



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## HODNOCENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

DESIGN OF WELDED JOINTS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

René Kojecký

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jozef Dlugoš, Ph.D.

BRNO 2020

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **René Kojecký**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jozef Dlugoš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2019/20

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

### Hodnocení svarových spojů

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá problematikou hodnocení svarových spojů pomocí národních a mezinárodních norem a speciálních metod vzhledem k statickému a cyklickému namáhání. Práce poskytne přehled omezení a odlišností mezi jednotlivými standardy, které jsou nevyhnutelné při aplikaci dané metody.

#### Cíle bakalářské práce:

Základní popis svarových spojů a problémů, ke kterým při sváření dochází.

Popis přístupů při posuzovaných svarových spojkách pomocí norem a speciálních metod.

#### Seznam doporučené literatury:

ČSN 05 0000. Sváření. Sváření kovů. Základní pojmy. 1988.

ČSN 05 0120. Výpočet svářecích spojů strojních konstrukcí. Praha: Český normalizační institut, 1972.

ČSN EN 1993-1-9. Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí: Část 1-9: Únava. Praha: Český normalizační institut, 2006.

PEC, Michal. Rozbor únosnosti vybraných svařovaných konstrukčních uzlů zatěžovaných staticky a cyklicky. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

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

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce řeší mezinárodní a normované přístupy posuzování svarů. Cílem bylo vytvořit přehledný soubor o pravidlech a odlišnostech jednotlivých metod. Zpracování probíhalo na základě dostupné literatury. V první části se práce věnuje rešeršní studii, která se zabývá touto problematikou. Následně byly vybrány tři metody ke zpracování a vyhodnocení pomocí MKP.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Hodnocení svarů, normovaný přístup, únavová pevnost, rozkmit napětí, statické a dynamické zatížení, IIW

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with international and standardized approaches of weld assessment. The aim was to create a clear set of rules and differences of individual methods. The processing was based on the available literature. The first part is devoted to a research study that deals with this issue. Subsequently, three methods were selected for processing and evaluation using FEM.

## KEYWORDS

Welds assessment, standardized approach, fatigue strength, fluctuation in stress, static and cyclic loading, IIW

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KOJECKÝ, René. Hodnocení svarových spojů. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121560>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 56 s. Vedoucí práce Jozef Dlugoš.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jozefa Dluhoše, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. června 2020

.....

René Kojcký

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Ing. Jozefu Dlugošovi, Ph.D. za odborné rady a poznámky při zpracování této práce. Dále děkuji svým přátelům a rodině za podporu při studiu.

## OBSAH

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Úvod.....                                                                  | 10 |
| 1 Základní pojmy .....                                                     | 11 |
| 1.1 Svařování za působení tepla.....                                       | 11 |
| 1.2 Svařování s použitím tlaku.....                                        | 11 |
| 1.3 Svarové spoje a svary.....                                             | 12 |
| 1.4 Technologie svařování .....                                            | 13 |
| 1.4.1 Osa svaru.....                                                       | 14 |
| 1.4.2 Jednostranný/oboustranný svar .....                                  | 14 |
| 1.4.3 Povrch svaru.....                                                    | 14 |
| 1.5 Lokální faktory ovlivňující pevnost svaru .....                        | 15 |
| 2 Normované přístupy hodnocení svarů.....                                  | 17 |
| 2.1 ČSN 05 0120 .....                                                      | 17 |
| 2.1.1 Platnost.....                                                        | 17 |
| 2.1.2 Jmenovité napětí .....                                               | 18 |
| 2.1.3 Dovolené napětí.....                                                 | 20 |
| 2.1.4 Podmínky pevnosti .....                                              | 22 |
| 2.1.6 Zhodnocení.....                                                      | 24 |
| 2.2 ČSN EN 1993-1-9.....                                                   | 24 |
| 2.2.1 Platnost.....                                                        | 24 |
| 2.2.2 Metody hodnocení .....                                               | 24 |
| 2.2.3 Kategorie detailu.....                                               | 25 |
| 2.2.4 Výpočet napětí.....                                                  | 25 |
| 2.2.5 Rozkmit napětí.....                                                  | 26 |
| 2.2.6 Posouzení svaru .....                                                | 27 |
| 2.2.7 Zhodnocení.....                                                      | 28 |
| 3 Hodnocení dle institucí.....                                             | 29 |
| 3.1 IIW (International Institute of Welding) .....                         | 29 |
| 3.1.1 Platnost.....                                                        | 29 |
| 3.1.2 FAT kategorie.....                                                   | 29 |
| 3.1.3 Posouzení na únavu .....                                             | 29 |
| 3.1.4 Metoda jmenovitého napětí (nominal stress method).....               | 30 |
| 3.1.5 Metoda tvarového napětí (structural stress method).....              | 31 |
| 3.1.6 Hodnocení kořene svaru s využitím lokálního jmenovitého napětí ..... | 31 |
| 3.1.7 Hodnocení paty svaru pomocí extrapolovaného napětí hot-spot .....    | 33 |
| 3.1.8 Linearizace povrchového napětí.....                                  | 35 |

|        |                                                                                |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.9  | Metoda vrubového napětí (effective notch stress method) .....                  | 36 |
| 3.1.10 | Zhodnocení.....                                                                | 37 |
| 3.2    | AWS D1.1/D1.1M:2015 (American national standard structural welding code) ..... | 38 |
| 3.2.1  | Platnost (statické zatížení).....                                              | 38 |
| 3.2.2  | Platnost (dynamické zatížení) .....                                            | 38 |
| 3.2.3  | Výpočet napětí (statické zatížení).....                                        | 38 |
| 3.2.4  | Alternativní přístup výpočtu napětí (statické zatížení).....                   | 38 |
| 3.2.5  | Okamžitý střed otáčení (statické zatížení) .....                               | 38 |
| 3.2.6  | Speciálně soustředně zatížená skupina svarů (statické zatížení).....           | 39 |
| 3.2.7  | Výpočet napětí (dynamické zatížení) .....                                      | 40 |
| 3.2.8  | Kategorie namáhání (dynamické zatížení).....                                   | 40 |
| 3.2.9  | Rozkmit napětí (dynamické zatížení) .....                                      | 40 |
| 3.2.10 | Zhodnocení.....                                                                | 42 |
| 4      | Aplikace řešení vybraných metod pomocí MKP .....                               | 43 |
| 4.1    | Geometrie, materiál, rozměry.....                                              | 43 |
| 4.2    | Okrajové podmínky .....                                                        | 43 |
| 4.3    | Metoda jmenovitého napětí dle ČSN 05 120 .....                                 | 44 |
| 4.3.2  | Řešení.....                                                                    | 45 |
| 4.3.3  | Výpočet jmenovitého napětí.....                                                | 45 |
| 4.3.4  | Zhodnocení.....                                                                | 46 |
| 4.4    | Metoda extrapolovaného napětí hot-spot .....                                   | 46 |
| 4.4.1  | Řešení.....                                                                    | 47 |
| 4.4.2  | Výpočet extrapolovaného napětí hot-spot.....                                   | 47 |
| 4.4.3  | Zhodnocení.....                                                                | 48 |
| 4.5    | Metoda vrubového napětí.....                                                   | 48 |
| 4.5.1  | Řešení.....                                                                    | 49 |
| 4.5.2  | Zhodnocení.....                                                                | 50 |
|        | Závěr .....                                                                    | 51 |
|        | Seznam použitých zkratk a symbolů.....                                         | 54 |

## ÚVOD

Svarové spoje se vyskytují téměř ve všech odvětvích těžkého průmyslu. Proto je důležité zabývat se problematikou vzniku svaru a jejich funkce. Jedná se o velmi komplexní a složité téma, protože existuje mnoho rozdílných způsobu svarového spojení. K tomu, aby svarové spoje plnily svoji funkci po stanovenou dobu je nutností znalost správného návrhu svarů. Za tímto účelem bylo zpracováno několik metod hodnocení svarových spojů, které jsou v této práci popsány a porovnány mezi sebou.

Předmětem této práce jsou normované a mezinárodní přístupy. Jednotlivé metody zahrnují rozdílné faktory ovlivňující celkovou pevnost svarového spoje. Jedná se o základní definice a hodnocení, které při samostatném použití slouží pouze pro orientaci. Nicméně na základě těchto metod pracují numerické přístroje zohledňující řadu dalších aspektů důležitých pro celkové vyhodnocení svarů. Některé z těchto přístupů již nemusí vyhovovat požadavkům kladeným na svarové spoje. Zejména starší normované přístupy je třeba analyzovat, jestli vyhovují dnešním nárokům.

Cílem této práce je poukázat na nedostatky a výhody jednotlivých přístupů hodnocení svarů. Dále pak vytvoření uceleného souboru, který slouží ke správnému a jednoznačnému určení vhodné metody hodnocení pro konkrétní svařovanou konstrukci.

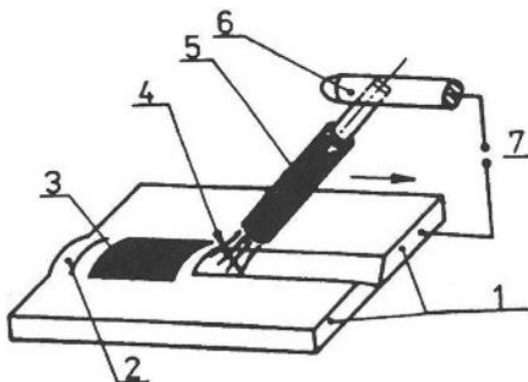
## 1 ZÁKLADNÍ POJMY

Svařování je proces vyhotovení nerozebíratelných spojů dosáhnutím meziatomových vazeb mezi spojovanými částmi při jejich ohřevu nebo plastické deformaci, nebo při společném působení. Kovová konstrukce vyhotovená svařováním jednotlivých částí se nazývá svařovaná konstrukce. V důsledku krystalizace roztaveného kovu, plastické deformace při tlakovém svařování nebo jejich kombinací vzniká svar.[18]

Způsoby svařování se mohou rozdělovat podle dvou základních metod. Jedná se o tavné svařování, které je vykonávané lokálním ztavením spojovaných částí bez použití tlaku a svařování s použitím tlaku, při kterém je tlak nevyhnutelný. [1]

### 1.1 SVAŘOVÁNÍ ZA PŮSOBNÍ TEPLA

Nejpoužívanější způsoby svařování v této kategorii jsou zejména: obloukové, plamenové a elektrostruskové svařování. Všechny tyto metody pracují na principu natavení základního materiálu společně s přídavným materiálem na svarovou plochu bez vlivu vnějších sil. Přídavný materiál má stejné nebo podobné vlastnosti jako základní materiál.[13]

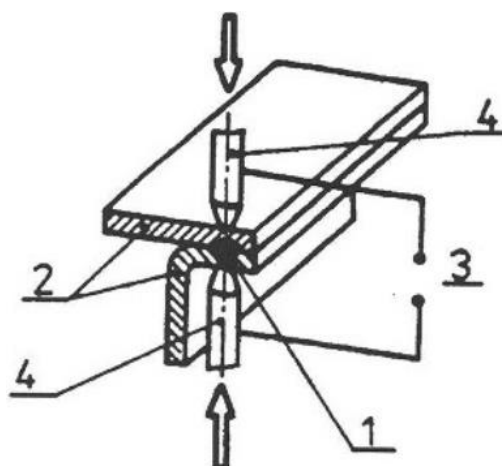


Obr. 1 Schéma ručního obloukového svařování obalenou elektrodou (1 – svařovaný materiál, 2 – svařovací vodič se svorkou, 3 – svar, 4 – elektrický oblouk, 5 – elektroda, 6 – svařovací vodič s držákem elektrod) [18]

Další metody tohoto svařování jsou například: elektronové, laserové a aluminotermické svařování.

### 1.2 SVAŘOVÁNÍ S POUŽITÍM TLAKU

Do této metody svařování patří například: bodové, třecí, tlakové nebo difúzní svařování. U těchto metod vzniká svarový spoj vlivem působení tlaku. Svaření je uskutečněno působením plastické deformace spojovaných částí, při teplotách nižších, než je teplota tavení těchto kovů. Svařování probíhá za teploty okolí tedy bez ohřevu. Nicméně vlivem tření dochází ke značnému nárůstu teploty svařovaných částí.[13]

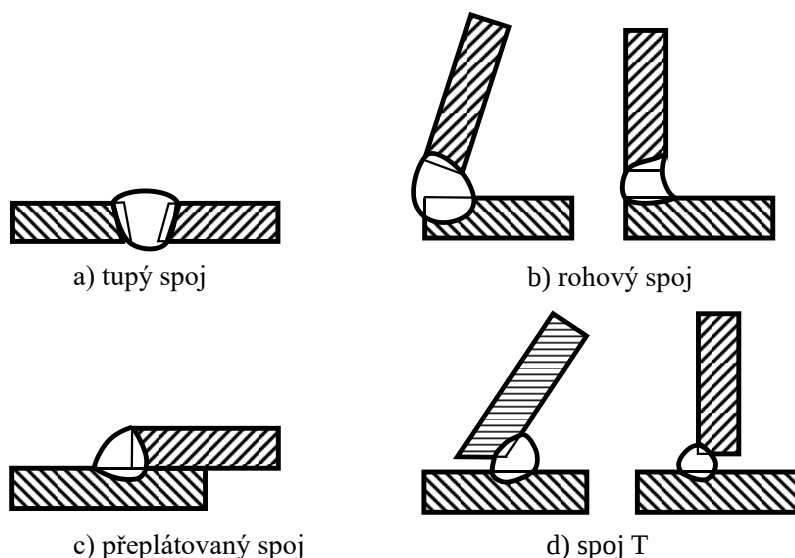


Obr. 2 Bodové svařování (1 – bodový svar, 2 – svařovaný materiál, 3 – zdroj proudu, 4 - elektrody)[18]

Příklady jiných způsobů tohoto svařování: ultrazvukové, magnetickoimpulsní, svařování za studena nebo svařování explozí.

### 1.3 SVAROVÉ SPOJE A SVARY

Základní rozdělení svarových spojů je definováno například podle vzájemné polohy svařovaných částí. Tupým svarem (Obr. 3a) se nazývají svařované části ležící ve stejné rovině. Takto vytvořený svar spojuje čelní plochy těchto dílů. Pokud je snaha docílit spojení částí, které jsou vzájemně pod určitým úhlem vznikne koutový svar. Tento typ svaru se taky využívá u přeplátovaného (Obr. 3b), rohového (Obr. 3c) nebo T spoje (Obr. 3d). Pokud není třeba průběžný svar po celé délce spoje je vhodný zástupce svar bodový. Pro svar vyplňující otvor připravený v jedné ze svařovaných částí je volen děrový svar.[1]

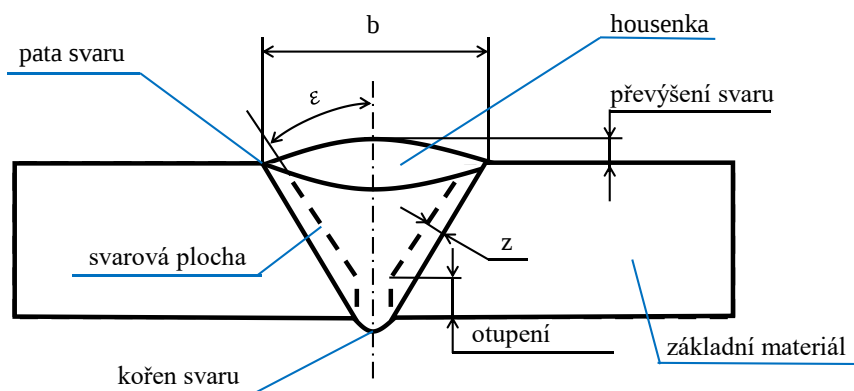


Obr. 3 Typy svarových spojů[1]

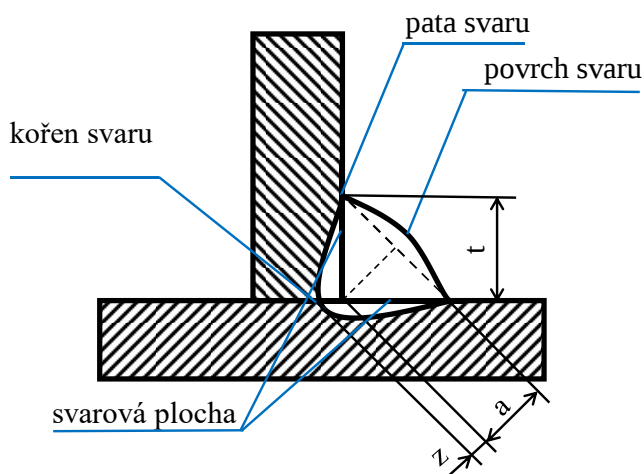
## 1.4 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ

Před začátkem samotného svařování je nutné provést přípravu základního materiálu a svarové plochy, tak aby vzniklý svar dosáhl požadované kvality. Pro svaření čelních ploch se provede šikmý řez hran, které jsou svařovány. Část této plochy se ponechá nezkosená, tvořící otupení. Ostrý úhel svírající plochu zkosení hrany s plochou čela se nazývá úhel zkosení. Úhel rozevření je pak úhel mezi zkosenými hranami svařovaných částí (Obr. 4).[1]

Při svařování vzniká svarová lázeň, což je část materiálu, která se při tavném svařování nachází v tekutém stavu. Do této lázně je jako doplněk roztaveného základního materiálu přiveden přídavný materiál. Tato slitina tvoří výsledný svar neboli housenku. Vlivem vysoké teploty dochází k narušení nebo změně struktury a vlastností svařovaného materiálu v blízkosti svaru. Tato část se nazývá tepelně ovlivněná oblast (TOO). Schéma tupého svaru s popisem základních částí je uvedeno na Obr. 4. Schéma koutového svaru s popisem základních částí je zobrazena na Obr. 5[12]



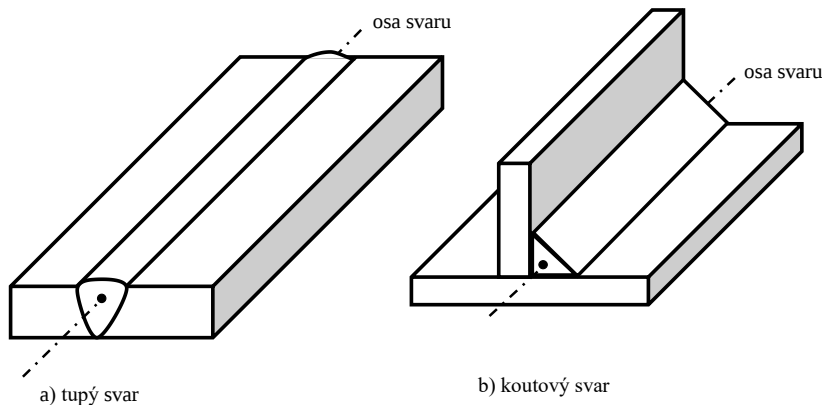
Obr. 4 Schéma tupého svaru ( $b$  – šířka svaru,  $z$  – hloubka závaru,  $\varepsilon$  – úhel zkosení)[12]



Obr. 5 Schéma koutového svaru ( $t$  – tloušťka svaru,  $a$  – výška svaru,  $z$  – hloubka závaru)[11]

### 1.4.1 OSA SVARU

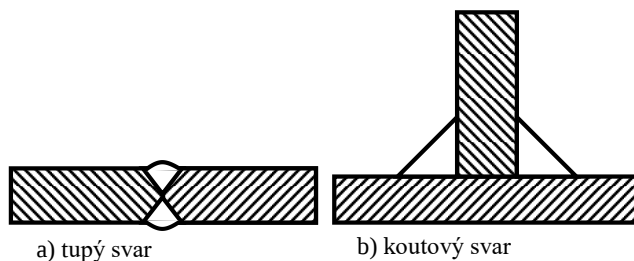
Je to myšlená spojnice bodů, která prochází příčnými průřezy svaru po celé jeho délce. Jednotlivé body se nachází ve středech těchto průřezů (Obr. 6).[15]



Obr. 6 Osa svaru

### 1.4.2 JEDNOSTRANNÝ/OBOUSTRANNÝ SVAR

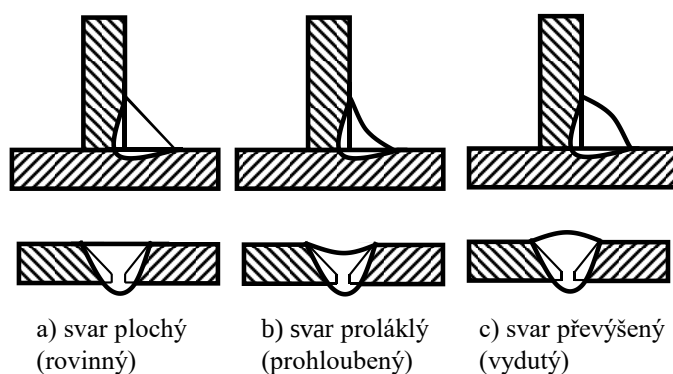
Pokud je na základě pevnostního výpočtu klasického svaru zjištěno, že není schopen přenést provozní zatížení, je možnost provést oboustranné provedení. Nevýhodou je vznik dalších vnitřních pnutí v základním materiálu. Klasický jednostranný svar je navíc náchylnější ke vzniku trhliny v místě kořene. Oboustranné provedení je zobrazeno na Obr. 7.[14]



Obr. 7 Oboustranné provedení svarů[14]

### 1.4.3 POVRCH SVARU

Pro koutové a tupé svary platí, že mohou plnit funkci nosnou nebo těsnící. Podle tvaru povrchu při pohledu v řezu jsou rozeznávány svary ploché (Obr. 8a), proláklé (Obr. 8b) a převýšené (Obr. 8c). Proláklost a převýšení je prohnutí nebo vyboulení určené vzdáleností mezi rovinou přecházející přes viditelné hranice svaru se základním kovem a povrchem svaru naměřeným v místě největšího prohnutí.[1]



Obr. 8 Typy povrchů svarů[1]

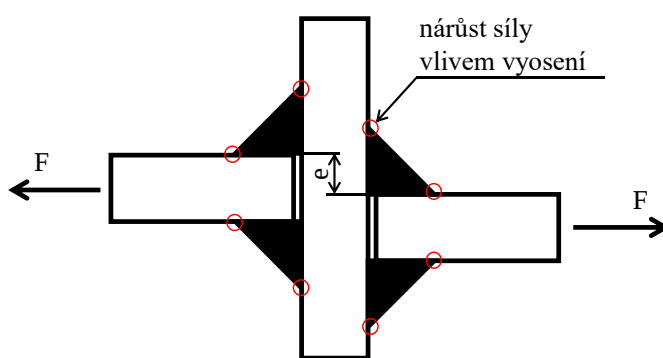
## 1.5 LOKÁLNÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PEVNOST SVARU

### a) Zbytkové napětí

Zbytkové napětí výrazně ovlivňuje únavovou pevnost. Zatímco vysoké zbytkové napětí v tahu ji snižuje, naopak zbytkové tlakové napětí ji zvyšuje. Hlavním faktorem je zde plastická deformace. Vlivem tváření materiálu za studena dochází k deformaci zrn. S tím je spojen výskyt těchto napětí. Řešením je zde rekrytalizační žíhání, během kterého dochází k rekrytalizaci struktury a vzniku nových zrn. Díky tomuto procesu dojde k odstranění většiny zbytkových napětí.[6]

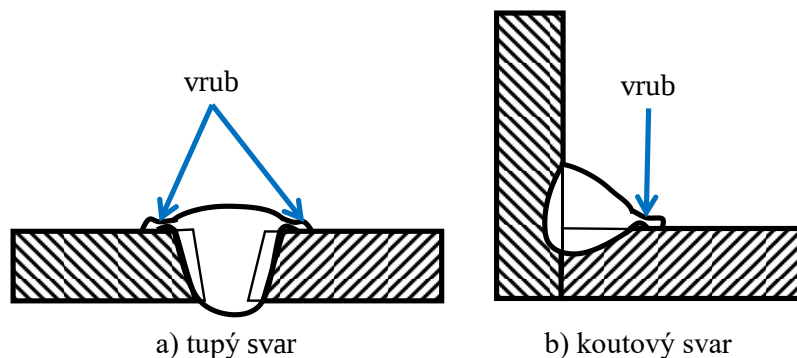
### b) Nesouosost

Nesouosost má za následek vznik sekundárních ohybových napětí, která snižují únavovou pevnost. Například axiální nesouosost vede k nárůstu axiální síly působící na svarovou patu. Graficky znázorněno na Obr. 9. V některých přístupech, například AWS D1.1/D1.1M:2015 je tento nárůst vyjádřen příslušným koeficientem.[8]

Obr. 9 Axiální nesouosost ( $e$  – axiální vyosení,  $F$  – působící síla) [8]

### c) Vruby

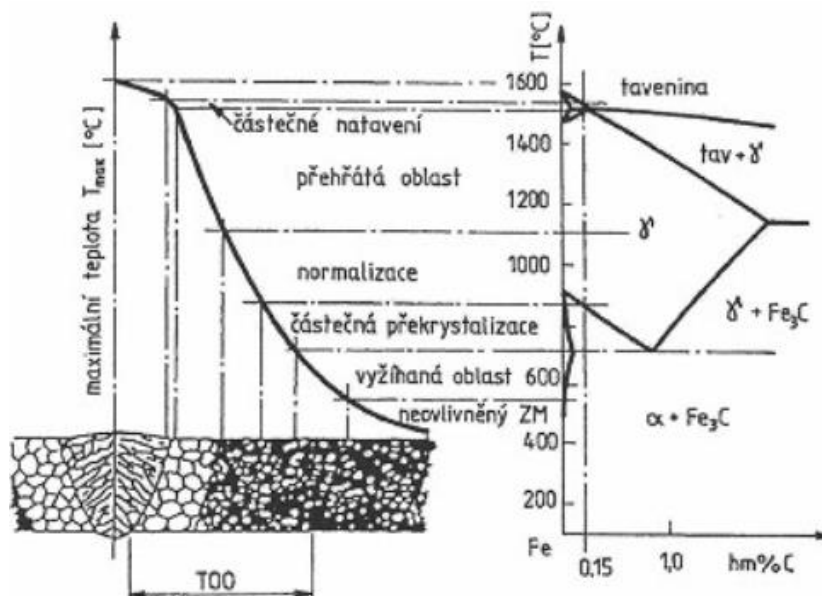
Jsou součástí každého svaru a mají vliv na pevnost. Jak výrazný je tento vliv, záleží na jejich provedení. Tvoří se v patě svaru. Při nedokonalém provedení se mohou vytvořit až přelivy. Jedná se o strukturální diskontinuity, které mají za následek oslabení celkové pevnosti svaru. Vznik přelivů může být způsobem nevhodně zvolenými parametry svařovací soustavy.[17]



Obr. 10 Přelivy svarového kovu[17]

### d) Tepelně ovlivněná oblast (TOO)

Hlavním faktorem je zde samotná technologie svařování. Vlivem vysokých teplot je ovlivněna struktura materiálu v blízké oblasti svaru. To má za následek částečnou nebo úplnou změnu mechanických vlastností svařovaného materiálu. K těmto změnám dochází pouze u materiálů s polymorfní přeměnou. [16]



Obr. 11 Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje[16]

## 2 NORMOVANÉ PŘÍSTUPY HODNOCENÍ SVARŮ

Z hlediska počtu zatěžujících cyklů se svarové spoje rozdělují do těchto skupin:[5]

### Skupina I – statické zatížení

Jedná se o zatížení statické, u kterých je počet cyklů během předpokládané doby životnosti v rozmezí  $N' = (0 \text{ až } 5 \cdot 10^3)$ .

### Skupina II – dynamické zatížení

Jedná se o zatížení dynamické, u kterých je počet cyklů během předpokládané doby životnosti v rozmezí  $N' = (5 \cdot 10^3 \text{ až } 2 \cdot 10^6)$ .

### Namáhání na únavu

K tomuto stavu dochází, pokud je překročena hranice meze únavy hodnoceného materiálu. V základním materiálu se mohou začít objevovat a růst mikroskopické trhliny, z nichž následně vzniká únavový lom.

Podle charakteru zatěžování svarových spojů se zatížení uvažuje buď jako stálé (např. vlastní hmotnost) nebo proměnné (např. cyklické). Mimo toho se mohou vyskytovat rázy, které zvětšují dynamické zatížení. Jejich účinek je dán dynamickým součinitelem rázu  $\varphi$ , voleno dle ČSN 05 0120.

Velikost zatížení lze pak obecně vyjádřit:[5]

$$F = F_m \pm \varphi F_a \quad (1)$$

$$M = M_m \pm \varphi M_a \quad (2)$$

kde:

$F_m$  stálá síla nebo střední síla při cyklickém zatížení

$F_a$  amplituda síly

$M_m$  stálý moment nebo střední moment při cyklickém zatížení

$M_a$  amplituda momentu

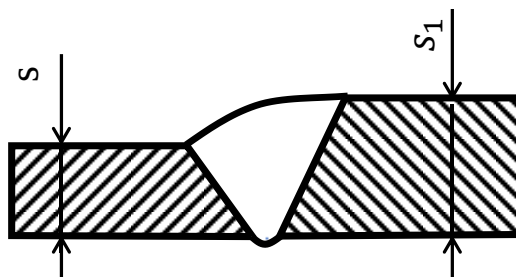
### 2.1 ČSN 05 0120

#### 2.1.1 PLATNOST

Tato norma platí pro výpočet svarových spojů strojních konstrukcí vyrobených z uhlíkových ocelí pevnostní řady 350 až 520 MPa, jsou-li provozní teploty v rozmezí od -20 °C až do +150 °C. Neuvažuje se vznik náhlých křehkých lomů, změna mechanických hodnot materiálu způsobených teplotou a vliv vlastních pnutí. Neplatí pro výpočet svarových spojů těch konstrukcí, pro které platí vlastní normy např. pro jeřáby, rypadla, tlakové nádoby a potrubí. Platí pouze pro případy, kdy je počet cyklů zatížení do maximální hodnoty  $N' = 2 \cdot 10^6$ . [5]

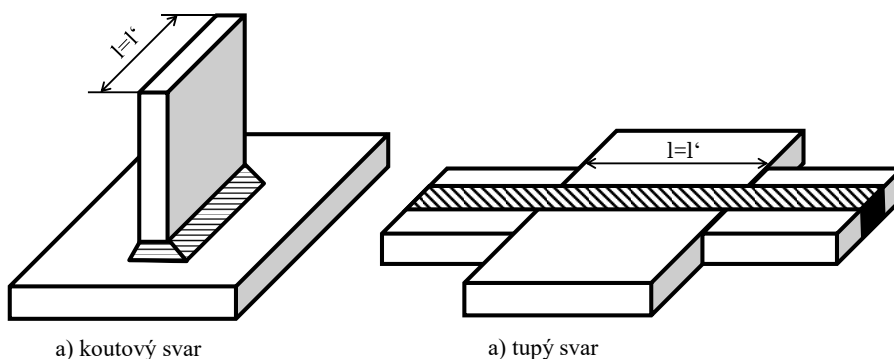
### 2.1.2 JMENOVITÉ NAPĚTÍ

Pro výpočet napětí ve svarovém spoji je základem určení nosného průřezu svaru  $S_{SV}$ . Tento průřez se liší v závislosti na typu svaru. Pro tupý svar se vychází z tloušťky svařovaných částí, značeno  $s$  (Obr. 12). Vždy se volí menší tloušťka. Způsob provedení povrchu svaru se neuvažuje.



Obr. 12 Tloušťka svařovaných částí[5]

U koutových svarů je nosný průřez závislý na výšce svaru  $a$ . Minimální výška koutového svaru je volena dle ČSN 05 0120. Společným parametrem je výpočtová délka svaru  $l$ , kde se uvažuje s počátečními a koncovými náběhy. Délku náběhu je možné eliminovat vhodným navržením svaru (Obr. 13). V takovém případě platí, že výpočtová délka svaru je totožná s celkovou délkou svaru.



Obr. 13 Eliminace délky náběhu[5]

Výška svaru:

$$a = 0,7t \quad (3)$$

kde:

$t$  tloušťka koutového svaru.

Výpočtová délka svaru:

**a) Tupý svar (Obr. 14a)**

$$l = l' - 2s \quad (4)$$

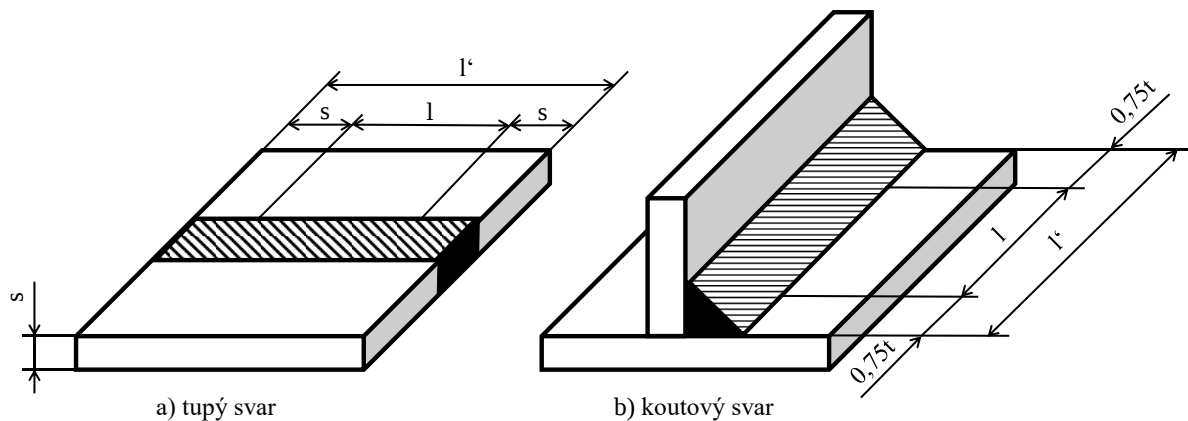
kde:

$l'$  celková délka svaru

$s$  tloušťka základního materiálu

**b) Koutový svar (Obr. 14b)**

$$l = l' - 1,5t \quad (5)$$



Obr. 14 Výpočtová délka svaru[5]

Pak nosný průřez je dán pro:

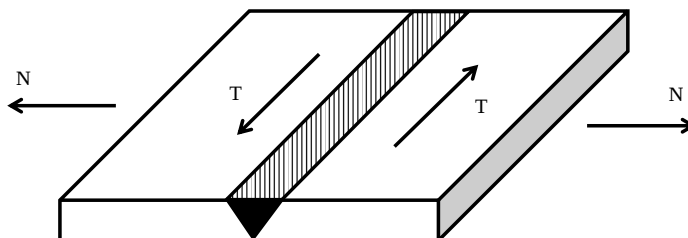
**a) Tupý svar**

$$S_{SV} = sl \quad (6)$$

**b) Koutový svar**

$$S_{SV} = al \quad (7)$$

Pokud je svar namáhán ohybovým nebo kroučícím momentem, nosný průřez je sklopen do roviny připojení, kde se určuje modul průřezu pro ohyb ( $W_{OSV}$ ) nebo krut ( $W_{KSV}$ ). Základní vzorce se nachází v tabulované podobě dle ČSN 05 0120.



Obr. 15 Svařovaný detail [5]

V určeném průřezu (Obr. 15) se stanoví jmenovité napětí ze vzorců:

$$\sigma_{\perp} = \frac{N}{S_{SV}} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{T}{S_{SV}} \quad (9)$$

kde:

$\sigma_{\perp}$             normálové napětí kolmé na osu svaru

$\tau$                 smykové napětí

$N$                 normálová síla

$T$                 posouvající síla.

Vzorce pro výpočet jmenovitých napětí pro jiné případy zatížení a jiné geometrii svaru viz. norma ČSN 05 0120.

### 2.1.3 DOVOLENÉ NAPĚTÍ

#### Skupina I – statické zatížení

Pro posouzení bezpečnosti svaru se stanovuje dovolené napětí, které vychází z meze kluzu v tahu základního materiálu. Dovolené napětí je pro koutové a tupé svary dáno vynásobením dovoleného napětí základního materiálu  $\sigma_D$  převodním součinitelem  $\alpha$  dle ČSN 05 0120. Tento součinitel zohledňuje druhy namáhání (tah, tlak,..).

Platí:

$$\sigma_{DSV} = \alpha \frac{\sigma_{KT}}{n} = \alpha \sigma_D \quad (10)$$

$$\tau_{DSV} = \alpha_{\tau} \frac{\sigma_{KT}}{n} = \alpha_{\tau} \sigma_D \quad (11)$$

kde:

$\sigma_{DSV}$             dovolené napětí svaru v tahu

$\tau_{DSV}$             dovolené napětí svaru ve smyku

$\sigma_{KT}$             mez kluzu v tahu

$\alpha; \alpha_{\tau}$             převodní součinitel svarového spoje

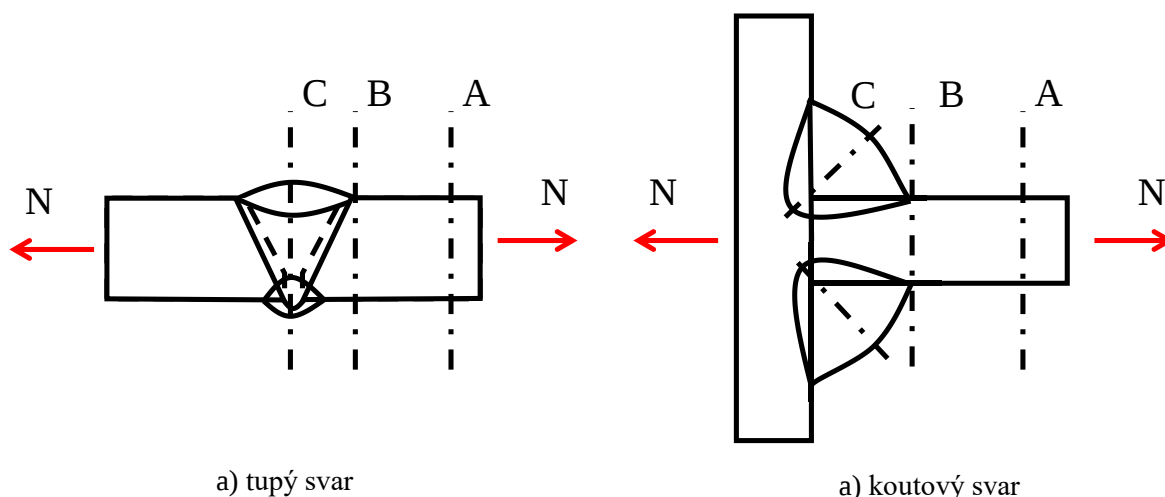
$\sigma_D$             dovolené napětí v tahu

$n$                 součinitel bezpečnosti

Pro skupinu I se volí  $n = 1,5$  (není-li stanoveno jinak).

## Skupina II – dynamické zatížení

V této skupině svarových spojů je rozhodujících několik veličin. Mez únavy, druh svaru, charakter namáhání (tah, tlak, ohyb, krut, smyk) a způsob zatížení (pulsující, mívivé, střídavé). Pro stanovení meze únavy slouží Smithovy diagramy. Volba diagramu uvažovaného svarového spoje se provede pro směrodatný průřez A, B nebo C (Obr. 16). Dále jsou tyto diagramy definovány podle tříd provedení svaru dáno ČSN 05 0120. Tyto třídy definují jakost svarového spoje. Předmětem hodnocení jsou zde tyto vlastnosti: tvar povrchu svaru, převýšení svaru, hloubka zápalu, provedení krycí vrstvy a provedení kořene svaru.



Obr. 16 Směrodatné průřezy [5]

Platí:

### a) Pro dané střední napětí

$$\sigma_{AD} = \frac{\sigma_A^x}{n}; \tau_{AD} = \frac{\tau_A^x}{n} \quad (12)$$

### b) Pro střídavé souměrné namáhání

$$\sigma_{AD} = \frac{\sigma_C^x}{n}; \tau_{AD} = \frac{\tau_C^x}{n} \quad (13)$$

kde:

- $\sigma_A^x; \tau_A^x$  mez únavy svaru nebo základního materiálu pro dané střední napětí
- $\sigma_C^x; \tau_C^x$  mez únavy svaru nebo základního materiálu při střídavém souměrném namáhání
- $\sigma_{AD}; \tau_{AD}$  dovolené napětí při dynamickém namáhání

Pro skupinu II se volí  $n = 1,5$  až 3 (není-li stanoveno jinak).

**2.1.4 PODMÍNKY PEVNOSTI****Skupina I – statické zatížení**

Tupé svary musí vyhovovat těmto podmínkám:

$$\sigma_{\perp} \leq \alpha_{\perp} \frac{\sigma_{KT}}{n} \quad (14)$$

$$\sigma_{\parallel} \leq \frac{\sigma_{KT}}{n} \quad (15)$$

$$\tau \leq \alpha_{\tau} \frac{\sigma_{KT}}{n} \quad (16)$$

$$\sigma_S = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\perp}}{\alpha_{\perp}}\right)^2 + \sigma_{\parallel}^2 - \frac{\sigma_{\perp}\sigma_{\parallel}}{\alpha_{\perp}} + 3\left(\frac{\tau}{\alpha_{\tau}}\right)^2} \leq \frac{\sigma_{KT}}{n} \quad (17)$$

kde:

|                                 |                                          |
|---------------------------------|------------------------------------------|
| $\sigma_S$                      | redukované normálové napětí              |
| $\sigma_{\perp}$                | normálové napětí kolmé na osu 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   |
| $\alpha_{\perp}; \alpha_{\tau}$ | převodní součinitel svarového spoje      |
| $\sigma_{KT}$                   | mez kluzu v tahu                         |
| $n$                             | součinitel bezpečnosti                   |

Koutové svary musí vyhovovat podmínce (Obr. 17):

$$\tau_S = \sqrt{\left(\frac{\tau_{\perp}}{\alpha_{\tau\perp}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel}}{\alpha_{\tau\parallel}}\right)^2} \leq \beta \frac{\sigma_{KT}}{n} \quad (18)$$

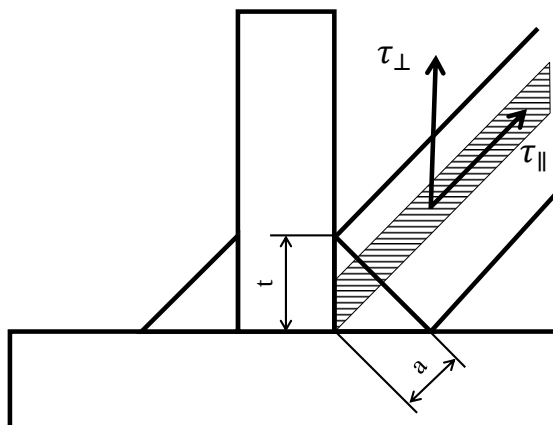
kde:

|                                              |                                     |
|----------------------------------------------|-------------------------------------|
| $\alpha_{\tau\perp}; \alpha_{\tau\parallel}$ | převodní součinitel svarového spoje |
| $\tau_S$                                     | redukované smykové napětí           |
| $\beta$                                      | součinitel tloušťky koutového svaru |

Pro:

$$t < 10 \text{ mm} \Rightarrow \beta = 1,3 - 0,03t$$

$$t \geq 10 \text{ mm} \Rightarrow \beta = 1$$



Obr. 17 Koutový svar[5]

### Skupina II – dynamické zatížení

Svarové spoje patřící do této skupiny musí vyhovovat ve všech průřezech těmto podmínkám:

#### a) Prosté namáhání

$$\sigma_a \leq \frac{\sigma_{Ax} (I \text{ až } IX)}{n} \text{ nebo } \tau_a \leq \frac{\tau_{Ax} (I \text{ až } IX)}{n} \quad (19)$$

#### b) Kombinované namáhání

$$\sigma_{as} \leq \frac{\sigma_{Ax} (I \text{ až } IX)}{n} \text{ nebo } \tau_{as} \leq \frac{\tau_{Ax} (I \text{ až } IX)}{n} \quad (20)$$

kde:

$\sigma_a; \tau_a$  amplituda napětí cyklu ve svaru nebo v základním materiálu pro prosté namáhání

$\sigma_{as}; \tau_{as}$  amplituda napětí cyklu ve svaru nebo v základním materiálu pro kombinované namáhání

I až IX označení křivky ve Smithově diagramu pro daný materiál

$\sigma_{Ax}^x, \tau_{Ax}^x$  mez únavy základního materiálu (řez A)

$\sigma_{A(II \text{ až } IX)}^x, \tau_{A(II \text{ až } IX)}^x$  mez únavy svarového spoje (řez B, C)

Tyto hodnoty se určí ze Smithových diagramů.

### 2.1.6 ZHODNOCENÍ

Tento přístup hodnocení je volen, pokud svarová konstrukce náleží do skupiny zatížení v rozmezí  $N' = (0 \text{ až } 2 \cdot 10^6)$  cyklů. Vhodný pro jednoduché svarové konstrukce, které pracují za normálních podmínek tzn. není vystavena vysokým teplotám a korozním vlivům. Norma je určena zejména pro výpočet jmenovitého napětí vlivem normálové a posouvající síly. Dále je klíčové přesně určit nosný průřez, což u složitějších konstrukcí nemusí být tak jednoznačné. Při vyhodnocení je cílem dosáhnout, aby hodnota jmenovitého napětí byla menší než dovolená hodnota napětí pro daný materiál. Ideální pro prostý tah a tlak. Lze použít i pro namáhání na krut a ohyb, nicméně zde je norma omezená na několik málo charakteristických případů. Proto je vhodnější pro krut a ohyb použít metodu extrapolovaných napětí.

## 2.2 ČSN EN 1993-1-9

### 2.2.1 PLATNOST

Tato norma definuje metody pro posouzení únavové odolnosti nosných prvků, přípojů a spojů, vystavených únavovému zatížení, které nastává při hranici počtu cyklů  $N' = 2 \cdot 10^6$ . Tyto metody vychází z únavových zkoušek velkého množství vzorků, které zahrnují účinky geometrických a strukturních imperfekcí, vzniklých při výrobě materiálu a při provádění konstrukce jako jsou účinky rozměrových úchylek a zbytkových napětí po svařování. Norma platí pouze pro materiály vyhovující požadavkům na houževnatost dle EN 1993-1-10. Použitelnost křivek únavové pevnosti obsažených v normě je omezeno na normální atmosférické podmínky. Korozní účinky a poškození mikrostruktury vlivem vysoké teploty není uvažováno. [22]

### 2.2.2 METODY HODNOCENÍ

Hodnocení na únavu je založeno na jedné z těchto metod:[22]

#### a) Metoda přípustných poškození

Metoda má s přijatelnou úrovní spolehlivosti zajistit, že konstrukce bude plnit svoji funkci po dobu návrhové životnosti. Předpokladem je dodržení kontrol a řádné údržby pro zajištění a opravu únavových poškození. Tuto metodu lze použít pouze u staticky neurčitých svarových konstrukcí, kde je v případě vzniku únavového lomu zajištěn přenos vnitřních sil ostatními prvky konstrukce. Přístupy pro dosažení potřebné spolehlivosti:

- výběrem detailů, materiálů a úrovně namáhání tak, aby při vzniku trhliny byla zaručena malá rychlost růstu trhliny a velká kritická délka trhliny
- zajištěním více cest pro přenos zatížení
- použitím detailů, umožňujících zastavení růstu trhliny
- použitím detailů snadno kontrolovatelných při pravidelných kontrolách

#### b) Metoda bezpečné životnosti

Metoda má s přijatelnou úrovní spolehlivosti zajistit, že konstrukce bude plnit svoji funkci po dobu návrhové životnosti bez nutnosti kontroly a údržby únavových poškození. Vhodné použití v případech, kdy vznik lokální trhliny může negativně ovlivnit nosný prvek. Přístupy pro dosažení potřebné spolehlivosti:

- výběrem detailů a úrovně namáhání, jejichž výsledkem je únavová životnost, postačující k dosažení  $\beta$ -hodnot, požadovaných pro ověření mezních stavů únosnosti na konci návrhové životnosti konstrukce

Poznámka: Pro posouzení na únavu dle ČSN EN 1993-1-9 se potřebná hodnota spolehlivosti může dosáhnout i pomocí dílčích součinitelů spolehlivosti únavové pevnosti  $\gamma_{Mf}$ . Ty se liší podle zvolené metody podle Tab. 1.

Tab. 1 Doporučené hodnoty dílčích součinitelů únavové pevnosti  $\gamma_{Mf}$ [22]

| Metoda hodnocení    | Důsledky porušení |         |
|---------------------|-------------------|---------|
|                     | Mírné             | Závažné |
| Přípustná poškození | 1,00              | 1,15    |
| Bezpečná životnost  | 1,15              | 1,35    |

### 2.2.3 KATEGORIE DETAILU

Udává číselné označení konstrukčního detailu namáhaného proměnným napětím daného směru. Z tohoto označení vychází křivka únavové pevnosti, která se použije pro posouzení na únavu. Nejvýše lze dosáhnout kategorie 160, kdy není možné dosáhnout lepší únavové pevnosti při libovolném počtu cyklů. S nižším číselným označením se tyto vlastnosti zhoršují. [22]

### 2.2.4 VÝPOČET NAPĚTÍ

Ve svarech se uvažuje výskyt napětí (Obr. 18), která se posuzují nezávisle na sobě. Jmenovitá napětí se počítají v nebezpečném průřezu, tj. v místě možného vzniku únavové trhliny. Pravděpodobné místo iniciace trhliny pro konkrétní případy je graficky znázorněno v ČSN EN 1993-1-9.

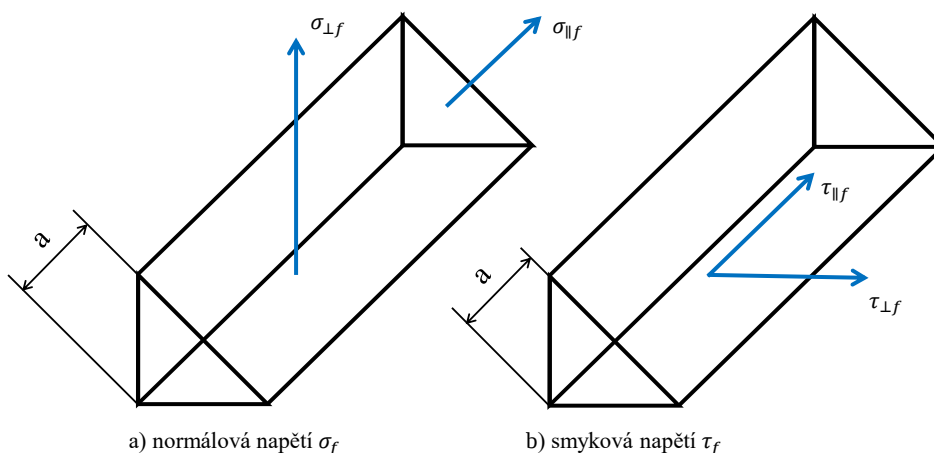
Platí:

#### a) normálové napětí $\sigma_{\perp}$

$$\sigma_{\perp} = \sqrt{\sigma_{\perp f}^2 + \tau_{\perp f}^2} \quad (21)$$

#### b) smykové napětí $\tau_{\parallel}$

$$\tau_{\parallel} = \tau_{\parallel f} \quad (22)$$



Obr. 18 Napětí uvažovaná v koutových svarech [22]

Při koncentraci napětí v detailech, které nejsou uvedeny v tabulkách se tyto účinky vyjádří pomocí součinitele koncentrace napětí dáno ČSN EN 1993-1-9. Vynásobením nominálního napětí se součinitelem koncentrace napětí získáme hodnotu modifikovaného jmenovitého napětí.

### 2.2.5 ROZKMIT NAPĚTÍ

Vlivem kmitavého charakteru zatížení svarové konstrukce jmenovitým napětím, dochází ke kumulaci napětí v nebezpečném průřezu, což může vést až ke vzniku únavové trhliny. Únavová pevnost těchto rozkmitů je pak dána Wöhlerovými křivkami viz. ČSN EN 1993-1-9.

Norma udává tyto způsoby:

#### a) Rozkmit jmenovitých napětí

Základem jsou konstrukční detaily, které jsou tabulovány v ČSN EN 1993-1-9. Platí:

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_i \dots \lambda_n \Delta \sigma (\gamma_{Ff} Q_k) \quad (23)$$

$$\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_i \dots \lambda_n \Delta \tau (\gamma_{Ff} Q_k) \quad (24)$$

kde:

|                                                                  |                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}, \gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2}$ | představují návrhovou hodnotu rozkmitů jmenovitých napětí                                         |
| $\Delta \sigma (\gamma_{Ff} Q_k), \Delta \tau (\gamma_{Ff} Q_k)$ | rozkmit napětí vyvolané únavovým zatížením, stanoveným v EN 1991                                  |
| $\lambda_i$                                                      | součinitelé ekvivalentního únavového poškození, závisující na spektrech specifikovaných v EN 1993 |

**c) Rozkmit modifikovaných jmenovitých napětí**

Využívá se pro detaily s náhlou změnou průřezu v místě iniciace únavové trhliny. Jedná se o případy, které nejsou uvedené v ČSN EN 1993-1-9. Platí:

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} = k_f \lambda_1 \lambda_2 \lambda_i \dots \lambda_n \Delta \sigma (\gamma_{Ff} Q_k) \quad (25)$$

$$\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2} = k_f \lambda_1 \lambda_2 \lambda_i \dots \lambda_n \Delta \tau (\gamma_{Ff} Q_k) \quad (26)$$

kde:

$k_f$  součinitel koncentrace napětí, vyjadřující místní zvýšení napětí v závislosti na geometrii detailu, které není zahrnuto v příslušné  $\Delta \sigma_R - N$  křivce únavové pevnosti

$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}, \gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2}$  představují návrhovou hodnotu rozkmitů modifikovaných jmenovitých napětí

Hodnoty  $k_f$  lze stanovit z příruček nebo vhodným použitím MKP.

**c) Rozkmit extrapolovaných jmenovitých napětí**

Určeno pro detaily s vysokým gradientem napětí v těsné blízkosti paty svaru. Typicky při přechodu svarů do základního materiálu. Uvedeno v příloze ČSN EN 1993-1-9. Platí:

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} = k_f (\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}^*) \quad (27)$$

kde:

$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}^*$  představuje návrhovou hodnotu rozkmitů napětí vypočtená pro zjednodušený model příhradové konstrukce s kloubovými styčníky

**2.2.6 POSOUZENÍ SVARU**

Libovolně zvolená metoda pro zjištění rozkmitu jmenovitého, modifikovaného jmenovitého nebo extrapolovaného jmenovitého napětí musí splňovat tyto podmínky:

**a) pro rozkmit normálových napětí**

$$\Delta \sigma \leq 1,5 \sigma_{KT} \quad (28)$$

kde:

$\sigma_{KT}$  mez kluzu v tahu

$\Delta \sigma, \Delta \tau$  rozkmit napětí

**b) pro rozkmit smykových napětí**

$$\Delta \tau \leq 1,5 \sigma_{KT} / \sqrt{3} \quad (29)$$

Dále musí splňovat:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (30)$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (31)$$

Pokud není pro kategorie únavové pevnosti v ČSN EN 1993-1-9 stanoveno jinak, musí platit při kombinaci rozkmitů normálových a smykových napětí následující:

$$\left( \frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_C / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_C / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1,0 \quad (32)$$

kde:

$\Delta \sigma_C, \Delta \tau_C$  referenční únavová pevnost při  $N = 2 \cdot 10^6$  cyklů

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

### 2.2.7 ZHODNOCENÍ

Tento přístup hodnocení je vhodný pro svarové konstrukce, u kterých se očekává, že budou vystaveny účinkům dlouhodobého cyklického zatížení. Metoda je založená na rozkmitu napětí. Jsou zde provedeny výpočty, které zajišťují, že nedojde k porušení materiálu vlivem únavy před dosažením kritického počtu cyklů pro hodnocený základní materiál. Toho je dosaženo navržením optimální hodnoty rozkmitu napětí (normálového, smykového), které musí splňovat podmínky (2.2.6). Koncentrátory napětí jako jsou strukturní nedokonalosti, zbytkové napětí nebo TOO jsou zahrnuty v jednotlivých kategoriích detailu, které jsou tabulovány. Ideální pro např.: tlakové nádoby, pozemní stavby. Metoda zanedbává vliv vysokých teplot a koroze.

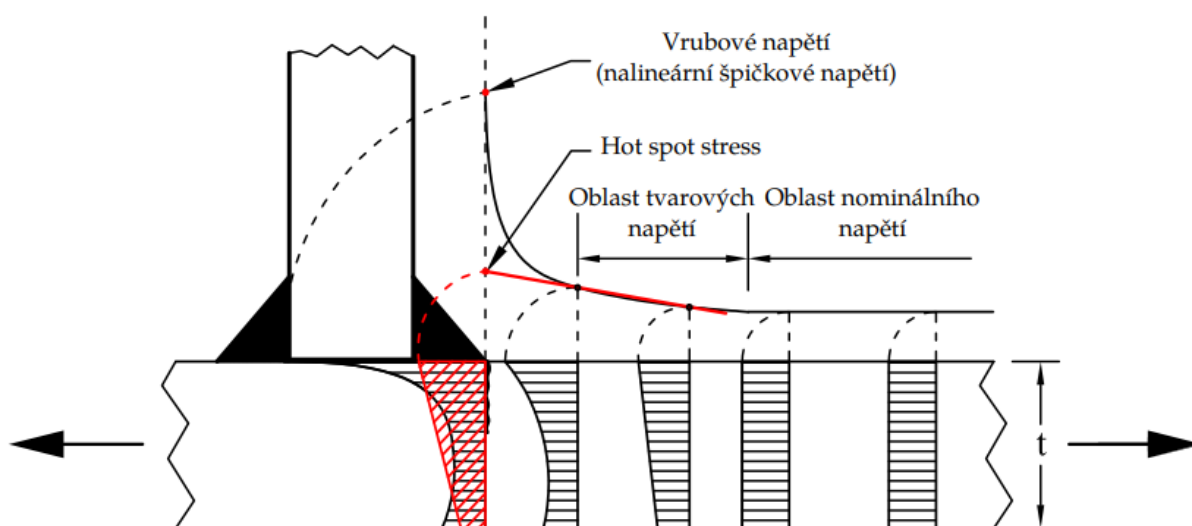
### 3 HODNOCENÍ DLE INSTITUCÍ

#### 3.1 IIW (INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING)

Hlavním zaměřením této organizace je vytvoření základních parametrů pro analýzu a návrh svarových konstrukcí. Je určena pro proměnlivé zatížení s cílem prevence proti selhání vlivem únavy. K tomu slouží metody založené na vyhodnocení napětí svaru jako jsou:

- Metoda jmenovitého napětí (nominal stress method)
- Metoda tvarového napětí (structural stress method)
- Metoda vrubového napětí (effective notch stress method)

Metody jsou zpracovány pro hodnocení únavy kořene a paty svaru.



Obr. 19 Metody IIW pro posouzení svarů[20]

##### 3.1.1 PLATNOST

Určeno pro svařování nízkolegovaných a uhlíkových ocelí s pevností menší než 600 MPa, kde poměr meze kluzu k mezi pevností je 0,8 a tažnost > 12 %. Předpokládá se svařování obalenými elektrodami v ochranném plynu nebo pod tavidlem. [11]

##### 3.1.2 FAT KATEGORIE

Jedná se obdobu kategorie detailu v normovaném přístupu ČSN EN 1993-1-9. Pro jednotlivé svarové konstrukce vychází křivky únavové pevnosti. FAT kategorie jsou tabulovány v příslušné literatuře.

##### 3.1.3 POSOUZENÍ NA ÚNAVU

Jedná se o závěrečnou část všech metodik podle směrnice IIW. Výstupem je počet cyklů do selhání vlivem únavy. Pro posouzení na únavu se vychází z FAT kategorií, podle nichž jsou stanoveny Wöhlerovy křivky. Křivky jsou vyjádřeny:

$$N' = \frac{C'}{\Delta\sigma^m} \quad (33)$$

$$N' = \frac{C'}{\Delta\tau^m} \quad (34)$$

kde:

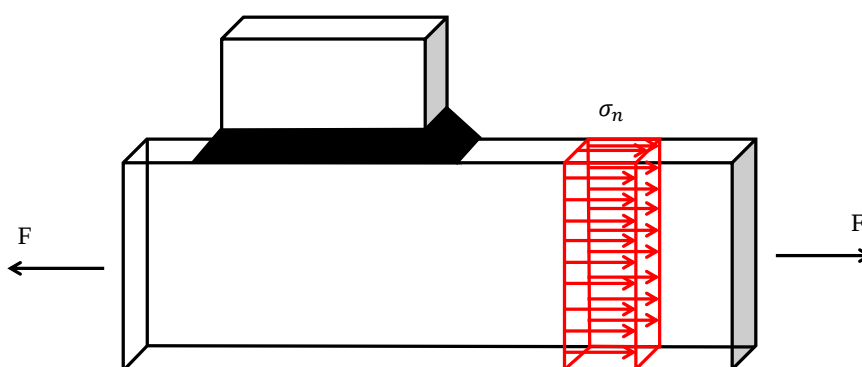
$N'$  počet cyklů během předpokládané doby životnosti

$C'$  parametr určený lineární regresí

$\Delta\sigma^m, \Delta\tau^m$  výsledná hodnota rozkmitu napětí pro Wöhlerovu křivku

### 3.1.4 METODA JMENOVITÉHO NAPĚTÍ (NOMINAL STRESS METHOD)

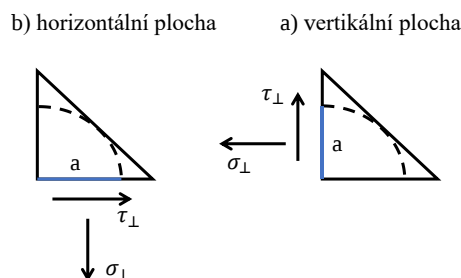
Jedná se o nejrozšířenější a nejpoužívanější metodu. Její použití spočívá ve stanovení jmenovitého napětí v daném průřezu základního materiálu. Průběh napětí graficky znázorněn na Obr. 20 jako veličina  $\sigma_n$ . Tato hodnota se porovná s přípustným napětím pro daný materiál. Při výpočtu se zanedbávají lokální faktory zvyšující napětí jako je např. zbytkové napětí nebo TOO, ale i mikro-geometrické faktory (napětí vyvolané samotným svařem). Pro využití této metody z hlediska únavy se stanují únavové křivky, které jsou dány příslušnou literaturou.[3][8]



Obr. 20 Definice jmenovitého napětí[20]

Jmenovité napětí je vyhodnoceno v uvažované oblasti okolí svaru. Metoda zahrnuje vliv makro-geometrických rysů (otvory, zakřivené profily, rohy) svařované konstrukce, které značně ovlivňují výslednou únavovou pevnost. Pro aplikování této metody je nutné, aby chování materiálu respektovalo Hookův zákon. [8]

K výpočtu jmenovitého napětí se využívá standartních formulí jako u normovaných přístupů (ČSN 05 120). Alternativou je řešení pro MKP. Základním parametrem je zde horizontální a vertikální plocha koutového svaru, reprezentována tloušťkou svaru  $t$ . Tato tloušťka je redukována na efektivní výšku svaru  $a$  (Obr. 21).



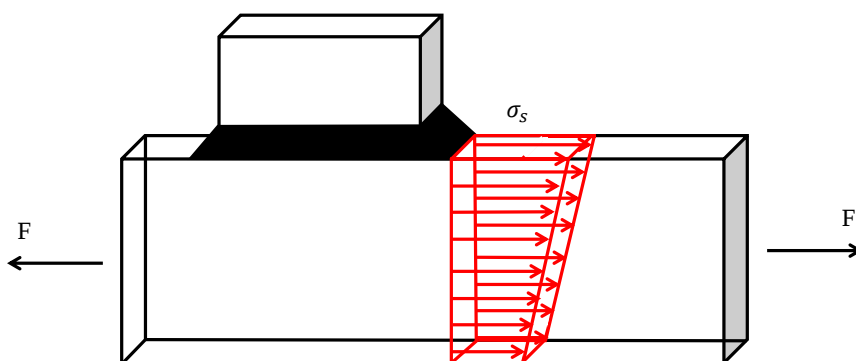
Obr. 21 Horizontální a vertikální plocha koutového svaru[7]

Pak celkové napětí ve svaru je definováno normálovou a smykovou složkou napětí jako samostatný vektor:

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2} \quad (35)$$

### 3.1.5 METODA TVAROVÉHO NAPĚTÍ (STRUCTURAL STRESS METHOD)

Do této skupiny hodnocení patří několik rozdílných přístupů. Řadí se sem metoda lokálního jmenovitého napětí a metoda extrapolovaného napětí hot-spot. Rozlišuje se způsob hodnocení v závislosti na kořenu nebo paty svaru. Každý z přístupů zahrnuje vliv geometrie konstrukce se zanedbáním vlivu samotného svaru na výsledný průběh napětí. Ten je graficky znázorněn na Obr. 22. jako veličina  $\sigma_s$ . Metody tvarového napětí zahrnují vliv nesouososti a dodatečného ohybu na průběh napětí.[7]

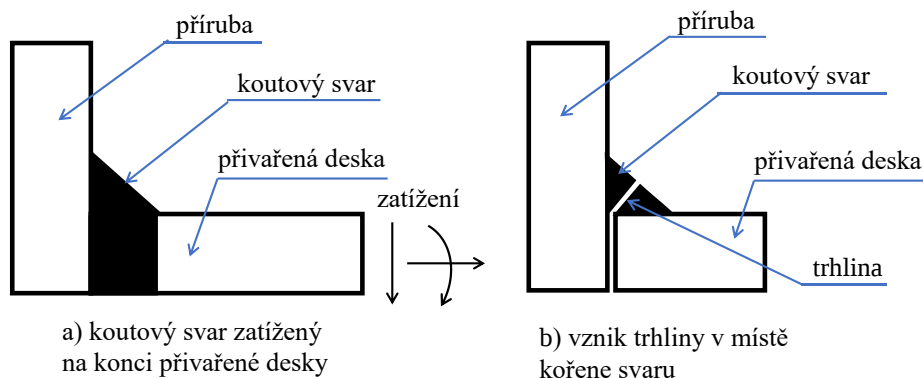


Obr. 22 Definice tvarového napětí[20]

Pro hodnocení kořene svaru se využívá vyhodnocení lokálního jmenovitého napětí. Pro hodnocení paty se využívá linearizace povrchového napětí (metoda extrapolovaného napětí hot-spot).[7]

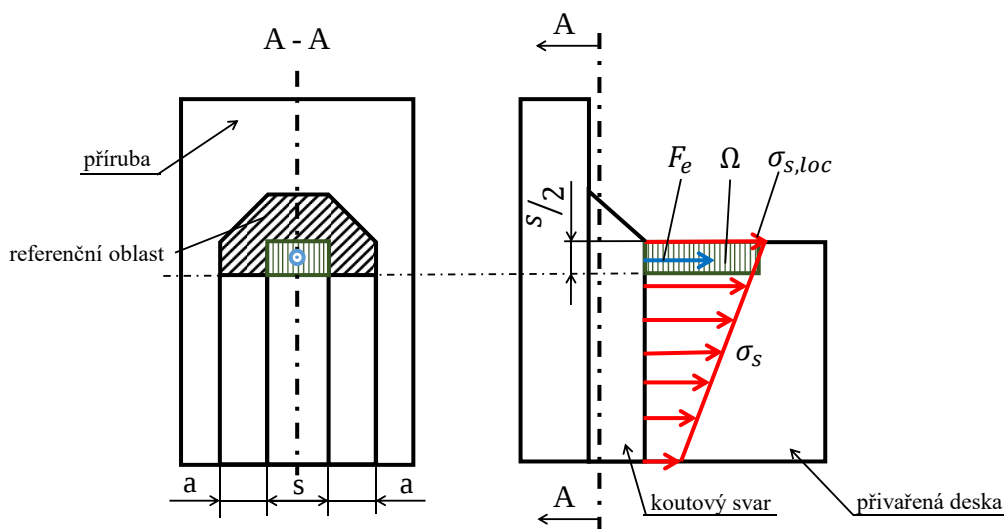
### 3.1.6 HODNOCENÍ KOŘENE SVARU S VYUŽITÍM LOKÁLNÍHO JMENOVITÉHO NAPĚTÍ

Lokální jmenovité napětí je odvozeno ze sil a momentů nebo z rozložení napětí ve svaru. V koutových svařích přenášejících zatížení přivařené desky (Obr. 23) je v rohu svařované konstrukce vyšší napětí. Jedná se speciální případ, kde lze využít tento přístup. V daném rohu je nebezpečné místo, které je nejnáchylnější na vznik trhliny v kořenu svaru. Při vyhodnocení se přístup zaměřuje pouze na kritické místo svaru a lokální (blízké) okolí. [7]



Obr. 23 Zatížení koutového svaru s koncentrací napětí v kořenu[7]

V tomto případě je svařovaná konstrukce zatížena obecným tahem (Obr. 24). Průběh napětí v konstrukci je znázorněn křivkou  $\sigma_s$ . Napětí má v přivařeném tělese kolmý charakter zatížení k ose svaru. Nevznikají žádné smykové napětí rovnoběžné k ose svaru. A je patrné, že směrem k rohu konstrukce dochází k výraznému nárůstu tohoto napětí. Proto se řešení omezí pouze na tuto lokální oblast. Jako nosný parametr je zde zvolena efektivní výška  $a$ . Referenční oblast  $\Omega$ , ve kterém je vyhodnoceno lokální jmenovité napětí je znázorněna v Obr. 24, zeleně vyšrafovaná část. Lokální napětí  $\sigma_{s,loc}$  vychází z celkového napětí  $\sigma_s$  vyvolané vnějším zatížením. Na základě napjatosti  $\sigma_{s,loc}$  v oblasti  $\Omega$  je vyjádřena síla  $F$ , která je v tomto případě kolmá na osu svaru. Posledním krokem je vyhodnoceno lokální jmenovité napětí.



Obr. 24 Koutový svar namáhán prostým tahem[23]

Vyjádření síly  $F$ :

$$F = \sigma_{s,loc} \frac{s^2}{2} \quad (36)$$

kde:

$\sigma_{s,loc}$  lokální napětí v oblasti  $\Omega$

$s$  tloušťka přivařené desky

Výsledné lokální jmenovité napětí ve svaru  $\sigma_{n,loc}$ :

$$\sigma_{n,loc} = \frac{F}{2(as) + a^2} \quad (37)$$

kde:

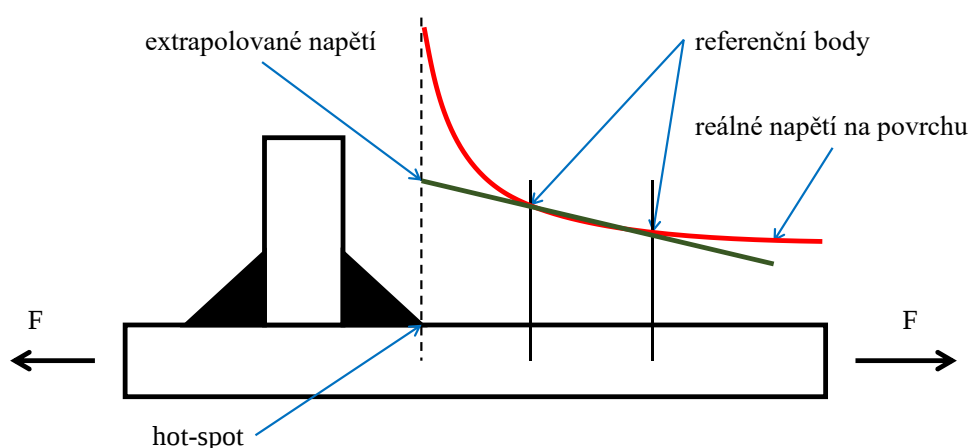
$s$  tloušťka desky

$a$  výška svaru

$F$  působící síla v oblasti  $\Omega$

### 3.1.7 HODNOCENÍ PATY SVARU POMOCÍ EXTRAPOLOVANÉHO NAPĚTÍ HOT-SPOT

Metoda se používá zejména pro složitější konstrukce. Jsou to případy, kdy jmenovité napětí není jednoduše definováno. Výstupem metody hot-spot je napětí  $\sigma_{hs}$ . Toto napětí je vyhodnoceno na povrchu dané svařované konstrukce. Graficky znázorněno na Obr. 25. Pro tuto situaci se využívá extrapolace v referenčních bodech, která následně určí napětí v patě svaru bez vlivu vrubů. [8]

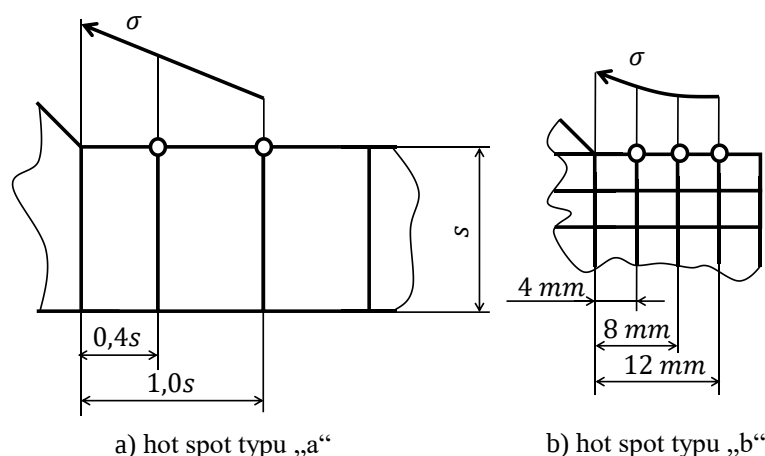


Obr. 25 Definice metody hot-spot[8]

Podle polohy na povrchu konstrukce a orientace k patě svaru se rozeznávají dva druhy extrapolovaných napětí typ „a“ a typ „b“. Rozdílem těchto dvou typů je, že každý využívá jiných parametrů k vyhodnocení dílčích napětí. U typu „b“ se první referenční bod nachází ve vzdálenosti 4 mm od svarové paty. To je vzhledem k malým rozměrům svařované konstrukce

a tloušťky koutového svaru dostatečná vzdálenost, aby nedošlo k ovlivnění výsledků extrapolace přítomností vrubu. Pokud by se ovšem jednalo o rozměrově větší svarovou konstrukci, došlo by v této vzdálenosti k ovlivnění výsledků vrubem. V takovém případě je volen hot-spot typu „a“, kde je vzdálenost prvního referenčního bodu závislá na tloušťce základního materiálu  $s$ . Konkrétně je hot-spot typu „b“ volen u konstrukcí s tloušťkou materiálu  $s \leq 10 \text{ mm}$ .

Dílčí napětí v referenčních bodech se stanoví pomocí linearizace povrchového napětí. Při vytváření modelů MKP je nutno přesně stanovit referenční body pro každý z těchto typů.



Obr. 26 Polohy referenčních bodů[8]

### 1. Typ „a“ (Obr. 26a)

Jedná se o extrapolované napětí na povrchu svarové paty. Finální síť má referenční body vzdálené od paty svaru  $0,4s$  a  $1,0s$ . Lineární extrapolace je dána vztahem:

$$\sigma_{hs} = 1,67\sigma_{0,4s} - 0,67\sigma_{1,0s} \quad (38)$$

kde:

$\sigma_{hs}$  extrapolované napětí pro hot-spot

$s$  tloušťka přivařené součásti

$\sigma_{0,4s}$  napětí ve vzdálenosti  $0,4s$  od paty svaru

$\sigma_{1,0s}$  napětí ve vzdálenosti  $1,0s$  od paty svaru

### 2. Typ „b“ (Obr. 26b)

Jedná se o extrapolované napětí na hraně svarové paty. Finální síť má referenční body vzdálené od paty svaru  $4 \text{ mm}$ ,  $8 \text{ mm}$  a  $12 \text{ mm}$ . Lineární extrapolace je dána vztahem:

$$\sigma_{hs} = 3\sigma_{s4mm} - 3\sigma_{s8mm} + \sigma_{s12mm} \quad (39)$$

kde:

$\sigma_{hs}$  extrapolované napětí pro hot-spot

$\sigma_{s4mm}$  napětí ve vzdálenosti 4 mm od paty svaru

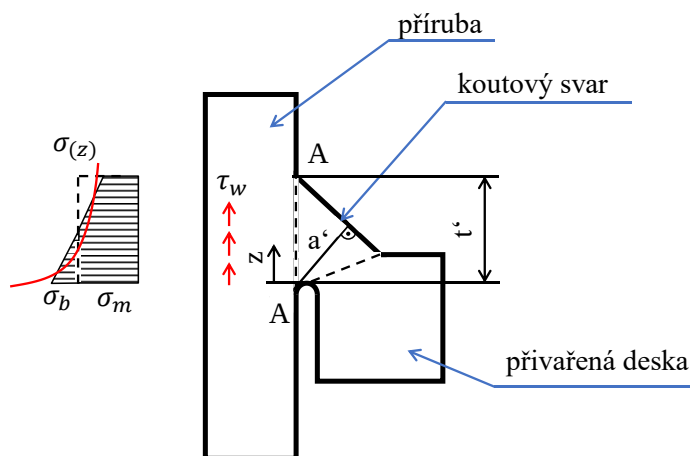
$\sigma_{s8mm}$  napětí ve vzdálenosti 8 mm od paty svaru

$\sigma_{s12mm}$  napětí ve vzdálenosti 12 mm od paty svaru

### 3.1.8 LINEARIZACE POVRCHOVÉHO NAPĚTÍ

Jedná se o princip, na kterém je založena metoda hot-spot. Linearizované napětí se určí s ohledem na efektivní výšku svaru  $a$ , která je navíc rozšířena o jeho kořenovou část. Je převážně charakterizováno normálovým napětím. Princip spočívá v lineární aproximaci normálového napětí působícího na povrch svařované konstrukce. Tloušťka svaru nesmí přesáhnout tloušťku přivařené desky. Linearizace se používá pro MKP s objemovými prvky. [7]

Celkové napětí  $\sigma_s$  je rozloženo na tři složky v referenčních bodech. Membránové napětí  $\sigma_m$ , ohybové napětí  $\sigma_b$  a špičkové napětí  $\sigma_p$ . Pomocí metody hot-spot je napětí zbaveno vlivu špičkového napětí (vliv svaru). Graficky znázorněno na Obr. 27.



Obr. 27 Linearizace napětí v oblasti A-A[9]

Definice linearizace pomocí příslušných integrálů:[24]

$$\sigma_m = \frac{1}{t'} \int_0^{t'} \sigma(z) dz \quad (40)$$

$$\sigma_b = \frac{6}{t'^2} \int_0^{t'} (\sigma(z) - \sigma_m) \left( \frac{t'}{2} - z \right) dz \quad (41)$$

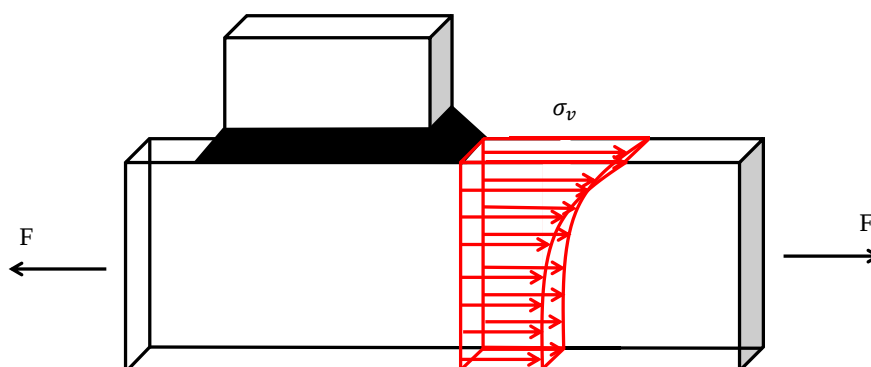
$$\sigma_p = (\sigma(z) - \sigma_m) - \left( 1 - \frac{2 \cdot z}{t'} \right) \cdot \sigma_b \quad (42)$$

kde:

|             |                                                          |
|-------------|----------------------------------------------------------|
| $\sigma_m$  | membránové napětí                                        |
| $\sigma_b$  | ohybové napětí                                           |
| $\sigma_p$  | špičkové napětí                                          |
| $t'$        | tloušťka koutového svaru rozšířená o jeho kořenovou část |
| $\sigma(z)$ | normálové napětí ve svaru                                |
| $(z)$       | zobecněná souřadnice                                     |

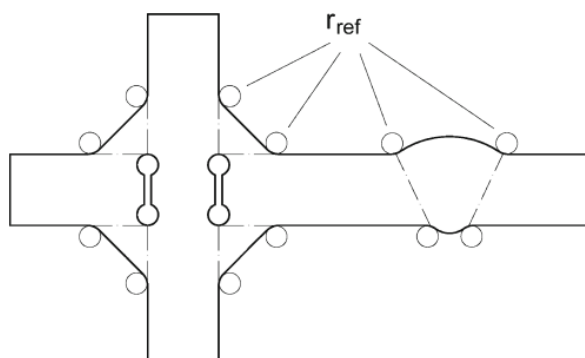
### 3.1.9 METODA VRUBOVÉHO NAPĚTÍ (EFFECTIVE NOTCH STRESS METHOD)

Metoda vrubového napětí je navržena tak, aby co nejpřesněji zachytila napjatost svařované konstrukce. Kromě makro-geometrických faktorů se uvažuje i napětí vyvolané samotnou geometrií svaru. Toto napětí je způsobeno například ostrými zářezy (respektive poloměry ve svarové patě a kořenu), úhlem zkosení svaru nebo provedením povrchu svaru. Průběh napětí graficky znázorněn na Obr. 28 jako veličina  $\sigma_v$ . [2][8]



Obr. 28 Definice vrubového napětí[20]

Efektivní vrubové napětí lze vyjádřit na základě referenčního poloměru, kterými jsou nahrazeny vruby v místě kořene nebo paty svaru. Metoda se standardně využívá pro hodnocení svařovaných konstrukcí o tloušťce  $s \geq 5 \text{ mm}$ . V takovém případě je dán referenční poloměr  $r_{ref} = 1 \text{ mm}$ . Graficky znázorněna na Obr. 29. Pokud se jedná o konstrukce s tloušťkou  $s \leq 5 \text{ mm}$ , pak  $r_{ref} = (0,3 \text{ až } 0,05 \text{ mm})$ . Tyto poloměry simulují stav nejhorších možných podmínek. V praxi ve větším měřítku se metoda používá v kombinaci s metodou extrapolovaného napětí hot-spot. To vede ke snadnější identifikaci kritických míst ve struktuře a poskytuje bezpečnější únavové vyhodnocení. [8][21]



Obr. 29 Znáznornění polohy referenčních poloměrů[7]

Pro vyhodnocení na únavu jsou individuálně stanoveny FAT kategorie pro každý  $r_{ref}$ . Při aplikaci metody je vyžadováno použití maximálních hlavních napětí. Dále musí být splněna podmínka minimálního tvarového napětí  $K_{w,min}$  uvedena níže. Pro zvolení správné FAT kategorie je dána Tab. 2. [21]

Tab. 2 Parametry pro únavu svaru s použitím maximálních hlavních napětí[21]

| $r_{ref} [mm]$ | FAT kategorie pro $\sigma_1$ | $K_{w,min}$ |
|----------------|------------------------------|-------------|
| 1,0            | 225                          | 1,6         |
| 0,3            | 300                          | 2,13        |
| 0,05           | 500                          | 3,56        |

$K_w$  je veličina definována jako poměr mezi vrubovým napětím  $\sigma_v$  a tvarovým napětím  $\sigma_s$ . K určení  $\sigma_s$  je doporučeno použití metody hot-spot.

$$K_w = \frac{\sigma_v}{\sigma_{hs}} \quad (43)$$

Následně musí být splněna podmínka

$$K_w \geq K_{w,min} \quad (44)$$

### 3.1.10 ZHODNOCENÍ

Metody hodnocení svarů dle IIW velmi rozsáhlé a komplexní. Metoda jmenovitého napětí se principiálně neliší od normovaných přístupů. Nicméně přidává možnost použití pro MKP. Pro hodnocení únavy kořene nebo paty svaru IIW udává několik rozdílných postupů řešení v rámci skupiny tvarových napětí. Hodnocení kořene svaru s využitím lokálního napětí je jednoduchá na aplikaci, ovšem lze ji použít jen v několika speciálních případech. Pro hodnocení paty svaru se využívá metoda extrapolovaného napětí hot-spot. Jedná se spolehlivou metodu zahrnující geometrii konstrukce, nicméně nezohledňuje faktory zvyšující napětí vlivem svaru samotného. Napětí hot-spot se určí na základě linearizace. Linearizace je metoda, jejíž použití je navrženo pro MKP a s její pomocí je dosaženo parametrů dílčích napětí, které jsou potřebné pro vyhodnocení extrapolovaného napětí hot-spot. Pro zahrnutí vlivu účinků samotného svaru je zvolena metoda vrubových napětí. K dosažení lepších výstupů je doporučeno metodu vrubových napětí použít v kombinaci s metodou hot-spot. Důležité zejména pro vyhodnocení

únavy. Celkově jsou tyto metody navrženy pro jednoduchou aplikaci a hodnocení složitějších konstrukcí.

## 3.2 AWS D1.1/D1.1M:2015 (AMERICAN NATIONAL STANDARD STRUCTURAL WELDING CODE)

### 3.2.1 PLATNOST (STATICKÉ ZATÍŽENÍ)

Přístup je určen pro nízkolegované uhlíkové oceli s minimální mezí kluzu, která nepřesahuje hodnotu 690 MPa. Dále doporučená minimální tloušťka svařovaných částí je 3,2 mm. Předpokládají se normální atmosférické podmínky bez vlivu koroze.[10]

### 3.2.2 PLATNOST (DYNAMICKÉ ZATÍŽENÍ)

Pokud hodnota maximálního napětí nepřekročí tabulovanou hodnotu, která je dána AWS D1.1/D1.1M:2015, není třeba provádět únavové vyhodnocení. Nelze použít pro svarové konstrukce namáhány nízkocyklovou únavou, pokud vypočítané napětí nespadá do elastické oblasti namáhání. Předpokládají se normální atmosférické podmínky bez vlivu koroze.[19]

### 3.2.3 VÝPOČET NAPĚTÍ (STATICKÉ ZATÍŽENÍ)

Napětí ve svaru je vyjádřeno nominální hodnotou, která je následně porovnána s dovoleným napětím. Vyhodnocení přípustného napětí je provedeno pomocí mechanických zkoušek. Nejčastěji se využívá parametrů jako je mez pevnosti nebo mez kluzu. Pro tyto parametry je ideální zkouška tahem, jejíž výstupem je tahový diagram. Předpokladem u koutových svarů je tvrzení, že jakékoliv napětí ve svaru působící na nosný průřez je považováno za smykové.

### 3.2.4 ALTERNATIVNÍ PŘÍSTUP VÝPOČTU NAPĚTÍ (STATICKÉ ZATÍŽENÍ)

Použití tohoto přístupu je omezeno na specifické svarové konstrukce. Jedná se převážně o jednoduché koutové svary nebo skupinu koutových svarů, které jsou navzájem rovnoběžné. Zatížení těchto svarů musí být pod stejným úhlem a v rovině procházející skrze těžiště svarové skupiny. [19]

Pak je maximální síla vyhodnocena pomocí vztahu:

$$F_v = 0,30F_{EXX}(1,0 + 0,50 \sin^{1,5}(\theta)) \quad (45)$$

kde:

$F_v$  přípustné jednotkové napětí

$F_{EXX}$  mez pevnosti přídatného materiálu (elektrody)

$(\theta)$  úhel mezi působící silou a osou svaru

Tento výsledek je porovnán s kritickou hodnotou svarů.

### 3.2.5 OKAMŽITÝ STŘED OTÁČENÍ (STATICKÉ ZATÍŽENÍ)

Metoda se využívá, pokud vnější zatížení nepůsobí na svary nebo skupinu svarů pod stejným úhlem. Základem je určení okamžitého středu otáčení, který je v daném okamžiku stejný pro všechny svary. K tomu jsou využity rovnice statické rovnováhy.[19]

$$F_x = \Sigma F_{ix} \quad (46)$$

$$F_y = \Sigma F_{iy} \quad (47)$$

$$M_o = \Sigma [F_{iy}(x) - F_{ix}(y)] \quad (48)$$

kde:

$F_x$  výsledná síla v ose x

$F_{ix}$  x-ová složka síly

$F_y$  výsledná síla v ose y

$F_{iy}$  y-ová složka síly

$M_o$  moment k okamžitému středu otáčení

Každý svar se řeší samostatně a pro další krok je nutné nalezení jejich těžiště. Vnější síla působící na svar v těžišti, svírá se spojnicí bodu okamžitého středu otáčení kolmý úhel. Pomocí této znalosti je odvozen úhel mezi vnější silou a osou daného svaru  $\theta$ . Po dosazení do experimentálně vytvořeného vztahu je výsledkem maximální zatížení pro jednotlivé svary.[19]

$$F_{vi} = 0,30F_{EXX}(1,0 + 0,50 \sin^{1,5}(\theta))F_{(\rho)} \quad (49)$$

kde:

$F_{vi}$  přípustné jednotkové napětí pro konkrétní svar

$F_{(\rho)}$  zohledňuje tažnost svarů dle úhlu zatížení

Obecně platí:

$$F_{(\rho)} = [\rho(1,9 - 0,9\rho)]^{0,3} \quad (50)$$

kde:

$\rho$  tažnost svaru

Výsledek je porovnán s kritickou hodnotou svarů.

### 3.2.6 SPECIÁLNĚ SOUSTŘEDNĚ ZATÍŽENÁ SKUPINA SVARŮ (STATICKE ZATÍŽENÍ)

Pro zvláštní případy je vyhodnoceno přípustné smykové napětí pro každý svarový prvek. Jednotlivé smykové napětí jsou sečteny. [19]

$$F_v = 0,30CF_{EXX} \quad (51)$$

kde:

$F_v$  přípustné jednotkové napětí

$F_{EXX}$  mez pevnosti přídavného materiálu (elektrody)

$C$  koeficient pevnosti pro šikmo zatížený svar

### 3.2.7 VÝPOČET NAPĚTÍ (DYNAMICKÉ ZATÍŽENÍ)

Nominální rozsah napětí je zde vyhodnocen na základě elastické analýzy svařovaných členů. Napětí není nutné zvyšovat pomocí součinitelů pro lokální diskontinuity svarů. Tento vliv je zanedbán. V případě nesouososti svařovaných částí je výpočet rozšířený o příslušný koeficient.[19]

### 3.2.8 KATEGORIE NAMÁHÁNÍ (DYNAMICKÉ ZATÍŽENÍ)

Jedná se obdobu kategorie detailu v normovaném přístupu ČSN EN 1993-1-9. Jsou označeny dle písmen abecedně v rozmezí (A až F). S tím, že kategorie B a E existují ještě v samostatné podmnožině B' a E'. Platí zde pravidlo, že s další následující kategorií se zhoršuje únavová pevnost pro daný počet cyklů. Kategorie A má nejlepší vlastnosti. Kategorie namáhání jsou tabulovány v AWS D1.1/D1.1M:2015.

### 3.2.9 ROZKMIT NAPĚTÍ (DYNAMICKÉ ZATÍŽENÍ)

Rozkmit napětí je definován jako rozsah kolísání napětí, které je vyvoláno opakovanou změnou charakteru zatížení (tah/tlak) svařované konstrukce. Nebo může být vyvolán součtem navzájem opačně orientovaných smykových napětí. Ve výpočtu jsou zahrnuty koeficienty v závislosti na zvolené kategorii namáhání. [19]

**Maximální rozkmit napětí pro kategorie (A, B, B', C, D, E, E')**

$$F_{SR} = \left[ \left( \frac{C_f \cdot 329}{N'} \right)^{0,333} \geq F_{TH} \right] \quad (52)$$

kde:

$F_{SR}$  přípustná hodnota rozkmitu napětí

$C_f$  tabulovaná konstanta dána AWS D1.1/D1.1M:2015 pro všechny kategorie s výjimkou F

$N'$  návrhová životnost svaru (počet cyklů)

$F_{TH}$  mezní hodnota únavového namáhání

**Maximální rozkmit napětí pro kategorii F**

$$F_{SR} = \left[ \left( \frac{C_f \cdot 11 \cdot 10^4}{N'} \right)^{0,167} \geq F_{TH} \right] \quad (53)$$

kde:

$C_f$  tabulovaná konstanta dána AWS D1.1/D1.1M:2015 pro kategorii F

**Maximální rozkmit napětí pro specifické případy**

Pro specifické případy svarových konstrukcí, které nevyhovují žádné kategorii jsou empiricky odvozené samostatné vztahy. Patří sem spoje T, rohové spoje, oboustranné spoje, které jsou tvořeny tupými nebo koutovými svary případně jejich kombinací. Maximální rozkmit napětí se vyhodnotí v průřezu základního materiálu v místě svarové paty.

**a) Pro průřez napínaného deskového prvku**

Iniciace trhliny se předpokládá vlivem selhání svaru.

$$F_{SR} = \left[ \left( \frac{14,4 \cdot 10^{11}}{N'} \right)^{0,333} \geq 68,9 \right] \quad (54)$$

**b) Pro spoje tvořené tupými svary**

Iniciace trhliny se předpokládá vlivem selhání kořene svaru.

$$F_{SR} = \left[ R_{PJP} \left( \frac{14,4 \cdot 10^{11}}{N'} \right)^{0,333} \right] \quad (55)$$

kde:

$R_{PJP}$  redukční součinitel pro tupé svary dáno AWS D1.1/D1.1M:2015

**c) Pro spoje tvořené koutovými svary**

Iniciace trhliny se předpokládá vlivem selhání kořene svaru.

$$F_{SR} = \left[ R_{FIL} \left( \frac{14,4 \cdot 10^{11}}{N'} \right)^{0,333} \right] \quad (56)$$

kde:

$R_{FIL}$  redukční faktor pro konstrukce spojeny oboustrannými koutovými svary dáno AWS D1.1/D1.1M:2015

### 3.2.10 ZHODNOCENÍ

Pro statické zatížení je vypočteno jmenovité napětí, které je srovnáno s přípustnou hodnotou. Princip je analogický jako u normovaných přístupů. Alternativním způsobem je vyhodnocení jednotkového napětí podle experimentálně vytvořených vztahů. Tento princip je vhodný pro větší množství stejných svarů. To znamená v automatizované a hromadné výrobě. Pro dynamické zatížení je stěžejní rozkmit napětí. Ten je vyhodnocen na základě vzorců, které se liší podle křivky únavové pevnosti. Výhodou je, že není potřeba provádět únavové vyhodnocení, pokud maximální napětí nepřekročí tabulovanou mez. Celkově je přístup hodnocení podle AWS D1.1/D1.1M:2015 výbornou volbou pro konstrukce, které nejsou vystaveny zatěžujícím vlivům z okolí jako je koroze nebo velké teplotní kolísání.

## 4 APLIKACE ŘEŠENÍ VYBRANÝCH METOD POMOCÍ MKP

Pro aplikaci jednotlivých metod byl použit program ANSYS Workbench 2020 R1. Vybrané metody pro kalkulaci napětí jsou:

- Metoda jmenovitého napětí dle ČSN 05 120
- Metoda extrapolovaného napětí hot-spot
- Metoda vrubového napětí

### 4.1 GEOMETRIE, MATERIÁL, ROZMĚRY

Jako základní materiál byla zvolena konstrukční ocel. Mechanické vlastnosti:

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa} \text{ (Youngův modul pružnosti pro ocel)}$$

$$\mu = 0,3 \text{ (Poissonova konstanta)}$$

Hodnocená svařovaná konstrukce se skládá ze dvou desek. Jedná se o T spoj s oboustranným provedením koutového svaru, kde výška svaru  $a = 0,7 \text{ mm}$  znázorněno na Obr. 30b. Parametry dílčích částí konstrukce jsou dány v Tab. 3.

Tab. 3 Rozměry dílčích částí svařované konstrukce

|          | $l'$ [mm] | $h$ [mm] | $s$ [mm] |
|----------|-----------|----------|----------|
| 1. Deska | 100       | 110      | 10       |
| 2. Deska | 100       | 50       | 10       |

kde:

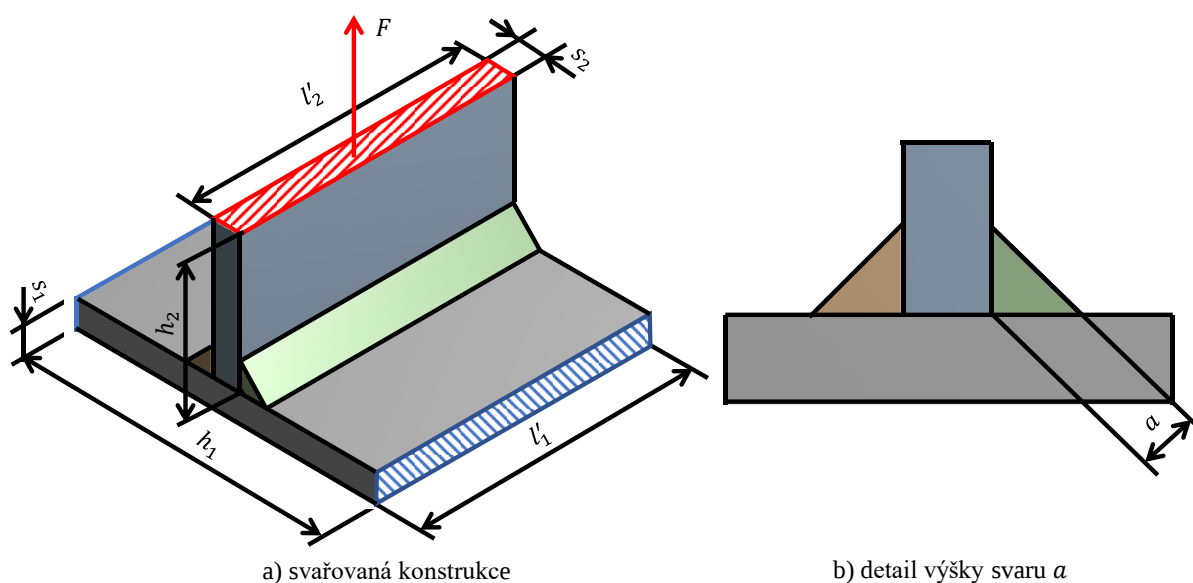
$l'$  celková délka svaru

$h$  výška desky

$s$  tloušťka svařované desky

### 4.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

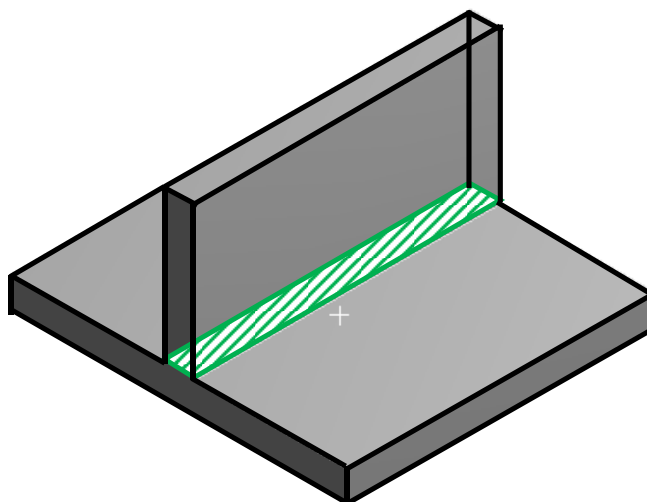
Okrajové podmínky jsou totožné pro všechny modely jednotlivých metod. Tyto podmínky jsou znázorněny barevně vyšrafovanými plochami na Obr. 30a. Červená barva představuje tahové silové účinky na danou plochu o velikosti  $F = 20 \text{ kN}$ . Modré plochy vyjadřují vetknutí. Vazby mezi jednotlivými tělesy (1. deska, 2. deska, koutový svar) byly vyhodnoceny automaticky programem ANSYS Workbench 2020 R1 jako idealizované spojení – kontakt typu *Bonded*. Jedná se o pevné vazby mezi plochami, které se navzájem dotýkají. Dohromady tvoří svarový spoj.



Obr. 30 Zadaná svařovaná konstrukce včetně rozměrů a okrajových podmínek

#### 4.3 METODA JMENOVITÉHO NAPĚTÍ DLE ČSN 05 120

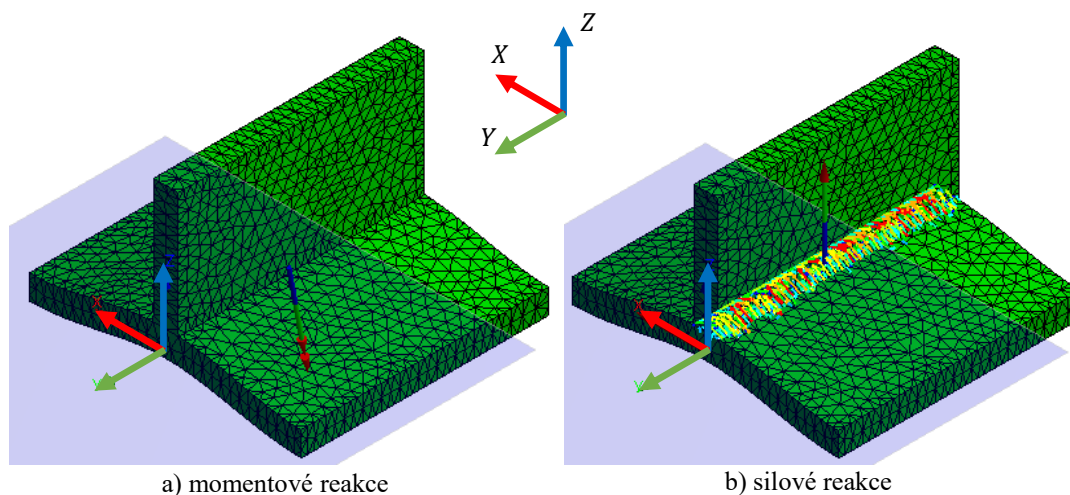
Pro tuto metodu je v modelu konstrukce pro MKP svar zanedbán. Model je tvořen jedním tělesem, který nahrazuje svarové spojení. Jmenovité napětí je vyhodnoceno v přechodové části svařených desek, znázorněno zeleně vyšrafovanou částí na Obr. 31. Z takového modelu jsou výstupem napětí, síly a momenty, pomocí kterých je stanovena únava materiálu s použitím příslušných Wöhlerových křivek.



Obr. 31 Model MKP pro metodu jmenovitého napětí

### 4.3.2 ŘEŠENÍ

Metoda jmenovitého napětí je založena na výpočtu pomocí sil a momentů. Řešením je extrahovat síly a momenty z MKP modelu. Výstup těchto účinků je v Tab. 4, grafické znázornění na Obr. 32. Konečný výpočet jmenovitého napětí je proveden pomocí vzorců dle zvoleného přístupu.



Obr. 32 Grafické znázornění řešení silových a momentových účinků

Tab. 4 Řešení silových a momentových účinků

|                 | X                    | Y                  | Z     | Výslednice |
|-----------------|----------------------|--------------------|-------|------------|
| Síla [N]        | $-1,7 \cdot 10^{-5}$ | $-9 \cdot 10^{-5}$ | 20000 | 20000      |
| Moment [N · mm] | 26,61                | -112,27            | -477  | 490,75     |

### 4.3.3 VÝPOČET JMENOVITÉHO NAPĚTÍ

Pro hodnocený svařovaný detail z hlediska silového platí:

$$l_1 = l'_1 - 1,5 \cdot s_1 = 100 - 1,5 \cdot 10 = 85 \text{ mm} \quad (57)$$

$$S_{SV} = a \cdot l_1 = 7 \cdot 85 = 595 \text{ mm}^2 \quad (58)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{N}{2 \cdot S_{SV}} = \frac{20000}{2 \cdot 595} = 16,81 \text{ MPa} \quad (59)$$

kde:

$l_1$  výpočtová délka svaru

$l'_1$  celková délka svaru

$s_1$  tloušťka svařované desky

|                |                              |
|----------------|------------------------------|
| $a$            | výška koutového svaru        |
| $S_{SV}$       | nosný průřez koutového svaru |
| $\tau_{\perp}$ | jmenovité napětí (smyk)      |
| $N$            | normálová síla               |

Pro hodnocení svařovaného detail z hlediska momentového platí:

$$\tau_{\parallel} = \frac{M_o}{W_{OSV}} = \frac{3 \cdot M_o}{a \cdot l_1^2} = \frac{3 \cdot 490,75}{7 \cdot 85^2} = 2,9 \cdot 10^{-2} \text{ MPa} \quad (60)$$

kde:

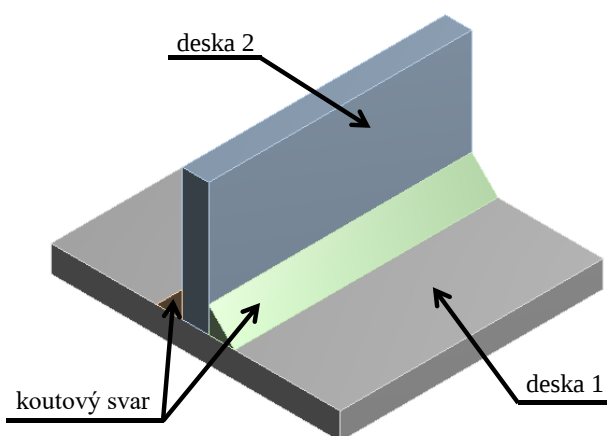
|                    |                         |
|--------------------|-------------------------|
| $\tau_{\parallel}$ | jmenovité napětí (smyk) |
| $M_o$              | výsledný ohybový moment |
| $W_{OSV}$          | modul průřezu v ohybu   |

#### 4.3.4 ZHODNOCENÍ

Silové účinky v osách  $x, y$  jsou zanedbatelné proto se v závěrečném výpočtu neprojeví. Důvodem (mimo nezátížení v těchto osách) je skutečnost, že se jedná o symetrickou konstrukci. Při vyhodnocení únavy pomocí Wöhlerových křivek se bude vycházet z jmenovitého napětí vypočteného na základě silových účinků. Jmenovité napětí z momentových účinků je mnohonásobně menší tudíž je zanedbatelné.

#### 4.4 METODA EXTRAPOLOVANÉHO NAPĚTÍ HOT-SPOT

Pro tuto metodu je v modelu konstrukce pro MKP svar zahrnut. Model je tvořen sestavou tří těles zobrazeno na Obr. 33. Dvěma deskami a oboustranným koutovým svarem. Z takového modelu jsou výstupem linearizované napětí, ve vzdálenostech definovaných metodou hot-spot.

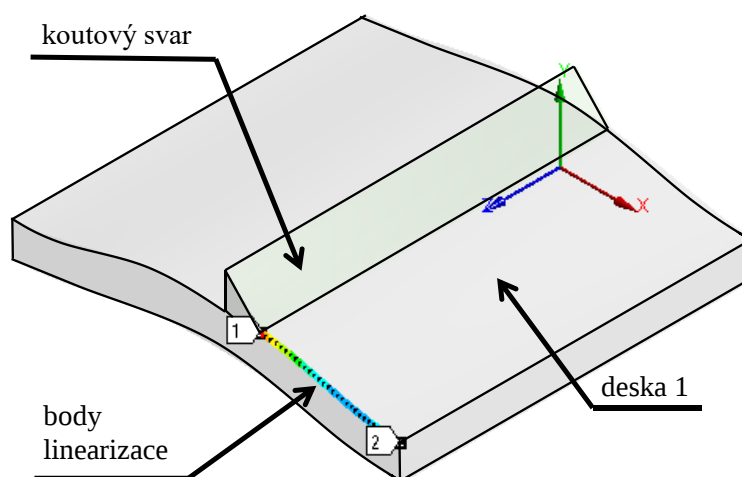


Obr. 33 Model pro řešení pomocí hot-spot

#### 4.4.1 ŘEŠENÍ

Pro řešení metodou hot-spot je nutné extrapolovat napětí v referenčních bodech. Podrobný popis metody je uveden v kapitole 3.1.7. V závislosti na tloušťce základního materiálu byl pro řešení zvolen hot-spot typu „b“.

Napětí hot-spot bude vyhodnoceno v referenčních bodech na povrchu svařované konstrukce ve vzdálených 4, 8 a 12 mm od paty svaru.



Obr. 34 Grafické znázornění linearizace v referenčních bodech

Body 1 a 2 na Obr. 34 definují cestu na povrchu součásti, kde je linearizace provedena. Na této křivce leží referenční body. Jednotlivé složky napětí v těchto bodech jsou uvedeny v Tab. 5. Tyto složky napětí jsou podrobněji vysvětleny v kapitole 3.1.8. Výsledkem je maximální hlavní napětí  $\sigma_h$ . Další průběh napětí není třeba znát pro kalkulaci metody hot-spot.

Tab. 5 Linearizace napětí v referenčních bodech

| Vzdálenost od paty svaru [mm] | $\sigma_m$ [MPa] | $\sigma_b$ [MPa] | $\sigma_p$ [MPa] | $\sigma_h$ [MPa] |
|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 0                             | 1,3              | 112,6            | 64,0             | 124,4            |
| 4,0                           | 1,3              | 90,1             | 2,7              | 75,4             |
| 8,0                           | 1,3              | 67,6             | 4,0              | 53,6             |
| 12,0                          | 1,3              | 45,0             | 2,7              | 31,9             |

Princip metody hot-spot je vyhodnocení napětí bez vlivu svaru. Ten vytváří ve svarové patě výrazný nárůst napětí. Pro konečný výpočet napětí hot-spot se využije dílčích napětí pouze v referenčních bodech.

#### 4.4.2 VÝPOČET EXTRAPOLOVANÉHO NAPĚTÍ HOT-SPOT

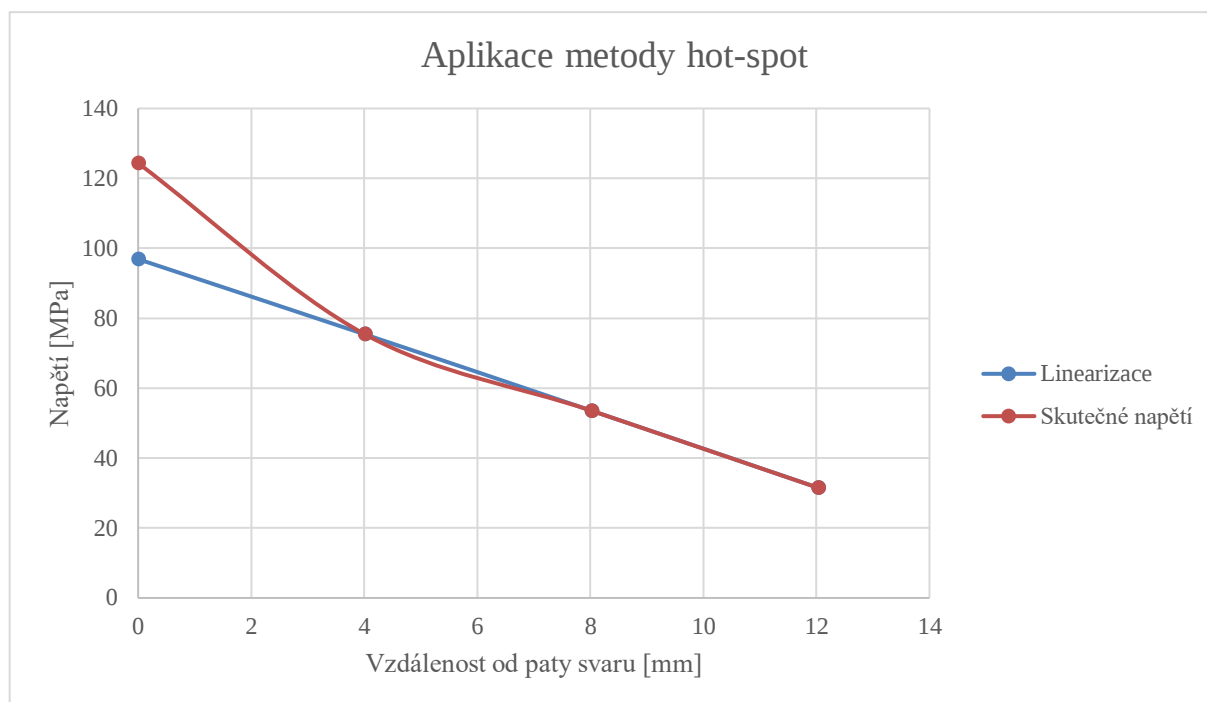
Pro hot-spot typu „B“ platí:

$$\sigma_{hs} = 3\sigma_{s4mm} - 3\sigma_{s8mm} + \sigma_{s12mm} \quad (61)$$

$$\sigma_{hs} = 3 \cdot 75,4 - 3 \cdot 53,6 + 31,9 = 96,9 \text{ MPa}$$

kde:

|                  |                                                 |
|------------------|-------------------------------------------------|
| $\sigma_{hs}$    | extrapolované napětí pro hot-spot               |
| $\sigma_{s4mm}$  | dílčí napětí ve vzdálenosti 4 mm od paty svaru  |
| $\sigma_{s8mm}$  | dílčí napětí ve vzdálenosti 8 mm od paty svaru  |
| $\sigma_{s12mm}$ | dílčí napětí ve vzdálenosti 12 mm od paty svaru |



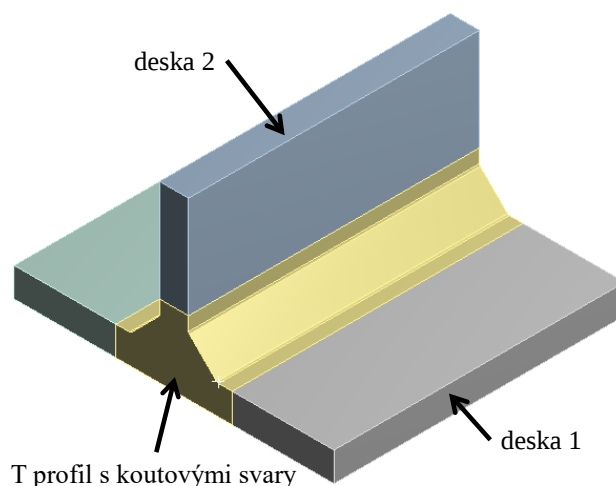
Obr. 35 Srovnání průběhu napětí metody hot-spot se skutečným napětím

#### 4.4.3 ZHODNOCENÍ

Z grafu na Obr. 35 je patrné, že křivka metody hot-spot má ve srovnání se skutečným průběhem napětím v patě svaru menší napětí. Tento rozdíl je způsoben vlivem svaru na napětí, který metoda hot-spot potlačí. Výsledkem je tedy poměrně přesné vyjádření napětí v patě svaru bez jeho zvyšujících účinků. Výsledné extrapolované hot-spot napětí je ideálně lineární, tudíž lze metodu považovat za funkční.

#### 4.5 METODA VRUBOVÉHO NAPĚTÍ

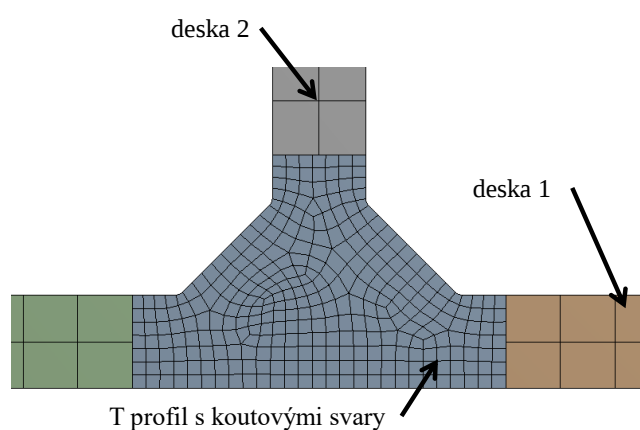
Na rozdíl od metody hot-spot je zde vliv svaru brán v úvahu při vyhodnocení napětí. Pro MKP musí být svar zahrnut v modelu. Ten je tvořen sestavou čtyř těles. Třemi deskami a spojovacím T profilem. Zobrazeno na Obr. 36.



Obr. 36 Model pro řešení metody vrubového napětí

#### 4.5.1 ŘEŠENÍ

Pro řešení metodou vrubového napětí je nutné definovat referenční poloměry v místě paty svaru a aplikovat je do modelu. Dle vstupních parametrů má svařovaná konstrukce tloušťku základního materiálu  $s > 5 \text{ mm}$ , tudíž referenční poloměry jsou dány  $r_{ref} = 1 \text{ mm}$ . Dalším krokem je vygenerování mřížky. Ta musí být detailnější v okolí vrubů. Toho lze dosáhnout modelací profilu, který tvoří společně s koutovými svary jedno těleso. Zobrazeno na Obr. 37. Pro volbu ideální velikosti elementu v mřížce je zapotřebí provést proces vyhodnocení napětí několikrát. U každé iterace se změní velikost elementu a výsledky jsou porovnány. Ideální velikost je zvolena v závislosti na nejmenším rozdílu ve výsledku dvou iterací. Ty se blíží ke stejné hodnotě. Byly provedeny tři iterace s velikostmi 1; 1,5 a 2 mm. Jako optimální velikost elementu byla zvolena hodnota 1,5 mm z důvodu nejmenšího rozdílu maximálního hlavního napětí mezi velikostmi 1,5 a 2 mm. Procentuálně se jedná o rozdíl 1,25 %. Výsledky jednotlivých iterací jsou v Tab. 6. Výstupem je vrubové napětí s vlivem svarových účinků.



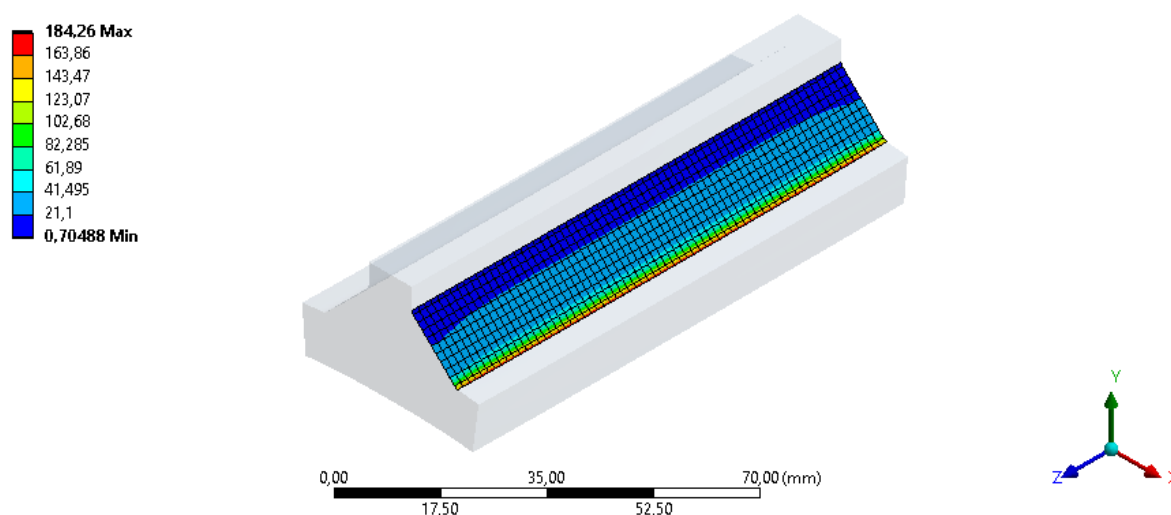
Obr. 37 Detail mřížky pro vrubové napětí

Tab. 6 Závislost velikosti elementu mřížky na výsledném napětí

|           | Velikost elementu v mřížce [mm] | Výsledné napětí $\sigma_v$ [MPa] |
|-----------|---------------------------------|----------------------------------|
| Iterace_1 | 1                               | 193,81                           |
| Iterace_2 | 1,5                             | 184,26                           |
| Iterace_3 | 2                               | 181,96                           |

Výstupní hodnotu vrubového napětí udává iterace s 1,5 mm velikostí elementu mřížky. Na Obr. 38 je grafické znázornění. Lze jednoznačně vidět, že v místě referenčního poloměru (vrubu) se koncentruje napětí. Hodnota maximálního hlavního napětí je současně hodnota vrubového napětí.

$$\sigma_v = 184,26 \text{ MPa}$$



Obr. 38 Průběh napjatosti při velikosti elementu v mřížce 1,5 mm

#### 4.5.2 ZHODNOCENÍ

Jedná se o metodu jednoduchou na aplikaci. Při řešení se vyskytly dva problémy, které poukazují na nevýhody metody. Hardwarová náročnost na zařízení. To je způsobeno vyhodnocováním více uzlů mřížky v místech referenčních poloměrů, kde je nutností hustší síť těchto bodů. Dalším faktorem je značná časová náročnost. Což je dáno nutností provést více iterací k dosažení optimálního výsledku.

## ZÁVĚR

Cílem této práce bylo porovnat a najít společné a rozdílné prvky postupů metod hodnocení svarů k dosažení optimálního vyhodnocení svarové konstrukce. Metody AWS D1.1/D1.1M:2015, ČSN 05 120 a ČSN 1993-1-9 mají společný základ a sice rozlišují hodnocené svarové konstrukce podle skupiny zatížení, respektive podle počtu zatěžujících cyklů. Pro staticky zatížené konstrukce si jsou tyto metody velmi podobné. Vyhodnocení je založeno na výpočtu jmenovitého napětí, které nesmí překročit dovolenou hodnotu. S rozdílem některých dodatečných podmínek dané příslušnou metodou. Odlišnosti jsou více patrné u konstrukcí zatížených dynamicky. ČSN 05 120 při vyhodnocení takto zatížené konstrukce využívá Smithovi diagramy, ze kterých vzejde mez únavy pro daný počet cyklů. U ČSN 1993-1-9 a AWS D1.1/D1.1M:2015 jsou meze únavy stanoveny pomocí Wöhlerových křivek, u kterých je základem určení rozkmitu napětí. Způsob určení rozkmitu je u těchto metod odlišný. Zatímco podle AWS D1.1/D1.1M:2015 je rozkmit napětí dosažen pomocí empiricky vytvořených vztahů, ČSN 1993-1-9 zahrnuje i další součinitele a koncentrátoři. Pokud není známa Wöhlerova křivka pro hodnocený materiál, ale pouze jeho základní mechanické vlastnosti doporučuje se použití Smithových diagramů tedy metody podle ČSN 05 120. Jelikož stanovení Wöhlerovy křivky je časově mnohem náročnější proces.

Metody stanovené IIW se zaměřují zejména na způsob, jakým je vyhodnoceno napětí ve svarové konstrukci. Kromě metody jmenovitého napětí udává více způsobů výpočtu napětí. Přístup jmenovitého napětí se neliší od výpočtu u normovaných přístupů. Tento přístup zanedbává vliv svaru na konečném napětí. Výpočet pomocí extrapolovaného napětí hot-spot je mnohem komplexnější způsob, který je vhodný pro složitější konstrukce. Napětí je stanoveno bez vlivu svaru pomocí lineární aproximace povrchového napětí. Což poskytuje velmi přesné určení napětí. Pro zahrnutí vlivu svaru je volena metoda vrubového napětí. Nicméně samostatně neposkytuje dostatečné únavové vyhodnocení, proto se používá v kombinaci s metodou hot-spot. IIW dále popisuje možnosti vyhodnocení pomocí MKP.

Při vyhodnocení napětí dle vybraných metod pomocí MKP bylo použito jednotné zadání pro snadnější srovnání těchto metod. Z hlediska časové náročnosti je nejlepší volbou metoda jmenovitého napětí. To je dáno především jednoduchou tvorbou modelu bez svaru a vygenerováním základní mřížky bez specifických požadavků. Metoda extrapolovaného napětí hot-spot a metoda vrubového napětí poskytují mnohem detailnější výsledky. Celkově je metoda vrubového napětí časově nejnáročnější, vzhledem k opakovaným iteracím k dosažení optimální velikosti sítě. Pro ideální výsledky z hlediska času a výstupů je nejlepší volbou metoda extrapolovaného napětí hot-spot.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ČSN 05 0000. Svařování: Základní pojmy. Praha: Vydavatelství ÚNM, 1987.
- [2] CHATTOPADHYAY, A., G. GLINKA, M. EL-ZEIN, J. QIAN a R. FORMAS. Stress Analysis and Fatigue of welded structures [online]. B.m.: Welding in the World. 2011. ISSN 0043-2288. Dostupné z: doi:10.1007/bf03321303
- [3] SONSINO, C. M., H. HANSELKA, Ö. KARAKAS, A. GÜLSÖZ, M. VOGT a K. DILGER. Fatigue Design Values for Welded Joints of the Wrought Magnesium Alloy AZ31 (ISO-MgAl3Zn1) According to the Nominal, Structural and Notch Stress Concepts in Comparison to Welded Steel and Aluminium Connections [online]. B.m.: Welding in the World. 2008. ISSN 0043-2288. Dostupné z: doi:10.1007/bf03266643
- [4] DU TOIT, M., G. T. VAN ROOYEN a D. SMITH. An Overview of the Heat-Affected Zone Sensitization and Stress Corrosion Cracking Behaviour of 12% Chromium Type 1.4003 Ferritic Stainless Steel [online]. B.m.: Welding in the World. 2007. ISSN 0043-2288. Dostupné z: doi:10.1007/bf03266599
- [5] ČSN 05 0120. Výpočet svarových spojů strojních konstrukcí. Praha: Český normalizační institut, 1971.
- [6] SONSINO, C. Effect of residual stresses on the fatigue behaviour of welded joints depending on loading conditions and weld geometry [online]. B.m.: International Journal of Fatigue. 2009. ISSN 0142-1123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2008.02.015
- [7] FRICKE, Wolfgang. IIW guideline for the assessment of weld root fatigue [online]. B.m.: Welding in the World. 2013. ISSN 0043-2288. Dostupné z: doi:10.1007/s40194-013-0066-y
- [8] Hobbacher A (2009) Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW doc.1823-07, Welding Research Council Bulletin 520, New York
- [9] FRICKE, W., A. KAHL a H. PAETZOLD. Fatigue Assessment of Root Cracking of Fillet Welds Subject to Throat Bending using the Structural Stress Approach [online]. B.m.: Welding in the World. 2006. ISSN 0043-2288. Dostupné z: doi:10.1007/bf03266538
- [10] MILLER, Daune. Welded Connections - A Primer For Engineers [online]. Cleveland: American Institute of Steel Construction, 2006 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <http://www.abarsazeha.com/images/ScinteficResources/DesignGuide/Weld%20Guide.pdf>
- [11] FALTUS, František. *Spoje s koutovými svary*. Praha: Academia, 1981. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:c43f0e90-1d55-11e4-8e0d-005056827e51>
- [12] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-708-2697-5.
- [13] TMĚJ, Jaroslav. *Teorie svařování*. Druhé. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1990. ISBN 80-7083-010-7.

- [14] FALTUS, František. *Svařování*. Praha: Česká matice technická, 1947.
- [15] WALD, František, L. ŠABATKA, Miroslav BAJER, et al. *Benchmark cases for advanced design of structural steel connections*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2016. ISBN 978-80-01-05826-8.
- [16] KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. *Svařování I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0870-6.
- [17] FALTUS, František. *Přehled a technologie svařování: Příručka svařování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955.
- [18] NĚMEC, Milan, Jan SUCHÁNEK a Jan ŠANOVEC. *Základy technologie I*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3530-1.
- [19] Structural welding code - steel: AWS D1.1/D1.1M:2015 [online]. 23rd edition. American Welding Society, 2015 [cit. 2020-05-19]. ISBN 978-0-87171-864-8. Dostupné z: [https://www.academia.edu/38613055/AWS\\_D1.1\\_D1.1M\\_2015\\_An\\_American\\_National\\_Standard\\_Structural\\_Welding\\_Code\\_-\\_Steel\\_American\\_Welding\\_Society](https://www.academia.edu/38613055/AWS_D1.1_D1.1M_2015_An_American_National_Standard_Structural_Welding_Code_-_Steel_American_Welding_Society)
- [20] AYGÜL, MUSTAFA. *Fatigue Analysis of Welded Structures Using the Finite Element Method* [online]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2012 [cit. 2020-05-21]. ISSN 1652-9146. Dostupné z: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/155710.pdf>
- [21] ROTHER, Klemens a Wolfgang FRICKE. *Effective notch stress approach for welds having low stress concentration* [online]. B.m.: International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2016. ISSN 0308-0161. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpvp.2016.09.008
- [22] ČSN EN 1993-1-9. *Navrhování ocelových konstrukcí*. Ed. 2. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2005.
- [23] FRICKE, W a O DOERK. *Simplified approach to fatigue strength assessment of fillet-welded attachment ends* [online]. B.m.: International Journal of Fatigue. 2006. ISSN 0142-1123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2005.04.008
- [24] PEC, Michal. *Rozbor únosnosti vybraných svařovaných konstrukčních uzlů zatěžovaných staticky a cyklicky*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

|                                        |                    |                                                                                                          |
|----------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\Delta\sigma_C; \Delta\tau_C$         | [MPa]              | Referenční únavová pevnost při $N' = 2 \cdot 10^6$                                                       |
| $\Delta\sigma_{E,2}; \Delta\tau_{E,2}$ | [MPa]              | Ekvivalentní konstantní rozkmit napětí pro $N' = 2 \cdot 10^6$                                           |
| $C_f$                                  | [-]                | Konstanta pro výpočet rozkmitu napětí dána AWS D1.1/D1.1M:2015                                           |
| $F_{(\rho)}$                           | [MPa]              | Koeficient zohledňující tažnost svarů dle úhlu zatížení                                                  |
| $F_{EXX}$                              | [MPa]              | Mez pevnosti přídatného materiálu (elektrody)                                                            |
| $F_{SR}$                               | [MPa]              | Přípustná hodnota rozkmitu napětí                                                                        |
| $F_{TH}$                               | [MPa]              | Mezní hodnota únavového namáhání                                                                         |
| $F_a$                                  | [N]                | Amplituda síly                                                                                           |
| $F_{ix}$                               | [N]                | x-ová složka síly                                                                                        |
| $F_{iy}$                               | [N]                | y-ová složka síly                                                                                        |
| $F_m$                                  | [N]                | Stálá síla nebo střední síla při cyklickém zatížení                                                      |
| $F_v$                                  | [MPa]              | Přípustné jednotkové napětí                                                                              |
| $F_{vi}$                               | [MPa]              | Přípustné jednotkové napětí pro konkrétní svar                                                           |
| $F_x$                                  | [N]                | Výsledná síla v ose x                                                                                    |
| $F_y$                                  | [N]                | Výsledná síla v ose y                                                                                    |
| $K_{w,min}$                            | [-]                | Minimální tvarové napětí                                                                                 |
| $K_w$                                  | [-]                | Poměr mezi vrubovým a tvarovým napětím                                                                   |
| $M_O$                                  | [N·m]              | Ohybový moment                                                                                           |
| $M_a$                                  | [N·m]              | Amplituda momentu                                                                                        |
| $M_m$                                  | [N·m]              | Stálý moment nebo střední moment při cyklickém zatížení                                                  |
| $M_o$                                  | [N·m]              | Moment k okamžitému středu otáčení                                                                       |
| $Q_k$                                  | [-]                | Charakteristická hodnota jednotlivého proměnného zatížení                                                |
| $R_{FIL}$                              | [-]                | Redukční faktor pro konstrukce spojeny oboustrannými koutovými svary                                     |
| $R_{PJP}$                              | [-]                | Redukční součinitel pro tupé svary                                                                       |
| $S_{SV}$                               | [mm <sup>2</sup> ] | Nosný průřez svaru                                                                                       |
| $W_{KSV}$                              | [mm <sup>3</sup> ] | Modul průřezu v krutu                                                                                    |
| $W_{OSV}$                              | [mm <sup>3</sup> ] | Modul průřezu v ohybu                                                                                    |
| $k_f$                                  | [-]                | Součinitel koncentrace napětí                                                                            |
| $r_{ref}$                              | [MPa]              | Referenční poloměr pro metodu vrubového napětí                                                           |
| $\gamma_{Ff}$                          | [-]                | Dílčí součinitel spolehlivosti pro ekvivalentní konstantní rozkmit napětí $\Delta\sigma_E, \Delta\tau_E$ |

|                          |       |                                                                                     |
|--------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $\gamma_{Mf}$            | [-]   | Dílčí součinitel spolehlivosti únavové pevnosti                                     |
| $\lambda_i$              | [-]   | Součinitelé ekvivalentního únavového poškození                                      |
| $\sigma_{\parallel}$     | [MPa] | Normálové napětí rovnoběžné s osou svaru                                            |
| $\sigma_{\parallel f}$   | [MPa] | Dílčí normálové napětí rovnoběžné s osou svaru                                      |
| $\sigma_{\perp}$         | [MPa] | Normálové napětí kolmé na osu svaru                                                 |
| $\sigma_{\perp f}$       | [MPa] | Dílčí normálové napětí kolmé na osu svaru                                           |
| $\sigma_{hs}$            | [MPa] | Extrapolované napětí hot-spot                                                       |
| $\sigma_i$               | [MPa] | Napětí ve vzdálenostech určených metodou hot-spot                                   |
| $\sigma_{AD}; \tau_{AD}$ | [MPa] | Dovolené napětí při dynamickém namáhání                                             |
| $\sigma_A^x; \tau_A^x$   | [MPa] | Mez únavy svaru nebo základního materiálu pro dané střední napětí                   |
| $\sigma_A^x; \tau_A^x$   | [MPa] | Mez únavy svaru nebo základního materiálu pro dané střední napětí                   |
| $\sigma_C^x; \tau_C^x$   | [MPa] | Mez únavy svaru nebo základního materiálu při střídavém souměrném namáhání          |
| $\sigma_D$               | [MPa] | Dovolené napětí v tahu                                                              |
| $\sigma_{DSV}$           | [MPa] | Dovolené napětí svaru v tahu                                                        |
| $\sigma_{KT}$            | [MPa] | Mez kluzu v tahu                                                                    |
| $\sigma_S$               | [MPa] | Redukované normálové napětí                                                         |
| $\sigma_a; \tau_a$       | [MPa] | Amplituda napětí cyklu ve svaru nebo v základním materiálu pro prosté namáhání      |
| $\sigma_{as}; \tau_{as}$ | [MPa] | Amplituda napětí cyklu ve svaru nebo v základním materiálu pro kombinované namáhání |
| $\sigma_b$               | [MPa] | Ohybové napětí                                                                      |
| $\sigma_h$               | [MPa] | Maximální hlavní napětí                                                             |
| $\sigma_m$               | [MPa] | Membránové napětí                                                                   |
| $\sigma_n$               | [MPa] | Jmenovité napětí podle IIW                                                          |
| $\sigma_p$               | [MPa] | Špičkové napětí                                                                     |
| $\sigma_{s,loc}$         | [MPa] | Lokální napětí                                                                      |
| $\sigma_s$               | [MPa] | Tvarové napětí podle IIW                                                            |
| $\sigma_v$               | [MPa] | Vrubové napětí                                                                      |
| $\tau_{\parallel}$       | [MPa] | Smykové napětí rovnoběžné s osou svaru                                              |
| $\tau_{\parallel f}$     | [MPa] | Dílčí smykové napětí rovnoběžné s osou svaru                                        |
| $\tau_{\perp}$           | [MPa] | Smykové napětí kolmé na osu svaru                                                   |
| $\tau_{\perp f}$         | [MPa] | Dílčí smykové napětí kolmé na osu svaru                                             |
| $\tau_{DSV}$             | [MPa] | Dovolené napětí svaru ve smyku                                                      |
| $\tau_S$                 | [MPa] | Redukované smykové napětí                                                           |

|                                                                                      |       |                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------|
| $\Delta\sigma^m; \Delta\tau^m$                                                       | [MPa] | Výsledná hodnota rozkmitu napětí pro Wöhlerovu křivku     |
| $\Delta\sigma; \Delta\tau$                                                           | [MPa] | Rozkmit napětí                                            |
| $h$                                                                                  | [mm]  | Výška základního materiálu                                |
| $\Omega$                                                                             | [-]   | Referenční oblast pro řešení lokálního jmenovitého napětí |
| $C$                                                                                  | [-]   | Koeficient pevnosti pro šikmo zatížený svar               |
| $C'$                                                                                 | [-]   | Parametr pro Wöhlerovu křivku určený lineární regresí     |
| $E$                                                                                  | [MPa] | Youngův modul pružnosti pro ocel                          |
| $F$                                                                                  | [N]   | Působící síla                                             |
| $M$                                                                                  | [N·m] | Výsledný moment                                           |
| $N$                                                                                  | [N]   | Normálová síla                                            |
| $N'$                                                                                 | [-]   | Počet cyklů během předpokládané doby životnosti           |
| $T$                                                                                  | [N]   | Posouvající síla                                          |
| $a$                                                                                  | [mm]  | Výška svaru                                               |
| $l$                                                                                  | [mm]  | Výpočtová délka svaru                                     |
| $l'$                                                                                 | [mm]  | Celková délka svaru                                       |
| $n$                                                                                  | [-]   | Součinitel bezpečnosti                                    |
| $s$                                                                                  | [mm]  | Tloušťka základního materiálu                             |
| $t$                                                                                  | [mm]  | Tloušťka koutového svaru                                  |
| $t'$                                                                                 | [MPa] | Tloušťka koutového svaru rozšířená o kořenovou část       |
| $\alpha; \alpha_\tau; \alpha_{\tau\parallel};$<br>$\alpha_\perp; \alpha_{\tau\perp}$ | [-]   | Převodní součinitel svarového spoje                       |
| $\beta$                                                                              | [-]   | Součinitel tloušťky koutového svaru                       |
| $\theta$                                                                             | [°]   | Úhel mezi působící silou a osou svaru                     |
| $\mu$                                                                                | [-]   | Poissonova konstanta                                      |
| $\rho$                                                                               | [-]   | Tažnost svaru                                             |
| $\tau$                                                                               | [MPa] | Smykové napětí                                            |
| $\varphi$                                                                            | [-]   | Dynamický součinitel rázu                                 |