomto ohledu mnohem lépe zpracováno, hlavně v rámci výpočtového modelování metodou konečných prvků.

Cíle diplomové práce:

Rešeršní část: Vyhledání metodik posouzení únosnosti svarových spojů (typických a netypických) při statickém a při cyklickém zatěžování.

Praktická část: Aplikování nejvhodnějších metodik na vybrané netypické svarové spoje při použití metody konečných prvků s následnou analýzou dosažených výsledků. Větší důraz by měl být kladen na statické posouzení pevnosti

Seznam odborné literatury:

ČSN 05 0120. Výpočet svarových spojů strojních konstrukcí. 1.5.1972.

ČSN 27 0103. Navrhování ocelových konstrukcí jeřábů. Výpočet podle mezních stavů. 1.1.1991.

ČSN EN 1993-1-8. <i>Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčníků</i>. 2. vyd. 1.11.2013.

HOBACHER, A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components: International Institute of Welding [doc. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07]. Paris, France: International Institute of Welding, 2008.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Vosynek

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 24.10.2014

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Svařování je hojně využívaná metoda spojování součástí díky své efektivitě, ekonomičnosti a téměř nekonečným možnostem typů spojení. Velká variabilita geometrických konfigurací svarů je problematická vzhledem k posouzení svarového spoje. V závislosti na této problematice vznikla tato diplomová práce zaměřená na posouzení svarových spojů staticky a cyklicky.

Práce se v první části zabývá rešeršní studií používaných metod hodnocení svarů a v závislosti na zjištěných možnostech je následně vybrána americká norma AISC pro posouzení svarových spojů. Metoda je aplikována do MKP a pomocí ní jsou vyhodnoceny jednoduché svarové spoje.

Pomocí MKP jsou spočteny tři příklady na nichž je provedena srovnávací analýza. Srovnání se provádí s analytickým řešením na základě změn parametrů výpočtového modelu. Změny se týkají především materiálových vlastností, velikostí sítě a dělení svarů na segmenty.

Na základě poznatků z jednoduchých analýz byla metoda rozšířena na obecnější rovinné svarové spoje s možností stanovení maximální zatěžující síly.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Posouzení svaru, MKP analýza, AISC, Eurokód 3, IIW

## ABSTRACT

Welding is a widely used method of connecting components because of its efficiency, great value and almost endless possibilities of joint types. A great variability of geometrical configurations of welds is problematic due to the assessment of the weld joint. Depending on this topic this thesis was focused on the assessment of weld joints statically and cyclically.

Work in the first part deals with the search of methods for evaluation of welds and depending on identified options is subsequently selected American standard AISC assessment of welded joints. The method is applied into FEA analysis and simple welded joints are evaluated.

Using FEM are computed three examples on which a comparative analysis was performed. Comparisons were made with the analytical solution based on changes in the parameters of the computational model. The change is primarily related to material properties, mesh size and division of the weld on segments.

On the basis of knowledge from analysis of simple joints, method was extended to more general welded joints with the possibility of determining the maximum loading force.

## KEYWORDS

Welds assessment, FEA analysis, AISC, Eurocode 3, IIW

PEČ, Michal, *Rozbor únosnosti vybraných svařovaných konstrukčních uzlů zatěžovaných staticky a cyklicky*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2015. 111 s. Vedoucí práce Ing. Petr Vosynek.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Rozbor únosnosti vybraných svařovaných konstrukčních uzlů zatěžovaných staticky a cyklicky“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení S 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení S 152 trestního zákona c. 140/1961 Sb.

Brno .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Tato práce vznikla za podpory a na přístrojovém vybavení NETME Centre, regionálního výzkumného a vývojového centra vybudovaného z finančních prostředků Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), Reg. č.: CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v navazující fázi udržitelnosti prostřednictvím projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Vosynkovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni, kteří mě během studia a psaní této práce podporovali.

Brno .....

.....

(podpis autora)





# OBSAH

<b>1 Úvod</b>	<b>11</b>
1.1 Problémová situace . . . . .	11
1.2 Formulace problému . . . . .	11
1.3 Formulace cílů a řešení . . . . .	11
1.4 Popis řešené soustavy . . . . .	12
1.5 Standardní a nestandardní konfigurace . . . . .	12
1.6 Svařování . . . . .	14
1.7 Svarové spoje . . . . .	14
1.8 Problémy spojené se svařováním . . . . .	15
1.8.1 Tepelné ovlivnění . . . . .	15
1.8.2 Změna mikrostruktury v tepelně ovlivněné oblasti . . . . .	16
1.8.3 Mechanické změny v tepelně ovlivněné oblasti . . . . .	19
1.8.4 Koncentrace napětí . . . . .	21
1.8.5 Deformace a zbytková napětí . . . . .	21
1.9 Systém podstatných veličin . . . . .	23
1.10 Výběr metody řešení a prostředků . . . . .	24
1.11 Nastudovaná literatura a články . . . . .	25
<b>2 Rešeršní práce</b>	<b>26</b>
2.1 Přístupy posuzování svarových spojů . . . . .	26
2.1.1 ČSN 05 0120 . . . . .	28
2.1.2 ČSN EN 1993-1-8 . . . . .	31
2.1.3 ČSN EN 1993-1-9 . . . . .	32
2.1.4 AWS D1.1 a AISC . . . . .	34
2.1.5 FKM . . . . .	38
2.1.6 IIW . . . . .	39
2.1.7 DNV . . . . .	44
2.1.8 Únosnost svaru . . . . .	44
2.1.9 Závěr rešeršní práce . . . . .	45
2.2 Vybraná metoda - AISC . . . . .	45
2.2.1 Princip metody okamžitého středu otáčení . . . . .	46
2.2.2 Excentrické zatížení v rovině svarů . . . . .	47
2.2.3 Excentrické zatížení mimo rovinu svarů . . . . .	49
2.2.4 Přípustná napětí a deformace - podmínky pro MKP . . . . .	50
2.2.5 Tabelované geometrie svarové skupiny . . . . .	51
2.2.6 Porovnání s ČSN . . . . .	51
2.3 Experimentální data . . . . .	53
<b>3 Výpočtové modelování</b>	<b>54</b>
<b>4 Analytický přístup řešení</b>	<b>56</b>
4.1 Modifikace systému podstatných veličin . . . . .	56
4.2 Příklad 1 - dva horizontální svary . . . . .	57
4.3 Příklad 2 - C svar . . . . .	58

4.4	Příklad 3 - dva vertikální svary . . . . .	59
4.5	Výpočty příkladů dle ČSN . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Postup výpočtu</b>	<b>61</b>
5.1	Získávání sil ze segmentů . . . . .	61
5.2	Získávání deformací ze segmentů . . . . .	62
5.3	Lineární model materiálu a kompletní rovnice (KR) . . . . .	63
5.4	Ideálně pružně plastický model materiálu a KR . . . . .	63
5.5	Lineární model materiálu a částečná rovnice (ČR) . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Numerický přístup řešení</b>	<b>65</b>
6.1	Modifikace systému podstatných veličin . . . . .	65
6.2	Model materiálu . . . . .	66
6.3	Model geometrie . . . . .	66
6.4	Model diskretizace geometrie . . . . .	66
6.5	Model okrajových podmínek . . . . .	67
6.6	Příklad 1 - dva horizontální svary . . . . .	68
6.7	Příklad 2 - C svar . . . . .	69
6.8	Příklad 3 - dva vertikální svary . . . . .	70
6.9	Příklad 4 - obecný svar . . . . .	71
<b>7</b>	<b>Analýza dosažených výsledků</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>Diskuse</b>	<b>74</b>
<b>9</b>	<b>Závěr</b>	<b>76</b>
	<b>Seznam použitých zdrojů</b>	<b>79</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>84</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>88</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>90</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>92</b>

# 1 ÚVOD

Ústav mechaniky, mechatroniky a biomechaniky (ÚMTMB) se zabývá mnoha projekty. Na jedné straně se biomedicínská část ústavu snaží o spolupráci s doktory a aplikovat tak principy klasické mechaniky na biologické struktury. Na straně druhé se mechatronika a inženýrská mechanika zapojuje do mnoha projektů zadávaných firmami. Činnost ústavu je tak úzce spjatá s reálnými problémy průmyslu a zdravotnictví. Již během bakalářského studia až do současnosti jsem se aktivně účastnil rozličných projektů, které ústav získal od firem, se kterými spolupracuje. Mnohé zakázky, které se řešily byly svařované konstrukce, které bylo nutné jistým způsobem vyhodnotit dle požadavků zákazníka. Mnohokrát se naskytly otázky podle jakých norem a doporučení hodnotit konstrukci, jestli je hodnocení korektní a dostatečné. To byl popud k vytvoření mé diplomové práce na téma Rozbor únosnosti vybraných svařovaných konstrukčních uzlů zatěžovaných staticky a cyklicky.

## 1.1 Problémová situace

Svařování je v dnešní době velice rozšířený způsob spojování součástí. Je tomu tak kvůli efektivitě, ekonomičnosti a rozličným možnostem provedení. To na druhou stranu přináší také jistá negativa. Do materiálu svaru a svařovaných součástí se vnesou nehomogenity, zbytková napětí a jiné ovlivňující faktory [36, str. 294]. Z toho plyne, že posouzení svarových spojů je velice komplexní a složitá úloha při jejímž řešení vyvstává mnoho otázek. Jak zahrnout nehomogenity v materiálu? Jak zahrnout nedokonalost provedení svaru? Jak hodnotit neobvyklé konfigurace provedených svarů? To a mnoho dalších otázek nás přivádí k problému, jak posuzovat svařované konstrukce. Během doby používání svarových spojů vzniklo mnoho metod pro posouzení, ale není jasné, která je nejvhodnější, a která do posouzení zahrne co možná nejvíce ovlivňujících aspektů.

## 1.2 Formulace problému

Na základě problémové situace byl stanoven problém: Rozbor metod posouzení nestandardních svarových spojů s ohledem na počet zátěžných cyklů a následné provedení analýzy vybraných konstrukčních uzlů pomocí metody konečných prvků.

## 1.3 Formulace cílů a řešení

Cíle byly stanoveny na základě potřeb praktického hodnocení konstrukcí vyplývajících z výše uvedeného textu a na základě diskuze s vedoucím diplomové práce, jsou stanoveny následovně:

- rešeršní studie hodnocení svarových spojů,

- stanovení nestandardního svarového spoje, na kterém budou prováděny analýzy,
- aplikace nejvhodnějších metod na netypický svarový spoj s použitím metody konečných prvků,
- analýza dosažených výsledků.

## 1.4 Popis řešené soustavy

Na obr. 1.1 jsou znázorněny dva základní typy svarů. Na obou jsou vyznačeny základní části, které jsou podstatné pro posuzování svarových spojů (terminologie dle [8] a [9]). Význam jednotlivých částí je dán následující legendou:

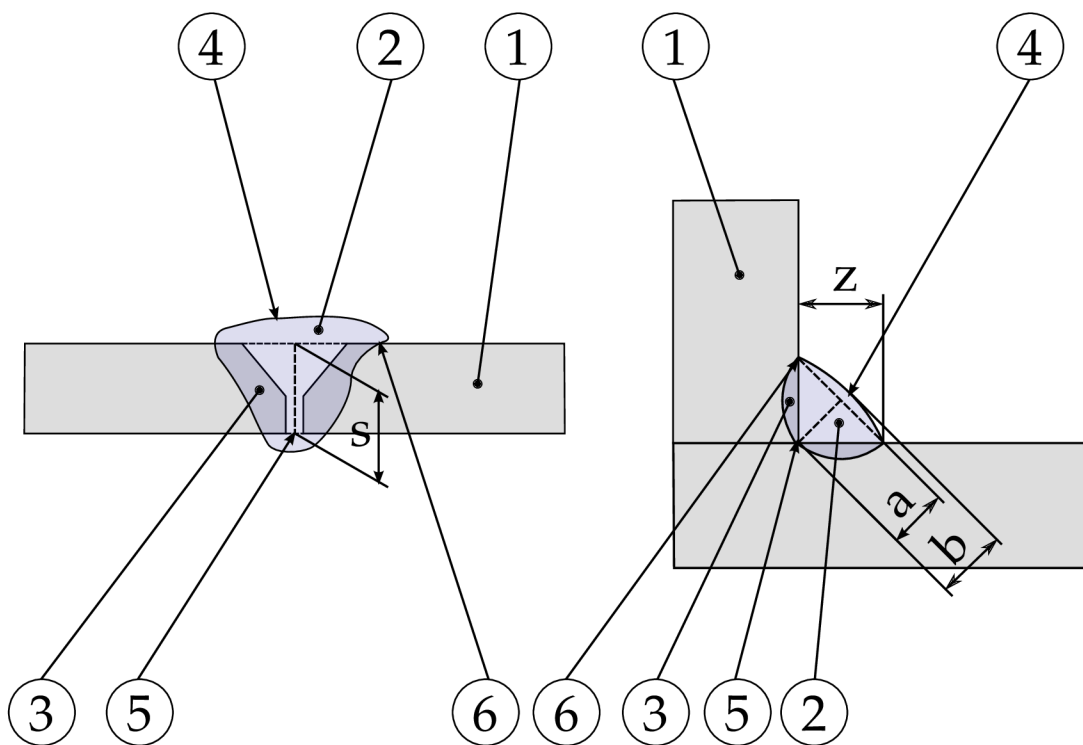
1. Základní materiál,
2. svarový kov,
3. závar (tepelně ovlivněná oblast),
4. povrch svaru,
5. kořen svaru,
6. pata svaru.

Navíc jsou na obr. 1.1 vyznačeny základní rozměry svaru:

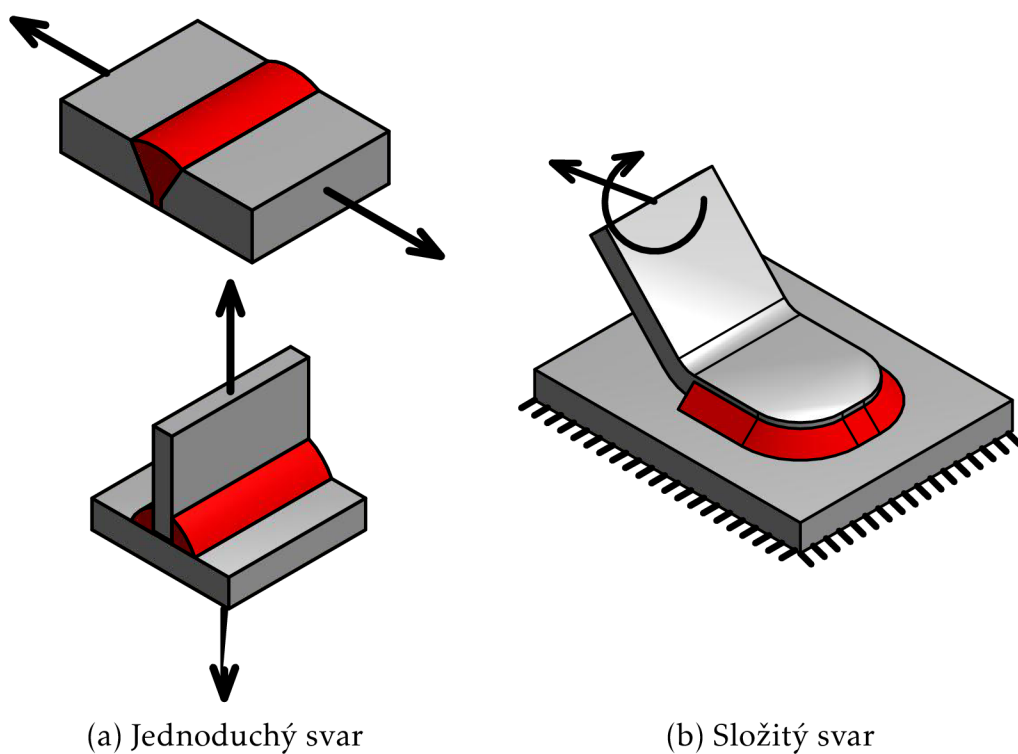
- V případě tupého svaru (jednostranný V svar) je vyznačena účinná (výpočtová) tloušťka  $s$ . Tato tloušťka nezahrnuje převýšení ani podložení svaru.
- U koutového svaru je znázorněna tloušťka svaru  $z$  a výška svaru  $a$ , představující odvěsnu rovnoramenného trojúhelníka vepsaného do průřezu svaru. Vztah mezi tloušťkou a výškou svaru je následující:  $a = 0,7 \cdot z$ . Rozměr  $b$  představuje skutečnou výšku svaru.

## 1.5 Standardní a nestandardní konfigurace

Práce by se měla zabývat především svary nestandardními, proto je potřeba vymezit tento pojem, jak bude v práci chápán. Za standardní svary jsou považovány spojení dle obr. 1.2(a), které jsou dány normami. Tato spojení představují převážně rovné svary a směr namáhání kolmý popřípadě rovnoběžný s tímto svarem (namáhání je vždy buď jen tah, ohyb, smyk, popřípadě krut). Spojení jsou normalizována a vztahy pro vznikající napětí ve svarech jsou tabelovány. Pokud budeme hovořit o nestandardních svarových spojkách budeme myslet geometricky a prostorově komplikované svary aplikované na obecně tvarované součásti, zatížení je obecné a kombinované (může se skládat z několika zátěžných stavů). Příklad takového spoje je uveden na obr. 1.2(b).



Obr. 1.1: Základní části svařovaných součástí.



Obr. 1.2: Dělení svaru podle složitosti

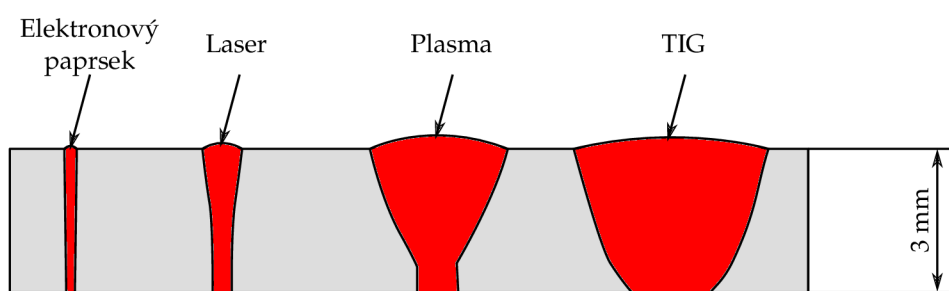
## 1.6 Svařování

Svařování se podle působících sil ve spoji řadí do kategorie fyzikálních spojů (další dvě kategorie jsou spoje mechanické a chemické). Jedná se o spojení mezi jednotlivými atomy, nesouhlasně nabitými ionty a molekulami, vedoucí k vytvoření fyzikálních sil. Toto spojení je při respektování zemských zákonitostí přirozené. To je myšleno tak, že částice se snaží najít svou stabilní konfiguraci a s tím související snížení jejich energie [36, str. 288].

Svařování je proces spojování dvou a více dílů za působení vysokých teplot, tlaku nebo obou činitelů čímž se umožní vytvoření výše uvedené vazby. Svařování je většinou spojováno s kovovými materiály, je ovšem možné svařovat také další materiály jsou polymery, sklo, keramika, atd. V této práci se budeme zabývat pouze svařováním kovových dílců. Svařování obecně můžeme rozdělit následovně:

- Tavné svařování za působení tepla (s mechanickým nebo bez mechanického vlivu),
- tlakové svařování (za tepla či studena) [36].

Vlivem rychlých tepelných změn za vysokých teplot dochází ke změnám fyzických, metalurgických a mechanických vlastností svařovaných materiálů. Proto je potřeba dostatečně porozumět celému procesu a zajistit tak, aby svar nebylo kritické místo konstrukce. [5] Při svařování se využívá mnoho různých technologií k vytvoření svarů (dělení bude uvedeno dále). [54] Výsledný vzhled svaru dle různých technik může vypadat dle obr. 1.3.



Obr. 1.3: Ukázka vytvořených tvarových spojů. [54]

## 1.7 Svarové spoje

Rozdělení svařovacích procesů bylo rozděleno výše. My se tedy budeme zabývat tavným svařováním, které se může uskutečnit několika různými svařovacími technikami. Liší se jak v principu, tak v teplotě (uvedeno v závorkách) [42, str. 15, 28], [36]:

- Elektrickým obloukem (3000 °C až 20 000 °C dle zvolené technologie - TIG, MIG, FCAW, SAW a jiné),
- plamenem (2500 °C až 3200 °C),
- elektronovým paprskem (až 25 000 °C),
- laserem (25 000 °C),

- plazmou (20 000 °C - 24 000 °C).

Příklad svarového spoje je uveden na obr. 1.2. Různé typy svarů podle vzájemné polohy svařovaných součástí [29]:

- tupé,
- přeplátované,
- rohové,
- typu „T“,
- křížové a jiné.

Pokud bychom svary hodnotily podle svaru samotného (podle příčného průřezu) máme následující kategorie [29]:

- tupé,
- koutové,
- bodové,
- lemové a jiné.

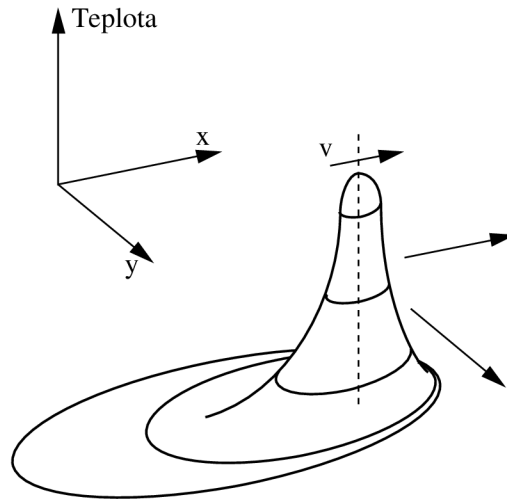
V běžném průmyslu jsou nejpoužívanější svary tupé a koutové. Bodové svary v převážné většině používá průmysl automobilový.

## 1.8 Problémy spojené se svařováním

Svařování obecně velmi ovlivňuje lokální vlastnosti svařovaných dílů. V určitých případech tento proces může být původem vad jako jsou trhliny, póry, křehnutí a jiné. Proto je nutné pochopit tento proces a vyhnout se těmto změnám materiálu. Výchozí literatura [5], [36].

### 1.8.1 Tepelné ovlivnění

Svařovací proces je charakterizovaný jako pohyb velmi malého množství hmoty o vysoké teplotě, která je následována ochlazováním. Ochlazování je zapříčiněno chladnějším okolím a je ovlivněno především velikostí ohřáté plochy, materiálovými vlastnostmi a svařovanou sestavou. Pokud uvažujeme pohyblivý tepelný zdroj (existuje i svařování bez pohyblivého zdroje tepla - odporové svařování) teoretické reprezentativní rozložení teplot v aktuálním místě svařování - viz obr. 1.4.



Obr. 1.4: Rozložení teploty na svařované součásti v místě tepelného zdroje [5].

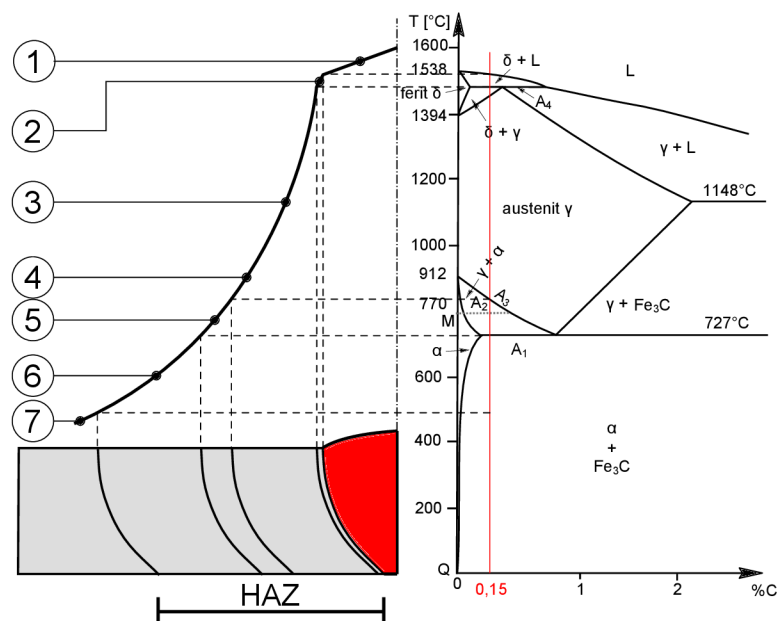
Teplota u tenkých svařovaných součástí je více roztažena do směrů  $x$  a  $y$  než u tlustých součástí. Je tomu tak kvůli možnosti šíření teploty po tloušťce u tlustých součástí. Obr. 1.4 znázorňuje obecně rozložení teploty v aktuálním místě svařování. Toto rozložení se velmi liší při svařování tenkých a tlustých součástí.

## 1.8.2 Změna mikrostruktury v tepelně ovlivněné oblasti

### Transformace během ohřívání

Rychlé změny teploty během svařovacího cyklu neumožňují využití rovnovážných digramů popisujících jednotlivé fáze kovů. Můžeme pouze přibližně kvalitativně posoudit vzniklou strukturu v tepelně ovlivněné oblasti. Jako příklad uvedeme analýzu struktury konstrukční oceli (které se nejčastěji používají pro svařované konstrukce) pomocí rovnovážného diagramu a maximálních vzniklých teplot při svařování (obr. 1.5).





Obr. 1.5: Vliv teploty na mikrostrukturu tepelně ovlivněné oblasti. ([5], [51])

Legenda k obr. 1.5: 1) ztuhlý roztavený kov, 2) přechodová oblast mezi kapalným a tuhým stavem, 3) oblast růstu zrn, 4) oblast rekrystalizace, 5) částečně transformovaná oblast, 6) normalizovaná oblast, 7) neovlivněný základní materiál.

Dle předchozího obrázku uvažujeme ocel s obsahem uhlíku  $T=0,15\%$  a v okolí vytvořeného svaru můžeme popsat tepelně ovlivněnou oblast (HAZ) skládající se z následujících podoblastí.

- *Neovlivněný základní materiál* nedosáhl transformační teploty danou bodem  $A_1$  ( $T=727\text{ }^\circ\text{C}$ ) a proto materiál zůstává v původním stavu (složen z  $\alpha$ -feritu a perlitu).
- *Popuštěná (podkritická) oblast* se vyskytne, pokud teplota překročí hodnotu  $T=600\text{ }^\circ\text{C}$ . Při tomto procesu dochází ke změně lamelového tvaru cementitu (dochází k zakulacování). Tím vznikne jemnější struktura zvyšující pevnost v tahu.
- *Částečně transformovaná oblast* mezi hranicemi  $A_1$  a  $A_3$  (v našem případě přibližně  $T=830\text{ }^\circ\text{C}$ ). Zde se ferit vyskytuje také s nově vytvořenou fází - austenitem ( $\gamma$  - ferit).
- *Zóna rekrystalizace* vyskytující se nad hranicí  $A_3$  až do teploty přibližně  $T=1495\text{ }^\circ\text{C}$ , do které se všechen ferit přemění na austenit. V této oblasti nastává postupné zvětšování zrn austenitu (někdy se tato oblast nazývá *hrubozrnná oblast*). V této oblasti se kvůli velikosti zrn vyskytují určité metalurgické problémy.
- *Oblast výskytu kapalné a tuhé fáze* je část fázového diagramu, kde se vyskytuje pevný  $\delta$ -ferit a kapalná fáze. Tato oblast představuje spojení mezi základním materiálem a přídavným materiálem.
- *Roztavený kov* je směs základního materiálu, přídavného materiálu a okolního prostředí.

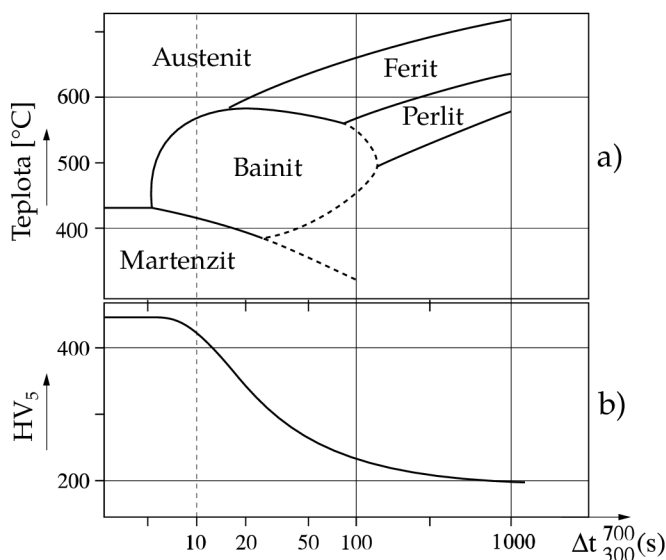
Moderní oceli mají optimalizovaný poměr mechanických vlastností (odolnost, tažnost a houževnatost) daných tvrdostí díky přesně vytvořené mikrostruktuře. Tato skutečnost je velmi narušována zkoumaným procesem – svařováním, protože při tomto ději měníme strukturu materiálu a přidáváme do něj další látky. [5]

### Transformace během ochlazování

Pokud budeme mluvit o konstrukčních ocelích, při svařování v tepelně ovlivněné oblasti vznikne austenitická struktura. Proto je nutné zvažovat ochlazování z teploty minimálně  $T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Transformace závislé na rychlosti ochlazování jsou popsány CCT diagramy (transformace kontinuálním ochlazováním) a v závislosti na těchto diagramech jsou vytvořeny průběhy tvrdosti struktury vzniklé mikrostruktury. Ukázka těchto diagramů je na obr. 1.6.

V závislosti na rychlosti ochlazování rozlišujeme různé typy vzniklých struktur.

- *Pro vysoké rychlosti ochlazování* (oblast pod čárkovanou svislou úsečkou) vzniká martenzitická struktura. Jedná se o přesycený tuhý roztok uhlíku v  $\alpha$  feritu jehož základní vlastnosti jsou vysoká pevnost a tvrdost, která závisí pouze na obsaženém množství uhlíku v oceli.
- *Pro středně rychlé teploty ochlazování* vzniká bainitická struktura, která je velice podobná struktuře martenzitu. Bainit má jehlicovou strukturu a precipituje karbidy. Jeho vznik je zapříčiněn pouze pomalejší změnou teploty, protože jejich vznik je přibližně za stejných teplot.
- *Pro pomalé rychlosti ochlazování* vzniká feriticko-perlitická struktura.



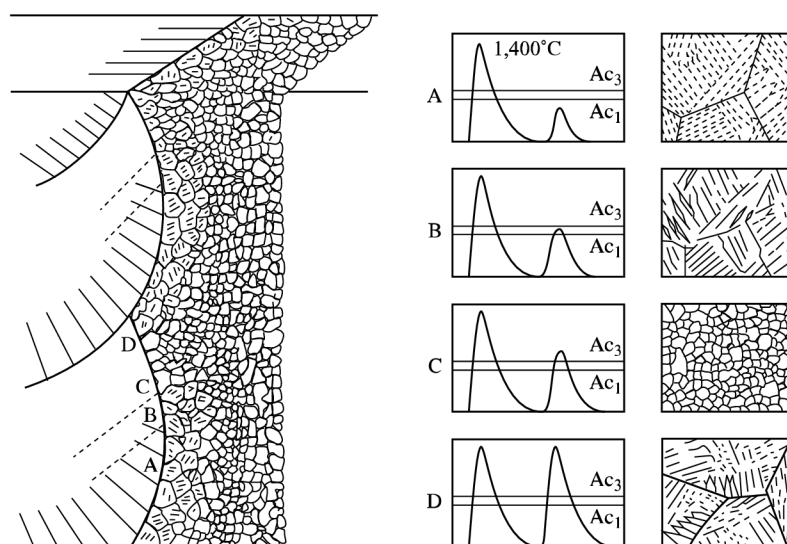
Obr. 1.6: a) CCT diagram, b) Diagram určující tvrdost struktury. [5]

### Případ vícenásobného svařování

Při spojování tlustších dílů je zapotřebí vytvořit vícenásobný svár (vrstvy jednotlivých svarů). Při tomto procesu dochází k násobnému ohřevu a tím se vytváří

velmi složitá struktura. Při vytváření nového svaru na předchozím svaru se díky vysoké teplotě „mažou“ vlivy předchozích cyklů a tyto cykly ohřevů lze popsat určitými charakteristikami - třemi zónami.

1. Zóna s hrubými zrny neovlivněna dalšími průchody - případ A. Mikrostruktura a mechanické vlastnosti jsou velmi blízké zóně D.
2. Oblast s hrubými zrny, které bylo ohřáto mezi teploty  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  (interkritické pole) případ B. Probíhající transformace  $\gamma$  feritu na  $\alpha$  ferit probíhá na hranicích zrn austenitu, protože je to zóna bohatá na uhlík. Během chlazení se austenit může částečně transformovat na martenzit a austenit, tato mikrostruktura je velmi málo houževnatá. Tento problém lze odstranit reohřevem nebo jiným tepelným zpracováním.
3. Oblast s jemnými zrny je vytvořena při mírném překročení teploty  $A_{c3}$  případ C. Tato zóna má velmi příznivé mechanické vlastnosti a při svařování se snažíme o vytvoření této struktury (snaha nahrazovat touto zónou předchozí oblast).



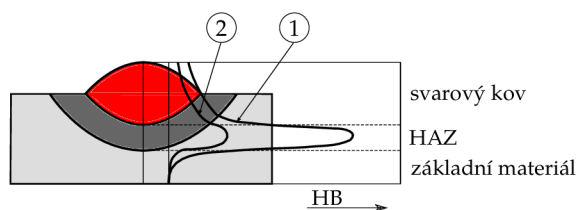
Obr. 1.7: Schématické cykly reohřevu a vzniklé mikrostruktury. [5]

### 1.8.3 Mechanické změny v tepelně ovlivněné oblasti

Významné změny mikrostruktury v okolí svaru ztlačně ovlivňují mechanické vlastnosti vzhledem k původním vlastnostem základního materiálu. [36], [5]

#### Ovlivnění tvrdosti

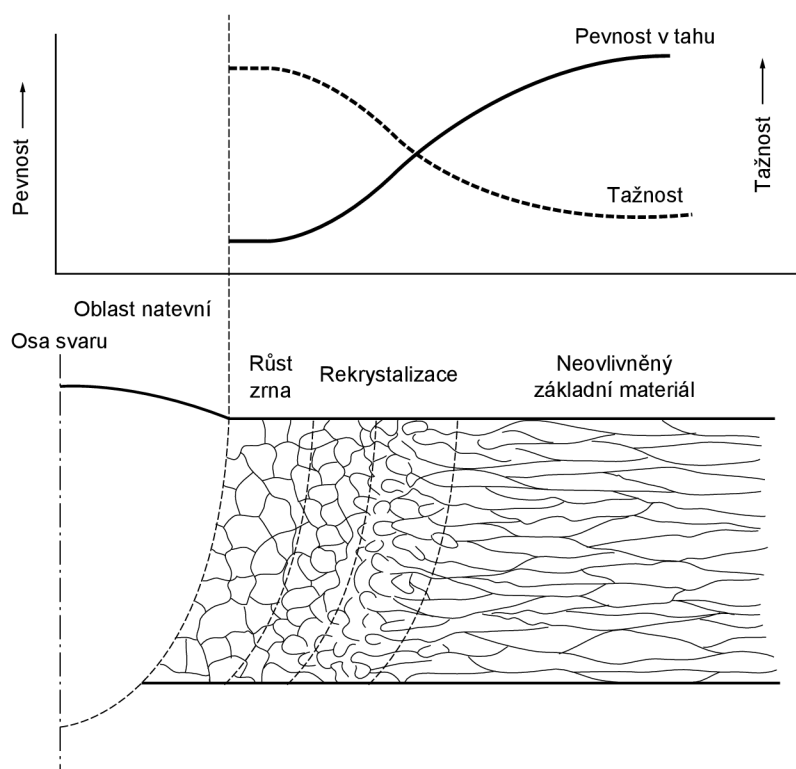
Obecně tepelný cyklus, potřebný k vytvoření svaru spojený s oblastí hrubých zrn, vytvoří lokální zvýšení tvrdosti vzhledem k základnímu materiálu. Průběh tvrdosti po průřezu svařovanou součástí je na obr. 1.8. Kde křivka 1 znázorňuje průběh tvrdosti, pokud materiál nebyl před svařováním předehřát, a křivka 2 je s předehřevem materiálu. [5]



Obr. 1.8: Změna tvrdosti ve svařované součásti. [30]

### Ovlivnění tažnosti a pevnosti

Efekt změny mikrostruktury je pozorovatelný s počátkem rekrystalizace (tvorba nové fáze, její ustálení a růst zrn při teplotách přibližně  $(0,4 \div 0,5) T_{mp}$ , kde  $T_{mp}$  je teplota tání. Jedná se o tvoření nových zrn bez předchozích deformací. Tepelný efekt na změnu mechanických vlastností se začne projevovat až se stádiem ochlazení. Nastává snížení meze kluzu a tvrdosti, doprovázené zvýšením tažnosti s nástupem fáze rekrystalizace. Růst zrn má pouze malý přínos do změny těchto vlastností. Změnu mikrostruktury a průběhy vlastností jsou na obr. 1.9.



Obr. 1.9: Vliv svařování na mechanické vlastnosti a mikrostrukturu[36]

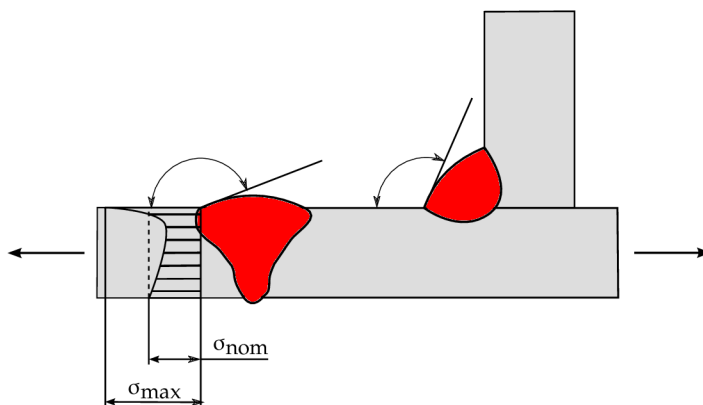
## 1.8.4 Koncentrace napětí

Jedná se o místo, kde úroveň napětí roste nad nominální (průměrné) napětí. Je to stejné navýšení napětí jako u plátů s dírou, popřípadě hřídeli se zápichem. Koncentrace napětí vzniká na místech, kde se redukuje příčný průřez, v místech nespojitosti a změny tvaru [33]. Obecně řečeno, veškeré změny mající vliv na tok napětí v součásti produkují koncentrace napětí.

Efekt vrubu se vyskytuje v místech paty a kořene svaru, kde se ovšem také vyskytuje velice nehomogenní materiál (smíšený materiál skládající se z svarového kovu, základního materiálu, nenataveného základního materiálu a nečistot). Po procesu svaření nastane náhlé ochlazování a v těchto místech se vytvoří póry, struska a další inkluze, které zvyšují napětí při zatížení.

Svarová housenka představuje změnu tvaru součásti, a proto se v jejím místě tvoří koncentrace napětí. Pokud bude přechod mezi základním materiálem a svarovou housenkou postupný, bude koncentrace minimální. To ovšem nastává jen velmi zřídka a v tomto přechodu je náhlá změna tvaru, která způsobuje velké koncentrace napětí.

Jak je vidět na obr. 1.10, v místě paty svaru dochází k radikálnímu nárůstu napětí. Dále z obrázku můžeme vyzkoušet, že směrnice v místě paty svaru tupého a koutového svaru je odlišná. To má za následek větší koncentraci napětí u koutových svarů, protože změna tvaru je zde větší než u tupých svarů. [33], [46]



Obr. 1.10: Porovnání koncentrace napětí tupého a koutového svaru.[33]

## 1.8.5 Deformace a zbytková napětí

Vnitřní napětí je napětí vyskytující se ve svarku bez působení vnějšího zatížení. Toto napětí je vyvoláno přívodem tepla a je doprovázeno také deformacemi. Máme dvě různá napětí: přechodná a zbytková. Přechodná napětí vymizí s ochlazením konstrukce na okolní teplotu. Zbytková napětí přetrvávají ve svarku i po ochlazení a zůstávají zde kvůli plastizaci svarku. Zbytková napětí jsou pro konstrukci nebezpečná, protože mohou u dále tepelně neošetřených konstrukcí dosahovat až meze kluzu, to je nepřijatelné. Současně s vnitřním napětím se vyskytuje také deformace

svarku. Oba jevy jsou přímo souvislé s tepelnou energií dodanou do procesu při svařování. Oběma těmto jevům nelze zabránit, můžeme je jedině minimalizovat.

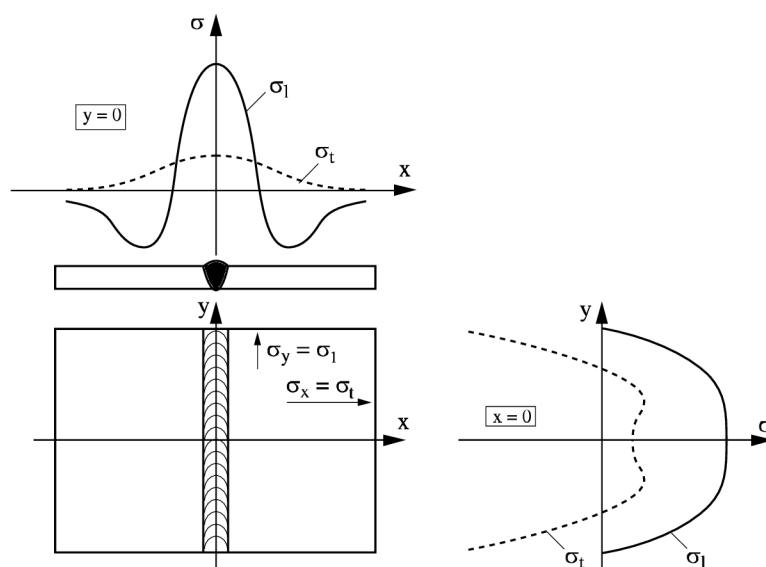
## Deformace

Proces svařování způsobí, že svařenec je nerovnoměrně ohřívá v rozmezí teplot okolí až k teplotám tavení kovu. Tímto se radikálně mění fyzikální a mechanické vlastnosti mající vliv na objemové změny materiálu. Smrštění svarku je způsobeno zmenšením objemu svarového kovu při jeho ochlazování. Pro příklad, při svařování uhlíkové oceli se součinitelem teplotní roztažnosti  $\alpha = 0,013 \text{ K}^{-1}$  se konstrukce prodlouží o 1,3 mm při ohřátí o 100 °C. Vytváření jednotlivých svarů probíhá v určitém sledu a tak se jednotlivé oblasti vzájemně ovlivňují (myšleno v omezení místního prodloužení materiálu), kde výsledkem je plastická deformace. Po ochlazení působí ve zplastizovaných místech tahová napětí a tato místa působí na okolí napětím tlakovým.

## Zbytková napětí

Při svařování dochází k plastické deformaci svarového kovu, protože okolní materiál brání libovolnému rozpínání. Obdobně při ochlazování se materiál nemůže libovolně zkracovat, jelikož je opět vázán okolím. Tím dojde k vnitřnímu napětí ve svarovém spoji. Ve svarku platí, že tlaková a tahová napětí jsou v rovnováze (popsáno i v odstavci Deformace výše).

Je známo, že při svařování neupnutých dílů je deformace vysoká, ovšem vnitřní napětí malé. Naopak u upnutých svarků jsou deformace malé, ale vnitřní napětí vysoká. To může způsobit velké deformace nebo vznik trhlin. [29], [33], [46], [51]



Obr. 1.11: Průběh napětí v součásti po svaření. [5]

## 1.9 Systém podstatných veličin

Pro správné stanovení všech důležitých veličin byl použit systémový přístup, pomocí něhož byl vytvořen systém podstatných veličin. Pro daný problém týkající se posouzení svarových spojů je použit následující systém podstatných veličin, který bude uvažován v celém následujícím textu. Tento globální systém podstatných veličin je souhrnem všech parametrů a veličin, majících vliv na svarové spoje. Později u jednotlivých přístupů hodnocení svarů bude tento systém podrobněji specifikován. [23]

### S0 – Veličiny popisující okolí entity

Entita je umístěna tam, kde je potřeba pevného nerozebíratelného spojení definovaného většinou výkresovou dokumentací. Okolí tedy působí na entitu vlivem vlhkosti, teploty, zářením, atd.

### S1 – Veličiny popisující geometrii a topologii entity

Obecně se bude jednat o prostorovou geometrii a v určitých případech o zjednodušenou rovinnou geometrii. Geometrie se skládá z plechů definované tloušťky spojené převážně koutovými svary dané velikost (není-li uvedeno jinak). Umístění součásti vůči sobě je známo (normou, výkresem, atd.).

### S2 – Veličiny popisující vazby a interakce entity s okolím

Vazby mezi jednotlivými částmi (plechy) tvoří svarový spoj. Jedno ze svařovaných těles je těleso základní, které je pevně spojeno s okolím.

### S3 – Veličiny popisující aktivaci entity s okolím

Aktivace svarku nastane vnějším zatížením, v obecném případě interakcí s jiným tělesem. V našem případě bude aktivace provedena silou, tlakem nebo posuvem.

### S4 – Veličiny popisující ovlivňování entity okolím

Entitu může ovlivnit především teplota a působení vody, tedy korodující (degradující) účinky. V případech v této práci korozní účinky zahrnuté nejsou a teplota je stanovena na 20 °C.

### S5 – Veličiny popisující oborové vlastnosti struktury entity

Části tvořící základní materiál jsou tvořeny plechy z materiálu S355J2 definované tloušťky a svar je vytvářen plnou elektrodou v inertním plynu (MIG) z materiálu AWS E70XX. Jak základní tak přídatný materiál jsou definovány jako homogenní, izotropní, lineárně pružný (nebo ideálně pružně-plastický) materiál s materiálovými parametry: modul pružnosti v tahu ( $E$ ), Poissonův poměr ( $\mu$ ), mez kluzu ( $Re$ ) a mez pevnosti elektrody ( $Rm$ ).

### S6 – Veličiny popisující procesy a stavy

Stavy tělesa se mění především při samotném procesu svařování, jedná se o jevy spojené s tepelným ovlivněním okolí svaru. Jsou to nerovnoměrné rozložení teploty při vytváření svaru, transformace materiálu během ohřívání a ochlazování a podstatné změny mechanických vlastností v tepelně ovlivněné oblasti (tvrdosti, houževnatosti, tažnosti, atd.). S vlivem teplot na součást jsou také spojena nežádoucí zbytková napětí nebo deformace.

### S7 – Veličiny popisující projevy entity

Projevy entity jsou dány deformacemi (celkovými posuvy jednotlivých částí) a napjatostí, která je dána složkami tenzoru napětí.

## S8 – Veličiny popisující důsledky projevů

Projevem je dosažení Mezního stavu únosnosti, tento pojem je definován v podkap. 2.1.8.

### 1.10 Výběr metody řešení a prostředků

S ohledem na [23] musíme pro správné vyřešení problému určit, o jaký typ modelování se jedná. Jedná se tedy o modelování abstraktní, teoretické a výpočtové.

V inženýrské praxi většinou převažuje výpočtové modelování, jelikož se jedná o kvantifikaci výsledků a převládá zpracování veličin výpočtem. Pro řešení je potřeba matematická teorie, která musí být řešitelná na určitých prostředcích při určité efektivitě a musí být dostupné vstupní údaje do algoritmů.

Výpočtové modelování se dále dělí na modelování klasické, simulační, optimalizační a citlivostní analýzu. Podle matematické teorie lze výpočtové modelování rozdělit na analytické, numerické a umělointeligentní modelování. V této práci se z počátku zaměříme na analytické modelování (dle další možnosti dělení na klasické výpočtové modelování) a v návaznosti na numerické modelování (simulačně výpočtové modelování).

Na počátku je třeba osvětlit algoritmy a matematickou teorii těchto algoritmů, vytvořit vstupní data a okrajové podmínky. To vše se vytvoří pomocí dílčích výpočtových modelů (model geometrie, model okrajových podmínek, ...).

Pro řešení analytického modelu je použita soustava obecných rovnic pružnosti a pro numerické řešení je použita metoda konečných prvků, která je zprostředkována programem ANSYS.

#### Použité prostředky (software a hardware)

Jak bylo avizováno výše, je potřeba mít dostupné prostředky na řešení problému, proto uvádím v krátkosti jaké prostředky byly využity.

Pro vypracování této práce bylo použito několik odlišných programů se specifickými funkcemi. Pro samotné sepsání práce byl použit program Texmaker 3.2.2, jedná se o nástroj pro sazbu textu. Tvorba geometrie a obrazové prezentace byla zpracována v programech Inkscape 0.91 a Autodesk Inventor Professional 2011. Grafy a analytické výpočty byly zpracovány prostředím MATLAB R2013a a simulace typu metody konečných prvků (MKP) byly provedeny v programu ANSYS 15.0. Veškeré aplikace byly spuštěny na systémovém prostředí Windows 7. Hardwarové vybavení se skládalo ze dvou počítačů. Jejich charakteristiky jsou následující:

1. Osobní počítač:
  - Procesor: AMD Phenom(tm) II X6 1055T 2,80 GHz
  - Operační paměť: 16,0 GB
  - Grafická paměť: 1,0 GB
  - Pevný disk: 1 TB
  - Grafická karta: NVIDIA GeForce GTS 250
2. Školní počítač:
  - Procesor: Intel®Core(tm) i7 X 980 @ 3,33 GHz



- Operační paměť: 24,0 GB
- Grafická paměť: 1,0 GB
- Pevný disk: 1 TB
- Grafická karta: NVIDIA GeForce GTX 560

V tab. 1.1 jsou přehledně uvedeny použité aplikace, jejich použití a počítač, na kterém byly provozovány.

Tab. 1.1: Programové vybavení.

<b>Program</b>	<b>Funkce/použití</b>	<b>Počítač</b>
Windows 7	Systémové prostředí	1) 2)
Texmaker 3.2.2	Textový editor	1)
Inkscape 0.91	Grafický editor	1)
Autodesk Inventor Professional 2011	CAD program	1)
MATLAB R2013a	Analytické výpočty	1) 2)
ANSYS 15.0	Simulace	2)

## 1.11 Nastudovaná literatura a články

V seznamu níže je uveden seznam používaných zdrojů použitý v rešeršní práci a dále při výpočtovém modelování. Zdroje použité v jednotlivých kapitolách jsou zde seřazeny, proto v dalším textu nejsou uváděny odkazy na zdroje.

- Obecné rozdělení: [19], [9], [46], [33], [16], [22];
- ČSN: [12], [10], [9];
- AISC: [6], [3], [52], [32], [38], [37], [55], [25], [40];
- AWS: [31],[14], [53];
- IIW: [17], [20], [22], [21];
- DNV: [15];
- FKM: [2], [24];
- Práce zabývající se posouzením součástí (konkrétní problémy): [35], [4], [19], [45], [50], [43], [41].

## 2 REŠERŠNÍ PRÁCE

Je důležité detailně posuzovat svary, protože svařování silně ovlivňuje svařované konstrukce (ohřívání, chlazení, přidávání svarového materiálu), což mění materiálové charakteristiky okolí svaru – vytváří nehomogenní materiál a vnáší do těchto míst také nové vruby.

Jelikož se svařování využívá snad ve všech možných konstrukcích (jeřáby, mosty, dopravní prostředky a jiné) bylo vyvinuto mnoho odlišných metod vyhodnocování svarů. Jednotlivé nejpoužívanější metody zde budou rozebrány.

### 2.1 Přístupy posuzování svarových spojů

Během doby, kdy se používají svary bylo vyvinuto mnoho metod a metodik jejich hodnocení. Pro hodnocení svarových spojů nelze použít standardní hodnocení jako pro ostatní části konstrukce (kvůli výše uvedeným aspektům - koncentrace napětí, tepelně ovlivněná oblast, zbytková napětí, změny vlastností materiálů, atd.). Kvůli těmto vlivům, které není jednoduché určit, je většina metodik hodnocení svarů založena na principu hodnocení svaru jako celku pomocí různých dílčích koeficientů.

Jak již bylo avizováno v úvodu, svary můžeme dle způsobu zatěžování rozdělit do následujících skupin [9]:

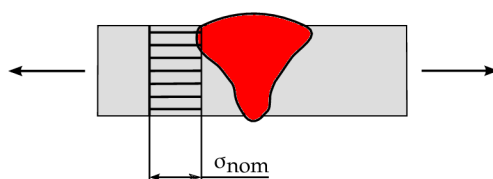
- Skupina 1 - zatížení svarových spojů, u kterých během předpokládané doby života počet cyklů nepřesáhne hodnotu  $5 \cdot 10^3$ , se mluví jako o *statickém zatěžování*.
- Skupina 2 - zatížení svarových spojů, u nichž se počet cyklů pohybuje nad hodnotou  $5 \cdot 10^3$  se nazývá *dynamické zatížení* (to se dále dělí na namáhání na časovou únavu a únavu, kde mezník mezi těmito skupinami je počet cyklů  $2 \cdot 10^6$ ).

Tomu odpovídá zatížení stálé (statické) a proměnné (cyklické).

Další možné dělení je podle způsobu posouzení dané součásti. Jsou čtyři základní přístupy, které by měly ve výsledku vykazovat stejné hodnoty.

#### Nominální napětí (nominal stress)

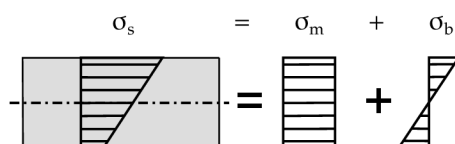
Nominální napětí je určeno jednoduchými výpočty (zahrnující sílu na jednotku plochy příčného průřezu, ohybový nebo kroučící moment podělený příslušným průřezovým modulem) stanovené v základním materiálu. Toto napětí by mělo být menší než přípustné napětí (srovnávací napětí). Toto přípustné nominální napětí je dáno tabulkově nebo pomocí grafů v příslušných normách. Přípustné napětí v sobě zahrnuje vliv geometrie, typu svaru, typu zatížení a výrobní a provozní vlivy. Příklad průběhu napětí po tloušťce součásti je na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Ukázka posuzování pomocí nominálních napětí. [22]

### Extrapolovaná (tvarová) napětí (structural stress)

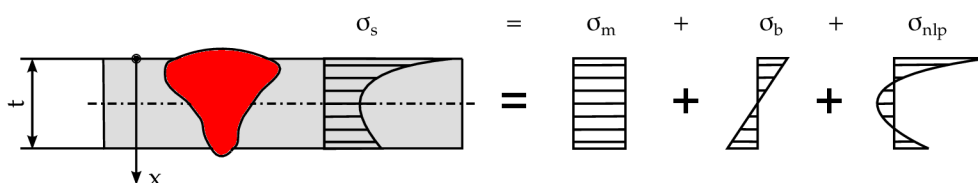
Nehomogenní rozložení napětí (v tomto případě ohybová napětí  $\sigma_b$ ) v místech svarů zatížených vnějším zatížením bez vlivů vrubů se dodatečně přidává k nominálnímu napětí (neboli membránovému  $\sigma_m$ ) pomocí inženýrských teorií (teorie prutů, skořepin, desek, atd. většinou zahrnující MKP) nebo pomocí testování zahrnující měření napětí v daných místech. Tato metoda byla původně používána na počátku hodnocení tlakových nádob, posuzování plechových konstrukcí (kde se této metodě říká hot spot stress). S rozvojem MKP se tato metoda začala používat v širším měřítku. Příklad průběhu napětí po tloušťce součásti je na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Ukázka posuzování pomocí extrapolovaných napětí. [22]

### Vrubové napětí (notch stress)

V tomto přístupu se uvažuje koncentrace napětí vlivem paty a kořene svaru, navýšení napětí se opět přidává k nominálnímu napětí vzniklému vnějším zatížením. Koncentrace napětí a napětí samotné se určuje pomocí experimentálního měření, fotoelasticimetrie nebo MKP. Po určení maximálního vrubového napětí se tato hodnota redukuje korekčními součiniteli pro správnou interpretaci těchto napětí. Přípustné napětí je stanoveno dle hladkého vzorku bez uvažování jakýchkoli koncentrací. Příklad průběhu napětí po tloušťce součásti je na obr. 2.3.



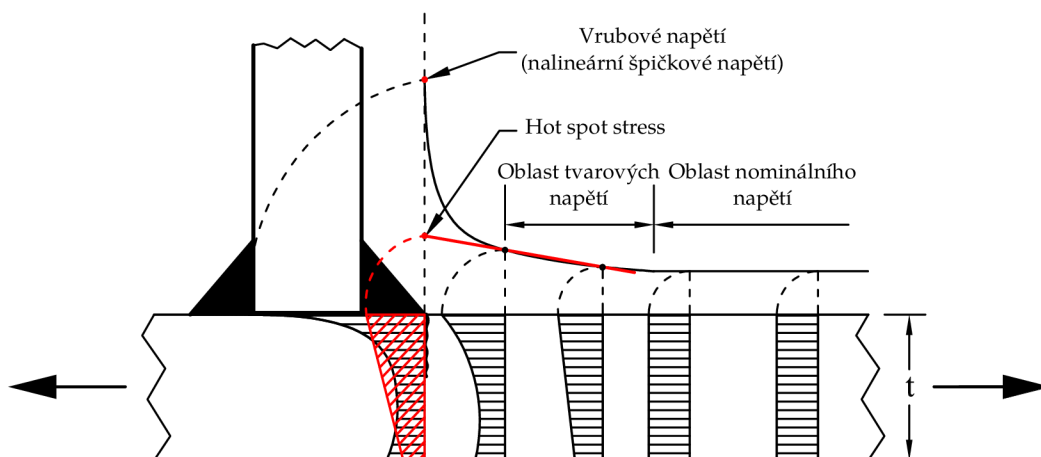
Obr. 2.3: Ukázka posuzování pomocí vrubových napětí. [22]

### Lomová mechanika (fracture mechanics)

V této kategorii se všudypřítomné trhlinky a defekty (přítomné obzvláště

v místě paty a kořene svaru) vyhodnocují pomocí faktoru intenzity napětí. Jako mezní hodnota (obdoba přípustného napětí v předchozích metodách) se uvažuje kritická délka trhliny. Jedná se pouze o bezpečnostní posouzení trhlin a vzniklých defektů. Tato metoda se nepoužívá pro návrh a dimenzování konstrukcí. Proto tato metoda nebude dále uvažována.

Porovnání předchozích tří napěťových přístupů lze nejlépe porovnat pomocí jednoho souhrnného obrázku (obr. 2.4).



Obr. 2.4: Ukázka posuzování pomocí vrubových napětí. [4]

V následujícím textu se budeme zabývat pouze napěťovými metodami. Pro lepší možnost porovnání budou metody rozděleny do odlišných kategorií. Budou rozděleny na národní standardy a speciální metody (doporučení).

1. Standardy
  - (a) ČSN (České technické normy)
  - (b) AWS (American Welding Society)
  - (c) Další normy
2. Speciální metody
  - (a) IIW (International Institute of Welding)
  - (b) DNV (Det Norske Veritas)
  - (c) FKM (Forschungskuratorium Maschinenbau)

Jako první je proveden rozbor národních standardů. V popisech jednotlivých norem je vždy uvedeno o jaký typ zatížení se jedná (statické nebo dynamické).

### 2.1.1 ČSN 05 0120

#### Omezení

Použití normy je platné pro nelegované oceli pevnosti 343 ÷ 510 MPa v rozmezí provozních teplot od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až do  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Neuvažuje se náhlý křehký lom, změna mechanických vlastností vlivem teplotního působení, vliv vlastních pnutí a špičková napětí. Dále norma neplatí pro ty případy, pro které

je stanovena speciální norma. Je doporučeno používat zaručeně nebo podmíněně svařitelné materiály (podle ČSN 05 1310).

### Výpočet napětí

Nosný průřez svarových spojů je definován pomocí nosného průřezu dle obr. 1.1, kde u tupých svarů je nosný průřez značen  $s$ , u koutových svarů  $a$  a pomocí výpočtové délky svaru  $l$ .

Pevnostním výpočtem se stanoví pro dané zatížení a daný nosný průřez nominální napětí. Základní nominální napětí jsou tabelovány.

### Přípustná napětí - Statické zatížení

Přípustná napětí svaru v tahu vzniklé ve svarovém spoji ( $\sigma_{Dsv}$ ) je definováno pomocí převodního součinitele ( $\alpha$ ) a přípustného napětí základního materiálu ( $\sigma_D$ ). Toto přípustné napětí je dáno mezí kluzu základního materiálu ( $\sigma_{Kt}$ ) a bezpečností  $n = 1,5$  (není-li stanoveno jinak). Stejným způsobem se určí přípustné napětí svaru ve smyku ( $\tau_{Dsv}$ )

$$\sigma_{Dsv} = \alpha \cdot \sigma_D = \alpha \cdot \frac{\sigma_{Kt}}{n} \quad (2.1)$$

$$\tau_{Dsv} = \alpha_t \cdot \sigma_D = \alpha_t \cdot \frac{\sigma_{Kt}}{n} \quad (2.2)$$

Převodní součinitel ( $\alpha$ ) je tabelovaná hodnota daná normou.

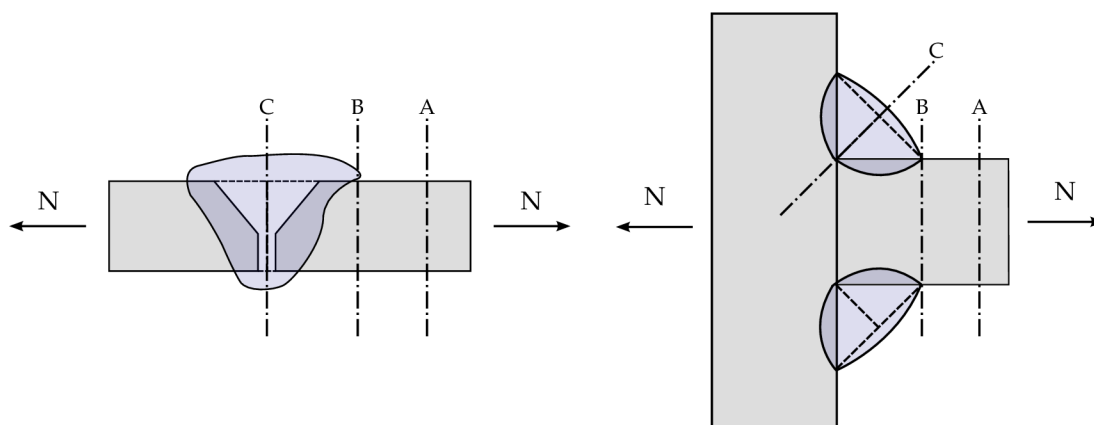
### Přípustná napětí - Dynamické zatížení

Pro posouzení svarových spojů je rozhodující mez únavy (definovaná amplitudou odpovídající příslušnému střednímu napětí) pro daný materiál, druh svaru, způsob namáhání (tah, ohyb, ...) a způsob zatížení (pulsující, míjivé, střídavé). Platí následující vztahy:

$$\sigma_{AD} = \frac{\sigma_A^x}{n} \quad \tau_{AD} = \frac{\tau_A^x}{n} \quad (2.3)$$

$$\sigma_{AD} = \frac{\sigma_C^x}{n} \quad \tau_{AD} = \frac{\tau_C^x}{n} \quad (2.4)$$

Meze únavy v rov. 2.3 se určí ze Smithových diagramů dané normou. Tyto diagramy jsou dány třídami provedení svarů (dle způsobu namáhání a realizace svaření) a směrodatným průřezem A, B nebo C (viz obr. 2.5). Použitá bezpečnost se volí v rozmezí  $n = 1,5 \div 3$ , není-li stanoveno jinak. Pro střídavé souměrné namáhání platí rov. 2.4.



Obr. 2.5: Směrodatné průřezy svaru. [9]

### Podmínky pevnosti - Statické zatížení

Tupé svary musí vyhovět podmínkám dle rov. 2.5.

$$\begin{aligned}\sigma_{\perp} &\leq \alpha_{\perp} \frac{\sigma_{Kt}}{n}, \\ \sigma_{\parallel} &\leq \frac{\sigma_{Kt}}{n}, \\ \tau &\leq \alpha_{\tau} \frac{\sigma_{Kt}}{n},\end{aligned}\tag{2.5}$$

$$\sigma_s = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\perp}}{\alpha_{\perp}}\right)^2 + \sigma_{\parallel}^2 - \frac{\sigma_{\perp} \cdot \sigma_{\parallel}}{\alpha_{\perp}} + 3 \cdot \left(\frac{\tau}{\alpha_{\tau}}\right)^2} \leq \frac{\sigma_{Kt}}{n}.$$

Koutové svary musí vyhovět podmínce dle rov. 2.6 odpovídající obr. 2.6.

$$\tau_s = \sqrt{\left(\frac{\tau_{\perp}}{\alpha_{\tau\perp}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel}}{\alpha_{\tau\parallel}}\right)^2} \leq \beta \frac{\sigma_{Kt}}{n}\tag{2.6}$$

Kde součinitel tloušťky koutového svaru ( $\beta$ ) je dán následovně:

- pro  $z < 10$  mm je  $\beta = 1,3 - 0,03 \cdot z$ ,
- pro  $z \geq 10$  mm je  $\beta = 1$ .

### Podmínky pevnosti - Dynamické zatížení

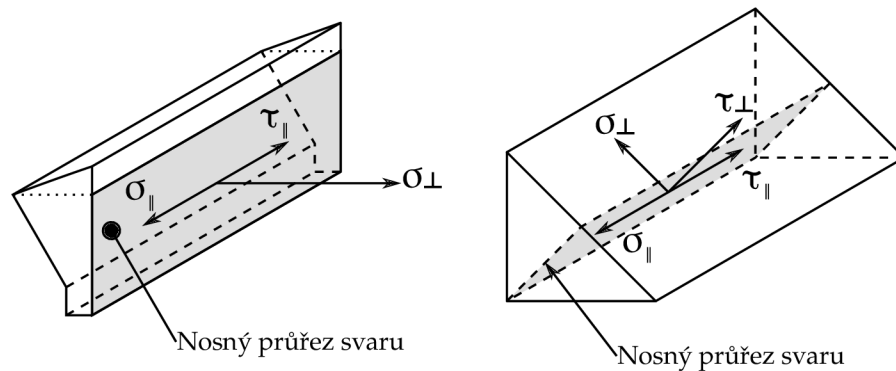
Svarové spoje této skupiny zatížení musí vyhovat následujícím podmínkám:

- Pro prosté namáhání, kde  $\sigma_A^x$  je mez únavy definovaná třídou provedení svaru (I až IX) a směrodatným průřezem (A, B nebo C):

$$\sigma_a \leq \frac{\sigma_A^x}{n}; \quad \tau_a \leq \frac{\tau_A^x}{n}\tag{2.7}$$

- Pro kombinované namáhání v případě totožného  $r$  (součinitele nesouměrnosti cyklu) platí pro srovnávací amplitudu podmínka:

$$\sigma_{as} \leq \frac{\sigma_A^x}{n}; \quad \tau_{as} \leq \frac{\tau_A^x}{n}\tag{2.8}$$



Obr. 2.6: Složky napětí ve svarech. [2], [12]

V případě, že ve Smithových diagramech přímka  $r$  protne mez kluzu, jsou podmínky pevnosti:

- Při prostém namáhání:

$$\sigma_h = \sigma_m + \sigma_a \leq \frac{\sigma_{Kt}}{n}, \quad (2.9)$$

$$\tau_h = \tau_m + \tau_a \leq \frac{\tau_K}{n} = \frac{0,6 \cdot \sigma_{Kt}}{n}.$$

- Při kombinovaném namáhání platí pro srovnávací horní napětí:

$$\sigma_{hs} \leq \frac{\sigma_{Kt}}{n}. \quad (2.10)$$

Současně s podmínkami rov. 2.7 až rov. 2.10 musí být splněny podmínky pro Statické zatížení (tj. podmínky rov. 2.5 a rov. 2.6).

### 2.1.2 ČSN EN 1993-1-8

Jedná se o evropskou normu Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčniců.

#### Omezení

Návrhové postupy v normě EN 1993 jsou určeny především pro statické zatížení a pro oceli tříd S235, S275, S355 a S460. Hodnocení je určeno pro materiály s tloušťkou 4 mm a více. Svarový kov má mít ve všech směrech stejné nebo lepší materiálové vlastnosti než základní materiál. Norma dále stanovuje kvalitu svaru, geometrii a rozměry svařovaných součástí.

#### Návrhová únosnost koutových svarů - metoda uvažující směr namáhání

Síly zatěžující jednotkovou délku svaru se rozkládají do kolmých a rovnoběžných složek vůči rovině nosného průřezu svaru. Předpokládá se rovnoměrné rozložení napětí po účinném průřezu (vznik normálových a smykových napětí), jak je znázorněno na obr. 2.6. Jednotlivá napětí představují

- $\sigma_{\perp}$  - normálové napětí kolmé na rozměr svaru;
- $\sigma_{\parallel}$  - normálové napětí rovnoběžné s osou svaru;

- $\tau_{\perp}$  - smykové napětí kolmé na osu svaru;
- $\tau_{\parallel}$  - smykové napětí rovnoběžné s osou svaru.

Únosnost svaru je dostatečná pokud platí následující podmínky:

$$\left[ \sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2) \right]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad a \quad \sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad (2.11)$$

Kde  $f_u$  je jmenovitá hodnota meze pevnosti nejslabší spojované součásti v tahu,  $\beta_w$  je korelační součinitel daný normou pro jednotlivé třídy pevnosti materiálů a  $\gamma_{M2}$  je dílčí součinitel spolehlivosti únosnosti svarových spojů (doporučená hodnota je dle [12]  $\gamma_{M2} = 1,25$ , a dle [26] a [44]  $\gamma_{M2} = 1,50$ ). Pro určení svarového spoje se neuvažuje normálové napětí rovnoběžné s osou svaru  $\sigma_{\parallel}$ .

### Návrhová únosnost koutových svarů - zjednodušená metoda

Zjednodušená, protože neuvažuje směry působení jednotlivých zatížení. Předpokládá, že návrhová únosnost svaru je dostatečná, pokud výslednice všech sil přenášených svarem na jednotku délky splňuje v každém bodě svaru podmínku rov. 2.12.

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = \frac{\frac{f_u}{\sqrt{3}}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (2.12)$$

Kde  $F_{w,Ed}$  je návrhová hodnota síly působící na jednotku délky svaru,  $F_{w,Rd}$  je návrhová únosnost svaru na jednotku délky a  $f_{vw,d}$  je návrhová pevnost svaru ve smyku.

## 2.1.3 ČSN EN 1993-1-9

### Omezení

Metody uvedené v této normě jsou odvozeny z únavových zkoušek velkého množství vzorků zahrnující geometrické a strukturní imperfekce. Posouzení je vhodné pro všechny třídy konstrukčních ocelí. Metoda neřeší neuvažuje lokální deformace ani lomovou mechaniku. V metodice není uvažováno korozní působení a poškození mikrostruktury při zvýšených teplotách. Pokud se budou využívat kategorie detailu svaru, jsou v nich již zahrnuty koncentrace napětí.

### Kategorie detailu

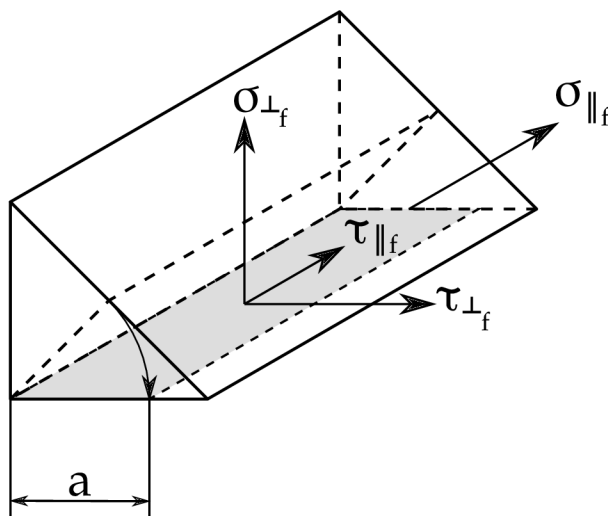
Jedná se o číselné označení daného konstrukčního provedení zatížené proměnným napětím. Číselné označení udává křivku únavové pevnosti pro daný detail a referenční mez únavy  $\Delta\sigma_C$  ( $\Delta\tau_C$ ) v *MPa*.

### Výpočet napětí

Metoda únavového posouzení je založena na porovnání účinků zatížení (rozkmit normálových a smykových napětí) a únavové pevnosti posuzované konstrukce. Napětí se stanovují pro mezní stav použitelnosti konstrukce. Jmenovitá napětí se určují v místech možného vzniku únavové trhliny. Uvažují se napětí v základním materiálu (jmenovitá normálová a smyková napětí) a napětí ve svarech dle obr. 2.7 jsou následující:



- normálová napětí ve směru kolmém k ose svaru:  $\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{\perp f}^2 + \tau_{\perp f}^2}$
- smyková napětí ve směru rovnoběžném s osou svaru:  $\tau_{wf} = \tau_{\parallel f}$



Obr. 2.7: Uvažovaná napětí v koutových svarech. [13]

Poznámka:

- Modifikovaná napětí - napětí u kategorie detailů, která nejsou tabulována. Tyto napětí získáme vynásobením součinitele koncentrace napětí a nominálního napětí v místě předpokládané iniciace trhliny.
- Extrapolovaná napětí - maximální hlavní napětí v základním materiálu v blízkosti paty svaru s uvažováním vlivu koncentrace napětí.

### Výpočet rozkmitů napětí

Norma uvažuje tři možné způsoby určení rozkmitů napětí, pro které jsou v normě uvedeny výpočtové vztahy:

- rozkmit jmenovitých napětí podle kategorie detailu,
- rozkmitu modifikovaných napětí,
- rozkmit extrapolovaných napětí.

Jako návrhová hodnota rozkmitu napětí pro posouzení na únavu se má dle normy brát hodnota  $\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{F,2}$  odpovídající počtu cyklů  $N_C = 2 \cdot 10^6$ .

### Posouzení svaru

Použitý rozkmit napětí (jeden ze tří) musí vyhovovat podmínkám:

$$\Delta \sigma \leq 1,5 \cdot f_y \quad a \quad \Delta \tau \leq 1,5 \frac{f_y}{\sqrt{3}}. \quad (2.13)$$

Další nutné podmínky jsou:

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\frac{\Delta \sigma_C}{\gamma_{Mf}}} \leq 1,0 \quad a \quad \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta \tau_{E,2}}{\frac{\Delta \tau_C}{\gamma_{Mf}}} \leq 1,0 \quad (2.14)$$

Pokud není stanoveno tabulkami jinak, kombinace rozkmitů normálových

a smykových napětí, je nutné splnit podmínku:

$$\left( \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf}}} \right)^5 \leq 1,0 \quad (2.15)$$

$f_y$  je mez kluzu materiálu,

$\gamma_{Ff}$  je dílčí součinitel spolehlivosti pro ekvivalentní konstantní rozkmit napětí ( $\Delta\sigma_E, \Delta\tau_E$ ),

$\gamma_{Mf}$  je dílčí součinitel spolehlivosti únavové pevnosti ( $\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$ ),

$\Delta\sigma_{E,2}, \Delta\tau_{E,2}$  je ekvivalentní konstantní rozkmit napětí pro počet cyklů

$N = 2 \cdot 10^6$ ,

$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$  je rozkmit (normálového a smykového) napětí.

## 2.1.4 AWS D1.1 a AISC

### Omezení - Statické zatížení

Americký předpis je určen pro svářené konstrukce vyrobené z uhlíkových ocelí s tloušťkou minimálně 3 mm a mezí kluzu do 690 MPa. V normě jsou stejně jako v předchozích českých normách stanoveny další požadavky týkající se tvaru a velikostí svaru a součásti samotné. Nosný průřez svaru je definován stejným způsobem jako na obr. 2.6.

### Výpočet napětí - Statické zatížení

Výpočet napětí se řídí výpočtem nominálních napětí ve svaru a následným porovnáním s přípustnými napětími. Napětí se posuzují ve dvou krocích, kde při zatížení musí přípustným napětím vyhovět jak základní materiál, tak svarový materiál v místě nosného průřezu. Přípustné napětí ve svaru se určuje na základě pevnosti v tahu svarového materiálu nebo meze kluzu základního materiálu. U koutových svarů se má zatížení uvažovat jako smykové napětí aplikované na nosný průřez svaru.

### Alternativní výpočet napětí - Statické zatížení

Pokud máme speciální případy, lze stanovení přípustného napětí ve svarech určit pomocí následujících pravidel.

- Pro hodnocení jednoho koutového svaru nebo více rovnoběžných koutových svarů zatížených pod stejným úhlem:

$$F_v = 0,30 \cdot F_{EXX} \cdot (1,0 + 0,50 \cdot \sin^{1,5}(\theta)) \quad (2.16)$$

Kde  $F_v$  představuje přípustné jednotkové napětí,  $F_{EXX}$  minimální mez pevnosti elektrody a  $\theta$  je úhel mezi svarem a zatížením ve stupních.

- **Okamžitý střed otáčení** je metoda, pomocí které se spočítá přípustné napětí ve svaru s uvažováním různé schopnosti svarů odlišné orientace přenést vnější excentrické zatížení. Je uvažováno, že svarová skupina se jako celek otáčí kolem jednoho středu (středu otáčení). Svarová skupina se nadělí na konečný počet segmentů svaru a je spočítán odpor každého segmentu vůči zatížení. Je uvažována rozdílná schopnost jednotlivých segmentů přenést odlišná zatížení vůči úhlu zatížení. Mezní

únosnost svaru je dosažena, pokud jakýkoli segmentu dosáhne své mezní deformace. Jedná se o iterativní metodu, jelikož se dohledává pozice okamžitého středu otáčení a v závislosti na něm se vyčíslí maximální vnější zatížení. Iterace se řídí pomocí rovnic rovnováhy (2 podmínky silové a 1 podmínka momentová). Kompletní vysvětlení i s příklady je uveden v [53] a později v této práci.

- Speciálně soustředně zatížená skupina svarů může být posouzena jako součet jednotlivých přípustných smykových napětí dílčích částí svaru. Výpočet jednotkového napětí ve svaru se provede pomocí rov. 2.17

$$F_v = 0,30 \cdot C \cdot F_{EXX} \quad (2.17)$$

Kde  $C$  je pevnostní koeficient pro šikmo zatížené svary. Ty jsou tabelovány v normě pro standardní svarové spoje.

Experimentální zkoušky ukázaly, že napětí ve svaru rovnající se 0,3 násobku meze pevnosti svarového materiálu poskytuje bezpečnost  $2,2 \div 4,6$  dle způsobu zatížení. To bylo základem pro vytvoření tabulek přípustných napětí. Pro určení maximálního možného zatížení svarové součásti se určují 3 základní roviny (dvě roviny pro spojované materiály a jedna rovina svarem) z nichž se určí ta, s minimální únosností. Roviny odpovídají těm v českých normách dle obr. 2.5. Bylo dokázáno, že únosnost svarových spojů velice záleží na poloze vůči vnějšímu zatížení (úhlu svírající s vnějším zatížením). Příčně zatížené svarové spoje mají přibližně o 50 % větší pevnost než svary zatížené podélně (opačně lze říct, že příčně zatížené svary mají nižší deformační kapacitu). Závislost mezi zatížením a deformací je vykreslena na obr. 2.8.

Testy dále prokázaly, že metoda okamžitého středu otáčení a posouzení svaru dle rov. 2.17 poskytují bezpečnost větší než 2.

Legenda ke grafu na obr. 2.8:

- Normalizovaná deformace - deformace segmentu podělena velikostí svaru (tloušťkou svaru).
- Normalizované zatížení - zatížení svaru pod určitým úhlem podělené maximálním zatížením svaru zatíženého longitudinálně.

### **Měření Deformace**

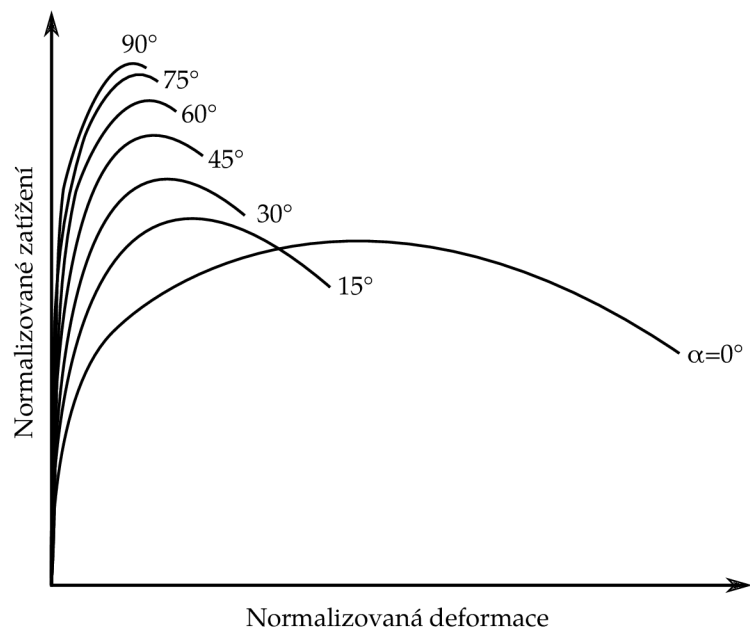
Deformace celého vzorku se měřila vždy pomocí minimálně tří tenzorových snímačů a deformace svaru se měřila pomocí LVDT (elektrický transformátor sloužící pro měření lineárních posuvů). Deformace svaru byla měřena rovnoběžně se zatížením svaru. Ukázka měření deformace na vzorku je na obr. 2.11.

### **Omezení - Dynamické zatížení**

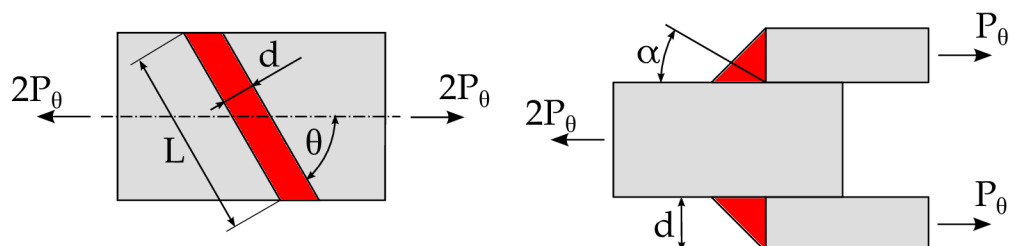
Výpočet se vztahuje pouze na netrbukové spoje. V normě je uvažována vysokocyklová únava za normálních atmosférických podmínek. Pokud je napětí ve svaru vzniklé vnějším zatížením nižší než je tabelováno pro jednotlivá spojení, není posouzení na únavu potřebné.

### **Výpočet napětí - Dynamické zatížení**

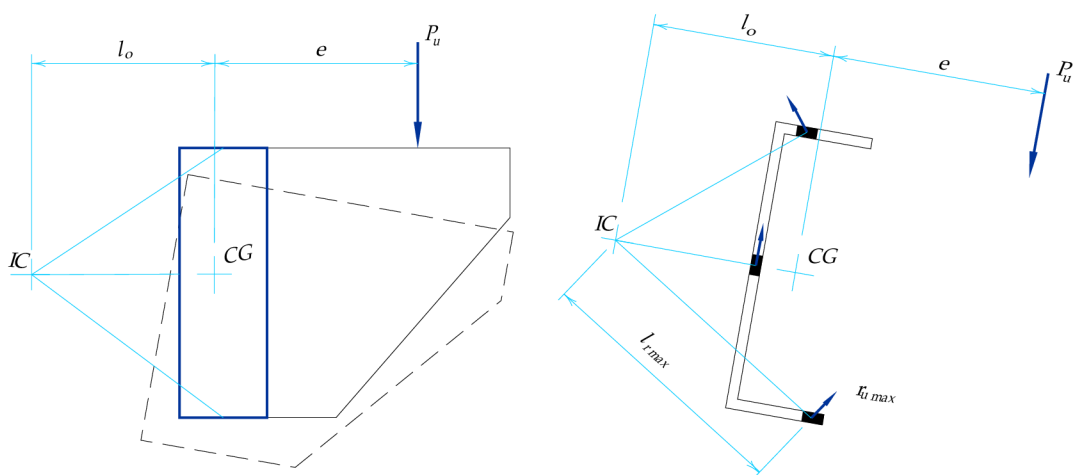
Výpočet napětí je založen na elastické analýze, kde se počítá s nominálním



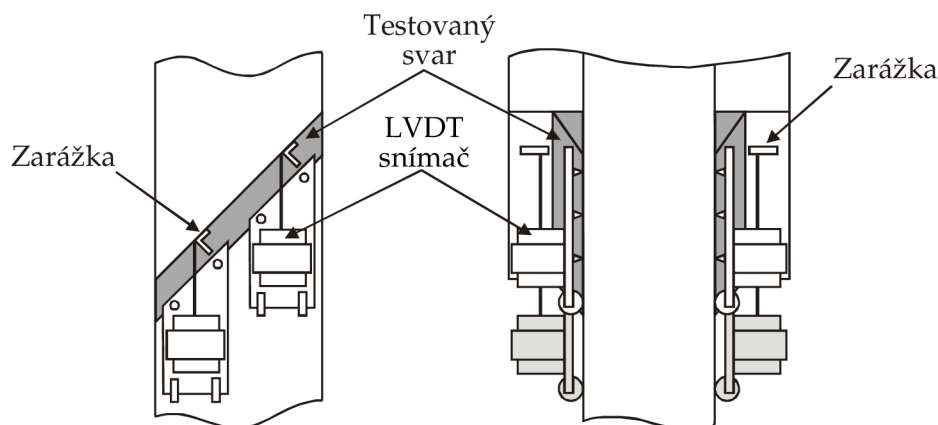
Obr. 2.8: Závislost zatížení na deformaci svaru. [14]



Obr. 2.9: Úhly testování svarů. [32]



Obr. 2.10: Okamžitý střed otáčení - princip. [34]



Obr. 2.11: Měření deformace svaru - ukázka na vzorku. [37]

napětím v posuzovaném členu. Tyto napětí je zapotřebí navýšit pomocí součinitele koncentrace napětí pro zahrnutí lokálních geometrických nespojitostí. Vypočtená napětí nesmí překročit přípustná napětí stanovená v závislosti na základním materiálu nebo materiálu svarového kovu (stejně jako při statické analýze).

#### Výpočet rozkmitů napětí

Rozkmit napětí je definován jako součet tahového a tlakového napětí nebo jako součet maximálních smykových napětí opačného směru v daném místě způsobené vnějším zatížením. Vypočítané rozkmit napětí nesmí překročit přípustné rozkmit napětí dané rov. 2.18 až rov. 2.22.

$$F_{SR} = \left[ \left( \frac{C_f \cdot 329}{N} \right)^{0,333} \geq F_{TH} \right] \quad (2.18)$$

$$F_{SR} = \left[ \left( \frac{C_f \cdot 11 \cdot 10^4}{N} \right)^{0,167} \geq F_{TH} \right] \quad (2.19)$$

$$F_{SR} = \left[ \left( \frac{14,4 \cdot 10^{11}}{N} \right)^{0,333} \geq 68,9 \right] \quad (2.20)$$

$$F_{SR} = \left[ R_{PJP} \left( \frac{14,4 \cdot 10^{11}}{N} \right)^{0,333} \right] \quad (2.21)$$

$$F_{SR} = \left[ R_{FIL} \left( \frac{14,4 \cdot 10^{11}}{N} \right)^{0,333} \right] \quad (2.22)$$

Kde  $F_{SR}$  představuje přípustné napětí,  $C_f$  je konstanta dána tabulkově,  $N$  počet cyklů návrhové životnosti,  $F_{TH}$  prahová hodnota rozkmitu napětí únavy,  $R_{PJP}$  je redukční součinitel pro částečně provařené svarové spoje a  $R_{FIL}$  je redukční součinitel pro příčné koutové svary.

Stejně jako v české normě jsou tabelovány rozdílné kategorie (A, B, B', C, D, E, E' a F), které určují konstantu  $C_f$ , prahové napětí  $F_{TH}$  a případná místa iniciace trhlin.

Z této normy čerpala také American Institution for Steel Construction (AISC), která je velice dobře zpracována, uvádí mnoho příkladů a odkazuje se na ni velké množství příruček.

Popisovaná metoda je známá pod názvem Ultimate strength method (metoda maximální pevnosti). Metoda se ovšem vyskytuje i v zjednodušené formě s názvem Elastická metoda.

Elastická metoda je velkým zjednodušením předchozí metody, protože nerespektuje tažnost svarů a přerozdělování zatížení ve svaru při vnějším zatížením. Proto se jedná o velmi konzervativní metodu. Tato metoda je podrobně popsána v [49].

V další části proběhne rozbor mezinárodních doporučení, které v převážné většině využívají metodu konečných prvků.

## 2.1.5 FKM

Vychází z [2] a [24].

Jedná se o metodiku analytického způsobu stanovení statické a únavové pevnosti součástí pomocí metod nominálních a lokálních napětí. Je tedy rozčleňena na 4 kapitoly (Statická pevnost pomocí nominálních napětí, Statická pevnost pomocí lokálních napětí, Únavová pevnost pomocí nominálních napětí a Únavová pevnost pomocí lokálních napětí.)

### Rozsah použitelnosti

- Součásti s geometrickými vruby a svarovými spoji.
- Konstrukce zatížené staticky a cyklicky s hranicí mezi těmito skupinami stanovenou na  $10^4$  cyklů.
- Použitelné pro oceli (k obrábění a kování, nerezové a odlitkové) a hliníkové slitiny.
- Posouzení je vhodné pro součásti za normálních i zvýšených teplot.
- Metodika je určena pro nekorozivní prostředí.

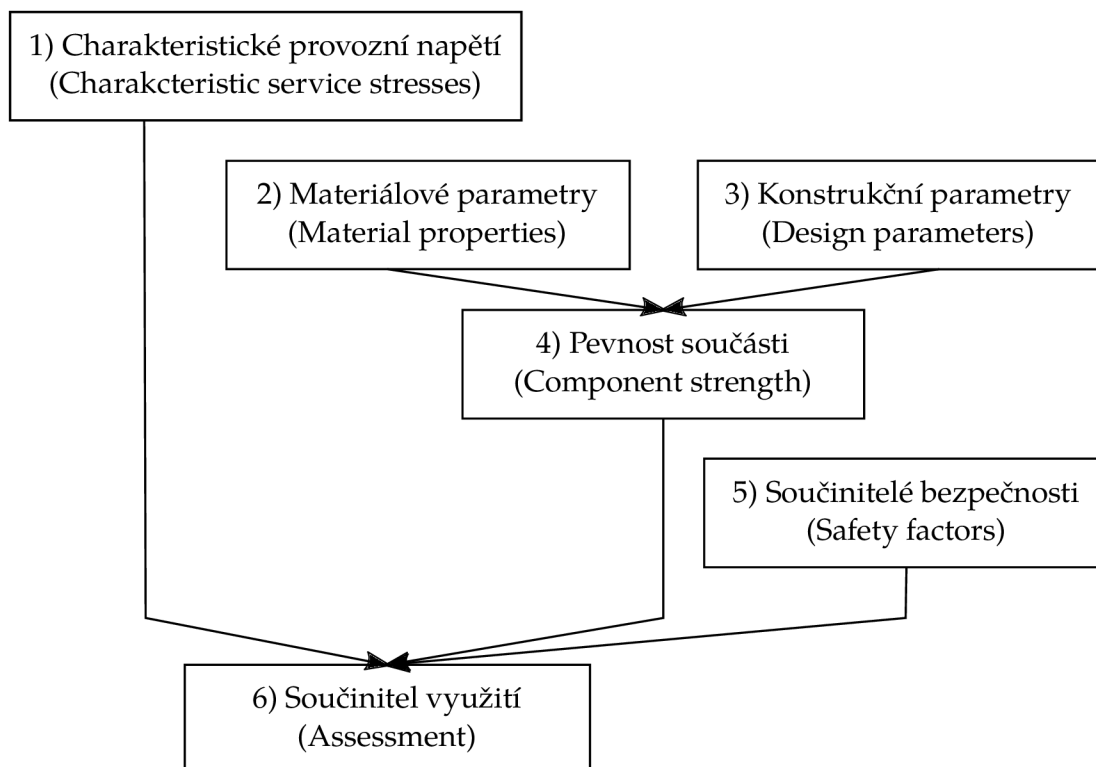
### Určení statické a únavové pevnosti

Při posuzování konstrukcí se obecně postupuje dle schématu na obr. 2.12. Každá část výpočtu obsahuje rozsáhlou dokumentaci popisující jak dané parametry stanovit. Všechny kroky jsou stejné, jak pro statické, tak pro únavové posouzení konstrukce. Liší se pouze způsobem určení dílčích koeficientů. Jednotlivé kroky výpočtu jsou následující.

1. Charakteristické provozní napětí - na základě typu součásti (vrubovaná nebo svařovaná) se stanoví jednotlivá napětí (maximální nebo ekvivalentní).
2. Materiálové parametry - na základě specifikovaného materiálu se stanoví mez pevnosti ( $R_m$ ) a mez kluzu ( $R_p$ ). Tyto parametry jsou funkcemi součinitele velikosti, součinitele anizotropie a mezí pevnosti a kluzu zkušebního vzorku. Tyto získané hodnoty jsou dále korigovány dle způsobu zatížení (tah, tlak a smyk).
3. Konstrukční parametry - dle typu součásti (vrubovaná nebo svařovaná) se stanoví konstrukční součinitele a součinitele tvaru. Jsou to součinitele

zohledňující plastizaci součásti v závislosti na na mezi kluzu materiálu, způsobu zatížení, tvaru průřezu a součinitele koncentrace napětí.

4. Pevnost součásti - bod 2 a bod 3 se sloučí do jedné podmínky stanovující mezní hodnotu pevnosti součásti.
5. Součinitelé bezpečnosti se stanoví na základě možného vyskytu kolbasu součásti a velikosti následných důsledků.
6. Součinitel využití - jedná se o poměr charakteristického provozního napětí a přípustné pevnosti součásti. Aby nenastal mezní stav porušení součásti, tato hodnota musí být menší nebo rovna jedné.



Obr. 2.12: Schéma určení pevnosti součásti dle FKM. [2]

### 2.1.6 IIW

Jedná se o metodiku posouzení dynamického zatížení konstrukce.

#### Omezení

Doporučení je použitelné pro konstrukční oceli do meze kluzu 960 MPa. Není použitelný pro nízkocyklovou únavu, kde rozkmit nominálního napětí je větší než 1,5 krát mez kluzu a maximální nominální napětí je větší než mez kluzu. Také není použitelné pro konstrukce vystavené korozivním podmínkám a zvýšeným teplotám.

#### Definice složek napětí

Pokud budeme uvažovat rozložení napětí dle obr. 2.3 lze podle obrázku napětí rozložit na :

- membránová napětí:

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \cdot dx, \quad (2.23)$$

- ohybová napětí:

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \int_{x=0}^{x=t} (\sigma(x) - \sigma_m) \cdot \left(\frac{t}{2} - x\right) \cdot dx, \quad (2.24)$$

- špičková napětí:

$$\sigma_{nl}(x) = \sigma(x) - \sigma_m - \left(1 - \frac{2 \cdot x}{t}\right) \cdot \sigma_b. \quad (2.25)$$

### Nominální napětí

Toto řešení odpovídá obr. 2.1 a přístupům v normách ČSN a AWS. Pokud nelze pomocí prosté pružnosti stanovit nominální napětí kvůli složitosti součásti, můžeme použít metodu konečných prvků (MKP).

Pokud použijeme MKP pro určení nominálních napětí, musíme vyloučit všechny koncentrace napětí. Nejvhodnější je pro určení nominálního napětí koutových svarů použít uzlové síly.

### Extrapolovaná napětí (Structural Hot Spot Stress)

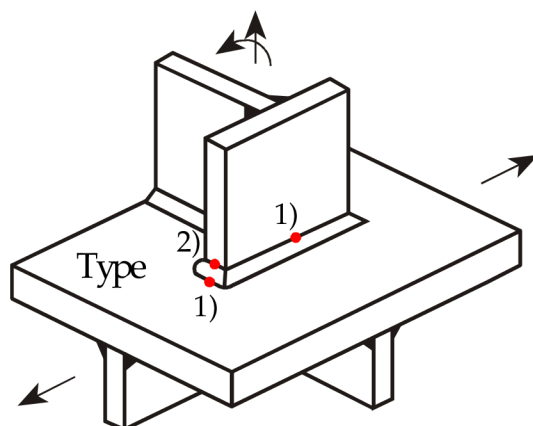
Pozn.: existují 3 metody pro určení hot spot stress [1, str. 13]

Obecný úvod k této problematice byl popsán na začátku této kapitoly. Je důležité, že uvažujeme napětí nominální a napětí vzniklá změnou geometrie, která následně vhodným způsobem extrapoluje a tím tak „smaže vliv vrubu“.

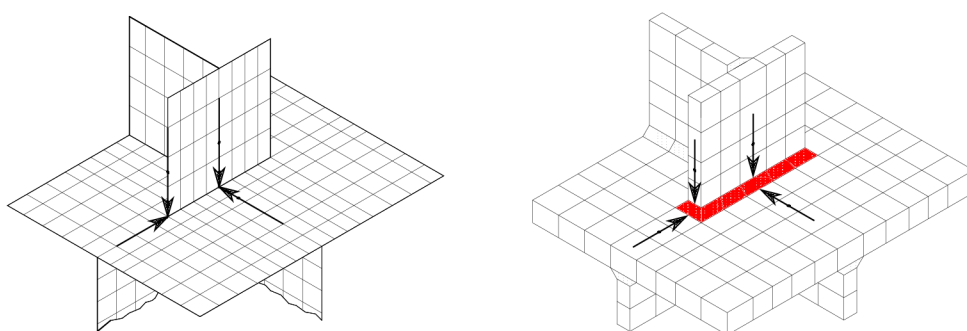
Extrapolovaná napětí se dělí na 2 základní skupiny podle jejich polohy na povrchu komponenty a jejich orientace vůči patě svaru (viz obr. 2.13):

1. pata svaru na ploše součásti,
2. pata svaru na hraně součásti.





Obr. 2.13: Typy extrapolovaných napětí. [20]



Obr. 2.14: Typické sítě konečných prvků (skořepiny, objemy). [15]

Na součásti je zapotřebí určit referenční body, pomocí nichž získáme extrapolované napětí. Většinou se pro určení těchto referenčních bodů a následně zpracováním dat určuje extrapolované napětí pomocí MKP. Při modelování součásti pomocí MKP můžeme použít dva způsoby:

- rovinné nebo skořepinové prvky - svar se nemodeluje,
- objemové prvky - zjednodušená modelace svaru.

Příklad takových modelů je na obr. 2.14. Je nutné podotknout, že je zapotřebí přesně stanovit referenční body. Ty jsou dány velikostí elementů konečně-prvkové sítě. Doporučené referenční body pro jednotlivá referenční napětí (dělená dle polohy a směru) jsou:

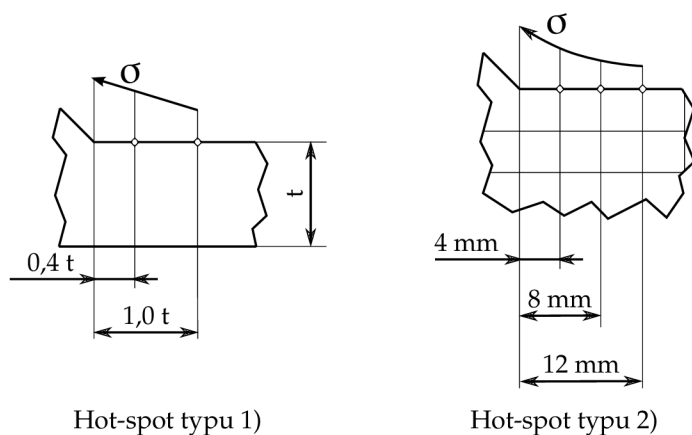
- extrapolované napětí typu 1) - dáno relativně jemnou sítí a dvěma referenčními body ve vzdálenostech  $0,4 \cdot t$  a  $1,0 \cdot t$  od paty svaru. Extrapolované napětí je dáno rov. 2.26, to je vše znázorněno graficky na obr. 2.15.

$$\sigma_{hs} = 1,67 \cdot \sigma_{0,4t} - 0,67 \cdot \sigma_{1,0t} \quad (2.26)$$

- extrapolované napětí typu 2) - relativně jemná síť, která již není závislá na tloušťce tělesa, tři referenční body jsou určeny v absolutní vzdálenost 4 mm, 8 mm, 12 mm od paty svaru. Potom je extrapolované napětí dáno

rov. 2.27 a znázorněno graficky na obr. 2.15.

$$\sigma_{hs} = 3 \cdot \sigma_{4mm} - 3 \cdot \sigma_{8mm} + \sigma_{12mm} \quad (2.27)$$

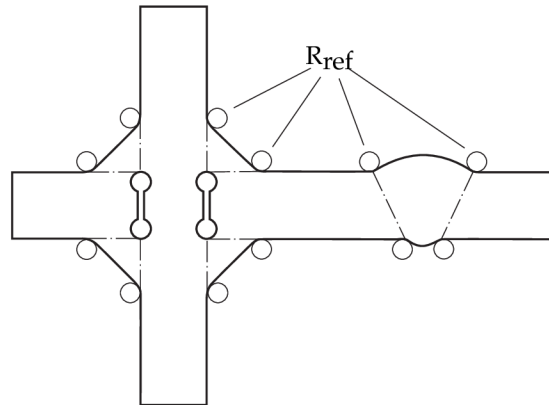


Obr. 2.15: Referenční body skupiny 1) a 2). [20]

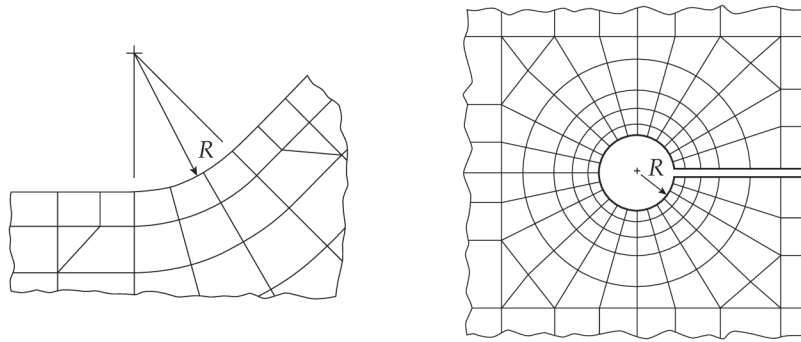
### Vrubová napětí (Effective Notch Stress)

Jedná se o metodiku pracující s aktuálním napětí v kořeni vrubu s uvažováním lineárního elastického materiálu. Pojem efektivní vrubové napětí (Effective Notch Stress) je chápána náhrada skutečného napětí v kořeni vrubu (u reálného svaru) svarem idealizovaným a v místech vrubů vytvoření zaoblení o poloměru  $R_{ref} = 1\text{ mm}$ . Metoda je určena výhradně pro posouzení únavy svaru samotného, posouzení základního materiálu musí být provedeno odděleně pomocí metody Hot spot stress. Předpokládá se, že vrubové napětí je minimálně 1,6 krát větší než napětí extrapolované (Hot spot stress). Podstatným omezením je, že metodika je použitelná pouze pro součásti tloušťky  $t \geq 5\text{ mm}$ . Pro komponenty s menší tloušťkou se jako referenční rádius používá  $R_{ref} = 0,05\text{ mm}$ .

Pro určení vrubového napětí pomocí MKP je stanoveno několik pravidel, týkající se převážně úpravy geometrie a tvorby konečně-prvkové sítě. Geometrii je obecně nutné upravit takovým způsobem, že v místě paty a kořene svaru se vytvoří zaoblení s poloměrem  $R_{ref}$ , viz obr. 2.16. Síť konečných prvků je potřeba vytvořit s ohledem na velikost prvků, která je závislá na formulaci prvku (lineární nebo kvadratický). Obecně se dá říct, že by délka hrany prvku měla být při zaoblení  $R_{ref} = 1\text{ mm}$  při použití lineárního prvku menší než  $0,25\text{ mm}$  a při použití kvadratického prvku menší než  $0,15\text{ mm}$ . Ukázka vztrové sítě konečných prvků je na obr. 2.17.



Obr. 2.16: Způsob zaoblení vrubů. [17]



Obr. 2.17: Příklady sítě v místech zaoblení. [17]

Předchozími způsoby je možné určit při daném vnějším zatížení příslušná napětí pro následující stanovení únavové životnosti.

### Odolnost proti únavě

Odolnost součásti se stejně jako v uvedených normách v předchozím textu určuje na základě experimentálně stanovených S-N křivek. Křivky jsou vyjádřeny pomocí rov. 2.28.

$$N = \frac{C}{\Delta\sigma^m} \quad \text{nebo} \quad N = \frac{C}{\Delta\tau^m} \quad (2.28)$$

Kde za napětí jsou dosazovány hodnoty z předchozích třech metodik (nominální, extrapolovaná a vrubová napětí). Podrobnější popis je dán následovně.

- Nominální napětí - jedná se o obdobu posouzení národními normami. Jednotlivá provedení spojení součástí jsou kategorizována (v tomto případě FAT kategorie) a k nim jsou uvedeny potřebné parametry pro stanovení výsledné životnosti.
- Extrapolovaná napětí - pro stanovení životnosti jsou dva přístupy.
  - Použití speciálních S-N křivek kategorií svarových detailů (omezené množství).

- Posouzení na základě nalezení co možná nejpodobnějšího provedení svaru v kategorizačních tabulkách pro nominální napětí a následným přepočtem stanovit FAT kategorii.
- Vrubová napětí - pro tento způsob určení napětí je stanovena pouze jedna FAT kategorie. Není tedy třeba žádné přirovnávání geometrie, to je ovšem kompenzováno vyšší náročností přípravy modelu a výpočtním časem.

### 2.1.7 DNV

Jedná se o Norské doporučené převážně zaměřené na hodnocení přímořských zařízení. Doporučení je určeno výhradně pro posuzování cyklického zatěžování, tedy únavy materiálu.

#### Omezení

Dokument je určen pro posuzování ocelí u mezí kluzu do 960 MPa, teploty standardně do 100 °C (při vyšších teplotách se zavádí korekční součinitel) a pro vysokocyklovou únavu.

#### Hodnocení únavy

Posouzení je založeno na S-N křivkách a kategorizaci napětí stejně jako předchozí předpisy pro hodnocení únavy.

#### Výpočet napětí

Výpočet napětí je možné stanovit dle různých metodik, kdy použití jednotlivých metodik je dáno složitostí spoje a způsobem zatěžování. Dělení je následující:

- Nominální napětí - posouzení je prováděno u svarů v místech, kde se nevyskytují žádné další tvarové změny jako jsou otvory a je totožné s předchozími dokumenty (na základě nominálního napětí a kategorizace detailů se zvolí správná S-N křivka a stanoví se životnost). Při posuzování svarů v místech tvarových změn (otvorů) se místo nominálního napětí používá lokální napětí, které navyšuje nominální napětí součinitelem koncentrace napětí. Toto lokální napětí společně s danými S-N křivkami vstupuje do hodnocení únavy. Další odchylkou od předchozích dokumentů je uvažování velikosti hlavního napětí jako významný parametr pro posouzení únavy. K tomuto posouzení se opět vztahují odlišné kategorie detailů svaru.
- Tvarová napětí - v doporučení je definováno stejným způsobem jako v IIW. Navíc však určuje, jakým způsobem jsou stanoveny rozkmity napětí a to rozdílně pro skořepinové a objemové MKP modely.
- Vrubová napětí - dokument tuto metodiku zmiňuje, ale uvádí, že je používána jen ve speciálních případech.

### 2.1.8 Únosnost svaru

Pro další text je zapotřebí specifikovat únosnost svarového spoje. Tento pojem není nikde přesně dán, ale v každé z norem znamená něco mírně odlišného.

## AISC

Dle [37, str. 49] se myslí únosností svaru síla, kterou svar dokáže přenést, než dojde k jeho porušení. Ve stejné práci prováděli rozbory lomových ploch a hodnotili také úhel, pod kterým došlo k porušení svarového spoje. Dojde tedy k meznímu stavu porušení spojitosti tělesa.

## ČSN 05 0120

Dle [9, str. 15] se únosností myslí zatížení, které nepřekročí hodnotu srovnávacího napětí odvozeného na základě meze kluzu základního materiálu. Dojde tedy k meznímu stavu pružnosti tělesa.

## ČSN EN 1993

V této normě je únosnost definována jako Mezní stav únosnosti, která zahrnuje ([47, str. 18], [11, str. 22]):

- porušení stability polohy,
- překročení pevnosti nebo nadměrná plastická deformace,
- ztráta stability tvaru konstrukce nebo některé její části,
- únavový lom,
- křehký lom,
- plastické poškození při proměnném zatížení.

### 2.1.9 Závěr rešeršní práce

Z provedené rešeršní práce vyplývá, že pro posouzení cyklicky namáhaných svarových spojů existuje velmi propracovaná metodika (IIW). Ta je proveditelná jak analytickým, tak numerickým způsobem řešení. Pro numerické řešení pomocí metody konečných prvků existují přísná pravidla pro tvorbu modelu geometrie a sítě konečných prvků. Proto bylo shledáno, že není třeba dalším způsobem rozvádět tento přístup. A to z důvodu, že je v možnostech této práce dále tuto metodiku zdokonalit, protože pro řešení takových problémů je zapotřebí mnoha rozsáhlých experimentů.

Jinak je tomu v oblasti staticky zatížených svarových spojů, kde existují pouze metody pro posouzení standardizovaných svarových spojů daných normou a tabulkami. Jako výchozí metoda byla vybrána metoda okamžitého středu otáčení. Výhodou tohoto přístupu posouzení únosnosti svarových spojů je, že výpočty jsou podloženy sadou experimentů a analytické řešení se s nimi shoduje. V dalším textu práce tedy převezmu analytický princip metody okamžitého středu otáčení a implementuji ji do numerického řešení pomocí metody konečných prvků. To by mělo přinést snadnější a obecnější přístup pro posouzení svarových spojů.

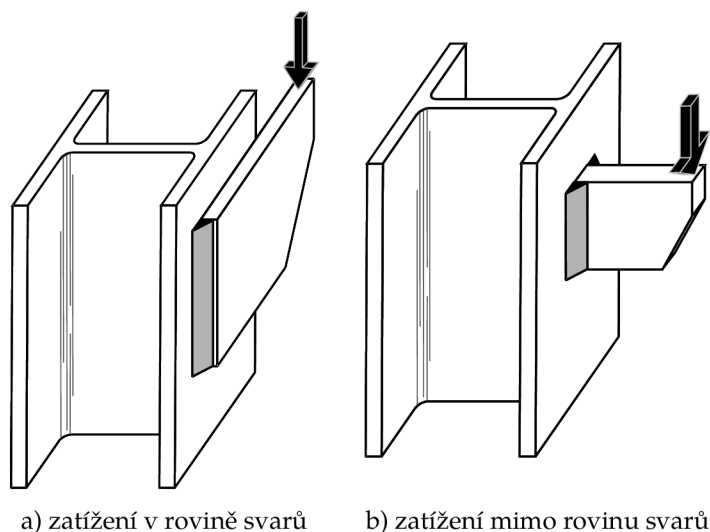
## 2.2 Vybraná metoda - AISC

Metodu je možné podle způsobu zatížení rozdělit na dvě základní skupiny:

- excentrické zatížení v rovině svarů (In-plane eccentricity),

- excentrické zatížení mimo rovinu svarů (Out-of-plane eccentricity).

Vysvětlení těchto dvou způsobů zatížení je zobrazeno na obr. 2.18.



Obr. 2.18: Způsoby zatížení svarů. [55]

### 2.2.1 Princip metody okamžitého středu otáčení

Princip metody okamžitého středu otáčení byl popsán ve dvou stěžejních pracích [6, str. 1] a [31, str. 5]. Popis metody lze tedy shrnout do několika následujících bodů:

- Skupina koutových svarů při excentrickém zatížení rotuje kolem okamžitého středu otáčení.
- Okamžitý střed otáčení stanovuje pomocí rovnic statické rovnováhy. Tento proces je iterativní, protože není možné napoprvé vyhovět všem rovnicím rovnováhy (nevýhoda této metody).
- Svar je rozdělen na konečný počet segmentů.
- Jednotlivé segmenty působí proti zatížení, kde výsledná působící síla je v těžišti segmentu. Tato síla působící v těžišti segmentu je kolmá na spojnici středu okamžitého středu otáčení a těžiště. Tím je stanoven úhel síly vůči ose daného segmentu.
- V závislosti na získaném úhlu se dopočtou deformace všech segmentů a určí se kritický segment. Deformace segmentů je lineárně rozložena vůči kritickému segmentu (ten, který jak první dosáhne své maximální deformace).
- Pro každý segment je následně dopočítána odporující síla vůči zatížení.
- Únosnost segmentu je dána empiricky získanými vztahy závislými na úhlu zatížení.
- Uvažuje se, že únosnost svaru v tahu a tlaku je stejná.
- Součet sil jednotlivých segmentů udává únosnost svaru.

## Dělení svaru

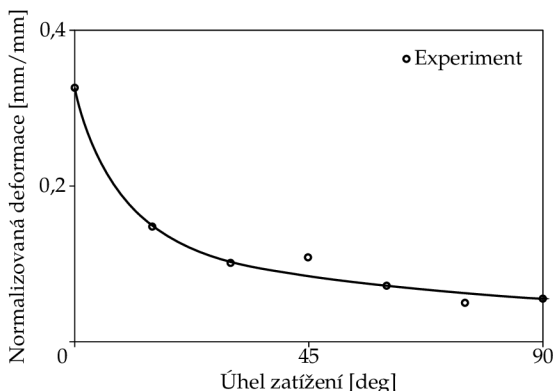
Přesnost výsledku je závislá na počtu dělení svaru. Výsledek uvedený v [6] je, že čím menší počet segmentů bude použit pro diskretizaci svaru, tím konzervativnější bude nižší maximální zatížení.

### 2.2.2 Excentrické zatížení v rovině svarů

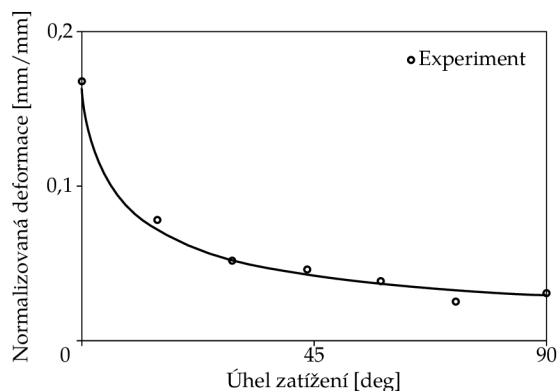
Pro řešení bylo vyvinuto několik metod využívajících okamžitého středu otáčení, kde nejprve se používalo metody elastické a následně metody maximální kapacity svaru. Metoda maximální kapacity svaru na rozdíl od metody elastické zohledňuje různou schopnost svarů přenášet zatížení dle měnících se úhlů zatáčení. Metodu maximální kapacity svaru odvodili a experimentálně ověřili Butler a Kulak, později také Lesik a Kennedy. Na základě jejich prací a prací z nich vycházející lze konstatovat následující.

#### Deformace

Na obr. 2.19 a obr. 2.20 je závislost velikosti normalizované deformace na úhlu zatížení při lomu a při maximálním zatížení. Normalizovanou deformací se myslí deformace svaru podělená tloušťkou svaru  $d$  (naším značení  $z$ ). Jednotlivé body (kroužky) jsou výsledky experimentálních měření, kdy každý bod je průměrem šesti měření. To nám dává obálku maximálních deformací, které působí na svar před jeho porušením. Dolní hranici při transversálně zatíženém svaru (úhel zatížení  $90^\circ$ ) a horní hranici při zatížení longitudinálně (úhel zatížení  $0^\circ$ ).



Obr. 2.19: Normalizovaná deformace při porušení. [32]



Obr. 2.20: Normalizovaná deformace při maximálním zatížení. [32]

Pro obr. 2.19 platí rov. 2.29.

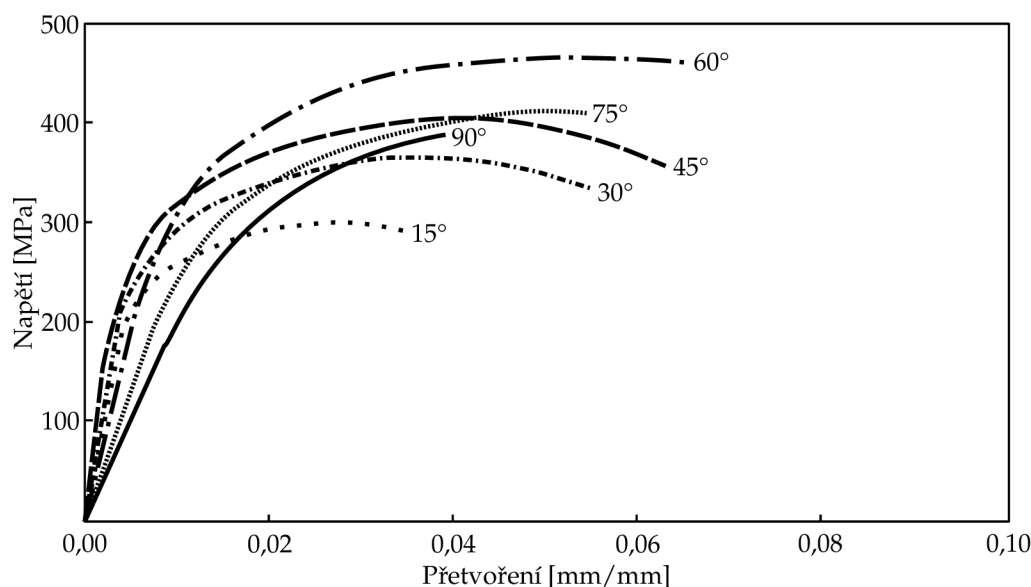
$$\frac{\Delta_f}{d} = 1,087 \cdot (\theta + 6)^{-0,65} \quad (2.29)$$

Pro obr. 2.20 platí rov. 2.30.

$$\frac{\Delta_u}{d} = 0,209 \cdot (\theta + 2)^{-0,32} \quad (2.30)$$

## Napětí

Na základě obr. 2.8, který zobrazuje závislost normalizovaného zatížení (aktuální zatížení pod daným úhlem  $P_\theta$  podělené podélnou pevností  $P_0$ ) vůči normalizované deformaci (deformace svaru  $\Delta$  podělená tloušťkou svaru jako v případech předchozích dvou obrázků), ukazuje rozdílnou únosnost svarových spojů v závislosti na úhlu zatížení. Normalizovaná maximální pevnost je dle teorie  $\frac{P_\theta}{P_0} = 1,51$  což se shoduje s experimentálními daty  $\frac{P_\theta}{P_0} = 1,50$ , dle [38]. To nám na rozdíl od deformačních závislostí říká, že transversálně zatížené svary mají o 51 % větší pevnost než svary zatížené v podélném směru. To je v souladu s výsledky běžných tahových zkoušek, protože materiály s vyšší pevností mají menší tažnost.



Obr. 2.21: Tahová zkouška svaru  $z = 5$  mm. [38]

Na obr. 2.21 je diagram napětí versus přetvoření, kde napětí je získané mírně odlišným způsobem než při běžných tahových zkouškách.

$$\sigma = \frac{P_u}{z \cdot l} \quad (2.31)$$

Kde  $P_u$  je zatížení při tahové zkoušce,  $z$  je aktuální tloušťka svaru a  $l$  je aktuální délka svaru.

### Empiricky vytvořené vztahy

Pokud bychom hodnotili skupinu svarů, která obsahuje svary různě natočené (počítali bychom pomocí metody Okamžitého středu otáčení – ultimate strength approach, tedy metoda maximální pevnosti) vůči zatížení použili bychom rovnici:

$$P = P_0 \left( 1,00 + 0,50 \cdot \sin^{1,5}(\theta) \right) \cdot f(\rho). \quad (2.32)$$

Kde  $P_0$  předstává maximální pevnost podélného svaru a je definována jako:



- podle kanadské normy CSA CAN3-S16.1-M84:

$$P_0 = 0,67\phi X_u, \quad (2.33)$$

Kde  $\phi$  představuje (resistance factor) faktor odolnosti a je dán hodnotou  $0,68 \div 0,81$  dle [32] a  $X_u$  je pevnost svarového materiálu.

Resistance factor, česky přeloženo jako faktor odolnosti představuje závislost na statistickém vyhodnocení experimentálních dat. Obecně se dává napsat:  $\phi = f(\rho_R, \beta, \alpha_R, V_R)$ . Kde  $\rho_R$  je poměr průměrné skutečné únosnosti svaru a přípustné únosnosti svaru spočítanou analyticky (statisticky zahrnuje průměr svaru, materiálové vlastnosti a schopnost predikce výpočtového modelu),  $\beta$  představuje index spolehlivosti,  $\alpha_R$  je koeficient porušení - numerická konstanta a  $V_R$  je koeficient variace (statisticky zahrnuje průměr svaru, materiálové vlastnosti a schopnost predikce výpočtového modelu).

- podle americké normy AISC:

$$P_0 = 0,6\phi F_{EXX}. \quad (2.34)$$

- podle americké normy AWS:

$$P_0 = 0,3F_{EXX}. \quad (2.35)$$

Kde  $F_{EXX}$  je pevnost elektrody (minimální pevnost v tahu) dle klasifikace přídavných materiálu (standardně používaná elektroda je E70 s pevností v tahu 480MPa) a  $\phi$  je faktor odolnosti, který má hodnotu  $\phi = 0,75$ .

Z rozboru rov. 2.32 vyplývá:

- první část rovnice představuje rozdílnou pevnost svarů dle úhlu zatížení,

$$P_0(1,00 + 0,50 \cdot \sin^{1,5}(\theta)) \quad (2.36)$$

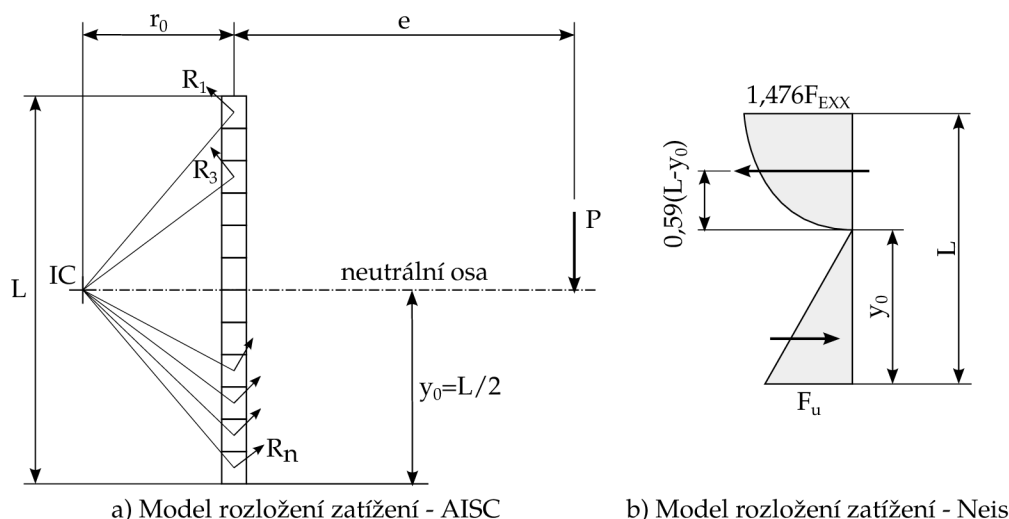
- druhá část rovnice představuje rozdílnou tažnost svarů dle úhlu zatížení. Tento člen odpadá pokud se posuzuje pouze jeden svar přímé geometrie (je podstatný pouze pro skupiny svarů).

$$f(\rho) = [\rho(1,9 - 0,9 \cdot \rho)]^{0,3} \quad (2.37)$$

### 2.2.3 Excentrické zatížení mimo rovinu svarů

Tento způsob zatížení je oproti předchozímu způsobu poněkud odlišný, proto je zapotřebí také odlišné posouzení. Zatížení vyvolává ohybové a smykové napětí. Opět bylo vyvinuto několik metod pro hodnocení s cílem co nejpřesněji predikovat chování svaru. Hlavní tvůrci jsou Dawe a Kulak, Neis, Beailieu a Picard.

Z metody navržené dvojicí Dawe a Kulak vychází také současná metoda v AISC. Jedná se o adaptaci metody z prvního způsobu zatěžování (zatížení v rovině svarové skupiny). Je nutné podotknout, že tento přístup uvažuje v oblasti zatížené tlakem, že zatížení je přenášeno pouze pomocí svarů. Žádné zatížení není přenášeno stykem svařovaných součástí. Metoda je totožná, jako kdybychom zatížili svary v rovině svarů. Ukázku metody a další příklad podle Neise je na obr. 2.22.



Obr. 2.22: Různé modely přenosu zatížení svařem. [55]

Po provnání ostatních modelů vyhodnocení zatížení vyplývá následující:

- Metoda podle AISC má stejná omezení jako při zatížení svaru v rovině svařové skupiny. Uvažuje různou schopnost přenést zatížení (svary transversální přenesou až o 50 % větší zatížení než svary longitudinální).
- Dle Niese vyplývá, že maximální kapacity svarů jsou následující:
  - v tažené oblasti je maximální kapacita  $P = 1,476 \cdot F_{EXX}$  (vychází z pevnosti transversálně zatížených svarů),
  - v tlačené oblasti je maximální kapacita mezi kluzu základního materiálu nebo pevnosti v tahu základního materiálu.
- Dle Beailieua a Picarda je maximální kapacita svaru v tažené oblasti dána pevností transversálně zatěžovaného svaru ( $P = 1,5 \cdot P_0$ ) a v oblasti tažené je kapacita dána mezi kluzu základních materiálů.

Pro posouzení svařové skupiny pomocí metody konečných prvků bude použit normativní předpis metody okamžitého středu otáčení.

## 2.2.4 Přípustná napětí a deformace - podmínky pro MKP

Na základě předchozího rozboru je pro posouzení konstrukce pomocí metody konečných prvků stanoveno:

- maximální napětí, které se může vyskytovat ve svaru je  $0,6 \cdot \phi \cdot F_{EXX}$ , kde hodnota 0,6 představuje návrhový smykový koeficient daný normou. To je základní napětí, které se ještě liší dle způsobu zatížení svaru (dle rov. 2.36). Ovšem dle [55] je doporučeno použít aktuální smykový koeficient o hodnotě 0,78.
- deformace v místě svaru by dle obr. 2.19 neměla přesáhnout hodnotu

$$\Delta_f = [1,087 \cdot (\theta + 6)^{-0,65}] \cdot d \quad (2.38)$$

Pokud do rov. 2.38 zahrneme skutečnost, že svary zatížené transversálně ( $\theta = 90^\circ$ ) mají nejmenší tuhost, získáme kritickou hodnotu deformace svaru  $\Delta_{f,krit} = 0,056 \cdot d$ . Norma navíc předepisuje, že deformace by neměla přesáhnout hodnotu  $0,17 \cdot d$ , to je v tomto případě trojnásobná hodnota.

Pro celkové posouzení svarku je nutno posoudit zvlášť základní materiál a svar samotný. Svar se posuzuje v efektivním průřezu (výška svaru). Základní materiál se posuzuje v místě styku se svarovým materiálem.

Pro posouzení základního materiálu se používá smykové napětí v místě zatížené smykem. To je plocha, kterou svar sdílí se základním materiálem. Potom pevnost základního materiálu je dána rov. 2.39.

$$P_{BM} = \phi_{BM} \cdot 0,6 \cdot F_y \quad (2.39)$$

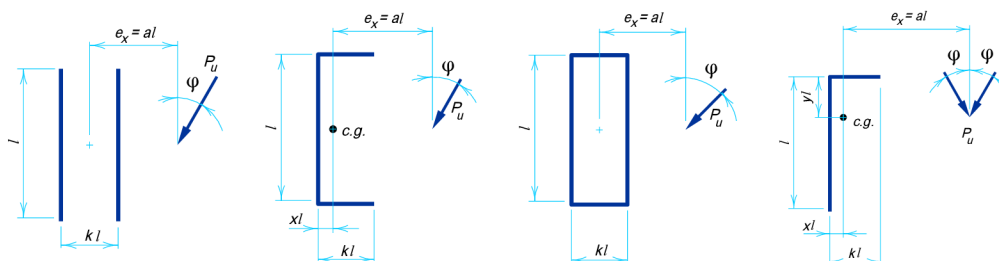
Kde  $F_y$  je mez kluzu základního materiálu a  $\phi_{BM} = 0,9$  je faktor odolnosti.

Svar se posuzuje v závislosti na pevnosti svarového materiálu, který by měl být volen tak, aby odpovídal pevnosti základního materiálu.

Celková pevnost svaru je potom dána menším z hodnot daných jednou z následujících rovnic (dle zvolené normy) rov. 2.32 a rov. 2.39.

## 2.2.5 Tabelované geometrie svarové skupiny

Dle [34] jsou tabelovány pouze některé, nejčastěji používané svarové skupiny běžné praxe, viz obr. 2.23. Tyto modely jsou zde ukázány jen proto, aby bylo nastíněno, že tabelované hodnoty jsou dostupné jen v omezeném množství a při hodnocení komplikovanějšího svaru nejsou dostupné podklady.



Obr. 2.23: Modely svarových skupin. [34]

## 2.2.6 Porovnání s ČSN

Pokud bychom výše uvedenou metodu [34] porovnali vůči české normě [9] zjistíme, že posouzení je na stejném principu jen s drobnými odlišnostmi. Odlišnosti:

- stanovení srovnávacího napětí vychází z:
  - ČSN 05 0120 se určuje z meze kluzu základního materiálu,
  - ČSN EN 1993-1-8 se určuje z meze pevnosti základního materiálu,
  - AISC se určuje z meze pevnosti elektrody,

a dále je tato hodnota napětí redukována pomocí dílčích koeficientů (součinitelem bezpečnosti, faktorem odolnosti, atd.),

- přípustné napětí je vynásobeno převodním součinitelem dle typu namáhání (v AISC pouze převod srovnávacího tahového napětí na srovnávací pevnost ve smyku),
- svarový materiál by měl mít lepší materiálové charakteristiky než materiál základní (v AISC by měl mít svarový materiál obdobné materiálové vlastnosti jako základní materiál),
- napětí se ve všech případech posuzuje v nosném průřez svaru. AISC se řídí teorií dle Maximálního smykového napětí ( $MAX \tau$ ) [37, str. 94]. Při hodnocení pomocí ČSN EN 1993-1-8 se srovnávací výsledné napětí působící ve svaru určuje jako ekvivalentní napětí, které zohledňuje anizotropické chování materiálu v místě svaru [39] a [12].

## 2.3 Experimentální data

Tab. 2.1 vychází z [25, str. 21], [40, str. 17], [55]. Názvy autorů označené tučným písmem jsou podstatné pro využívané normy a pro tuto práci.

Tab. 2.1: Experimenty provedené k metodice okamžitého středu otáčení.

Autor a rok	Počet vzorků	Poznámka
Archer a kol. (1958)	2T, 2L	Ukazují rozdílnou únosnost v transversálním (T) a longitudinálním (L) směru. V T směru 1,56 vyšší únosnost než ve směru L.
Ligtenburg (1968)	?	Ukazují rozdílnou únosnost v T a L směru. V T směru 1,59 vyšší únosnost než ve směru L.
Higgins a Preece (1969)	168 (L + T)	Snaha vyvinout kritérium pro stanovení přípustného zatížení pro různé kombinace základního a svarového materiálu. V T směru 1,57 vyšší únosnost než ve směru L.
Clark (1971)	18	Shrnuje modely popisující únosnost svarových spojů a z jeho experimentální práce vyplynulo, že svary zatížené v T směru mají o 70 % větší únosnost než svary zatížené v L směru.
Butler a Kulak (1971)	23	Vytvořili vzorky svařené pod různými úhly (0°, 30°, 60° a 90°). Snaha o vytvoření závislosti deformace a únosnosti jednotlivých svarových spojů na úhlu zatěžovací síly. V T směru 1,44 vyšší únosnost než ve směru L. Byl odvozen vztah pro únosnost svarového spoje zohledňující úhel zatížení svaru.
Butler, Pal a Kulak (1972)	13	Vytvoření metodiky posouzení excentricky zatížené svarové skupiny.
Swannel a Skewes (1979)	21	Tvorba nových modelů pro určení únosnosti svarové skupiny zatížené excentricky. Výsledky některých zkoušek jsou nejasné, ale model je v dobré shodě s experimenty a ostatními empirickými vztahy.
Mansell a Yadav (1982)	?	Zkoumali mechanismus porušení svarového spoje a jejich výsledky ověřili, že T zatížení svary jsou pevnější než L zatížené svary.
Pham (1983)	36 L, 36 T	Zkoumal plastickou oblast v tepelně ovlivněné oblasti a vliv velikosti a délky svaru na jeho tažnost a únosnost.
Mansell a Yadav (1982)	?	V jejich práci ukázali, že při porušení L a T provedených svarů dochází při různých napětích ve svarech a různých úhlech porušení.
McClellan (1989)	96	Ukazuje rozdílnou únosnost v T a L směru závislou také na metodě svařování. V T směru 1,39 až 1,51 vyšší únosnost než ve směru L.
<b>Miazga a Kennedy (1986/1989)</b>	42	Pozorovali úhel porušení mezi 49° až 14° při zatížení pod úhlem 0 deg až 90 deg respektive. Průměrný poměr mezi T a L svarem byl naměřen 1,43. Na základě naměřených dat vyvinuli vztahy pro stanovení únosnosti svarového spoje v závislosti na úhlu zatížení svaru.
Bowman a Quinn (1994)	18	Provedli testy na T a L zatížených svarových vzorcích.
<b>Lesik a Kennedy (1990)</b>	-	Neprováděli experimenty, pouze zjednodušili a upravili vztahy navržené Miazgou a Kennedym (1989).
Bowman a Quinn (1994)	18	Pozorovali geometrické faktory ovlivňující únosnost svarového spoje, poměr únosnosti T a L provedeného svaru (zjištěný poměr byl 1,30 až 1,70) a vliv velikosti svaru.
<b>Ng a kol. (2002)</b>	102	Provedená experimentální měření slouží pro rozšíření experimentů provedených Miazgou a Kennedym (1986).
Deng a kol. (2003)	30	Provedli experimenty pro ověření používaných vztahů pro určení únosnosti svarů zatížených pod různými úhly.
UC Davis (2007)	12	Experimenty na vzorcích pro pozorování out of plane zatížení svarové skupiny zatížení.
Kanvinde (2008)	108	Provedl experimenty na 108 vzorcích pro in plane i out of plane zatížené svarky. Na těchto datech ověřoval metodiky.

### 3 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

Metoda převzaná z amerických norem je adaptována do MKP. Má to následující výhody:

- možnost vytvořit libovolný svar,
- přesnější stanovení požadovaných úhlů pro posouzení.

Pro možnost porovnání výpočtových modelů (analytických a numerických) byly vytvořeny tři příklady. Dva příklady pro posouzení únosnosti svaru při zatěžování IN PLANE a jeden příklad při zatěžování v OUT OF PLANE.

Určování únosnosti svarové skupiny probíhalo v několika krocích. Veškerý postup prací bude popsán pouze na jednom příkladě (zbylé dva jsou odlišné pouze geometrií). Popsán bude *Příklad 1* kap. 4.2.

#### Model geometrie

Jako první se musela stanovit jednoduchá geometrie. Návrh byl proveden dle AISC MANUAL [52] tak, aby bylo analytické řešení jednoduché a nebylo třeba interpolací mezi jednotlivými koeficienty.

#### Stanovení koeficientů

Pro výpočet únosnosti zvolené svarové skupiny je dle tabulek zapotřebí stanovit charakteristický rozměr svaru ( $L$ ), koeficient zohledňující použitý typ elektrody ( $C_1$ ), koeficient zahrnující geometrii a úhel zatížení svarové skupiny ( $C$ ) a velikost svaru ( $D$ ). Koeficienty  $L$  a  $D$  byly voleny při tvorbě geometrie a koeficienty  $C$  a  $C_1$  byly voleny v závislosti na této geometrii.

#### Stanovení normativní únosnosti svarové skupiny

Stanovení únosnosti dle norem je dáno vztahem rov. 3.1.

$$P_u = C \cdot C_1 \cdot D \cdot L [kip] \quad (3.1)$$

Hodnota síly určená pomocí rov. 3.1 byla základním vstupem do MKP výpočtu. Touto silou byla zatěžována vytvořená geometrie.

#### Tvorba geometrie numerického modelu

Tvorba modelu byla pojata jako kompletně parametrická úloha. Hlavními parametry jsou charakteristický rozměr ( $L$ ), velikost svaru ( $D$ ), počet segmentů a velikost konečně prvkového elementu. V závislosti na těchto parametrech byl model geometrie vytvořen tak, aby bylo možné svar modelovat jako dělený (takto jej uvažuje norma) a spojitý.

#### Model materiálu numerického modelu

Materiál byl modelován jako homogenní, izotropní, lineárně pružný (nebo ideálně pružně-plastický) materiál s materiálovými parametry: modul pružnosti v tahu ( $E$ ), Poissonův poměr ( $\mu$ ) a mezí kluzu ( $Re$ ). Více o modelu materiálu dále v kap. 6.1.

#### Model okrajových podmínek

Okrajové podmínky jsou tvořeny vetknutím a silovým zatížením získaným z rov. 3.1. Podrobnější popis okrajových podmínek je uveden v kap. 6.5.

#### Diskretizace geometrie konečnými prvky

Diskretizace byla provedena lineárními prvky tak, aby vzniklá síť byla pravidelná (mapovaná). V místech zájmu (segmentech svaru) byla síť vytvořena hustější a v ostatních oblastech hrubší pro zlepšení výpočetního času.

### Vyhodnocení sil na segmentech

Byl vytvořen skript pro automatizaci vyhodnocení a uložení výsledků. Síly byly vyhodnoceny na jednotlivých segmentech svaru na plochách zatížených smykem (na obr. 4.1 až obr. 4.3 označeno červenou barvou). Byly vyselektovány všechny uzly na této hranici náležící danému segmentu a v těžišti této plochy byly dopočítány složkově jednotlivé síly ( $F_x, F_y, F_z$ ).

### Stanovení srovnávací síly na segmentech

Z předchozího kroku byly získány složky síly působící na segment, ze kterých byl stanoven úhel, který svírá výslednice této síly s osou svaru. Úhel byl stanoven jak v rovině zatížení, tak obecně v prostoru. Úhel byl dále upraven tak, aby byl v rozmezí  $0^\circ$  až  $90^\circ$ . Tento úhel vstupoval do rov. 3.2, která je kombinací rov. 2.36 a rov. 2.34.

$$P = 0,6 \cdot \phi \cdot F_{EXX} \cdot (1,00 + 0,50 \cdot \sin^{1,5}(\theta)) \quad (3.2)$$

Tím byla stanovena maximální síla, kterou je segment svaru chopen přenést.

### Parametrická studie

Vstupy do úlohy byly různé počty segmentů svaru, velikost elementů konečně prvkové sítě a dva různé modely materiálu. Výstupem byl textový soubor obsahující informace o vzniklých silách v jednotlivých segmentech, úhel vzniklé síly svírající s osou svaru, maximální vzniklá deformace segmentu a přípustné síly a deformace segmentu v závislosti na úhlu mezi silou a osou svaru. Pro každý příklad byla vytvořena dvojice skriptů, kde jeden vytvořil a spočítal úlohu, a druhý vyhodnotil výsledky. Rozsah skriptů byl 300 až 700 řádků. Do vyhodnocení se řadí:

- získání sil z jednotlivých segmentů,
- na základě složek síly byl stanoven úhel mezi silou a osou svaru,
- vložení do jednotlivých těžišť segmentů nové souřadné systémy a jejich natočení dle úhlu působící síly (pro možnost vyhodnocení deformace ve směru působení síly),
- výpočet přípustných sil pro jednotlivé segmenty,
- zápis do textových souborů.

## 4 ANALYTICKÝ PŘÍSTUP ŘEŠENÍ

Pro všechny příklady byla použita elektroda s označením *E70*, tedy elektroda s pevností 480 MPa. Pro tuto elektrodu je dle [52] stanoven koeficient  $C_1 = 1,00$ .

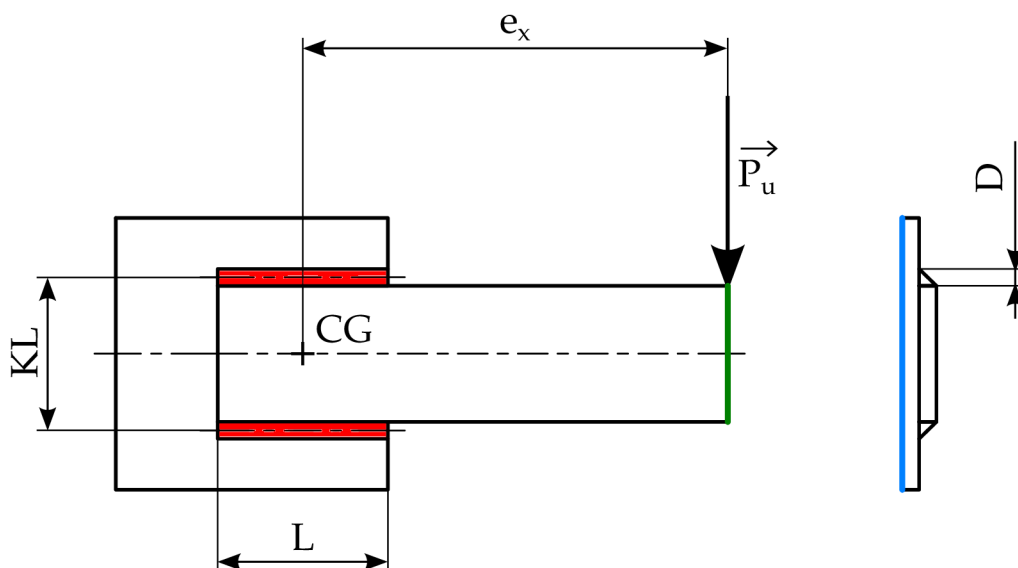
### 4.1 Modifikace systému podstatných veličin

Systém podstatných veličin uvedený v kap. 1.9, který by vytvořen pro popis problematiky svarových spojů je komplexní a metoda pro hodnocení svarových spojů nezahrnuje veškeré veličiny v něm uvedené. Proto je vhodné uvést alespoň v bodech odlišnosti (již ne strukturovaně) a zavedené předpoklady, které byly pro výpočet použity.

- Jsou uvažována ideálně tuhá tělesa, tedy bez uvažování modulu pružnosti a Poissonova poměru.
- V návaznosti na předchozí bod (ideálně tuhá tělesa), je rozložení sil dáno pomocí rovnic statické rovnováhy.
- Pro splnění rovnic statické rovnováhy se hledá bod, kolem kterého svarová skupina rotuje. Tento bod je stanoven iterativně.
- Posouzení svarové skupiny pouze v rovině.
- Maximální přípustná síla a deformace svaru je dána v závislosti na experimentálních datech.
- Únosnost jednotlivých segmentů je dána lineárně v závislosti na nejvíce deformovaném (kritickém) segmentu a jeho vzdálenosti od středu otáčení.
- Pro stanovení únosnosti svarové skupiny je nejdůležitější úhel, který svírá reakce svaru na vnější zatížení s osou svaru samotného.
- Maximální přípustná síla je stanovena na základě pevnosti svarového materiálu (elektrody).
- Uvažují se diskrétní segmenty svaru (každý svar je reprezentován konečným počtem dílků), které se samostatně a hlavně nezávisle na sobě kontrolují. Návaznost segmentů na vedlejší segmenty je dána přepočtem dle rov. 2.32.
- Pomocí této metody se určí pouze únosnost svaru samotného, únosnost spojovaných součástí je zapotřebí ještě dodatečně určit.
- Metoda je obecná, ale iterační, proto je pro běžné použití nevhodná. Metoda je pro jednotlivé způsoby zatížení a provedení svaru tabelována.
- Deformace svarů z experimentů jsou závislé na skutečné křivce napětí-přetvoření.
- Zbytková napětí jsou taktéž zahrnuta ve výpočtech prostřednictvím využívaných experimentálních dat (používané křivky zatížení-deformace byly určeny z reálných svařovaných komponent, které nebyly žihány).



## 4.2 Příklad 1 - dva horizontální svary



Obr. 4.1: Zadání příkladu 1.

Zvolené parametry svařované součásti:

Popisek	Značení	Hodnota
Úhel zatížení svarové skupiny	$\theta$	$0^\circ$
Charakteristická délka skupiny svarů	L	4 in
Vzdálenost os svarů	KL	2 in
Vzdálenost zatížení od těžiště skupiny svarů	$e_x$	8 in
Velikost svaru	D	6/16 in

Ze zvolených rozměrů a daného úhlu zatížení součásti vyplývají dílčí koeficienty dle [52]:

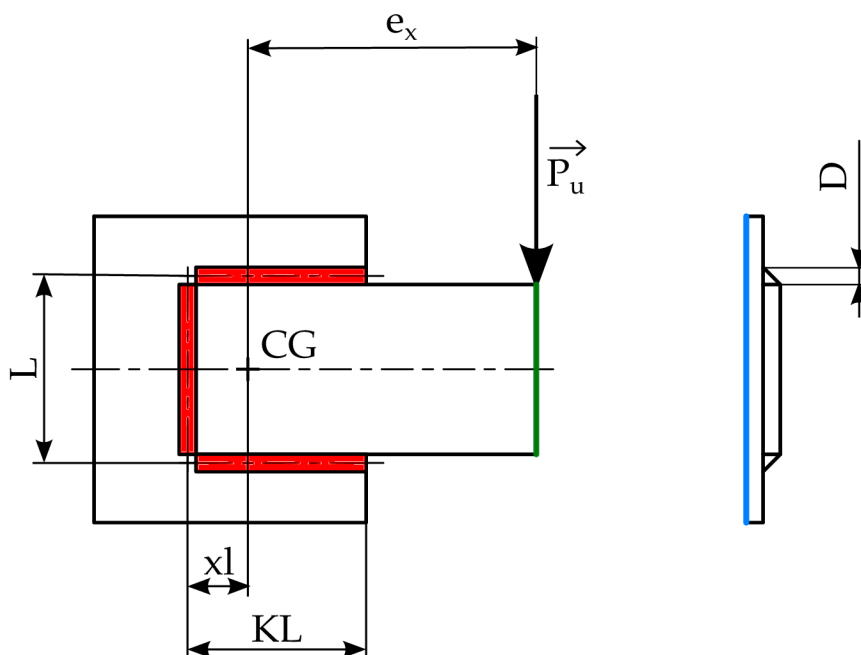
$$K \cdot L = 2 \Rightarrow K = 0,5 \quad a \quad e_x = a \cdot L = 8 \Rightarrow a = 2 \quad (4.1)$$

Z rov. 4.1 a z [52, str. 8-169] vyplývá:  $C = 0,616$

Potom maximální redukované přípustné zatížení na svarovou skupinu je dáno:

$$P_u = C \cdot C_1 \cdot D \cdot L = 0,616 \cdot 1 \cdot 6 \cdot 4 = 14,78 \text{ kip} \approx 65762 \text{ N} \quad (4.2)$$

### 4.3 Příklad 2 - C svar



Obr. 4.2: Zadání příkladu 2.

Zvolené parametry svařované součásti:

Popisek	Značení	Hodnota
Úhel zatížení svarové skupiny	$\theta$	$0^\circ$
Charakteristická délka skupiny svarů	L	4 in
Vzdálenost os svarů	KL	4 in
Vzdálenost zatížení od těžiště skupiny svarů	$e_x$	8 in
Velikost svaru	D	6/16 in

Ze zvolených rozměrů a daného úhlu zatížení součásti vyplývají dílčí koeficienty dle [52]:

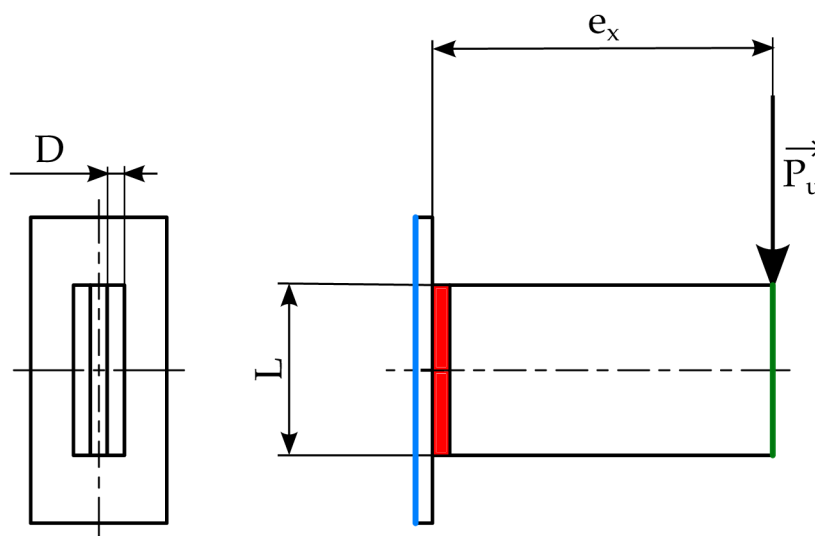
$$K \cdot L = 4 \Rightarrow K = 1 \quad a \quad e_x = a \cdot L = 8 \Rightarrow a = 2 \quad (4.3)$$

Z rov. 4.3 a z [52, str. 8-187] vyplývá:  $C = 1,23$

Potom maximální redukované přípustné zatížení na svarovou skupinu je dáno:

$$P_u = C \cdot C_1 \cdot L = 1,23 \cdot 1 \cdot 6 \cdot 4 = 29,52 \text{ kip} \approx 131312 \text{ N} \quad (4.4)$$

## 4.4 Příklad 3 - dva vertikální svary



Obr. 4.3: Zadání příkladu 3.

Zvolené parametry svařované součásti:

Popisek	Značení	Hodnota
Úhel zatížení svarové skupiny	$\theta$	$0^\circ$
Charakteristická délka skupiny svarů	L	4 in
Vzdálenost os svarů	KL	-
Vzdálenost zatížení od těžiště skupiny svarů	$e_x$	8 in
Velikost svaru	D	6/16 in

Ze zvolených rozměrů a daného úhlu zatížení součásti vyplývají dílčí koeficienty dle [52]:

$$K = 0 \quad a \quad e_x = a \cdot L = 8 \Rightarrow a = 2 \quad (4.5)$$

Z rov. 4.5 a z [52, str. 8-163] vyplývá:  $C = 0,491$

Potom maximální redukované přípustné zatížení na svarovou skupinu je dáno:

$$P_u = C \cdot C_1 \cdot L = 0,491 \cdot 1 \cdot 6 \cdot 4 = 11,78 \text{ kip} \approx 52418 \text{ N} \quad (4.6)$$

## 4.5 Výpočty příkladů dle ČSN

Zadání příkladů 1 až 3 bylo zvoleno tak, aby bylo možné spočtení, jak pomocí normy AISC, tak pomocí ČSN. Příklady byly spočítány pomocí normy ČSN EN 1993-1-8 složitější metodou uvažující směr zatížení svarové skupiny. Jednotlivé postupy výpočtu s ilustračními obrázky jsou uvedeny v přílohách kap. D, kap. E a kap. F. Výsledky jsou pro přehlednosti uvedeny v tab. 4.1, kde je jako referenční hodnota síla vypočtená pomocí normy AISC. Dle výsledků lze konstatovat, že výsledky jsou dosti odlišné.

Pro výpočet dle ČSN EN 1993-1-8 byl použit koeficient  $\gamma_{M2} = 1,25$  uváděný v normě a korelační součinitele  $\beta_w = 0,9$  pro srovnávací napětí v rov. 2.11.

Tab. 4.1: Porovnání norem.

Příklad	Maximální zatížení [N]		Rozdíl [%]
	AISC	ČSN	
1	65762	45067	-31,5 %
2	131312	86484	-34,1 %
3	52418	36513	-30,3 %

Výsledky získané normou ČSN jsou přibližně o třetinu nižší než hodnoty získané normou AISC. Tento rozdíl byl také pozorován v [28, str. 26]. V práci [18, str. 5] porovnávali potřebné velikosti svarů pro přenesení stejného zatížení. Výsledkem bylo, že průměrně dle normy ČSN je zapotřebí o 32,2 % větší svar než při výpočtu dle AISC. Hlavní důvod udělují skutečnosti, že v normě ČSN se uvažuje rozdílná únosnost svarového spoje zatížená longitudinálně a transversálně jako 1,22 ([37, str. 8],[18, str. 5]). Norma AISC uvažuje rozdílný podíl únosnosti, a to 1,5 (viz rešeršní část). Dle [48, str. 50] je hlavní rozdíl v tom, že AISC uvažuje různou únosnost svarového spoje v závislosti na směru zatížení a ČSN norma nikoli. Další rozdíl dle Šahinovy práce spočívá v určení ekvivalentního (redukovaného) napětí:

- AISC používá velikost vektoru složek napětí:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2},$$

- ČSN používá redukované napětí dle podmínky HMMH:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}.$$

Závěrem lze konstatovat, že při výpočtu dle AISC bude svarová skupina lépe využita. Při použití ČSN normy navíc vznikají úskalí, že je nutné rozlišovat jednotlivá napětí do daných složek. To by nejspíš nebylo možné nějakým způsobem automatizovat. Proto se jeví použití principu normy AISC jako nejvhodnější.

## 5 POSTUP VÝPOČTU

Bylo provedeno mnoho analýz ve snaze vytvořit takový numerický výpočtová model, aby výsledky byly porovnatelné s hodnotami z norem. Výpočty probíhaly v několika fázích, kdy se prováděly následující úpravy:

- úprava modelu materiálu (lineární a ideálně pružně plastický model materiálu),
- změna některých částí svaru na tuhá tělesa (byl desetinásobně zvýšen modul pružnosti daných těles),
- geometrie svaru byla dělená (jednotlivé segmenty se deformovaly individuálně) a kontinuální,
- modifikace velikosti konečně prvkových elementů,
- modifikace počtu segmentů (různé dělení svaru).

Jednotlivé varianty výpočtů byly porovnávány pomocí parametrů v tabulkách  $p_{red}$  a  $p_{dos}$ . Tyto vytvořené parametry mají následující význam:

$$p_{red} = \frac{F_{pr,R}}{F_{dos,R}}, \quad (5.1)$$

$$p_{dos} = \frac{F_{pr,R}}{F_{dos}}. \quad (5.2)$$

Tedy rov. 5.1 je poměr síly přípustné redukované ku síle dosažené redukované (síla získaná z výpočtu MKP a vynásobená faktorem odolnosti svaru). A rov. 5.2 je poměr síly přípustné redukované ku síle dosažené (síla přímo získaná z MKP výpočtu).

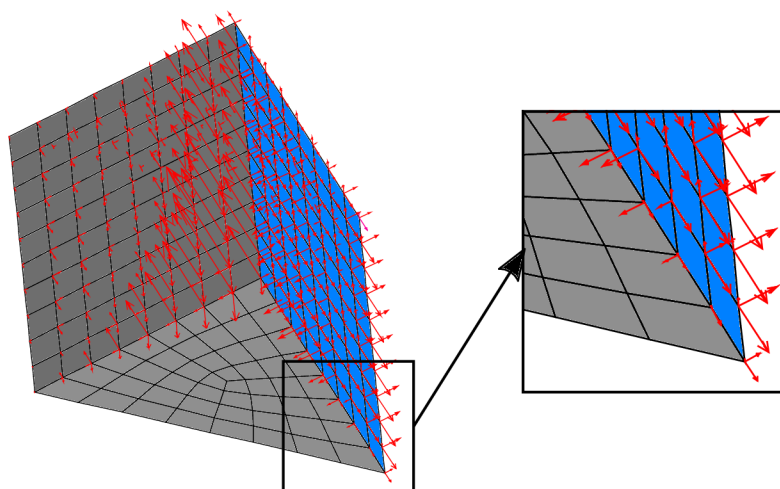
Tyto dva parametry nám tedy určují „bezpečnost“ daného segmentu. Určování vlivu těchto parametrů bylo provedeno tak, že z normy se určila síla, kterou by svarová skupina měla být schopna přenést. Touto silou ze zatížil výpočtový MKP model. Pokud by síla byl v daném kritickém segmentu získaná MKP výpočtem větší než přípustná síla na segment (parametr bude větší než 1), určí se potom menší vnější zatěžující síla – tedy výsledek bude konzervativnější. A to samé naopak, pokud se stanoví v segmentu menší síla než je přípustná (parametr bude menší než 1), tak vnější zatížení bude stanoveno jako větší oproti normě.

Jelikož se jedná o lineární výpočet je možné jednoduchou interpolací stanovit vnější přípustné zatížení tak, aby tyto parametry ( $p_{red}$  a  $p_{dos}$ ) dosahovaly hodnot 1.

### 5.1 Získávání sil ze segmentů

Pro stanovení síly, kterou přenáší jednotlivé segmenty bylo zapotřebí vytvořit rutinu, která z dané oblasti získávala síly. Síly byly získávány z jednotlivých segmentů z červené plochy dle obr. 4.1, obr. 4.2 a obr. 4.3. Tato plocha představuje odvěsnu svaru zatíženou smykem. Příklad segmentu svaru je na obr. 5.1, kde tato vyhodnocovaná plocha je obarvena modře a jednotlivé červené šipky představují síly vznikající v uzlech jednotlivých elementů náležících danému segmentu. Síly na vyhodnocované ploše byly sečteny a převedeny na výsledné složky síly působící

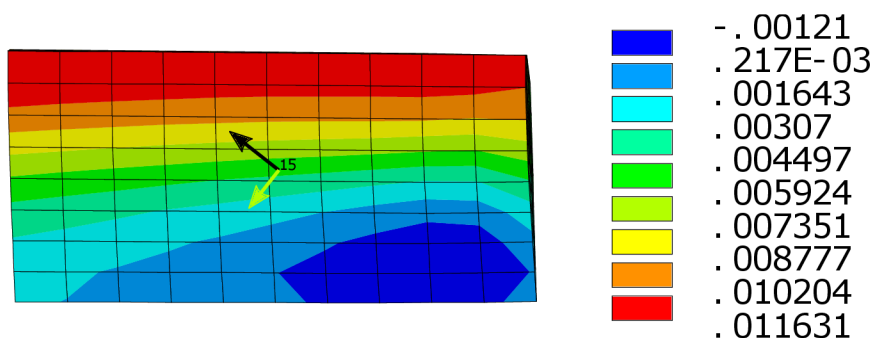
na daný segment  $(F_x, F_y \text{ a } F_z)$ . Prostřednictvím složek síly byl stanoven úhel, který svírá vektor síly s osou svaru, který je potřebný pro stanovení přípustné síly a deformace na segment.



Obr. 5.1: Příklad získávaných sil.

## 5.2 Získávání deformací ze segmentů

Po stanovení jednotlivých úhlů, které svírá výslednice síly působící na segment s osou svaru, bylo možné stanovit deformace segmentu. Bylo zapotřebí stanovit deformace ve směru zatěžování a proto v těžišti každého segment byl vytvořen nový souřadný systém, který byl natočen o příslušný úhel (ten který svírá vektor síly s osou svaru) a hodnoty deformací byly vykresleny v tomto novém souřadném systému. Na obr. 5.2 je vyobrazen kartézský souřadný systém č. 15, kde jeho červená osa představuje osu  $x$  v níž byly zjišťovány potřebné deformace.



Obr. 5.2: Příklad stanovení deformací na segmentu, legenda v [mm].

U Příkladu 1 byla provedena analýza s využitím kompletní geometrie (tedy i s objemem pod pásou, odlišně od obr. 6.4). Výsledky této analýzy byly neuspokojivé a vliv přítomnosti objemu pod pásou bude tedy v následujících

analýzách zanedbán. To ulehčí tvorbu konečně-prvkové sítě pro jednoduché modely a zároveň bude vhodné pro metodiku samotnou, že nebude potřeba zbytečně modifikovat geometrii. Výsledky této analýzy jsou v příloze v tab. A.1.

### 5.3 Lineární model materiálu a kompletní rovnice (KR)

První pokusy výpočtu proběhly s :

- lineárním materiálem pro všechna tělesa,
- dělenou a kontinuální geometrií svaru,
- modifikacemi velikosti elementů a počtu segmentů,
- vyhodnocení sil v rovině zatěžování (2D) a obecně v prostoru (3D).

Z těchto modelů byly získány síly a deformace vzniklé na jednotlivých segmentech. S využitím kompletní rovnice (zahrnující vliv různé pevnosti a tažnosti jednotlivých segmentů): rov. 2.32 v kombinaci s rov. 2.34 byly stanoveny přípustné síly na segmentech a pomocí rov. 2.30 přípustné deformace. Analýzou dosažených a přípustných sil a deformací pro různé varianty výpočtových modelů lze konstatovat následující výsledky.

- Zanedbatelný vliv děleného a kontinuálního svaru.
- Velikosti elementů a počtu segmentů má vliv na dosahované výsledky.
- Rozdíly sil získaných v rovině a prostoru jsou minimální.
- Hlavním poznatkem byly příliš malé dosažené deformace oproti deformacím přípustným. To bylo vysvětleno skutečností, že byl použit lineární model materiálu. Z obr. 6.3 je vidět, že skutečné chování materiálu vykazuje vysoká přetvoření, které lineární model materiálu nebyl schopen postihnout. Proto bylo navrženo použití ideálně pružně plastického modelu materiálu (IPPM).

### 5.4 Ideálně pružně plastický model materiálu a KR

S poznatky z předchozí sady simulací byla přepsána makra a modifikace byly následující:

- ideálně pružně plastický model materiálu,
- různá tuhost těles (základní materiál, pásovina nebo obě komponenty byly výrazně tužší než svar samotný),
- dělená a kontinuální geometrie svaru,
- modifikace velikosti elementů a počtu segmentů,
- vyhodnocení sil v rovině zatěžování a obecně v prostoru.

Přípustné síly a deformace byly stanoveny stejným způsobem jako v kap. 5.3. Zhodnocením výsledků pro různé výpočtové varianty modelů lze říct následující.

- Dosažené deformace jednotlivých segmentů jsou stále menší než deformace přípustné (i u kritického segmentu). Rozdíl již není v řádech, ale pouze v násobcích.
- Dosažené síly v kritických elementech korespondují s přípustnými silami.
- Provedená analýza vlivu počtu segmentů a velikosti elementů ukazuje mírný vliv na výsledky.

- Nevýhodou ideálně pružně plastického modelu materiálu je zatížení kritických segmentů jen do určité míry a následně jen dochází k přerozdělení zatížení mezi ostatní segmenty. Proto není možné porovnávat kritický segment, protože při různých velikostech vnějšího zatížení je kritický segment zatížen přibližně stejně. Tento fakt lze pozorovat na jednom z příkladů viz tab. B.6.
- Výsledky těchto analýz jsou zpracovány přehledně v tabulkách v příloze:
  - Dva horizontální svary: tab. A.7 až tab. A.12,
  - C svar: tab. B.4 až tab. B.6,
  - Dva vertikální svary: tab. C.4 a tab. C.5.
- Bylo konstatováno, že není potřeba využívat celou rovnici (rov. 2.32), protože deformační kompatibilita jednotlivých segmentů je již postihnuta prostřednictvím MKP (spojitostí sítě).

## 5.5 Lineární model materiálu a částečná rovnice (ČR)

Na základě výsledků z předchozích dvou sad analýz se přistoupilo k následujícím modifikacím numericky řešené úlohy:

- lineární materiál pro všechna tělesa,
- různá tuhost těles (základní materiál, pásovina nebo obě komponenty byly výrazně tužší než svar samotný),
- kontinuální geometrie svaru,
- modifikace velikosti elementů a počtu segmentů,
- vyhodnocení sil ve 2D a 3D.

Výsledkem této varianty úlohy lze shrnout do následujících bodů.

- Hodnoceny jsou pouze vznikající síly a přípustné síly. Deformace se po zkušnostech z první sady analýz již nehodnotí (deformace byly opět o řády nižší než přípustné deformace).
- Různá tuhost jednotlivých těles výrazně ovlivňovala výsledky. Jako nejvhodnější se ukázalo použití pásoviny (těleso, na které je přímo aplikováno zatížení) jako tuhého tělesa (desetkrát vyšší tuhost než ostatní tělesa).
- Velikost elementů a počet segmentů opět ovlivňuje výsledky. Proto byla provedena citlivostní analýza jejichž výsledek je příloze. Výsledkem je, že ideální velikost elementu je 2 mm.
- Výsledky jednotlivých příkladů jsou opět přiloženy do přílohy, kde jsou především výsledky vlivu různé tuhosti jednotlivých částí a počtu segmentů dělení svaru. U *1. příkladu* byla také provedena analýza vlivu velikosti sítě.
  - Dva horizontální svary: tab. A.2 až tab. A.6,
  - C svar: tab. B.1 až tab. B.3,
  - Dva vertikální svary: tab. C.1 a tab. C.3.



## 6 NUMERICKÝ PŘÍSTUP ŘEŠENÍ

### 6.1 Modifikace systému podstatných veličin

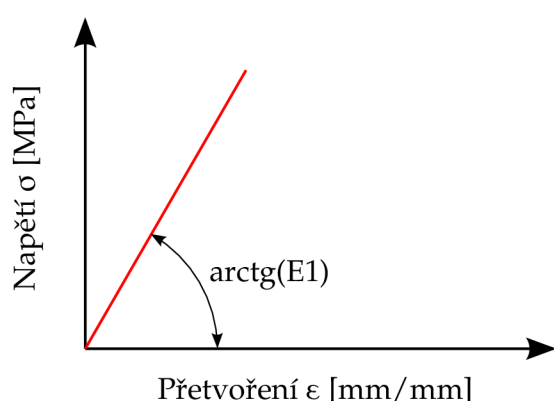
Stejně jako v kap. 4 je zapotřebí dodefinovat systém podstatných veličin stanovený v kap. 1.9. Opět jsou zde jen v bodech vypsané odlišující se a podstatné veličiny veličiny od globálního systému podstatných veličin.

- Možnost nastavit detailně materiálové vlastnosti svaru a základního materiálu pro model materiálu (model pružnosti a Poissonův poměr), neuvažují se tedy jen tuhá tělesa. Jednotlivými výpočty bylo ale stanoveno, že pro možnost porovnání musí být těleso, na které je aplikovaná síla (pásovina) tuhé. Druhé tělo (základní) je v podstatě také tuhé, protože je vetknuté a tato okrajová podmínka výrazně ovlivňuje jeho chování.
- Posouzení prostorové úlohy.
- Maximální přípustná síla a deformace je přejatá z metody okamžitého středu otáčení, tj. z experimentů,
- Posouzení svarové skupiny je vztaheno k pevnosti svarového materiálu (elektrody).
- Na rozdíl od metody okamžitého středu otáčení, svarová skupina nerotuje kolem jednoho bodu, to je možno pomocí MKP postihnout a určit reálnější síly vznikající v jednotlivých částech svaru pomocí z jejich složek se následně určí úhel, který tato síla svírá s osou segmentu svaru.
- Možnost hodnotit segmenty svaru jako diskrétní samostatné nebo jako kontinuální svar (jak je tomu v realitě). Pro porovnání bylo použito hodnocení kontinuálního svaru.
- Metoda je obecná, co do tvaru provedení svaru. Výsledky získané analytickým řešením mohou být v některých případech ovlivněny zkrácením svarů, protože uvažují svar i v rozích. V MKP rohy nebyly modelovány a je tak možné malé ovlivnění.
- Deformace segmentů jsou získávány z výpočtu s lineárním modelem materiálu, proto jsou přibližně o řád menší než přípustné deformace a nelze tuto podmínku hodnocení použít.
- Zbytková napětí jsou stejně jako v případě analytického vyhodnocování únosnosti zahrnuta (opět se vychází z experimentálních dat).

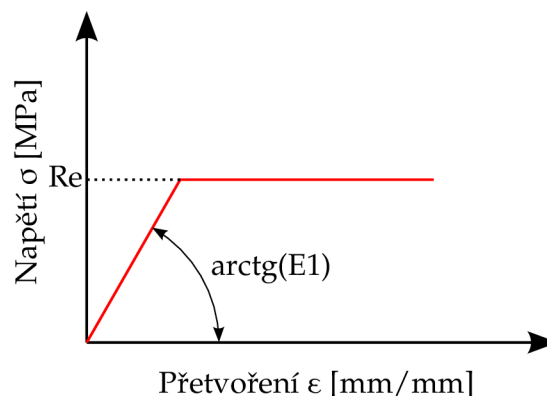
Řešení bylo provedeno v prostředí ANSYS APDL, kde byly vytvořeny parametrické modely. Hlavními vstupními parametry jsou rozměry svaru, počet segmentů a velikost konečně-prvkové sítě. Pro parametrickou studii byly podstatné pouze parametry ovlivňující počet segmentů a velikost elementů. Modely byly spouštěny pomocí dávkového souboru .bat pro rychlejší práci a snadné získávání výsledků, jelikož makra byla napsána tak, že výstupem byl textový soubor obsahující informace o dosažené a přípustné síle v jednotlivých segmentech, dosažené a přípustné deformaci v jednotlivých segmentech a úhel této síly svírající s osou svaru. Ve spouštěcím souboru bylo nastaveno kromě použité licence a počtu jader, na kterém se úloha bude řešit, také spouštěné makro a vstupní parametry (počet segmentů a v některých případech velikost elementů).

## 6.2 Model materiálu

Tyto výpočtové modely měly všechny stejný model materiálu dle obr. 6.1 a obr. 6.2. Kde modul pružnosti byl 210 000 MPa, Poissonův poměr  $\mu = 0,3$  a mez pevnosti stanovena dle pevnosti elektrody  $R_m = 480$  MPa (Pro ideálně pružně plastický model materiálu byla použita mez kluzu rovna mezi pevností elektrody, tj.  $R_e = R_m = 480$  MPa). Ideálně pružně-plastický materiál byl použit pouze pro modelovaný svar viz obr. 6.2, zbytek svarku (základní materiál a připojovaná pásovina) byl modelován pouze lineárním materiálem - viz obr. 6.1.



Obr. 6.1: Lineární materiál.



Obr. 6.2: Ideálně pružně-plastický materiál.

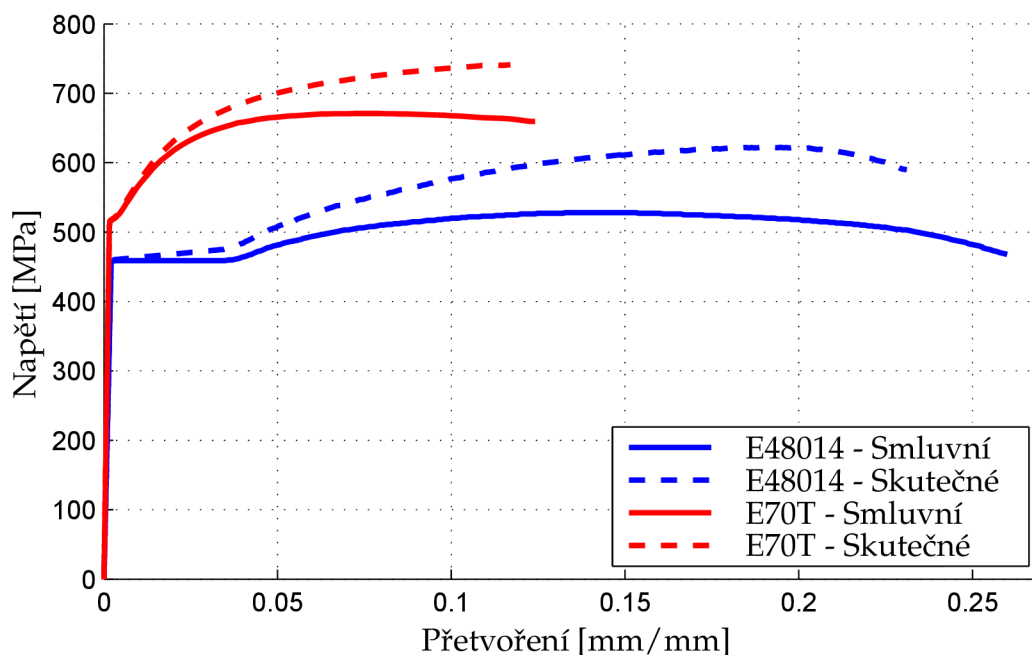
Ideálně pružně plastický materiál byl použit kvůli velmi plochému průběhu křivky tahové zkoušky na obr. 6.3. Normy uvažují materiál E70, ale při experimentech byl použit materiál E48014 (proto jsou zde pro porovnání uvedeny oba materiály).

## 6.3 Model geometrie

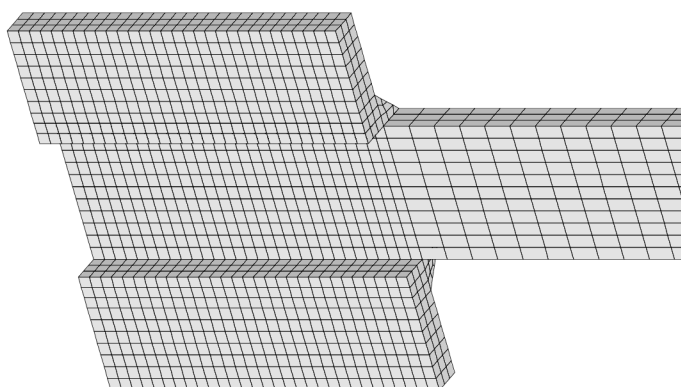
Geometrie svarové skupiny byla vytvořena dle zadání analytických příkladů (obr. 4.1 až obr. 4.3). Vzdálenost okraje základního materiálu a paty svaru byla volena 25 mm. Tloušťka jednotlivých součástí je totožná s velikostí svaru  $D$ .

## 6.4 Model diskretizace geometrie

Pro všechny modely byl použit stejný konečně-prvkový element SOLID185 (to je osmi-uzlový prostorový prvek). Pro zjednodušení tvorby sítě konečných prvků nebyla síťována celá geometrie. Oblast nacházející se pod přípojným materiálem (pásovina) nebyla vysíťována. Nastával problém, když bylo potřeba vytvořit nespojitou síť mezi základním tělesem a přípojným materiálem. Výslednou síť u jedné z geometrií lze vidět na obr. 6.4.



Obr. 6.3: Tahová zkouška svarových materiálů.

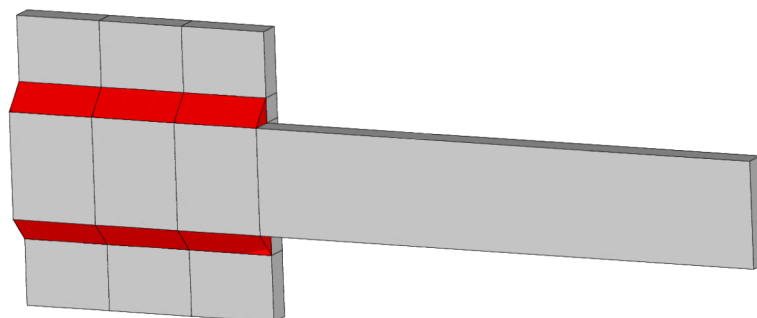


Obr. 6.4: Zadní pohled na síť konečných prvků součásti.

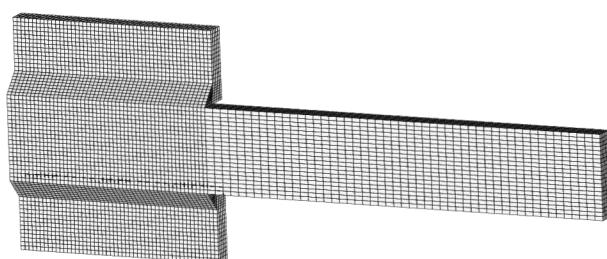
## 6.5 Model okrajových podmínek

Okrajové podmínky na jednotlivých modelech byly vytvořeny dle obr. 4.1, obr. 4.2 a obr. 4.3. Na těchto obrázcích jsou okrajové podmínky značeny zelenou a modrou barvou. Modrá barva představuje vetknutí na celé ploše základního tělesa a zelená barva představuje aplikované zatížení na konec připojované pásoviny. Zatížení bylo aplikováno do jednotlivých uzlů na konci pásoviny. Síla která se aplikovala na pásoviny (bylo zapotřebí sílu rozpočítat do jednotlivých uzlů), byla stejná jako bylo vypočteno analytickým řešením dle rov. 4.2 až rov. 4.6 pro korespondující modely geometrie. Byly aplikovány tyto síly, protože cílem bylo určit silovou odezvu v jednotlivých segmentech svaru a porovnat tyto odezvy s přípustnými silami, které v segmentech vznikají při maximálním zatížení.

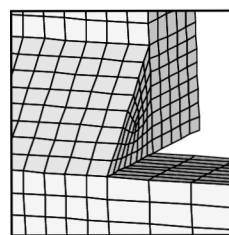
## 6.6 Příklad 1 - dva horizontální svary



Obr. 6.5: Dělení svaru na segmenty - 3 segmenty (obarveno červeně).



(a) Síť konečných prvků (velikost elementu 2 mm).



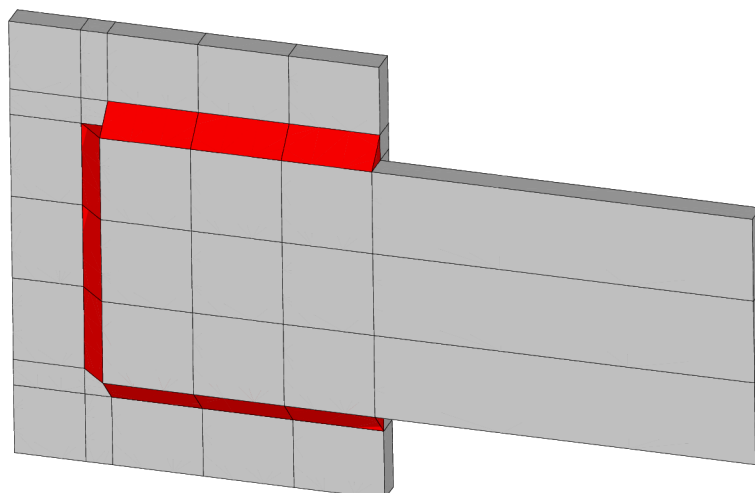
(b) Detail sítě konečných prvků.

Obr. 6.6: Síť konečných prvků.

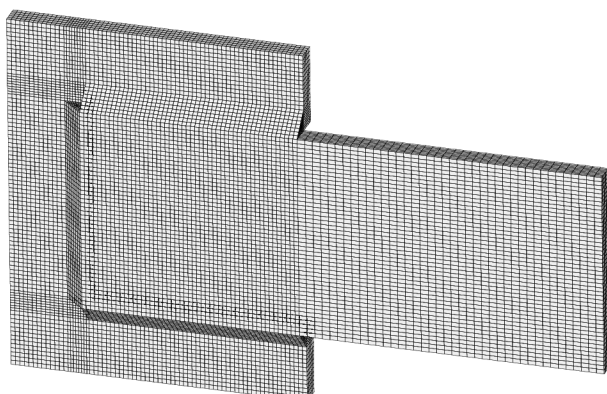
Tab. 6.1: Dva horizontální svary. Určí se o cca 30 % menší síla.

$F$ [N]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla [N]			$P_{red}$	$P_{dos}$
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{dpr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
65762	28208	21156	19911	44	0,94	0,71
80000	34315	25736	19911	44	0,77	0,58
60000	25736	19302	19911	44	1,03	0,77
40000	17178	12884	19911	44	1,55	1,16

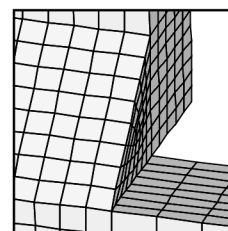
## 6.7 Příklad 2 - C svar



Obr. 6.7: Dělení svaru na segmenty - 3 segmenty (obarveno červeně).



(a) Síť konečných prvků (velikost elementu 2 mm).



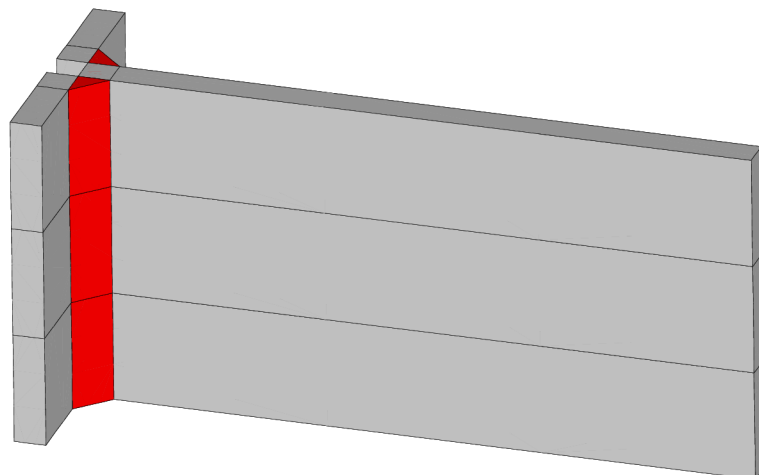
(b) Detail sítě konečných prvků.

Obr. 6.8: Síť konečných prvků.

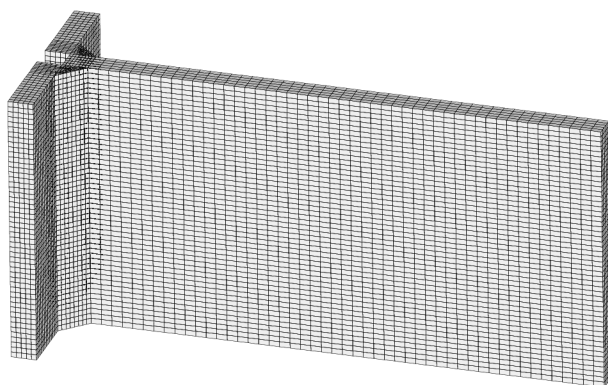
Tab. 6.2: Tři svary (C tvar). Určí se o cca 10% menší síla.

$F$ [N]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$	$p_{dos}$
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
131 312	18 492	13 869	16 752	32	1,21	0,91
140 000	19 715	14 786	16 752	32	1,13	0,85
120 000	16 899	12 674	16 752	32	1,32	0,99
110 000	15 490	11 618	16 752	32	1,44	1,08

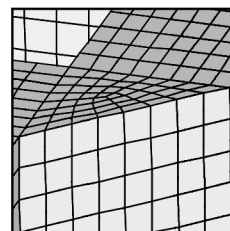
## 6.8 Příklad 3 - dva vertikální svary



Obr. 6.9: Dělení svaru na segmenty - 3 segmenty (obarveno červeně).



(a) Síť konečných prvků (velikost elementu 2 mm).



(b) Detail sítě konečných prvků.

Obr. 6.10: Síť konečných prvků.

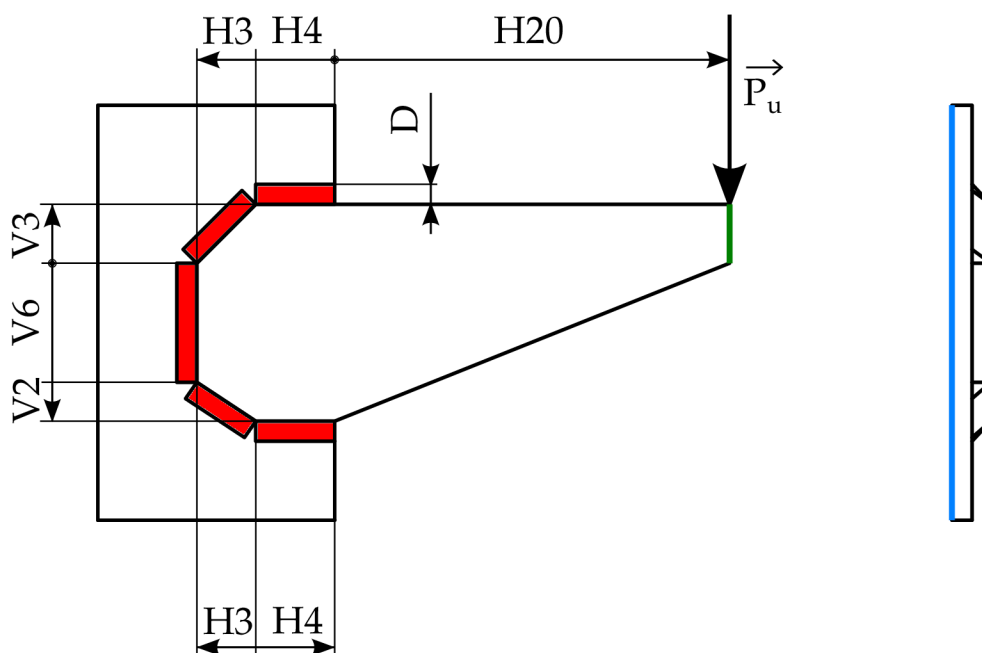
Tab. 6.3: Dva vertikální svary. Určí se o cca 15 % větší síla.

$F$ [N]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$	$p_{dos}$
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
52 418	19 358	14 519	22 165	89	1,53	1,15
70 000	25 851	19 388	22 165	89	1,33	0,86
60 000	22 158	16 619	22 165	89	1,60	1,00
50 000	18 465	13 849	22 165	89	1,60	1,20

## 6.9 Příklad 4 - obecný svar

Na základě výsledků analýz získaných v předešlých kapitolách byl navržen modelový příklad konzoly zatížené vertikální silou. Zvolené parametry svařované součásti dle obr. 6.11:

Popisek	Značení	Hodnota
Úhel zatížení svarové skupiny	$\theta$	$0^\circ$
Délka svaru	H3	3 in
Délka svaru	H4	4 in
Délka svaru	V2	2 in
Délka svaru	V3	3 in
Délka svaru	V6	6 in
Vzdálenost zatížení od základního materiálu	H20	20 in
Velikost svaru	D	6/16 in



Obr. 6.11: Zadání příkladu 4.

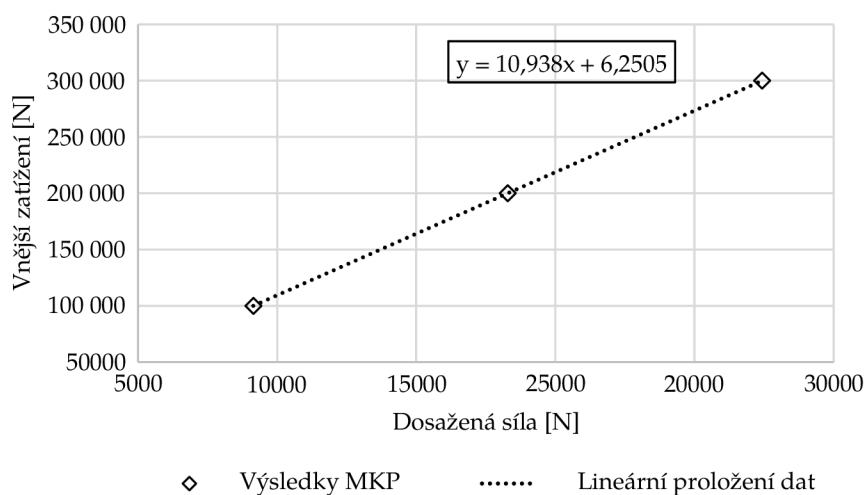
Model okrajových podmínek byl zadán dle obr. 6.11, kde modrá barva představuje vetknutí na celé ploše základního tělesa a zelená barva představuje aplikované zatížení na konec připojované pásoviny. Zatížení bylo aplikováno do jednotlivých uzlů na konci pásoviny. Aplikována byla síla 100 kN, 200 kN a 300 kN.

Velikost elementu byla v závislosti na poznacích z předchozích kapitol nastavena na 2 mm mapované a všechny svary byly rozděleny na 10 segmentů. Model materiálu byl nastaven dle předchozích tří úloh.

Tab. 6.4: Obecný svar - přípustné zatížení.

$F$ [N]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$	$p_{dos}$
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
100 000	9142	6857	16 330	21	2,38	1,79
200 000	18 285	13 714	16 330	21	1,19	0,89
300 000	27 427	20 570	16 330	21	0,79	0,60

Pomocí lineární interpolace je potom možné stanovit přípustné vnější zatížení jako  $F = 178\,624\text{N}$ . Pro vyhodnocení byl použit poměr dosažených sil  $p_{dos} = 1$ . Vnější zatížení bylo stanoveno pomocí rovnice uvedené na obr. 6.12. Graf byl vytvořen pro názornost, že velikost síly vzniklé na segmentu je přímo úměrná velikosti vnějšího zatížení s lineární závislostí.



Obr. 6.12: Graf závislosti velikosti zatížení na dosažené síle v kritickém segmentu.



## 7 ANALÝZA DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Na základě poznatků z kap. 5.5 bylo pro posouzení konstrukce stanoveno následující:

- použití lineárního modelu materiálu,
- těleso na které bude přímo aplikováno zatížení (označováno jako pásovina) má zvýšenou tuhost (desetinásobná tuhost než u zbylých těles),
- počet segmentů byl stanoven na  $N_S = 10$  a velikost elementů na  $L_E = 2$  mm,
- pro posouzení je použit pouze částečný tvar rovnice.

Po zavedení těchto nastavení úlohy je možné stanovit přípustné zatížení svařové skupiny pomocí MKP. Výsledky jednotlivých úloh jsou uvedeny v tab. 6.1, tab. 6.2 a tab. 6.3. Jelikož je použit lineární materiál pro stanovení únosnosti svařové skupiny, je zapotřebí provést pouze jeden výpočet, kterým zjistíme tři nejdůležitější veličiny:

- **dosaženou sílu**,
- **úhel** svírající působící síla s osou segmentu,
- ze získaného úhlu je potom možné stanovit **přípustnou sílu** v segmentu.

Následně je možné pomocí lineární interpolace určit pro danou přípustnou sílu odpovídající zatížení, které tuto přípustnou sílu vyvolá. V tab. 6.1, tab. 6.2 a tab. 6.3 jsou uvedeny výsledky pro různé zatěžující síly pro názornou ukázkou konstantního úhlu a tím pádem také konstantní přípustné síly kritického segmentu.

Maximální zatěžující síla určená pomocí MKP je potom pro jednotlivé příklady uvedena v tab. 7.1. V této tabulce jsou uvedeny hodnoty získané interpolované z MKP výpočtů ( $F_{MKP}$ ), hodnota spočtená pomocí normativních tabulek ( $F_{norm}$ ), dosažená síla v segmentu ( $F_{dos}$ ), redukovaná síla dosažená v segmentu ( $F_{dos,R}$ ) a hodnotící poměrem ( $p_{dos}$ ), tedy poměr síly dovolené ku dosažené. Jako srovnávací parametr je potom rozdíl, o kolik procent je MKP síla větší/menší než síla určená normami (značeno  $\Delta$ ).

Tab. 7.1: Výsledky dílčích úloh dle norem.

Př. č.	$F_{MKP}$ [N]	$F_{norm}$ [N]	$F_{dos}$ [N]	$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$p_{dos}$	$\Delta$ [%]
1	46 379	65 762	19 911	14 933	19 911	1,00	-29,5
2	118 961	131 312	16 752	12 546	16 752	1,00	-9,4
3	60 000	52 418	22 165	16 624	22 165	1,00	+14,5

Síly vzniklé v jednotlivých segmentech (získaných pomocí MKP) mající směr dle souřadného systému na obr. 5.2 neodpovídají směrům sil z analytického řešení. V analytickém řešení se kolmice na jednotlivé síly v segmentech protínají v jednom bodě – okamžitý střed otáčení (dle obr. 2.10). Naopak kolmice sil získané z MKP se v jednom bodě neprotínají. Neprotínají se v žádné kombinaci nastavení, které byly provedeny. To bude zapříčiněno deformovatelností svaru.

## 8 DISKUSE

Na základě rešeršní studie a znalostí nabitě během studia je možné několik přístupů jak hodnotit svarové spoje, a to:

- pružně,
- plasticky.

Pokud bude řeč o pružném hodnocení, jedná se o posouzení dle norem, doporučení a patří sem i přístup, kterým byly hodnoceny svary v této práci. Za použití lineárního modelu materiálu a přerozdělování sil za určitých podmínek lze interpolováním stanovit maximální přípustnou sílu.

Další možná varianta jak hodnotit svarové spoje zatěžované staticky by bylo na základě namáhání svaru a postupném přerozdělování zatížení do okolních částí svaru. Na toto téma vznikla v roce 2014 diplomová práce [27]. Tato diplomová práce pojednává o stejné metodice jako je uváděná v této práci, jen s tím rozdílem, že výpočet se řeší jako pružně plastický. Výpočty byly prováděny ve výpočtovém systému Abaqus explicitním řešičem plastických materiálů s nastavenými parametry porušení materiálu. Práce se především zabývá přizpůsobením výpočtového modelu tak, aby výsledky odpovídaly výsledkům experimentálního měření na vzorcích stejné geometrie. Podařilo se vytvořit odpovídající modely a provést na nich výpočty, které se shodují s experimentálními daty. Obecné vyhodnocení prostorového svaru ovšem provedeno nebylo. Výsledkem těchto simulací byla křivka závislosti zatížení na deformaci a tedy místo kdy došlo k prvnímu porušení svaru v libovolném místě. Bylo tedy možné stanovit maximální přípustnou sílu. Je nutné podotknout, že i když se jednalo jen o jednoduché úlohy (přeplátované plechy zavařené pod různými úhly - jako na obr. 2.9) bylo velice složité nastavit materiálové parametry a kritéria porušení tak, aby byly dosahovány výsledky jako při experimentu. Samotné řešení trvalo několik hodin. Ukázalo se tedy, že využití přerozdělování napětí není vhodná cesta řešení únosnosti svarových spojů.

Obdoba řešení přerozdělování napětí bylo také řešeno v této práci. Byla snaha zjistit vliv materiálu na velikost zplastizované oblasti a stanovit přibližné místo porušení svaru (úhel, pod kterým by došlo k porušení). Toto řešení je uvedeno v kap. G. Výsledky v příloze (obr. G.4 až obr. G.6) ukazují v jakých místech by docházelo k porušení svaru. Tyto výsledky jsou ve shodě s literaturou, kde stejnou problematiku popisují ([37, str. 109], [49], atd.).

Tato práce se především zabývá pružným řešením, které využívá metodu Okamžitého středu otáčení. Globální systém podstatných veličin, který byl definován v úvodu, byl při jednotlivých výpočtech detailněji specifikován. Obecně se dá říct, že hlavní odklon od reality v jednotlivých přístupech je nereálná tuhost jednotlivých těles. To je způsobeno předpoklady analytického výpočtu, který byl proveden na úrovni statiky (spojovaná tělesa jsou tuhá). Proto ve výpočtech provedených v této práci má pásovina desetinásobnou tuhost oproti svaru a základní materiál je ovlivněn okrajovou podmínkou, obě tělesa se tedy chovají jako tuhá. V normách se samostatně hodnotí svar a okolí. To by bylo potřeba v budoucím hodnocení dále řešit a tím vylepšit tuto metodu. Naopak výhodou metodiky dle AISC je, že zahrnuje vnitřní napětí a variabilitu svarového spoje.

Nakonec je vhodné podotknout, že metoda Okamžitého středu otáčení používaná v normě AISC a AWS má velmi dobře propracované zázemí. Tím jsou myšleny odkazy na jednotlivé články a experimentální data z kterých jednotlivé úvahy vychází. Toto zázemí v českých normách není, zde jsou uvedeny pouze vzorce a krátký popis veličin v nich vystupujících.

## 9 ZÁVĚR

Tato práce byla pojata jako metodologie o přístupech hodnocení svarových spojů. Práce se zabývá tematikou svarových spojů s hlavním zaměřením na svarové spoje zatěžované staticky (hranice statického a dynamického zatěžování je uvedena v kap. 2.1).

V první části se práce zaměřuje na vytvoření systému podstatných veličin, tedy veličin, které mohou mít vliv na únosnost svaru. V návaznosti na tomto seznamu byly některé významné činitele podrobněji rozebrány a určeny jejich vlivy na svar samotný a jeho okolí.

V druhé části byla vypracována rešeršní studie shrnující možnosti hodnocení svařovaných konstrukcí. Byl proveden rozbor jak národních standardů (českých a amerických), tak mezinárodních doporučení celosvětově uznávaných.

V návaznosti na provedenou rešerši byla vybrána vhodná metoda. Z rešeršní práce vzešla jako nejvhodnější metoda hodnocení dle normy AISC (AWS). Později se ukázalo, že česká norma ČSN EN 1993-1-8 (tedy Eurokód 3) je obdobou normy americké (obě jistým způsobem zahrnují vliv směru zatěžování, jen se liší v posuzovaných napětích a způsobu získávání dílčích hodnot z jednotlivých svarů svarových skupin). Metoda Okamžitého středu otáčení používaná v normě AISC byla implementována do programu ANSYS, kde bylo v klasickém (APDL) prostředí vytvořeno makro pro hodnocení svarových skupin. Makro bylo vytvořeno tak, aby bylo možné hodnotit takové svarové skupiny, které bylo možné spočítat i normativními výpočty. Makro bylo definováno jako parametrické tak, aby se dalo jednoduchým způsobem provést parametrickou studii. Celkem bylo vytvořeno 8 maker (dvě pro každý příklad, kde jedno tvořilo geometrii a získávalo z modelu síly a druhé tyto data zpracovávalo) v rozsahu 300 až 700 řádků.

Hodnoty maximálních přípustných sil, které svarová skupina dokáže přenést, stanovené pomocí MKP a analytickými výpočty (dle AISC i ČSN) byly vyhodnoceny a porovnány. Na základě srovnávací analýzy byla určena dobrá shoda výsledků získaných pomocí MKP a s hodnotami získaných z normami.

- Pro příklad 1 byla určena síla o 30 % menší síla vůči normám. Výsledky jsou tedy konzervativní.
- Hodnota síly pro příklad 2 byla určena o 10 % menší sílu vůči normám.
- Pro poslední speciální případ spojení - příklad 3 byla stanovena síla o 15 % větší vůči normám.

Uváděné výsledky jsou za předpokladu použití tuhých těles. Při použití poddajných těles vznikaly extrémní hodnoty v krajních segmentech. Pokud by tedy byla použita poddajná tělesa byly by určeny řádově nižší přípustné hodnoty zatížení (svařenec by byl poddimenzovaný).

V závislosti na poznatcích z těchto výpočtů byl vytvořen jeden nestandardní příklad, na který byl aplikován vytvořený postup hodnocení. Výsledkem výpočtu byla maximální přípustná síla, kterou svarová skupina dokáže přenést.

Byl použit induktivní přístup hodnocení. Předpokládá se, že jelikož se tři vybrané vzorky téměř shodují s hodnotami určenými normami, bude stejný přístup platit obecně. Na základě této úvahy byl vyhodnocen obecný (normou nedefinovaný) svarový spoj. Proto by bylo zapotřebí provést experimentální měření. Toto

měření by mělo být zaměřeno na stanovení maximální přípustné síly, kterou navržený svarový spoj přenese. Bylo by vhodné, kdyby bylo provedeno větší množství měření z důvodu velké variability testovaných vzorků (není možné vytvořit identické vzorky s výkresovou dokumentací). Následně by bylo zapotřebí statistické vyhodnocení získaných dat.

Z práce tedy vyplývají následující doporučení pro hodnocení svarových spojů:

## Cyklické zatížení

Obecně pro tento způsob zatížení je nejvhodnější postupovat dle podkap. 2.1.6. Nejobecnější metodika je na základě vrubových napětí. Výhodou je, že využívá pouze jednu únavovou křivku a je možné pomocí ní modelovat obecnou geometrii. Nevýhodou je ovšem větší náročnost na přípravu modelu a výpočtový počítačový čas.

## Statické zatížení

Jelikož posouzení staticky zatížených svarových spojů je hlavní náplní této práce, lze vyvodit následující doporučení.

- Pro jednoduché svary (obr. 2.23) je možné použít metody uváděné ve všech normách.
- Pro složité svarové skupiny již není možné použít běžný způsob a je zapotřebí odlišného přístupu. Tento přístup je vypracován americké normě AWS a AISC (také v ČSN, ale komplikovaně), které jsou založeny na experimentálních datech a pracují s odlišnou únosností svarů dle úhlu zatížení svaru. Metodika tohoto způsobu hodnocení byla rozvedena a implementována do MKP a následně srovnána.
- Ukázalo se, že pro zvolené případy svarových skupin vybraných z norem je možné porovnání s MKP.
- Lze konstatovat, že by bylo možné touto převzatou metodou z americké normy hodnotit složitější svarové skupiny. Je ovšem zapotřebí dodržet jistá pravidla, která jsou uvedena v kap. 5.3.
  - Je zapotřebí použít tuhá tělesa a pouze svarová skupina bude mít reálný model materiálu. Při použití poddajných těles by výpočet nebyl srovnatelný s normou a získané hodnoty by byly chybné.
  - Doporučené dělení svaru na segmenty je 10 dílků.
  - Nejvhodnější velikost elementů je 2 mm při použití lineárních prvků (kvadratické nebyly používány).

Velkou výhodou MKP řešení oproti analytickému řešení, které se neprovádí (používají se tabelované hodnoty) je rychlost a variabilita řešení. Je možné namodelovat jakýkoli rovinný svar a ten následně posoudit.

## Doporučení pro další práci

Pro obecně prostorový svar by bylo potřeba nových zkušebních vzorků a provést obdobnou studii jako v [37]. V návaznosti na nově vytvořené vzorky by z analýzy výsledků bylo zapotřebí stanovit přístup, jakým by se stanovovaly úhly, pod jakými působí síla na daný segment. Z těchto úhlu by bylo zapotřebí stanovit kritérium maximální síly na úhlu zatížení, tedy plochu porušení (obdobu křivek dle obr. 2.8). Potom by bylo možné hodnotit libovolně prostorový svar.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] AKHLAGHI, FARSHID Z. *Fatigue life assessment of welded bridge details using structural hot spot stress method: A numerical and experimental case study*. Göteborg, Sweden, 2009. Diplomová práce. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- [2] *Analytical strength assessment of components in mechanical engineering*. 5th rev. ed. Překlad E Haibach. Frankfurt am Main: VDMA Verlag, 2003, 267 s . ISBN 38-163-0425-7.
- [3] ANSI/AISC 360-10. *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [4] AYGÜL, MUSTAFA. *Fatigue Analysis of Welded Structures Using the Finite Element Method*. Gothenburg, Sweden, 2012. ISSN 1652-9146. Diplomová práce. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- [5] BLONDEAU, Régis. *Metallurgy and mechanics of welding: processes and industrial applications*. Hoboken, NJ: John Wiley, c2008, xvi, 496 p. ISBN 18-482-1038-8.
- [6] BRANDT, G. DONALD. A General Solution for Eccentric Loads on Weld Groups. *Engineering journal (AISC)*. Chicago, etc.: American Institute of Steel Construction, 1982.
- [7] C. H. Norris, *Photoelastic Investigation of Stress Distribution in Transverse Fillet Welds*, *Welding J.*, vol. 24, 1945, p. 557s
- [8] ČSN 05 0000. *Zváranie. Zváranie kovov. Základné pojmy*. 1988.
- [9] ČSN 05 0120. *Výpočet svarových spojů strojních konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 1972.
- [10] ČSN 27 7008. *Navrhování ocelových konstrukcí rypadel, nakladačů a zakladačů*. Praha: Český normalizační institut, 2007. NEPLATNÁ
- [11] ČSN EN 1993-1-6. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí*. Frýdek-Místek: Český normalizační institut, 2008.
- [12] ČSN EN 1993-1-8. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčníků*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [13] ČSN EN 1993-1-9. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí: Část 1-9: Únava*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [14] D1.1/D1.1M:2010. *STRUCTURAL WELDING CODE-STEEL*. Miami, Florida: American Welding Society, 2010.

- [15] DNV-RP-C203. *FATIGUE DESIGN OF OFFSHORE STEEL STRUCTURES*. Høvik, Norway: Det Norske Veritas, 2010. Dostupné z: <http://www.dnvgl.com/>
- [16] FRICKE, Wolfgang. *Fatigue analysis of welded joints: state of development*, Marine Structures, Volume 16, Issue 3, May 2003, Strany 185-200, ISSN 0951-8339, Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/>
- [17] FRICKE, Wolfgang. *IIW recommendations for the fatigue assessment of welded structures by notch stress analysis: IIW-2006-09*. Oxford: Woodhead, 2012. ISBN 978-0-85709-855-6.
- [18] GRESNIGT, A. M. Design rules for fillet welds in Eurocode 3 and AISC. In: *Eurosteel 2014: 7th European Conference on Steel and Composite Structures*. Napoli, Italy: ECCS, 2014, s . 8. ISBN 978-92-9147-121-8. Dostupné z: <http://repository.tudelft.nl/>
- [19] HEYES, Peter a Jeff MENTLEY. HBM nCode. *Fatigue Analysis of Seam Welded Structures using nCode DesignLife*. Rotherham, 2013. Dostupné z: <http://www.ncode.com/>
- [20] HOBACHER, A., *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components: International Institute of Welding [doc. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07]*. Paris, France: International Institute of Welding, 2008.
- [21] HOBACHER, A. The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components – A comprehensive code recently updated. *International Journal of Fatigue*. 2009, vol. 31, issue 1, s . 50-58. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2008.04.002.
- [22] (IIW), Commissions XIII and XV of the Inte a Edited by Erkki NIEMI. *Stress determination for fatigue analysis of welded components: IIS/IIW-1221-93 (ex doc XIII-1458-92, XV-797-92)*. Cambridge, England: Abington Pub, 1995. ISBN 18-557-3213-0.
- [23] JANÍČEK, Přemysl. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: hledání souvislostí*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-555-61.
- [24] KADLEC, Martin. EVEKTOR, spol. s r.o. *Směrnice FKM: FAD/11/002*. Kuno-vice, 2011.
- [25] Kam Deng, Grondin Y. Gilbert, Robert G. Driver, *Effect of Loading Angle on the Behavior of Fillet Welds*. Edmonton, Alberta: Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, 2003.
- [26] KARMAZÍNOVÁ, Marcela. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *PRVKY KOVOVÝCH KONSTRUKCÍ: MODUL BO02-M02 (SPOJE KOVOVÝCH KONSTRUKCÍ)* [online]. 2005 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://lences.cz/>



- [27] KEITH A., Adkins. *A Model for Prediction of Fracture Initiation in Finite Element Analyses of Welded Steel Connections*. Cincinnati OH, USA, 2014. Diplomová práce. University of Cincinnati.
- [28] KHURSHID, Mansoor a Noman Ali MUMTAZ. *STATIC AND FATIGUE DESIGN OF LOAD CARRYING WELDED JOINTS IN HIGH STRENGTH STEELS*. Stockholm, Sweden, 2011. Diplomová práce. Royal Institute of Technology.
- [29] KOVAŘÍK, Rudolf. *Technologie svařování. 2. vyd.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 185 s . ISBN 80-708-2697-5.
- [30] KUČERA, Jan. *Teorie svařování - část 2*. Ostrava: VŠB, 1994, 207-402 s .
- [31] LESIK, Dale F a D KENNEDY. *Ultimate strength of eccentrically loaded fillet welded connections*. Edmonton, Alta.: Dept. of Civil Engineering, University of Alberta, 1988. ix, 77 p. Structural engineering report, no. 159. Structural Engineering Report. University of Alberta.
- [32] LESIK, Dale F. a D. J. Laurie KENNEDY. Ultimate strength of fillet welded connections loaded in plane. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1990, vol. 17, issue 1, s . 55-67. DOI: 10.1139/190-008.
- [33] MADDOX, S. *Fatigue strength of welded structures*. 2nd ed. Cambridge, England: Abington Pub., 1991, x, 198 p. ISBN 18-557-3013-8.
- [34] American Institute of Steel Construction. *Manual of steel construction: load and resistance factor design*. 2nd ed. Chicago: AISC, 1994. ISBN 15-642-4042-8.
- [35] MARTINSSON, Johan. *Fatigue Assessment of Complex Welded Steel Structures*. Stockholm, 2005. ISBN 91-2783-968-6; TRITA-AVE 2005:02. Doktorská práce. Royal Institute of Technology, Department Aeronautical and Vehicle Engineering, Division of Lightweight Structures.
- [36] MESSLER, Robert W. *Joining of materials and structures: from pragmatic process to enabling technology*. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004, xxiv, 790 s . ISBN 07-506-7757-0.
- [37] MIAZGA, Gregory S. a D. J. Laurie KENNEDY. *Behaviour of fillet welds as a function of the angle of loading*. Edmonton, 1986. ISBN 10.1139/189-089. Report. University of Alberta.
- [38] MIAZGA, Gregory S. a D. J. Laurie KENNEDY. Behaviour of fillet welds as a function of the angle of loading. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1989, vol. 16, issue 4, s . 583-599. DOI: 10.1139/189-089.
- [39] Svarové spoje. *MITCalc - Strojírenské, průmyslové a technické výpočty*. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.mitcalc.com/>
- [40] NG, Kit Fu, Robert G DRIVER a Gilbert Y GRONDIN. *Behaviour of transverse fillet welds*. Edmonton, Alberta: Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, 2002.

- [41] NORDIC INNOVATION CENTRE. *Integrated Design and Manufacturing of Welded Structures*. OSLO, Norway, 2007.
- [42] NORRISH, John. *Advanced welding processes: technologies and process control*. [Nouv. éd.]. Cambridge: Woodhead Publ, 2006. ISBN 978-184-5691-301.
- [43] PARK, W a C MIKI. Fatigue assessment of large-size welded joints based on the effective notch stress approach. *International Journal of Fatigue*. 2008, vol. 30, issue 9, s . 1556-1568. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.11.012. Dostupné z: <http://www.elsevier.com/>
- [44] PILGR, Milan. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Cvičení PRVKY KOVOVÝCH KONSTRUKCÍ: MODUL BO02-M02*. Brno, 2007. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/>
- [45] POUTIAINEN, I. Finite element methods for structural hot spot stress determination a comparison of procedures. *International Journal of Fatigue*. 2004, vol. 26, issue 11, s . 1147-1157. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2004.04.003. Dostupné z: <http://www.elsevier.com/>
- [46] RADAJ, Dieter. *Design and analysis of fatigue resistant welded structures*. Cambridge: Abington, 1990. ISBN 18-557-3004-9.
- [47] RIEGER, Miloš. VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *OCELOVÉ KONSTRUKCE*. Ostrava, 2009. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/>
- [48] ŞAHIN, SERKAN. *A COMPARATIVE STUDY OF AISC-360 AND EUROCODE 3 STRENGTH LIMIT STATES*. Ankara, 2009. Diplomová práce. Middle East Technical University.
- [49] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s . ISBN 978-80-214-2629-0.
- [50] SCHIJVE, Jaap. Fatigue predictions of welded joints and the effective notch stress concept. *International Journal of Fatigue*. 2012, vol. 45, č. 1, s . 31-38. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.06.016. Dostupné z: <http://www.elsevier.com/>
- [51] SINGH, By Ramesh. *Applied welding engineering: processes, codes, and standards*. 1st ed. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-012-3919-168.
- [52] *Steel construction manual*. 13th ed. Chicago, Ill.: American Institute of Steel Construction, c2005, 1 v . (various pagings). ISBN 15-642-4055-X.
- [53] TIDE, R. H. R. Eccentrically Loaded Weld Groups: AISC Design tables. *AISC Engineering Journal*. 1980, roč. 17, (4).
- [54] WEMAN, Klas. *Welding processes handbook*. 1st ed. Boca Raton: Woodhead, 2003, vii, 193 s . ISBN 18-557-3689-6.

- [55] KANVINDE, Ivan Gomez Amit a Yu Kay Kwan Gilbert GRONDIN. *Strength and Ductility of Welded Joints Subjected to Out-of-Plane Bending: Final Report Presented to American Institute of Steel Construction*. Alberta, 2008. Dostupné z: <http://www.aisc.org/>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

## Zkratky

2D	Vyhodnocování výsledků v rovině zatěžování
3D	Vyhodnocování výsledků obecně v prostoru
CG	Těžiště svarové skupiny
IPPM	Ideálně pružně plastický model materiálu
KR	Kompletní rovnice pro určení přípustné síly (rov. 2.32)
LVDT	Linear variable differential transformer - elektrický transformátor sloužící pro měření lineárních posuvů
MKP	Metoda konečných prvků
ČR	Částečná rovnice pro určení přípustné síly (rov. 2.36)

## Řecké symboly

$\Delta$	O kolik procent je MKP síla větší/menší než síla určená normami	%
$\alpha$	Převodní součinitel	–
$\alpha_R$	Koeficient porušení - numerická konstanta	–
$\alpha_{\perp}; \alpha_{\tau}$	Převodní součinitel závislý na způsobu zatěžování	–
$\beta$	Poměr průměrné skutečné únosnosti svaru a přípustné únosnosti svaru svaru spočítanou analyticky	–
$\beta$	Součinitel tloušťky koutového svaru	–
$\beta_w$	Korelační součinitel dle použitého materiálu	–
$\Delta\sigma; \Delta\tau$	Rozkmit napětí	MPa
$\Delta\sigma_C; \Delta\tau_C$	Referenční únavová pevnost pro 2 miliony cyklů	MPa
$\Delta\sigma_E; \Delta\tau_E$	Ekvivalentní konstantní rozkmit napětí	MPa
$\Delta\sigma_{E,2}; \Delta\tau_{E,2}$	Ekvivalentní konstantní rozkmit napětí pro 2 miliony cyklů	MPa
$\Delta_f$	Deformace svaru při porušení svaru	mm
$\Delta_u$	Deformace svaru při maximálním zatížení svaru	mm
$\gamma_{Ff}$	Dílčí součinitel spolehlivosti pro ekvivalentní konstantní rozkmit napětí	MPa

$\gamma_{M2}$	Dílčí součinitel spolehlivosti únosnosti svarových spojů	–
$\gamma_{Mf}$	Dílčí součinitel spolehlivosti únavové pevnosti	MPa
$\mu$	Poissonův poměr	–
$\phi$	Faktor odolnosti svaru (resistance factor)	–
$\rho$	Bezrozměrný poměr deformací	–
$\rho_R$	Index spolehlivosti	–
$\sigma_b$	Ohybové napětí	MPa
$\sigma_m$	Membránové napětí	MPa
$\sigma_{\perp}$	Normálové napětí kolmé na směr svaru	MPa
$\sigma_{AD}; \tau_{AD}$	Přípustné napětí při dynamickém namáhání	MPa
$\sigma_{as}; \tau_{as}$	Srovnávací amplituda napětí cyklu ve svaru nebo v základním materiálu pro kombinované namáhání	MPa
$\sigma_a; \tau_a$	Amplituda napětí cyklu ve svaru nebo v základním materiálu	MPa
$\sigma_A^x; \tau_A^x$	Mez únavy svaru nebo základního materiálu pro dané střední napětí	MPa
$\sigma_C^x; \tau_C^x$	Mez únavy svaru nebo základního materiálu při střídaném souměrném namáhání	MPa
$\sigma_{Dsv}$	Přípustné napětí svaru v tahu	MPa
$\sigma_D$	Přípustné napětí základního materiálu	MPa
$\sigma_e$	Ekvivalentní (redukované) napětí složek napětí ve svaru	MPa
$\sigma_{hs}$	Extrapolované napětí	MPa
$\sigma_h; \tau_h$	Horní napětí cyklu ve svaru nebo v základním materiálu	MPa
$\sigma_{Kt}$	Mez kluzu základního materiálu	MPa
$\sigma_m; \tau_m$	Střední napětí cyklu ve svaru nebo v základním materiálu	MPa
$\sigma_{nl}$	Špičkové napětí	MPa
$\sigma_s; \tau_s$	Srovnávací napětí	MPa
$\sigma_{wf}$	Normálové napětí ve směru kolmém k ose svaru	MPa
$\tau_{Dsv}$	Přípustné napětí svaru ve smyku	MPa
$\tau_{wf}$	Normálové napětí ve směru rovnoběžném s osou svaru	MPa

$\theta$	Úhel svírající osa svaru zatěžující síla segmentu svaru	°
$f_y$	Jmenovitá mez kluzu v tahu	MPa
$V_R$	Koeficient variace	–
<b>Latinské symboly</b>		
$F_{MKP}$	Síla získaná pomocí MKP výpočtu	N
$F_{norm}$	Síla získaná z norem	N
$n$	Součinitel bezpečnosti	–
$C$	Dílčí koeficient zahrnující geometrii a úhel zatížení svařové skupiny	–
$C_1$	Dílčí koeficient typu použité elektrody	–
$C_f$	Koeficient zahrnující geometrii a provedení svaru	–
$D$	Velikost svaru	mm
$d; z$	Tloušťka svaru	mm
$E; E_1$	Modul pružnosti	MPa
$E_2$	Tečný modul pružnosti	MPa
$e_x$	Vzdálenost působící síly od těžiště svařové skupiny	mm
$F$	Aplikované zatížení na svařovanou součást	N
$f(\rho)$	Deformační kompatibilita svaru (závislost deformace na úhlu zatížení svaru)	–
$f_u$	Jmenovitá mez pevnosti nejslabší spojované součásti v tahu	MPa
$F_v$	Minimální mez pevnosti elektrody	MPa
$F_v$	Přípustné jednotkové napětí	MPa
$F_{dos,R}$	Síla zjištěná výpočtem MKP vynásobená faktorem odolnosti (0,75)	N
$F_{dos}$	Síla zjištěná výpočtem MKP	N
$F_{pr,R}$	Přípustná síla v segmentu svaru v závislosti na úhlu zatížení vůči ose svaru, zahrnuje faktor odolnosti	N
$F_{SR}$	Srovnávací napětí	MPa
$F_{TH}$	Prahová hodnota rozkmitu napětí únavy pro nekonečnou životnost	MPa

$F_{w,Ed}$	Návrhová hodnota síly působící na jednotku délky svaru	N
$F_{w,Rd}$	Návrhová únosnost svaru na jednotku délky svaru	N
$L$	Charakteristický rozměr svarové skupiny	mm
$l$	Délka svaru	mm
$L_E$	Velikost (délka) elementu	mm
$L_S$	Velikost (délka) segmentu	mm
$m; C$	Konstanty S-N křivek pro Paris-Erdoganovu rovnici	–
$N$	Počet cyklů návrhové životnosti	–
$N_S$	Počet segmentů, na které je svar rozdělen	–
$P$	Vnější zatížení svarové skupiny	N
$P_0$	Pevnost podélně zatíženého svaru	N
$P_\theta$	Pevnost svaru zatíženého vůči ose svaru pod úhlem $\theta$	N
$p_{dos}$	Poměr přípustné a dosažené síly – bezpečnost bez faktoru odolnosti	–
$p_{red}$	Poměr redukované přípustné a dosažené síly – bezpečnost s faktorem odolnosti	–
$P_u$	Maximální zatížení svaru	N
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	MPa
$R_p$	Mez kluzu v tahu	MPa
$R_{FIL}$	Redukční součinitel pro příčné koutové svary	–
$R_{PJP}$	Redukční součinitel pro částečně provařené svarové spoje	–
$R_{ref}$	Idealizovaný poloměr zaoblení paty a kořene svaru	mm
$S$	Zplastizovaná plocha svaru	mm <sup>2</sup>
$t$	Tloušťka	mm
$X_u$	Pevnost svarového materiálu v tahu	MPa
<b>Dolní indexy</b>		
	Rovnoběžnost na směr svaru	–
⊥	Kolmost na směr svaru	–

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Základní části svařovaných součástí. . . . .	13
1.2	Dělení svaru podle složitosti . . . . .	13
1.3	Ukázka vytvořených tvarových spojů. [54] . . . . .	14
1.4	Rozložení teploty na svařované součásti v místě tepelného zdroje [5].	16
1.5	Vliv teploty na mikrostrukturu tepelně ovlivněné oblasti. ([5], [51])	17
1.6	a) CCT diagram, b) Diagram určující tvrdost struktury. [5] . . . . .	18
1.7	Schématické cykly reohřevu a vzniklé mikrostruktury. [5] . . . . .	19
1.8	Změna tvrdosti ve svařované součásti. [30] . . . . .	20
1.9	Vliv svařování na mechanické vlastnosti a mikrostrukturu[36] . . . . .	20
1.10	Porovnání koncentrace napětí tupého a koutového svaru.[33] . . . . .	21
1.11	Průběh napětí v součásti po svaření. [5] . . . . .	22
2.1	Ukázka posuzování pomocí nominálních napětí. [22] . . . . .	27
2.2	Ukázka posuzování pomocí extrapolovaných napětí. [22] . . . . .	27
2.3	Ukázka posuzování pomocí vrubových napětí. [22] . . . . .	27
2.4	Ukázka posuzování pomocí vrubových napětí. [4] . . . . .	28
2.5	Směrodatné průřezy svaru. [9] . . . . .	30
2.6	Složky napětí ve svarech. [2], [12] . . . . .	31
2.7	Uvažovaná napětí v koutových svarech. [13] . . . . .	33
2.8	Závislost zatížení na deformaci svaru. [14] . . . . .	36
2.9	Úhly testování svarů. [32] . . . . .	36
2.10	Okamžitý střed otáčení - princip. [34] . . . . .	36
2.11	Měření deformace svaru - ukázka na vzorku. [37] . . . . .	37
2.12	Schéma určení pevnosti součásti dle FKM. [2] . . . . .	39
2.13	Typy extrapolovaných napětí. [20] . . . . .	41
2.14	Typické sítě konečných prvků (skořepiny, objemy). [15] . . . . .	41
2.15	Referenční body skupiny 1) a 2). [20] . . . . .	42
2.16	Způsob zaoblení vrubů. [17] . . . . .	43
2.17	Příklady sítě v místech zaoblení. [17] . . . . .	43
2.18	Způsoby zatížení svarů. [55] . . . . .	46
2.19	Normalizovaná deformace při porušení. [32] . . . . .	47
2.20	Normalizovaná deformace při maximálním zatížení. [32] . . . . .	47
2.21	Tahová zkouška svaru $z = 5$ mm. [38] . . . . .	48
2.22	Různé modely přenosu zatížení svarem. [55] . . . . .	50
2.23	Modely svarových skupin. [34] . . . . .	51
4.1	Zadání příkladu 1. . . . .	57
4.2	Zadání příkladu 2. . . . .	58
4.3	Zadání příkladu 3. . . . .	59
5.1	Příklad získávaných sil. . . . .	62
5.2	Příklad stanovení deformací na segmentu, legenda v [mm]. . . . .	62
6.1	Lineární materiál. . . . .	66
6.2	Ideálně pružně-plastický materiál. . . . .	66
6.3	Tahová zkouška svarových materiálů. . . . .	67
6.4	Zadání pohledu na síť konečných prvků součásti. . . . .	67
6.5	Dělení svaru na segmenty - 3 segmenty (obarveno červeně). . . . .	68



6.6	Sít konečných prvků. . . . .	68
6.7	Dělení svaru na segmenty - 3 segmenty (obarveno červeně). . . . .	69
6.8	Sít konečných prvků. . . . .	69
6.9	Dělení svaru na segmenty - 3 segmenty (obarveno červeně). . . . .	70
6.10	Sít konečných prvků. . . . .	70
6.11	Zadání příkladu 4. . . . .	71
6.12	Graf závislosti velikosti zatížení na dosažené síle v kritickém segmentu. . . . .	72
D.1	Model geometrie Příkladu 1. . . . .	101
D.2	Rozložení napětí pro Příklad 1. . . . .	102
E.1	Model geometrie Příkladu 2. . . . .	103
E.2	Rozložení napětí pro Příklad 2. . . . .	103
F.1	Model geometrie Příkladu 3. . . . .	105
F.2	Rozložení napětí pro Příklad 3. . . . .	105
G.1	Základní geometrie. [7] . . . . .	108
G.2	Lineární materiál. . . . .	108
G.3	Bilineární materiál. . . . .	108
G.4	Materiál 1, rovina porušení pod úhlem přibližně 32°. . . . .	109
G.5	Materiál 2, rovina porušení pod úhlem přibližně 22°. . . . .	110
G.6	Materiál 3, rovina porušení pod úhlem přibližně 27°. . . . .	110
G.7	Graf závislosti zplastizované plochy na zatížení. . . . .	111

## SEZNAM TABULEK

1.1	Programové vybavení. . . . .	25
2.1	Experimenty provedené k metodice okamžitého středu otáčení. . .	53
4.1	Porovnání norem. . . . .	60
6.1	Dva horizontální svary. Určí se o cca 30 % menší síla. . . . .	68
6.2	Tři svary (C tvar). Určí se o cca 10 % menší síla. . . . .	69
6.3	Dva vertikální svary. Určí se o cca 15 % větší síla. . . . .	70
6.4	Obecný svar - přípustné zatížení. . . . .	72
7.1	Výsledky dílčích úloh dle norem. . . . .	73
A.1	Příklad 1 - lineární materiál, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, doplněná geometrie pod pásovinou, všechna tělesa stejně tuhá. . . . .	93
A.2	Příklad 1 - lineární materiál, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina i základní materiál tuhý. . . . .	93
A.3	Příklad 1 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina tuhá. . . . .	93
A.4	Příklad 1 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, vše stejně tuhé. . . . .	94
A.5	Dva svary s lineárním materiálem - dělené svary (síly hodnoceny ve 3D). . . . .	94
A.6	Dva horizontální svary, lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina tuhá. Dělení na 10 segmentů. . . . .	94
A.7	Vliv počtu segmentů ve 2D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM. . . . .	94
A.8	Vliv počtu segmentů ve 3D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM. . . . .	95
A.9	Vliv velikosti elementů ve 2D na velikost síly v kritickém segmentu svaru (dělní na 10 segmentů) - IPPMM. . . . .	95
A.10	Vliv velikosti elementů ve 3D na velikost síly v kritickém segmentu svaru (dělní na 10 segmentů) - IPPMM. . . . .	95
A.11	Vliv počtu segmentů ve 2D na velikost síly v kritickém segmentu děleného svaru - IPPMM. . . . .	95
A.12	Vliv počtu segmentů ve 3D na velikost síly v kritickém segmentu děleného svaru - IPPMM. . . . .	96
B.1	Příklad 2 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina i základní materiál tuhý. . .	97
B.2	Příklad 2 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina tuhá. . . . .	97
B.3	Příklad 2 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, vše stejně tuhé. . . . .	97
B.4	Vliv počtu segmentů ve 2D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM. . . . .	98
B.5	Vliv počtu segmentů ve 3D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM. . . . .	98

B.6	Vliv velikosti zátěžné síly ve 2D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM, 10 segmentů . . . . .	98
C.1	Příklad 3 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina i základní materiál tuhý. . .	99
C.2	Příklad 3 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina tuhá. . . . .	99
C.3	Příklad 3 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, vše stejně tuhé. . . . .	99
C.4	Vliv počtu segmentů ve 2D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM. . . . .	100
C.5	Vliv počtu segmentů ve 3D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM. . . . .	100

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Příklad 1 - 2 horizontální svary</b>	<b>93</b>
<b>B</b>	<b>Příklad 2 - 3 svary (C svar)</b>	<b>97</b>
<b>C</b>	<b>Příklad 3 - 2 vertikální svary</b>	<b>99</b>
<b>D</b>	<b>ČSN příklad 1</b>	<b>101</b>
<b>E</b>	<b>ČSN příklad 2</b>	<b>103</b>
<b>F</b>	<b>ČSN příklad 3</b>	<b>105</b>
<b>G</b>	<b>Vliv plastizace svaru únosnost</b>	<b>107</b>
	G.1 Úvod . . . . .	107
	G.2 Model geometrie . . . . .	107
	G.3 Model materiálu . . . . .	107
	G.4 Model okrajových podmínek . . . . .	107
	G.5 Vliv materiálu na porušování svaru . . . . .	108

## A PŘÍKLAD 1 - 2 HORIZONTÁLNÍ SVARY

Tab. A.1: Příklad 1 - lineární materiál, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, doplněná geometrie pod pásovinou, všechna tělesa stejně tuhá.

$N_S$ [-]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla			$p_{red}$ [-]	$p_{dos}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
3	123198	92399	54498	29	0,59	0,44
10	58306	43730	18457	44	0,42	0,32

Tab. A.2: Příklad 1 - lineární materiál, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina i základní materiál tuhý.

$N_S$ [-]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla			$p_{red}$ [-]	$p_{dos}$ [-] [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
3	58271	43703	53469	18	1,22	0,92
5	45624	34218	33087	23	0,97	0,73
10	25122	18842	17061	27	0,91	0,68
20	13619	10214	8338	24	0,82	0,61

Tab. A.3: Příklad 1 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina tuhá.

$N_S$ [-]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla			$p_{red}$ [-]	$p_{dos}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
3	72939	54704	57567	29	1,05	0,79
5	53267	39950	35922	35	0,90	0,67
10	28208	21156	19911	44	0,94	0,71
20	15049	11287	8832	32	0,78	0,59

Tab. A.4: Příklad 1 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, vše stejně tuhé.

$N_S$ [-]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla			$p_{red}$ [-]	$p_{dos}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
3	155132	116349	51824	13	0,45	0,33
5	118298	88724	31709	16	0,36	0,27
10	57466	43100	15449	12	0,36	0,27
20	36247	27185	8010	18	0,29	0,22

Tab. A.5: Dva svary s lineárním materiálem - dělené svary (síly hodnoceny ve 3D).

$N_S$ [-]	Maximální redukovaná síla [N]					
	Poddajné		Pásovina tuhá		Pásovina i základ tuhý	
	$F_{dos,R}$	$\theta$ [°]	$F_{dos,R}$	$\theta$ [°]	$F_{dos,R}$	$\theta$ [°]
3	125454	13	58873	30	45933	19
5	103245	17	44709	36	36833	24
10	64958	24	27362	46	22418	31
20	36443	35	16400	60	11819	40

Tab. A.6: Dva horizontální svary, lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina tuhá. Dělení na 10 segmentů.

$L_E$ [mm]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$ [-]	$p_{dos}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
0,5	43915	32936	19593	49	0,59	0,45
1	37349	28012	19398	47	0,69	0,52
2	28208	21156	19011	44	0,90	0,67
4	21004	15753	18527	39	1,18	0,88

Tab. A.7: Vliv počtu segmentů ve 2D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM.

$N_S$ [-]	$L_S$ [mm]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]	
3	33,9	36710	51088	20	1,39
5	20,3	22020	21573	6	0,98
10	10,2	11732	10666	5	0,91
20	5,1	5751	4486	1	0,78

Tab. A.8: Vliv počtu segmentů ve 3D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM.

$N_S$ [-]	$L_S$ [mm]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]	
3	33,9	36 940	51 377	21	1,39
5	20,3	22 128	22 080	7	1,00
10	10,2	11 792	11 102	7	0,94
20	5,1	5 772	4 923	5	0,85

Tab. A.9: Vliv velikosti elementů ve 2D na velikost síly v kritickém segmentu svaru (dělní na 10 segmentů) - IPPMM.

$L_E$ [mm]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$
	$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]	
0,5	13 350	11 096	6	0,83
1,0	13 064	11 427	7	0,87
2,0	11 732	10 666	5	0,91
3,0	11 086	10 366	4	0,94

Tab. A.10: Vliv velikosti elementů ve 3D na velikost síly v kritickém segmentu svaru (dělní na 10 segmentů) - IPPMM.

$L_E$ [mm]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$ [-]
	$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]	
0,5	13 407	11 344	7	0,85
1,0	13 091	11 550	8	0,88
2,0	11 829	11 094	7	0,94
3,0	11 165	10 400	8	0,93

Tab. A.11: Vliv počtu segmentů ve 2D na velikost síly v kritickém segmentu děleného svaru - IPPMM.

$N_S$ [-]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$
	$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]	
3	40 525	51 328	21	1,27
5	25 600	32 387	31	1,27
10	11 501	9 648	0	0,84
20	5 162	5 446	20	1,06

Tab. A.12: Vliv počtu segmentů ve 3D na velikost síly v kritickém segmentu děleného svaru - IPPMM.

$N_S$ [-]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$ [-]
	$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]	
3	40 994	51 822	22	1,26
5	22 633	22 681	9	1,00
10	11 504	9997	1	0,87
20	5223	5244	8	1,00



## B PŘÍKLAD 2 - 3 SVARY (C SVAR)

Tab. B.1: Příklad 2 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina i základní materiál tuhý.

$N_S$ [-]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla			$p_{red}$ [-]	$p_{dos}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
3	43 603	32 702	55 539	31	1,70	1,27
5	29 440	22 080	33 634	32	1,52	1,14
10	14 629	10 972	16 584	30	1,51	1,13
20	8 474	6 356	8 432	33	1,33	1,00

Tab. B.2: Příklad 2 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina tuhá.

$N_S$ [-]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla			$p_{red}$ [-]	$p_{dos}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
3	56 384	42 288	57 175	35	1,35	1,01
5	35 777	26 833	35 058	38	1,31	0,98
10	18 492	13 869	16 752	32	1,21	0,91
20	9 569	7 177	8 410	32	1,17	0,88

Tab. B.3: Příklad 2 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, vše stejně tuhé.

$N_S$ [-]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla			$p_{red}$ [-]	$p_{dos}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
3	109 801	82 351	52 959	24	0,64	0,48
5	73 362	55 022	32 052	25	0,58	0,44
10	39 449	29 587	15 769	23	0,53	0,40
20	20 996	15 747	7 901	23	0,50	0,38

Tab. B.4: Vliv počtu segmentů ve 2D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM.

$N_S$ [-]	$L_S$ [mm]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]	
3	32 a 31	36 287	28 096	16	0,80
5	19 a 18	22 535	16 164	15	0,71
10	10 a 9	12 311	8 138	17	0,66
20	5 a 4	6 008	3 631	15	0,60

Tab. B.5: Vliv počtu segmentů ve 3D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM.

$N_S$ [-]	$L_S$ [mm]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]	
3	32 a 31	36 563	29 402	17	0,80
5	19 a 18	22 700	16 346	26	0,72
10	10 a 9	12 361	8 184	17	0,66
20	5 a 4	6 035	3 657	16	0,61

Tab. B.6: Vliv velikosti zátěžné síly ve 2D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM, 10 segmentů

$F$ [N]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$ [-]
	$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]	
131312	9234	8138	16	0,88
120000	8847	7803	16	0,88
110000	9557	8519	19	0,89
100000	9257	8122	19	0,88
90000	8743	7733	20	0,88

## C PŘÍKLAD 3 - 2 VERTIKÁLNÍ SVARY

Tab. C.1: Příklad 3 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina i základní materiál tuhý.

$N_S$ [-]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla			$p_{red}$ [-]	$p_{dos}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
3	24 249	18 187	73 428	81	4,04	3,03
5	8 715	6 536	43 403	73	6,64	4,98
10	7 739	5 804	21 985	80	3,79	2,84
20	5 091	3 818	11 082	89	2,90	2,18

Tab. C.2: Příklad 3 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, pásovina tuhá.

$N_S$ [-]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla			$p_{red}$ [-]	$p_{dos}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
3	49 517	37 138	73 621	83	1,98	1,49
5	35 203	26 402	44 300	87	1,68	1,26
10	19 358	14 519	22 165	89	1,53	1,15
20	10 018	7 514	11 065	85	1,47	1,10

Tab. C.3: Příklad 3 - lineární mat, bez části rovnice (deformační kompatibility) pro přípustné zatížení, vše stejně tuhé.

$N_S$ [-]	$F_{dos}$ [N]	Maximální redukovaná síla			$p_{red}$ [-]	$p_{dos}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]		
3	52 064	39 048	73 441	81	1,88	1,41
5	37 999	28 499	44 173	83	1,55	1,16
10	21 590	16 193	22 135	86	1,37	1,03
20	11 395	8 546	11 080	88	1,30	0,97

Tab. C.4: Vliv počtu segmentů ve 2D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM.

$N_S$ [-]	$L_S$ [mm]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]	
3	1	38 613	35 590	81	0,92
5	1	27 782	21 903	83	0,79
10	1	15 166	11 286	85	0,74
20	1	7 509	5 475	83	0,73

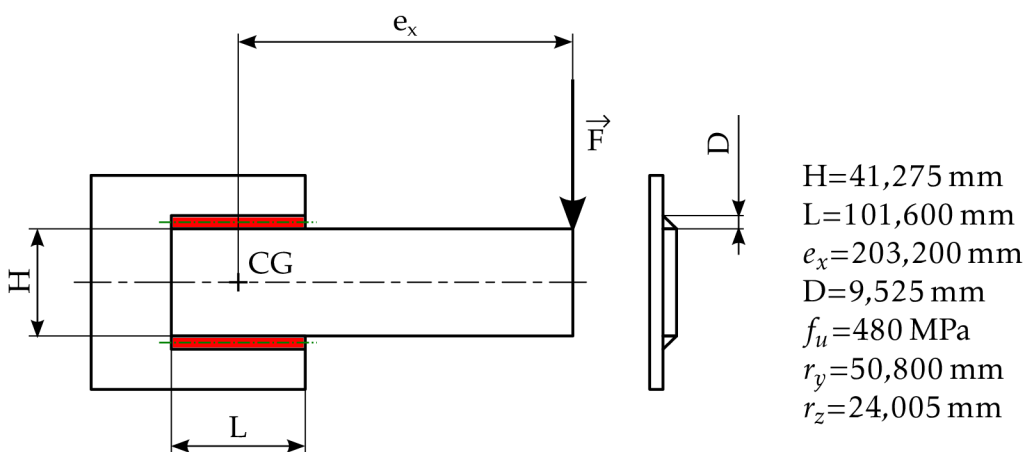
Tab. C.5: Vliv počtu segmentů ve 3D na velikost síly v kritickém segmentu svaru - IPPMM.

$N_S$ [-]	$L_S$ [mm]	Maximální redukovaná síla [N]			$p_{red}$ [-]
		$F_{dos,R}$ [N]	$F_{pr,R}$ [N]	$\theta$ [°]	
3	1	42 330	35 952	82	0,85
5	1	30 441	22 060	84	0,72
10	1	13 884	11 343	86	0,82
20	1	8 284	5 518	88	0,67

## D ČSN PŘÍKLAD 1

Zpracováno dle [12], [26], [44].

Na obr. D.1 je geometrie a její rozměry jako na obr. 4.1 ovšem upravená pro možnosti spočítání normou ČSN. Pro výpočet byl použit základní materiál S355, který má mez kluzu  $f_y = 355 \text{ MPa}$ , mez pevnosti  $f_u = 510 \text{ MPa}$  a součinitel korelace  $\beta_w = 0,9$ . Pro možnost porovnání výsledků normy ČSN a AISC byla hodnota meze pevnosti snížena na  $f_u = 480 \text{ MPa}$ . Napětí se počítají k ose sklopeného svaru a kritická místa jsou označena modrým kroužkem. Hodnoty  $r_y$ ,  $r_z$  a  $r_{max}$  jsou odvozeny z geometrie.



Obr. D.1: Model geometrie Příkladu 1.

Po zatížení svarové skupiny dle zadání vznikne ve svarech napětí čistého smyku a čistého krutu. V zadání  $D$  představuje tloušťku svaru, pro výpočty ovšem byla použita výška svaru  $a = 0,707 \cdot D$ .

Excentrické zatížení vyvolá kroutící moment:

$$M = F \cdot e_x \quad (\text{D.1})$$

Po sklopení nebezpečné roviny (nebezpečného průřezu) do roviny připojení dostáváme následující průřezové charakteristiky:

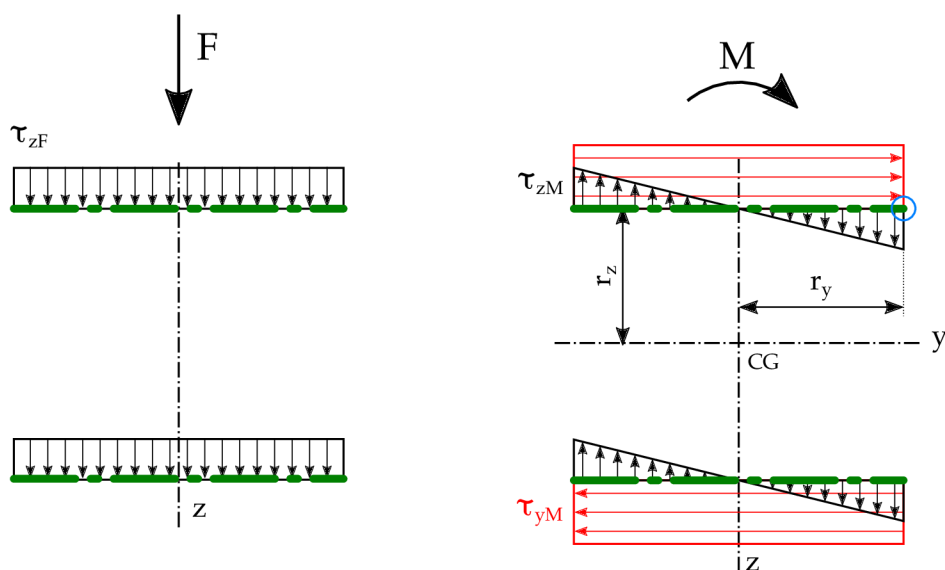
- průřezová plocha  $A = 1368 \text{ mm}^2$ ,
- osově momenty setrvačnosti  $I_z = 1\,177\,071 \text{ mm}^2$ ,  $I_y = 793\,635 \text{ mm}^2$ ,
- polární moment setrvačnosti  $I_p = 1\,970\,706 \text{ mm}^2$ .

Napětí vyvolané silou (obr. D.2 nalevo) vyvolává rovnoměrné namáhání svarové skupiny:

$$\tau_{zF} = \frac{F}{A}. \quad (\text{D.2})$$

Pokud toto napětí rozložíme do složek dle obr. 2.6 dostaneme:

$$\sigma_{\perp,F} = \tau_{\perp,F} = \frac{\tau_{zF}}{\sqrt{2}} \text{ a } \tau_{\parallel,M} = 0.$$



Obr. D.2: Rozložení napětí pro Příklad 1.

Napětí vyvolané kroučícím momentem (obr. D.2 napravo) vyvolá vodorovná a svislý smyk:

$$\tau_{yM} = \frac{M}{I_p} \cdot r_z, \quad (D.3)$$

$$\tau_{zM} = \frac{M}{I_p} \cdot r_y. \quad (D.4)$$

Po rozkladu do jednotlivých složek jako u síly získáme:

$$\sigma_{\perp, M} = \tau_{\perp, M} = \frac{\tau_{zM}}{\sqrt{2}} \text{ a } \tau_{\parallel, M} = \tau_{yM}.$$

Výsledné namáhání svaru stanovíme superpozicí jednotlivých účinků:

$$\begin{aligned} \sigma_{\perp} &= \sigma_{\perp, F} + \sigma_{\perp, M} \\ \tau_{\perp} &= \tau_{\perp, F} + \tau_{\perp, M} \\ \tau_{\parallel} &= \tau_{\parallel, F} + \tau_{\parallel, M} \end{aligned}$$

Maximální únosnost se potom vyhodnotí pomocí rov. 2.11 odkud po zpracování hodnot a vyjádření síly získáváme:

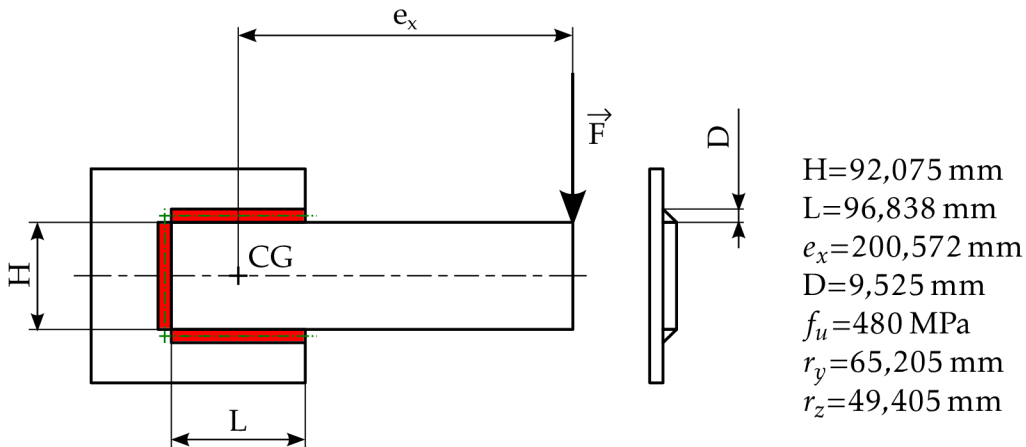
$$F_{max} = 45\,067 \text{ N}. \quad (D.5)$$

Výsledek dle ČSN 45067 N je o 31,5 % menší hodnota síly než dle výpočtu podle normy AISC (rov. 4.2).

## E ČSN PŘÍKLAD 2

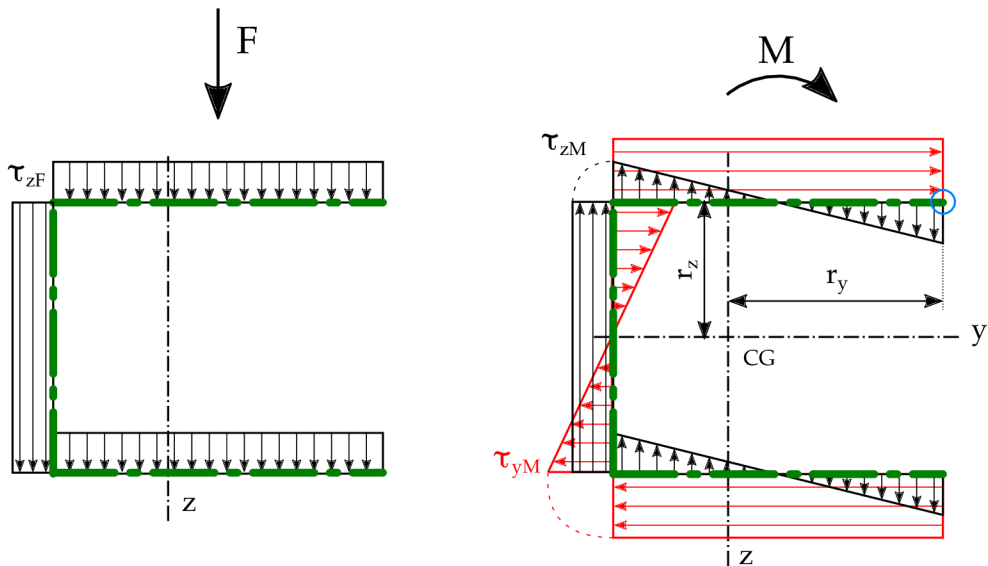
Zpracováno dle [12], [26], [44].

Na obr. D.1 je geometrie a její rozměry jako na obr. 4.2 ovšem upravená pro možnosti spočítání normou ČSN. Pro výpočet byl použit základní materiál S355, který má mez kluzu  $f_y = 355 \text{ MPa}$ , mez pevnosti  $f_u = 510 \text{ MPa}$  a součinitel korelace  $\beta_w = 0,9$ . Pro možnost porovnání výsledků normy ČSN a AISC byla hodnota meze pevnosti snížena na  $f_u = 480 \text{ MPa}$ .



Obr. E.1: Model geometrie Příkladu 2.

Po zatížení svarové skupiny dle zadání vznikne ve svarech napětí čistého smyku a čistého krutu.



Obr. E.2: Rozložení napětí pro Příklad 2.

Excentrické zatížení vyvolá kroutící moment:

$$M = F \cdot e_x \quad (\text{E.1})$$

Po sklopení nebezpečné roviny (nebezpečného průřezu) do roviny připojení dostáváme následující průřezové charakteristiky:

- průřezová plocha  $A = 1924 \text{ mm}^2$ ,
- osově momenty setrvačnosti  $I_z = 2\,148\,520 \text{ mm}^2$ ,  $I_y = 3\,626\,280 \text{ mm}^2$ ,
- polární moment setrvačnosti  $I_p = 5\,774\,800 \text{ mm}^2$ .

Napětí vyvolané silou (obr. E.2 nalevo) vyvolává rovnoměrné namáhání svarové skupiny:

$$\tau_{zF} = \frac{F}{A}. \quad (\text{E.2})$$

Pokud toto napětí rozložíme do složek dle obr. 2.6 dostaneme:

$$\sigma_{\perp,F} = \tau_{\perp,F} = \frac{\tau_{zF}}{\sqrt{2}} \text{ a } \tau_{\parallel,M} = 0.$$

Napětí vyvolané kroutícím momentem (obr. E.2 napravo) vyvolá vodorovná a svislý smyk:

$$\tau_{yM} = \frac{M}{I_p} \cdot r_z, \quad (\text{E.3})$$

$$\tau_{zM} = \frac{M}{I_p} \cdot r_y. \quad (\text{E.4})$$

Po rozkladu do jednotlivých složek jako u síly získáme:

$$\sigma_{\perp,M} = \tau_{\perp,M} = \frac{\tau_{zM}}{\sqrt{2}} \text{ a } \tau_{\parallel,M} = \tau_{yM}.$$

Výsledné namáhání svaru stanovíme superpozicí jednotlivých účinků:

$$\begin{aligned} \sigma_{\perp} &= \sigma_{\perp,F} + \sigma_{\perp,M} \\ \tau_{\perp} &= \tau_{\perp,F} + \tau_{\perp,M} \\ \tau_{\parallel} &= \tau_{\parallel,F} + \tau_{\parallel,M} \end{aligned}$$

Maximální únosnost se potom vyhodnotí pomocí rov. 2.11 odkud po zpracování hodnot a vyjádření síly získáváme:

$$F_{max} = 86\,484 \text{ N}. \quad (\text{E.5})$$

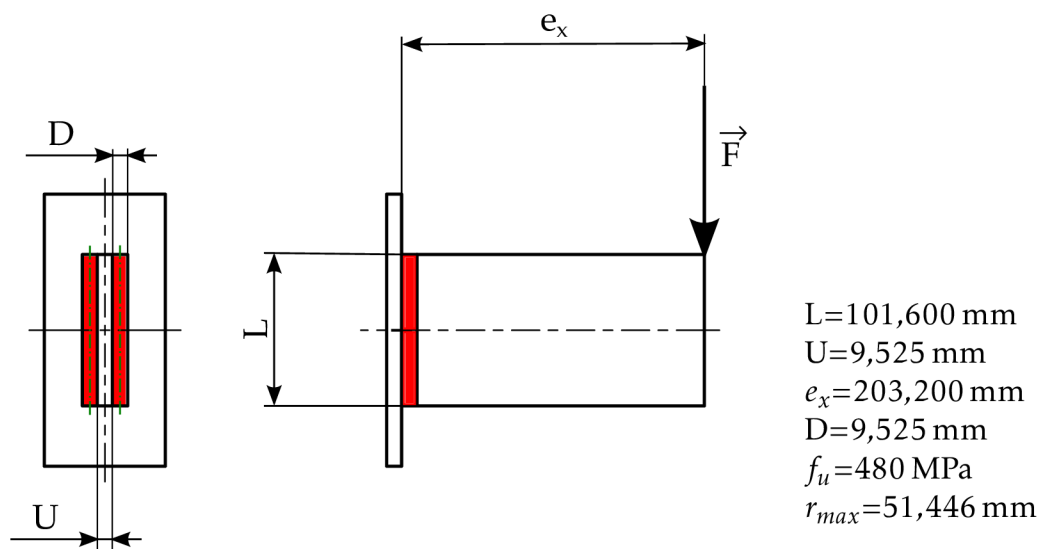
Výsledek dle ČSN 86 484 N je o 34,1 % menší hodnota síly než dle výpočtu podle normy AISC (rov. 4.4).



## F ČSN PŘÍKLAD 3

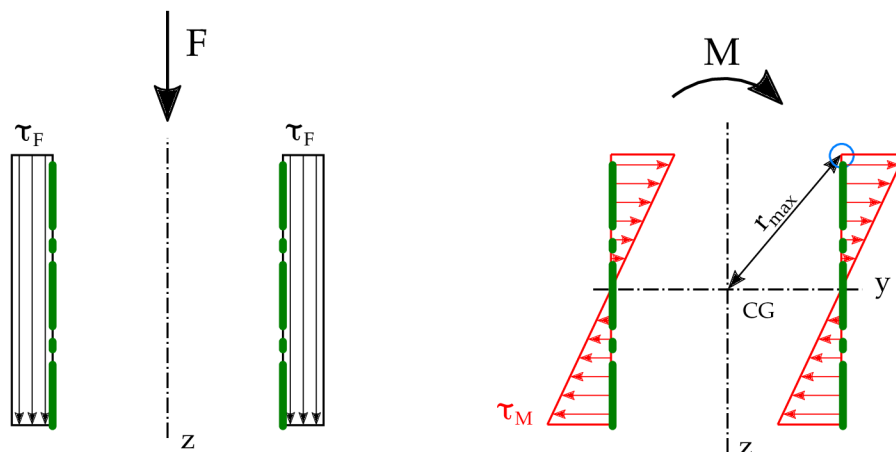
Zpracováno dle [12], [26], [44].

Na obr. D.1 je geometrie a její rozměry jako na obr. 4.1 ovšem upravená pro možnosti spočítání normou ČSN. Pro výpočet byl použit základní materiál S355, který má mez kluzu  $f_y = 355 \text{ MPa}$ , mez pevnosti  $f_u = 510 \text{ MPa}$  a součinitel korelace  $\beta_w = 0,9$ . Pro možnost porovnání výsledků normy ČSN a AISC byla hodnota meze pevnosti snížena na  $f_u = 480 \text{ MPa}$ .



Obr. F.1: Model geometrie Příkladu 3.

Po zatížení svarové skupiny dle zadání vznikne ve svarech napětí čistého smyku a ohybu.



Obr. F.2: Rozložení napětí pro Příklad 3.

Excentrické zatížení vyvolá kroutící moment:

$$M = F \cdot e_x \quad (\text{F.1})$$

Po sklopení nebezpečné roviny (nebezpečného průřezu) do roviny připojení dostáváme následující průřezové charakteristiky:

- průřezová plocha  $A = 1368 \text{ mm}^2$ ,
- osové momenty setrvačnosti  $I_z = 95\,603 \text{ mm}^2$ ,  $I_y = 1\,177\,071 \text{ mm}^2$ ,
- polární moment setrvačnosti  $I_p = 1\,272\,674 \text{ mm}^2$ .

Napětí vyvolané silou (obr. F.2 nalevo) vyvolává rovnoměrné namáhání svarové skupiny:

$$\tau_F = \frac{F}{A}. \quad (\text{F.2})$$

Dle obr. 2.6 toto napětí představuje:

$$\tau_{\parallel} = \tau_F.$$

Napětí vyvolané ohybovým momentem (obr. F.2 napravo) vyvolá napětí:

$$\sigma_M = \frac{M}{I_p} \cdot r_{max}, \quad (\text{F.3})$$

Po rozkladu do jednotlivých složek jako u síly získáme:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_M}{\sqrt{2}}.$$

Maximální únosnost se potom vyhodnotí pomocí rov. 2.11 odkud po zpracování hodnot a vyjádření síly získáváme:

$$F_{max} = 36\,513 \text{ N}. \quad (\text{F.4})$$

Výsledek dle ČSN 36513 N je o 30,3 % menší hodnota síly než dle výpočtu podle normy AISC (rov. 4.6).

## G VLIV PLASTIZACE SVARU ÚNOSNOST

### G.1 Úvod

K řešení únosnosti svarových spojů lze přistoupit dvěma způsoby. Únosnost se může řešit stejně jako v normě AISC přes síly na odvěsnách svaru nebo přerozdělováním napětí v příčném průřezu svaru. Při sepisování rešeršní práce nebyly známky možné přístupy řešení, a tak se jako první řešil způsob přerozdělování napětí. Později byla nalezena práce [27], která tento způsob využila v návaznosti na zmiňovanou normu AISC. Zde je tedy uveden začátek studie, která byla později zamítnuta a převzala se metodika AISC.

Pro úplnost zadání byly vytvořeny dílčí modely uvedeny níže. Pro analýzy je nejpodstatnější model materiálu, který má velký vliv na výsledky.

### G.2 Model geometrie

Model geometrie byl vytvořen dle specifikace v [7] (jelikož tato práce se zabývala rozložením napětí na odvěsnách svaru a již proběhly jisté práce s touto geometrií v jiné souvislosti) a použita byla jen jedna ze čtyř geometrií svaru. Pro názornost je model geometrie na obr. G.1.

### G.3 Model materiálu

Použitý materiál je lineární nebo bilineární (viz obr. G.2 a obr. G.3) elastický homogenní isotropní materiál představující materiál S355 s modulem pružnosti  $E = 2,1 \times 10^5$  MPa a Poissonovým poměrem  $\mu = 0,3$  a mezí kluzu  $Re = 345$  MPa. Byly vytvořeny tři varianty modelu materiálu:

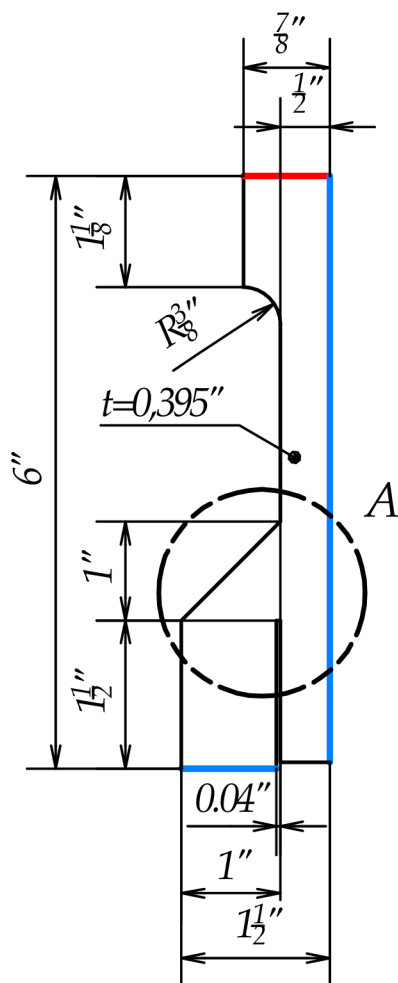
- Materiál 1 - lineární model materiálu dle obr. G.2 pro  $E1 = E$ ,
- Materiál 2 - ideálně pružně plastický model materiálu dle obr. G.3 pro  $E2 = 0$ ,
- Materiál 3 - bilineární model materiálu dle obr. G.3 pro  $E1 = E$  a  $E2 = \frac{E}{10}$ .

### G.4 Model okrajových podmínek

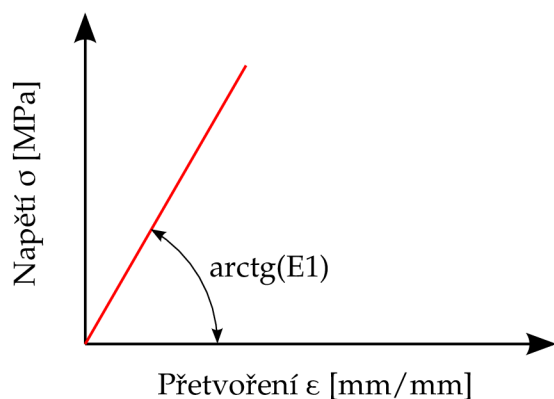
Dle obr. G.1 podle barevného označení jsou definovány následující okrajové podmínky:

- dvě okrajové podmínky symetrie označené modrými hranami,
- zatížení posuvem  $p = 0,25$  mm

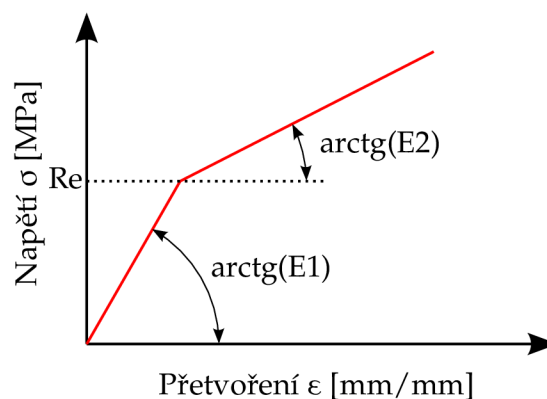
Úloha byla modelována jako tenký plech, tedy jako rovinná úloha s formulací rovinné napjatosti.



Obr. G.1: Základní geometrie. [7]



Obr. G.2: Lineární materiál.

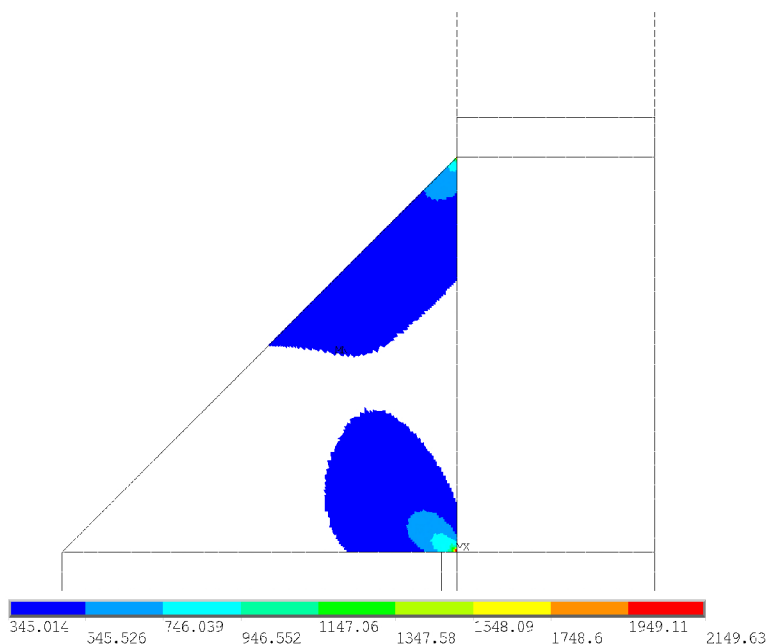


Obr. G.3: Bilineární materiál.

## G.5 Vliv materiálu na porušování svaru

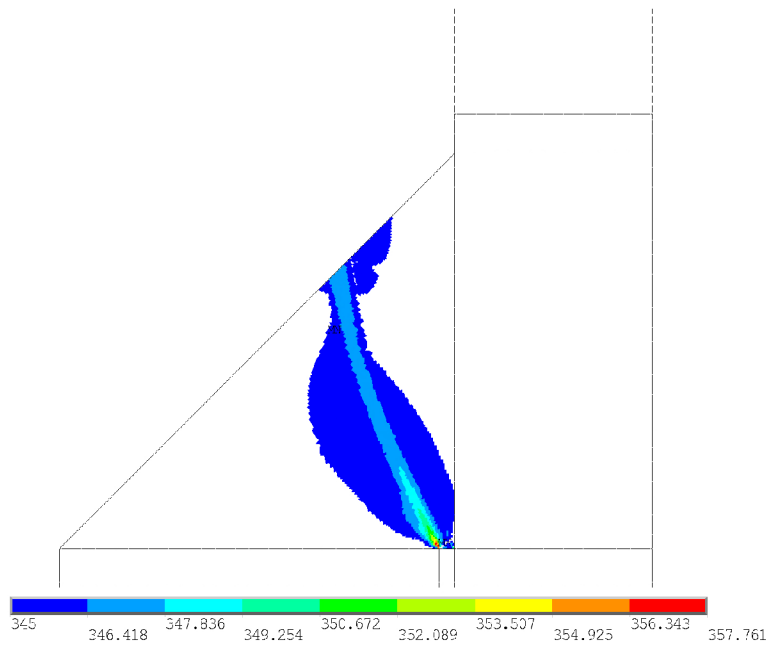
Byla provedena analýza zaměřená na různé modely materiálu a jejich vlivy na vzniklá napětí a následně na místo a úhel porušování.

Rozlišovací schopnost při určování zplastizované plochy je velikost jednoho elementu. Velikost strany elementu je nastavena na  $l = 0,127$  mm, tedy přibližná plocha elementu (uvažují element čtvercového tvaru)  $S = 0,016$  mm<sup>2</sup>. Je zřejmé, že všechny elementy nemají stejnou plochu, ale jelikož je oblast svaru tvořena 15559 elementy, které jsou tvořeny formulací mapované sítě lze zanedbat nepravidelnost tvarů elementů. Rozlišovací schopnost lze tedy uvažovat dle čtvercového tvaru elementu.

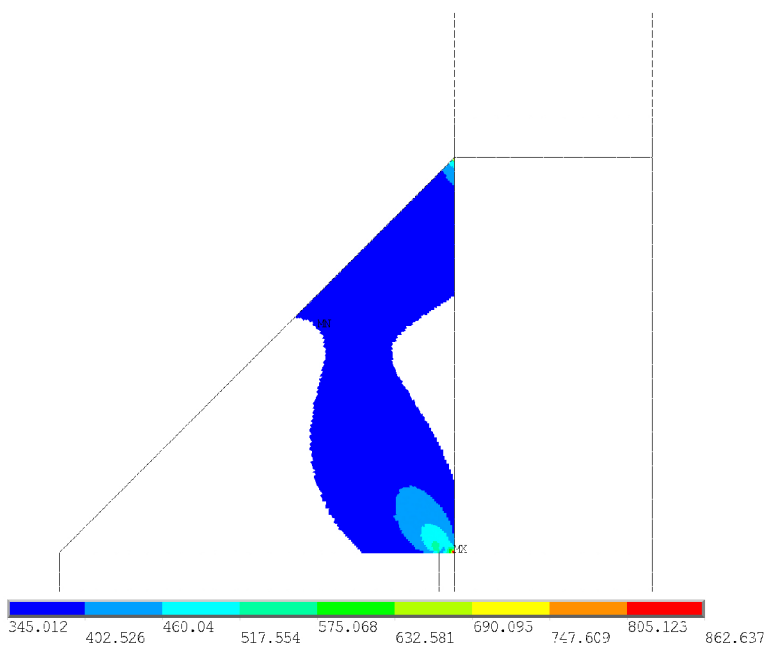


Obr. G.4: Materiál 1, rovina porušení pod úhlem přibližně 32°.

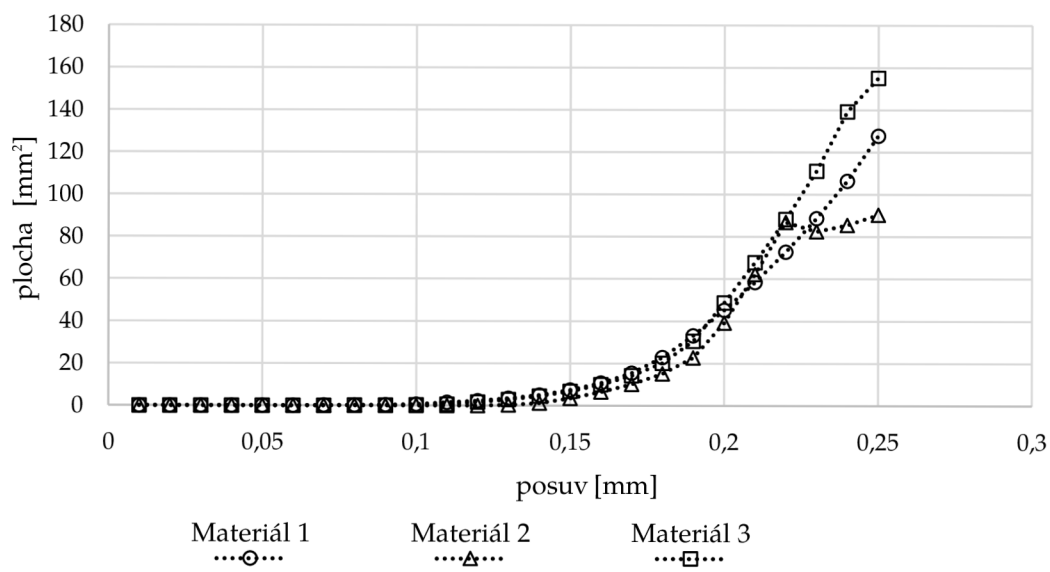
Z obr. G.7 je zřejmé, že do jistého zatížení se materiály chovají stejně, ale po překročení hranice přibližně 0,22 mm Materiál 2 (ideálně pružně-plastický model materiálu) náhle začne téct a plocha, která překročila mez kluzu se již dále nezvětšuje. Materiály 1 a 3 se téměř shodují, ale u bilineárního modelu materiálu (Materiál 3) plastizuje větší oblast a nedochází k tak významnému (nereálnému nárůstu) napětí v místech koncentrátorů napětí. Výsledky na obr. G.4 až obr. G.6 ukazují v jakých místech by docházelo k porušení svaru. Tyto výsledky jsou ve shodě s literaturou, kde stejnou problematiku popisují ([37, str. 109], [49], atd.).



Obr. G.5: Materiál 2, rovina porušení pod úhlem přibližně 22°.



Obr. G.6: Materiál 3, rovina porušení pod úhlem přibližně 27°.



Obr. G.7: Graf závislosti zplastizované plochy na zatížení.