



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POSOUZENÍ ŽIVOTNOSTI SVAŘOVANÉHO RÁMU PRO HYDRAULIKU LISU STROJE RONDOPRESS

THE EVALUATION OF THE LIFETIME PERIOD OF WELDED FRAME FOR
HYDRAULIC PRESS MACHINE RONDOPRESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Čermák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2016

ABSTRAKT

Petr Čermák: Posouzení životnosti svařovaného rámu pro hydrauliku lisu stroje RONDOPRESS

Cílem této diplomové práce je posouzení životnosti svařovaného rámu pro hydrauliku lisu stroje RONDOPRESS, který je určen pro pekárenské odvětví v potravinářském průmyslu. Samotná komora lisu stroje je vyrobena z korozivzdorných ocelí, protože zpracovává potraviny (těsto). Ale pevnostní část daného lisu je tvořena rámem z uhlíkové oceli s hydraulickým válcem. Pro životnost stroje RONDOPRESS je určující tuhost a odolnost rámu. Je tedy nutné vypracovat studii svařitelnosti uhlíkových ocelí, vybrat vhodnou metodu svařování a následně provést vyhodnocení svařované konstrukce rámu z hlediska použitých svarových spojů v analyzovaných oblastech.

V praktické části je třeba vypracovat počítačový model rámu a dále provést výpočet napjatosti a výpočet životnosti při požadovaných 1 825 000 cyklech, zvolit vhodnou metodu svařování rámu a vyloučit jeho nežádoucí deformace.

Finálním výstupem je funkční rám lisu stroje RONDOPRESS, který splňuje požadavky na životnost z hlediska zadaných cyklů pro výrobní proces.

Klíčová slova: svařitelnost, únavová životnost, uhlíková ocel, napjatost, ANSYS, metoda konečných prvků (MKP)

ABSTRACT

Petr Čermák: Service time assessment of the welded frame for the hydraulics of RONDOPRESS press machine

The goal of this thesis is to assess durability of the welded frame for the hydraulics of RONDOPRESS press machine, which is used at the bakery sector in the food industry. The press machine chamber is made of stainless steel, because of food (dough) processing. But the strengthened part of the press machine consists of a carbon steel frame with a hydraulic cylinder. For the life of the RONDOPRESS machine is determining the rigidity and durability of the frame. Therefore it is necessary to carry out a study of carbon steel weldability, choose a suitable welding method and then make an evaluation of welded frame construction used in terms of weld joints in analyzed areas.

Practical part consists of the frame computer model design, stress calculations and the service time calculation for required 1,825,000 cycles, choosing the appropriate welding method and avoiding undesired deformations.

The final output is an operational frame of the RONDOPRESS press machine that meets the required service time specified by the number of production process cycles.

Keywords: weldability, fatigue lifetime, carbon steel, stress, ANSYS, finite element method (FEM)

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČERMÁK, Petr. *Posouzení životnosti svařovaného rámu pro hydrauliku lisu stroje Rondopress*. Brno, 2016. 53s, 7 výkresů, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kubíček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Říčkách 22.05. 2016

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkovi za užitečné připomínky a cenné rady týkající se zpracování mé diplomové práce.

OBSAH

ZADÁNÍ

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

ÚVOD

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | ROZBOR SOUČÁSTI | 10 |
| 2 | TEORIE SVAŘOVÁNÍ | 13 |
| 2.1 | Svařitelnost uhlíkových ocelí | 13 |
| 2.2 | Metody tavného svařování..... | 14 |
| 2.2.1 | Svařování plamenem..... | 14 |
| 2.2.2 | Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (ROE)..... | 14 |
| 2.2.3 | Svařování v ochranné atmosféře plynu..... | 15 |
| 3 | DEFORMACE A ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ PŘI SVAŘOVÁNÍ | 21 |
| 3.1 | Zbytková napětí | 21 |
| 3.1.1 | Napětí způsobené změnou objemu | 22 |
| 3.1.2 | Napětí způsobené rozdílnou tepelnou roztažností | 22 |
| 3.1.3 | Napětí způsobené vznikem teplotního gradientu v materiálu | 23 |
| 3.2 | Deformace..... | 23 |
| 3.2.1 | Příčné deformace | 24 |
| 3.2.2 | Podélné deformace | 25 |
| 3.2.3 | Úhlové deformace | 26 |
| 4 | ÚNAVOVÁ ŽIVOTNOST | 27 |
| 4.1 | Hodnocení únavové životnosti podle historicky daných koncepčních postupů ... | 28 |
| 4.2 | Základní Wöhlerova křivka únavové životnosti | 28 |
| 5 | EXPERIMENT – PEVNOSTNÍ ANALÝZA | 31 |
| 5.1 | Úvodní údaje a parametry | 31 |
| 5.2 | Svarové spoje | 32 |
| 5.3 | Průběh napětí a deformace rámu | 34 |
| 6 | POSOUZENÍ ŽIVOTNOSTI VYBRANÝCH OBLASTÍ RÁMU | 44 |
| 6.1 | Výpočet součinitele lineárního součtu poškození svař.oblasti žebra a rámu..... | 44 |
| 6.2 | Výpočet součinitele lineárního poškození pro oblast spojení 213 a 217..... | 46 |
| 6.3 | Výpočet součinitele lineárního poškození pro oblast spojení 213 a 216..... | 48 |
| 7 | ZÁVĚR | 50 |

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

SEZNAM PŘÍLOH

ÚVOD

Odvětví výroby potravin a nápojů patří k nosným odvětvím zpracovatelského průmyslu v České republice. Jeho hlavním významem je zajištění výživy obyvatelstva. V České republice se výroba potravin a nápojů podílí na HDP zhruba 2,7 % a po vstupu do EU mírně roste. Celkově však přetrvává nižší efektivnost a produktivita potravinářství v ČR v porovnání s vyspělejšími zeměmi EU, kde je podíl výroby potravin na hrubé přidané hodnotě obvykle vyšší. Výkonnost produkce na pracovníka v ČR je zhruba na 40-50 % mezi zeměmi EU, tento rozdíl přetrvává, ale nesnižuje se [10].

Česká republika patří mezi země s propracovanou potravinářskou legislativou a dobře fungujícím systémem úředních kontrol potravinového řetězce ve prospěch spotřebitelů. Efektivní činnost dozorových orgánů, včetně medializace výsledků úředních kontrol, posiluje na domácím trhu důvěru spotřebitelů v dodržování standardů kvality a zdravotní nezávadnosti potravinářských výrobků. To samozřejmě klade vysoké nároky i na samotná výrobní zařízení, která dále zpracovávají vyprodukované základní potraviny [10].

V české republice se nachází řada velmi dobrých a exportně orientovaných podniků, které se zaměřují na inovaci a zvyšování konkurenceschopnosti v rámci evropského trhu, a to nejen v produkci potravin, ale i v produkci nových technologicky vyspělých strojů a strojních zařízení pro zpracovatelské potravinářské podniky [12].

Moje diplomová práce se zabývá posouzením životnosti svařovaného rámu pro hydrauliku lisu stroje RONDOPRESS, který zpracovává těsto pro pekárenský průmysl. Základní snahou je zvýšení produktivity výrobních faktorů a zároveň snižování fixních nákladů při lépe technologicky vybavené a koncentrované výrobě.

V předchozích letech byl problémem českého potravinářského průmyslu nedostatek kapitálu, což se částečně daří vyřešit díky přílivu zahraničních investic, zejména v rámci grantů z EU.



Obr. 1 Rondopress [15].

1 ROZBOR SOUČÁSTI

Cílem práce je posoudit životnost svařovaného rámu pro hydrauliku lisu, jenž je základní součástí výše zobrazeného stroje RONDOPRESS, který je určen v pekárenském průmyslu na výrobu těsta. Stroj je vyráběn ve dvou verzích, jeden typ je určen pro evropský trh a druhý typ pro americký trh, kde je v současné době podstatně větší odbyt.

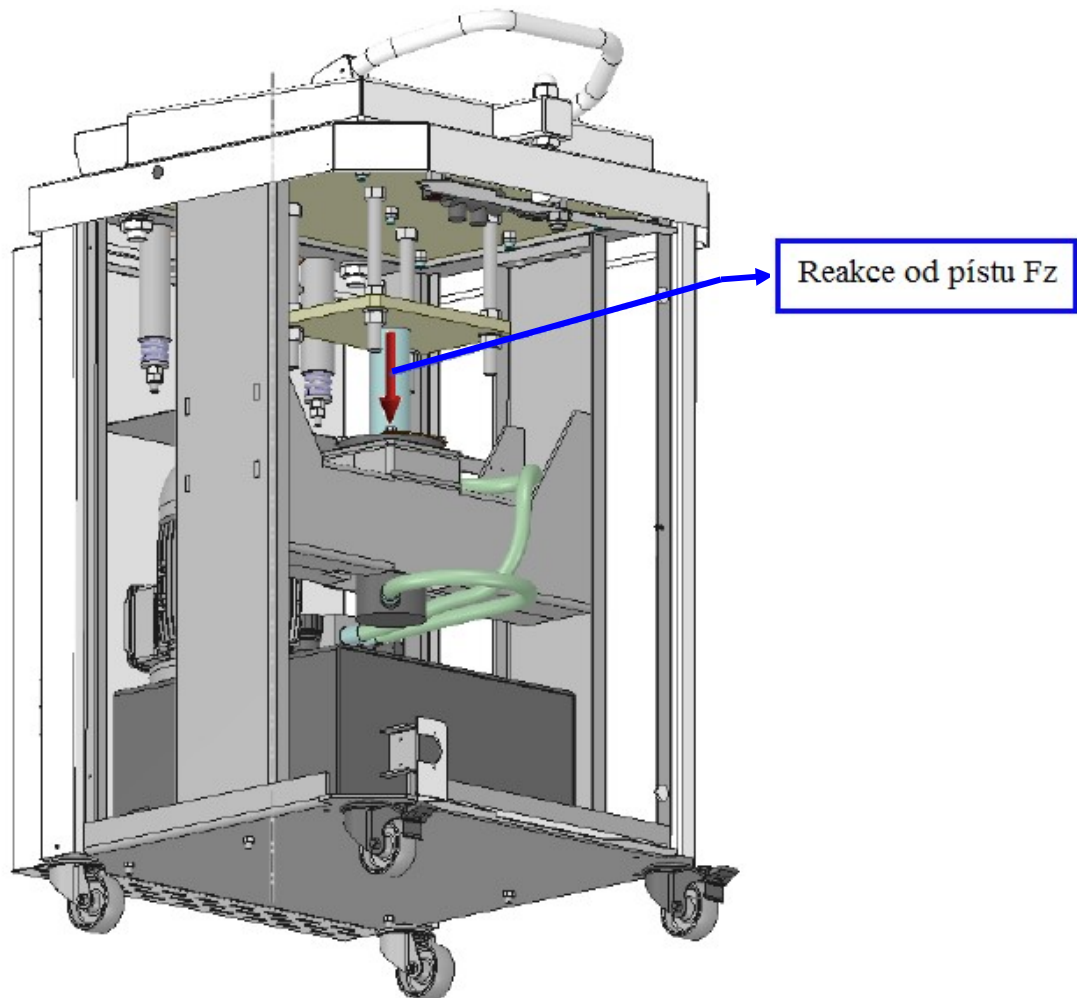
Tento stroj patří do skupiny zařízení využívaných v potravinářském průmyslu, které je velmi náročné a specifické z hlediska požadavků na kvalitu, hygienu a především bezpečnost při samotné výrobě. Pro zaručení bezpečnosti, pevnosti a tuhosti konstrukce rámu je nutné vypracovat svary bez vad s minimálním ovlivněním základního materiálu. K mezním stavům, které limitují životnost a bezproblémovou funkčnost zařízení, patří únava materiálu, ta se stává nejčastější příčinou porušení. Největší nebezpečí vyplývá z dlouhodobého působení takových sil, které při nahodilém jednorázovém zatížení nezpůsobí žádné poškození.

A proto hlavním zadáním předkládané diplomové práce je provedení únavové analýzy materiálu dlouhodobě zatěžovaného svařeného rámu stroje RONDOPRESS z hlediska funkčnosti hydrauliky lisu a daného požadavku 1825000 cyklů, v jehož komoře se lisuje těsto do úhledných bloků. Toto posouzení se provádí podle metodiky stanovené normou ČSN EN 13445-3.



Obr. 2 Detail hydrauliky lisu stroje RONDOPRESS.

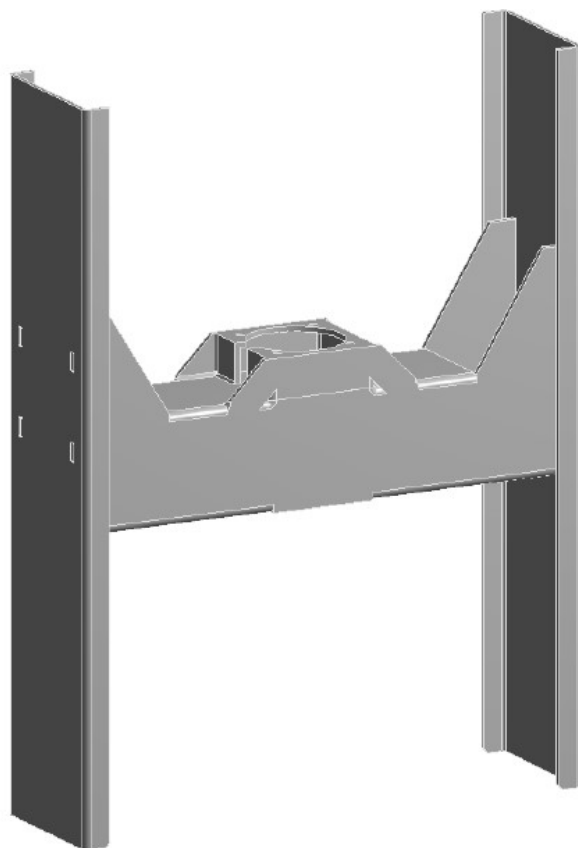
Předmětem experimentu pro výrobu a prodej stroje RONDOPRESS je provedení analýzy, co způsobí píst lisu se základní konstrukcí rámu při opakovaném cyklickém zatěžování stanoveného počtu cyklů životnosti (viz obr.3).



Obr. 3 Model lisu.

Samotné vytvoření svarů v požadované kvalitě není snadnou záležitostí. Při zavádění nové technologie bylo nutné provedení experimentálních svarů, kterými se ověřila správná volba materiálů, předehřevu, parametrů svařování, podmínek uchycení dané konstrukce anebo přípravku.

Rám pro hydrauliku lisu je svařen z několika dílů. Pro výrobu rámu je použit materiál ocel 1.0038 (S235JRG2). Uvedený rám se skládá z rámu pístu, desky pístu, bočnice pro hydrauliku rámu a žebra.



Obr. 4 Model rámu.

Tab. 1 Chemické složení oceli S235JRG2 [13,14].

| Materiál | C [hm.%] | P [hm.%] | S [hm.%] | N [hm.%] | Mn [hm.%] |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 11 375 | max. 0,17 | max. 0,045 | max. 0,045 | max. 0,014 | - |
| S235JRG2 | max. 0,17 | max. 0,045 | max. 0,045 | max. 0,014 | max1,40 |

Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli S235JRG [14].

| R_{eH} [MPa] | R_m [MPa] | A₅ [%] | KV [J] | E [GPa] |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------|----------------|
| min 235 | 360 - 510 | min 26 | min. 27 | 206 |

2 TEORIE SVAŘOVÁNÍ

Svařování patří mezi nerozebíratelné druhy spojení dvou nebo více dílů. K tomuto spojení dochází dodáním určitého množství energie do místa styku dílů. Postupem času bylo vyvinuto více způsobů a technologií svařování, neboť je kvalitativně více možností přívodu tepla nebo kinetické energie do místa svaru.

Různé způsoby svařování si dále také vynutila zvyšující se potřeba svařovat velké množství různých druhů materiálu při ještě větší potřebě různého konstrukčního uspořádání svařovaného uzlu [2].

Svařování se uplatňuje v mnoha oborech průmyslu - ve strojírenské výrobě, u silničních a železničních vozidel, při stavbě lodí, v ocelových konstrukcích, jako jsou mosty, jeřáby, dálkovody, dále u tlakových nádob pro chemii a energetiku, ve stále větší míře v elektrotechnice a také při výrobě zařízení a strojů pro potravinářský průmysl, což je předmětem této diplomové práce.

2.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí

Mezi uhlíkové oceli jsou zahrnuty podle ČSN oceli třídy 10, 11 a 12 a jejich základní vlastnosti jsou určeny obsahem uhlíku, naopak síra a fosfor by měly být zastoupeny v minimální míře. Uhlíkové oceli se vyznačují nízkou odolností v oxidačním a korozním prostředí. Také se vyznačují podstatným snížením pevnosti při vyšších teplotách [1].

Při jejich technickém využití musíme vzít v úvahu zejména tato omezení [1]:

- nízká prokalitelnost,
- výrazný pokles tvrdosti při žhání,
- malá korozní odolnost, malá odolnost při oxidaci,
- malá pevnost při vysoké teplotě.

Při svařování nelegovaných ocelí nesmíme zapomenout, že uhlík v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) způsobuje zvýšení tvrdosti, snižuje plasticitu, čímž vzniká vnitřní pnutí, které může vést ke vzniku trhlin. Účelná výroba a zvolený vhodný typ svarku mohou nebezpečí vzniku trhlin snížit, vhodné je nepoužívat svarky velké tloušťky a svarky s vysokou tuhostí. Pro zamezení vnitřních pnutí jsou vhodnější tupé spoje, než spoje koutové, aby byla konstrukce dostatečně pružná [1].

Vliv jednotlivých prvků na svařitelnost uhlíkových ocelí [1]:

- **křemík** - zvyšuje pevnost feritu, působí silně deoxidačně,
- **mangan** - zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti a přitom nesnižuje plasticitu, společně s křemíkem se používají k výrobě uklidněných ocelí,
- **fosfor** - zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti, zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi, snižuje plasticitu ocelí, způsobuje zkřehnutí tuhého roztoku α ,
- **síra** - přidává se za účelem zlepšení obrobiteľnosti (automatová ocel), železo a sulfid železnatý tvoří nízkotavitelné eutektikum, náchylnost na vznik teplých trhlin,
- **dusík** - zvyšuje mez kluzu, pevnosti a tvrdost, snižují se plastické vlastnosti, zejména tažnost, vrubová houževnatost i mez únavy, vylučování nitridů způsobuje stárnutí uhlíkových ocelí a křehkost,

- **vodík** - nežádoucí příměs slitin železa, vniká rozkladem vzdušné vlhkosti, je třeba se vyvarovat vlhkosti obalu elektrod a tavidel,
- **hliník** - působí silně deoxidačně a denitridačně,
- **měď** - dostává se do nelegovaných ocelí používáním šrotu s určitým obsahem mědi, při obsahu 0,15 – 0,50 hm. % v oceli se snižuje rychlost koroze, vytváří se těsná oxidická vrstvička chránící před atmosférickou korozí.

U nelegovaných uhlíkových ocelí je nutné věnovat pozornost stárnutí svarových spojů, které bývá vyvoláno precipitací nitridů z přesyceného tuhého roztoku nebo deformací a dalším problémem je hrubnutí zrna v oblasti svarového spoje v důsledku rekrystalizace, která bývá vyvolána dřívějším tvářením těchto oblastí za studena [1].

2.2 Metody tavného svařování

Všechny běžné metody svařování lze rozdělit na dvě velké skupiny metod, a to na metody tavného svařování a metody tlakového svařování. Rozdělení metod svařování je dle ČSN EN 34063 [2].

2.2.1 Svařování plamenem

Technologie svařování plamenem se provádí ručně s přiváděním přídavného materiálu ve formě drátu. Plamen vzniká zapálením směsi kyslíku a hořlavého plynu vystupujícího z hořáku. Pro svařování ocelí se využívá plynů, které mají co největší výhřevnost v kombinaci kyslík a acetylen. Do základního materiálu je vnášeno velké množství tepla, což způsobuje vznik široké tepelně ovlivněné oblasti (TOO), vznik značných deformací a vnitřního pnutí v místě spoje. V případě svařování slabých materiálů je sklon k přehřívání až spálení materiálů. Tato metoda není vhodná zejména pro koutové spoje, doporučuje se používat zejména tupé svary [2].

2.2.2 Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (ROE)

Při svařování obalenou elektrodou hoří mezi elektrodou a základním materiálem elektrický oblouk, který je zdrojem potřebného tepla [2]. Dochází tak k natavování elektrody a základního materiálu. Natavené kapky kovu jsou obloukem přenášeny do svarové lázně, tak vzniká svarová housenka, kterou před okolní atmosférou chrání vrstva strusky, která se po zatuhnutí svarového spoje musí odstranit. Obalená elektroda je tvořena kovovým jádrem a obalem. Tento obal obsahuje přísady, které se v elektrickém oblouku odpařují, vytvářejí tak ochrannou atmosféru a strusku [2]. Vzhledem k omezené délce elektrody je samotný proces svařování často přerušován, což snižuje hlavně produktivitu práce. Výhodou je jednoduchá manipulace, nejsou potřeba plynové lahve, ke svařování lze použít lehký a přenosný invertorový zdroj.

2.2.3 Svařování v ochranné atmosféře plynu

Obloukové svařování v ochranné atmosféře je v současnosti nejrozšířenější a nejpoužívanější metodou svařování. Je to dáno produktivitou, ekonomickou výhodností a také možností svařování různorodých materiálů.

Při obloukovém svařování v ochranných plynech hoří oblouk obklopen ochranným plynem, který chrání elektrodu, oblouk, odtavující se kapky přídavného materiálu a tavnou lázeň proti účinkům vzdušného kyslíku a dusíku. Jednotlivé technologie se rozlišují podle druhu elektrody a ochranného plynu [2].

Metody svařování

| | | |
|---------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MIG 131 | Metal Inert Gas | obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (např. Ar, He, směsné plyny) |
| MAG 135 | Metal Aktiv Gas | obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (např. CO ₂ , směsné plyny) |



Obr. 5 Svařování v ochranné atmosféře [7].

Svařování metodou MIG/MAG

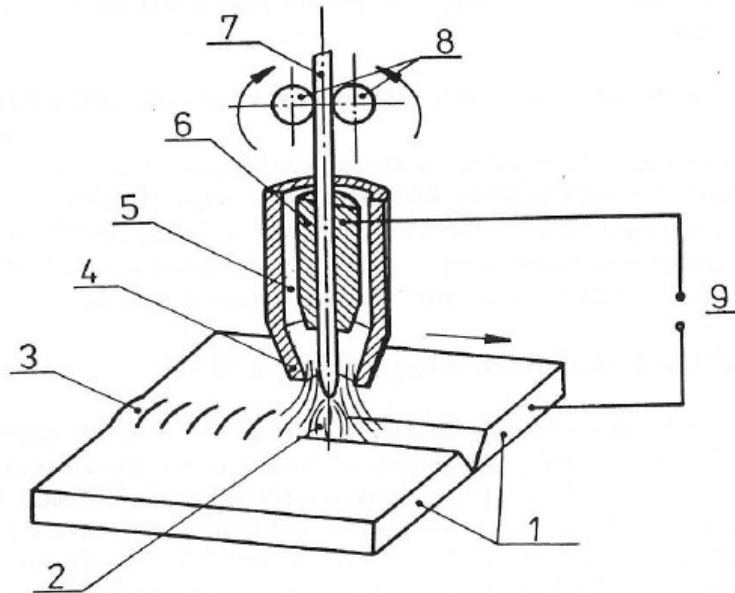
Svařováním v ochranné atmosféře plynu tavící se elektrodou vzniká oblouk mezi kontinuálně podávaným svařovacím drátem a svařencem, kdy oblouk i svařová lázeň jsou chráněny proudem plynu, a to aktivního nebo inertního podle použité metody [2].

Metoda MAG se využívá při svařování nelegovaných, nízkolegovaných a vysokolegovaných ocelí, zatímco metoda MIG se využívá při svařování neželezných kovů - hliníku, jeho slitin, slitin mědi, titanu. Vývoj těchto metod se zaměřuje zejména na zvyšování produktivity práce, stabilitu procesu hoření oblouku, na jakost spojů, ale také na hygienu práce svářečů [2].

Charakteristickým rysem obloukového svařování MIG/MAG je vysoké proudové zatížení. Při ručním obloukovém svařování se pracuje se specifickým zatížením 20 až 30 A.mm⁻².

Při obloukovém svařování tavící se elektrodou je specifické zatížení svařovacího drátu až desetinásobné [4].

Hodnota svařovacího proudu je přímo závislá na podávací rychlosti svařovacího drátu, tj. čím vyšší je rychlost podávání drátu, tím vyšší je svařovací proud. Tímto způsobem lze dosahovat velkých výkonů natavení i při malých průměrech svařovacího drátu [4].



Obr. 6 Princip svařování MIG/MAG [2].

1 – svařovaný materiál, 2 – elektrický oblouk, 3 – svar, 4 – plynová hubice,
5 – ochranný plyn, 6 – kontaktní průvlak, 7 – přídavný materiál,
8 – podávací kladky, 9 – zdroj proudu.

Výhody svařování MIG a MAG [2]:

- snadná svařitelnost různých kovů a různých tloušťek,
- snadná svařitelnost ve všech polohách od tloušťky materiálu 0,8 mm,
- minimální tvorba strusky,
- vysoká proudová hustota,
- vysoký výkon odtavení,
- vysoká produktivita díky svařovacímu drátu, který je pro proces klíčový (nekonečný drát),
- snadný start oblouku a svarové lázně,
- snadný start oblouku bez nárazu svařovacího drátu do svarku,
- velmi dobrý profil svaru a hluboký závar,
- široký proudový rozsah pro jeden průměr drátu,

- stabilní plynová ochrana,
- nízká pórovitost,
- malý nebo žádný rozstřík,
- snadná aplikace metody u robotizovaných a mechanizovaných systémů svařování,
- přímá vizuální kontrola oblouku a svarové lázně.

Svařovací zařízení pro metodu MIG a MAG je stejné, podle použité metody se mění pouze ochranný plyn, případně svařovací drát. Velmi běžné je proto označení těchto dvou metod svařování MIG/MAG [4].

Drát je průběžně podáván do oblasti svařování integrovaným podávacím zařízením. Ochrana taveniny je zajištěna plynem nebo směsí plynů dodávaných speciální tryskou.

Při svařování metodou MIG se svařuje drátem v inertním plynu argonu, helia, nebo v jejich směsi. Inertní plyn plní pouze ochrannou funkci k zamezení přístupu vzduchu k roztavenému kovu, k chemickým procesům je zcela netečný. Oblouk hoří mezi drátem a základním materiálem a je chráněn právě inertním plynem.

Svařovací drát je z cívky plynule dodáván do místa svaru při stejnosměrném proudu a při kladné polaritě elektrody. Charakter přenosu kovu obloukem závisí na parametrech svařování a ochranném plynu. Pro tenké plechy je běžný zkratový a pro větší tloušťky plechů sprchový přenos.

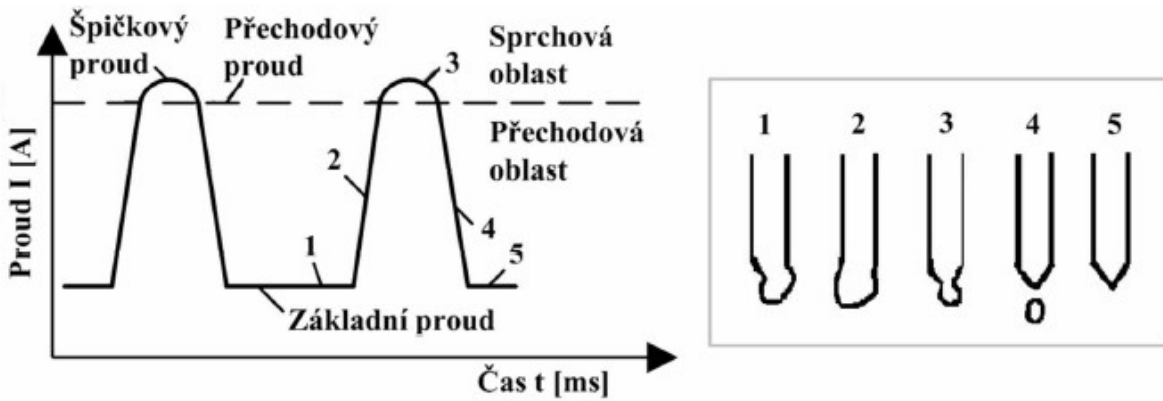
Přenos kovu v oblouku do tavné lázně lze měnit změnami parametrů a svařovacími podmínkami, které tak ovlivňují vzájemný poměr sil působících na kapku roztaveného kovu.

Základní druhy přenosu kovu do tavné lázně:

- zkratový přenos - přenos kovu v oblouku, kdy jednotlivé kapky tavící se elektrody způsobují zkrat mezi elektrodou a svarovou lázní [4]. Používá se pro malé tloušťky, kořeny svarů a svařování v pozicích. Pracuje se s nízkými hodnotami proudu, do svaru se tak vnáší menší teplo, svarová lázeň není tak tekutá a nastává rychlé tuhnutí.
- bezzkratový přenos - přenos kovu v kapkách, jenž se oddělují od elektrody usmýknutím bez vzniku zkratu mezi elektrodou a svarovou lázní, tento proces nastává při vyšších hodnotách napětí a proudu, do základního materiálu je vnášeno větší množství tepla, proces probíhá v ochranné atmosféře směsi plynů Ar + CO₂, Ar + O₂, díky vysokým parametrům svařování může být i vysoká rychlost svařování při velké tloušťce svařovaného materiálu [2].
- sprchový přenos - bezzkratový přenos kovu v oblouku, kdy kov elektrody přechází do svarové lázně jemnými kapkami v ose oblouku [4]. Používá se pro velké tloušťky, vysoké výkony odtavení a vysokou rychlost svařování. Může však způsobovat deformace a změnu mikrostruktury svarového spoje a tepelně ovlivněné oblasti z důvodu velkého vnášení tepla, což způsobuje hluboké závary. Výkon odtavení materiálu je až 4x vyšší, než u oblouku se zkratovým přenosem kovu. U tohoto způsobu se doporučuje pouze svařování ve vodorovné poloze vzhledem k objemu tavné lázně.

- impulsní přenos

- používá se pro střední výkony a doporučuje se pro svařování nerezavějících ocelí a lehkých slitin malé až střední tloušťky. Objem a frekvence odtavených kapek je dána amplitudou impulsního proudu, tvar a rozsah této amplitudy se nastavuje ohledem na ochranný plyn a přídavný materiál. Optimální velikost kapek se zajišťuje v závislosti svařovacího proudu na frekvenci impulsů. Pro nízký svařovací proud je potřeba nízká frekvence impulsů a naopak. V konečné fázi amplitudy dochází k odtavení kapky kovu. V průběhu děje se udržuje nepřetržitý elektrický oblouk, který ohřívá svarovou lázeň a přídavný materiál. Hodnotu impulsního proudu ovlivňuje svářeč. U tohoto přenosu vzniká velmi kvalitní spoj s jemnou, pravidelnou housenkou bez rozstříku díky malému vnesenému teplu a malým deformačním účinkům, proto je vhodný pro tenké hliníkové plechy a tuto metodu lze optimálně využít pro koutové svarky bez okrajových zápalů [4,11].



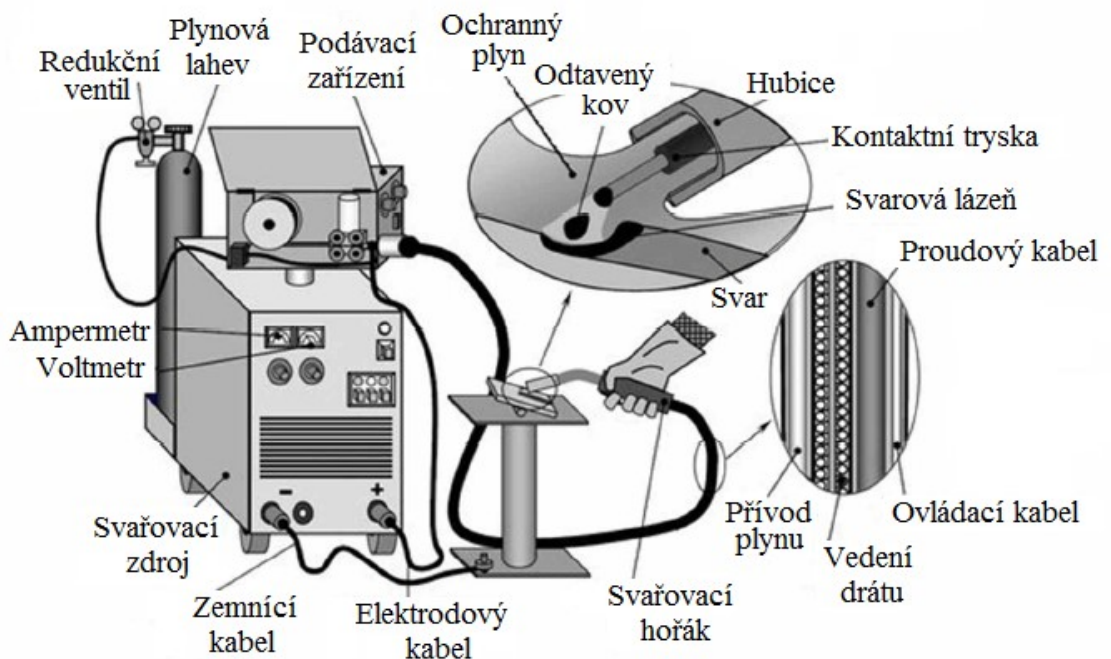
Obr. 7 Impulsní charakteristika oblouku [16].



Obr. 8 Druhy přenosu – kapkový, sprchový, impulsní [17].

Hlavní části zařízení pro svařování metodou MIG/MAG [4]:

- zdroj svařovacího proudu,
- podávací zařízení svařovacího drátu,
- svařovací hořák,
- a příslušenství:
 - zásobník svařovacího drátu,
 - láhev s ochranným plynem,
 - redukční ventil s průtokoměrem.



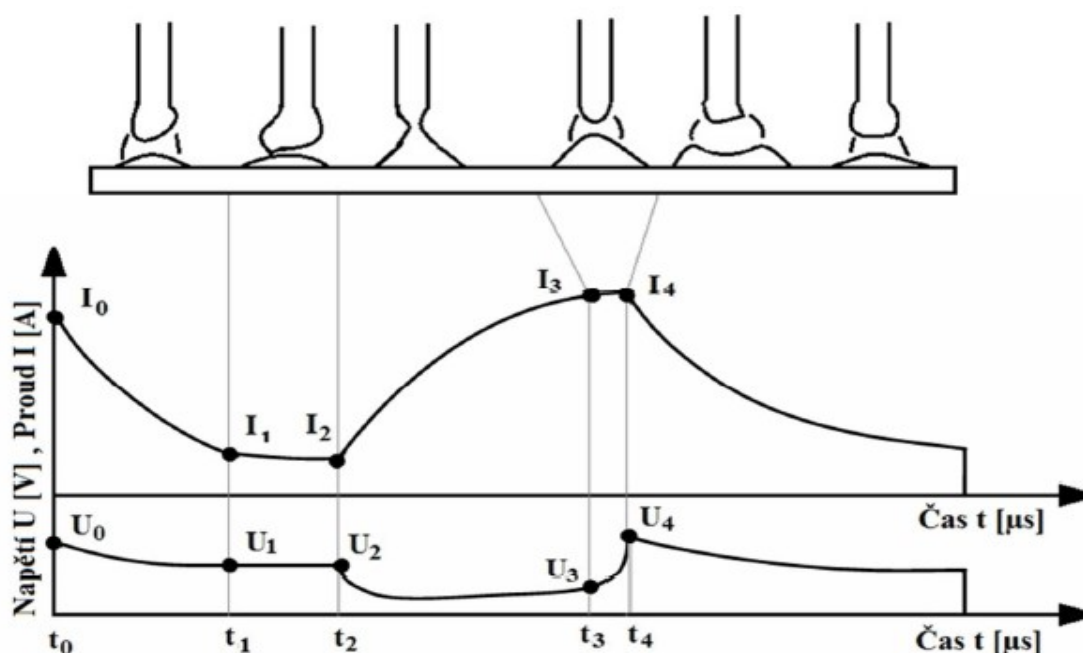
Obr. 9 Vybavení pro MIG/MAG svařování [20].

Při svařování metodou MAG se svařuje drátem v aktivním plynu oxidu uhličitého nebo směsi oxidu uhličitého, argonu a kyslíku. Oxid uhličitý při svařování oxiduje tavnou lázeň. Jakost svarů zlepšíme drátem legovaným manganem a křemíkem, které se lépe slučují s kyslíkem. Plyn musí mít čistotu minimálně 99,5 %, pak tyto oxidy tvoří na povrchu svaru jen nepatrné množství strusky.

MAG umožňuje svařování ve všech polohách a vyznačuje se vysokou svařovací rychlostí. Je tedy produktivnější, klade mnohem nižší nároky na čištění strusky a zároveň vyvolává vyšší ochranu svarového kovu, do základního materiálu vnáší méně tepla a deformací, než plamenové svařování.

Z uvedených metod byla vybrána pro svařovaný rám jako **nejvhodnější metoda MAG a zkratový přenos kovu do tavné lázně.**

Zkratový přenos kovu do tavné lázně vzniká zkratováním mezery svařovacího oblouku, tím dojde k odtavení přídavného materiálu. Ke zkratování dochází tím, že rychlost tavení elektrody je nižší než její přísun do místa svařování. Rychlost tavení přídavného materiálu je nižší než rychlost podávání, proto je přídavný materiál ponořen do svarové lázně, kde vznikne odporový ohřev přídavného materiálu. Po dosažení teploty tavení přídavného materiálu se část odtaví do svarové lázně, a tím se spojení přeruší a elektrický oblouk se opět zapálí. Tento proces se v průběhu svařování opakuje a probíhá v ochranné atmosféře CO_2 . Pomocí svařovacích parametrů napětí a proudu lze nastavit frekvenci zkratů (čas hoření oblouku) i na více než 100 Hz. Výhodou metody je vnášení menšího množství tepla, a tím vznikají menší deformační účinky při svařování [2].



Obr.10 Průběh napětí a proudu při zkratovém přenosu kovu [16].

3 DEFORMACE A ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ PŘI SVAŘOVÁNÍ

Svařovací proces má teplotní a deformační účinek na základní materiál. Svarová napětí a deformace jsou způsobovány přívodem energie do místa vytváření svarového spoje a následným sdílením tepla do okolního základního materiálu. Vznikají u každého procesu svařování a nelze tomu zcela zabránit, můžeme je však účinně ovlivňovat technologickými zásahy a konstrukčním řešením svarů [3].

Svarová napětí i deformace vznikají jak ve fázi ohřevu, tak i při ochlazování svařovaného materiálu – nejdříve koncentrovaný ohřev materiálu a pak jeho nestejněmorné ochlazování [3].

Podle charakteru vzniku je dělíme na:

- teplotní a strukturní.

Podle doby existence je dělíme na:

- přechodná a zbytková.

Zatímco přechodná působí v materiálu pouze po určitou omezenou dobu, kdy existuje příčina jejich vzniku, zbytková přetrvávají v materiálu i po ukončení technologického procesu [3].

3.1 Zbytková napětí

Zbytková svarová napětí, která vznikají v samotném svaru a jeho bezprostředním okolí, ovlivňují užité vlastnosti svarů, mohou být příčinou selhání dané konstrukce, způsobují nežádoucí změny tvaru, kdy po svařování ještě následuje obrábění. Tento problém je nutné řešit v souladu s normami zabezpečení kvality ISO 9000 od konstrukčního návrhu přes technologii celé výroby až po kontrolu dodržování daných parametrů [3].

Charakter a velikost zbytkových napětí závisí na mnoha faktorech:

- nastavení svařovacích parametrů,
- zvolená metoda svařování a postup tvorby svaru,
- teplotní režim v průběhu a po svařování,
- druh a stav základního materiálu,
- tloušťka materiálu,
- druh, velikost, umístění a počet svarů,
- konstrukční řešení oblasti svaru vzhledem k tuhosti [3].

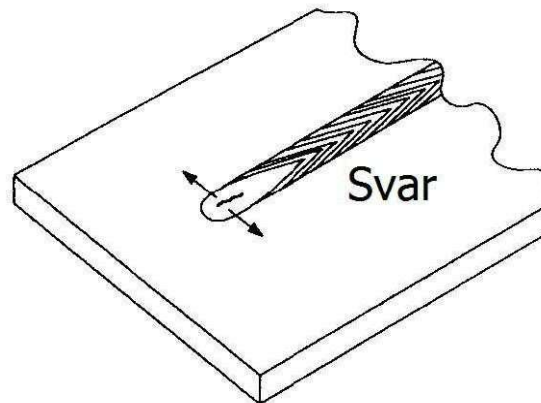
Praktické metody snižování napětí již v procesu svařování:

- příčná napětí snižuje svařování volných neupnutých dílů,
- podélná napětí snižuje svařování s vyšším přívodem energie na jednotku délky svaru,
- aktivní a reaktivní napětí snižuje místní předpětí nebo ohřev,
- makroskopická napětí snižuje svařování s celkovým předehřevem, snižují se i zbytkové deformace a strukturní napětí,
- vhodně zvolený postup vytváření svarového spoje – postup a pořadí kladení housenek svaru a vrstev,
- svařování s předběžnou pružnou deformací [3].

Zbytkové napětí tepelného původu podle mechanismu vzniku dělíme do 3 skupin:

3.1.1 Napětí způsobené změnou objemu

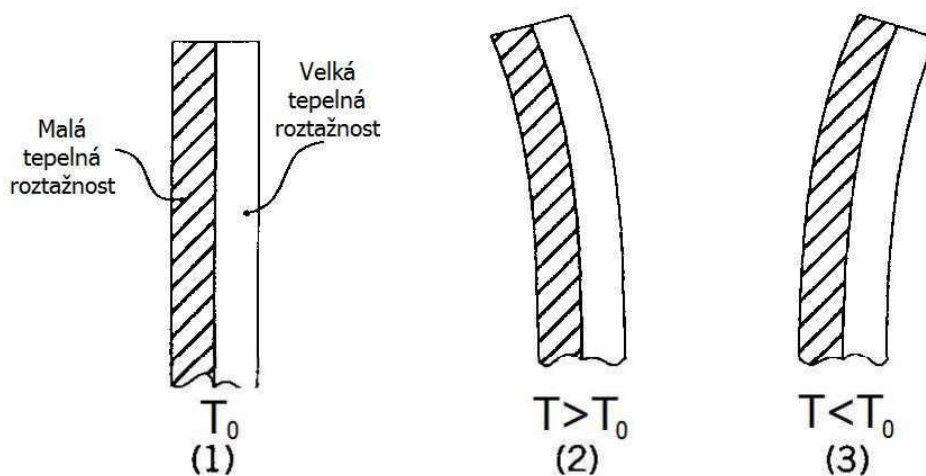
Roztavený kov ve svarové lázni ztuhne, tím dojde ke zmenšení jeho objemu a následné reakci v okolním materiálu - pokud je to možné, přizpůsobí se smrštění tuhnutí materiálu. Pokud tato deformace není dostačující, zvýší se velikost napětí v materiálu. Pokud tato hodnota překročí mez kluzu, dojde ke vzniku trhlin v materiálu.



Obr. 11 Roztavený svarový kov smršťující se během tuhnutí [6].

3.1.2 Napětí způsobené rozdílnou tepelnou roztažností

Takové napětí může vzniknout, když spojujeme dva materiály s různou tepelnou roztažností. Všeobecně známý a rozšířený je princip bimetalového pásku, který se používá při řešení a výrobě bimetalových termostátů a teploměrů. Pokud deformaci pásku znemožníme, dojde k nárůstu vnitřního napětí v materiálu - při svařování či pájení dvou různých materiálů.



Obr. 12 Princip bimetalového pásku [6]:
při pokojové teplotě (1), po ohřátí (2), po ochlazení (3).

3.1.3 Napětí způsobené vznikem teplotního gradientu v materiálu

Když vznikne podél některého rozměru svařence teplotní gradient lokálním ohřevem – ochlazením, dochází k různé rychlosti rozpínání – smršťování uvnitř materiálu, jehož následkem je zvýšené napětí, které může způsobit vznik trhlin.

3.2 Deformace

Svařovací proces způsobuje různé svarové deformace, které dělíme obdobným způsobem jako svarová napětí:

- dle oblasti působení na:
 - vnitřní - ta se objevují v jednotlivých vláknech nebo objemech průřezu,
 - vnější - projevují se změnami geometrického tvaru a rozměrů a rozměrů svařence a dále je členíme na:
 - elementární, což jsou deformace svarového spoje,
 - lokální, jenž se projevují jen v určité části svarku a nemají vliv na celkovou deformaci konstrukce,
- podle rozsahu na:
 - makroskopické - projevují se změnami geometrického tvaru a rozměrů svařovaných dílů, což jsou vnější deformace,
 - mikroskopické - vznikají ve velikosti zrn a nemají vliv na změnu tvaru nebo rozměru svarku, jsou to vnitřní deformace,
 - submikroskopické - co do objemů jsou na úrovni elementárních buněk a jsou to opět vnitřní deformace,
- dle doby existence na:
 - přechodné - dočasné deformace vykazuje svařovaný díl pouze po určitou dobu, dle příčiny jejich vzniku,
 - zbytkové - tyto deformace zůstávají ve svařovaném dílu i po ukončení technologického procesu,
- dle stálosti na:
 - elastické - deformace způsobí napěťový stav, napětí však nepřekročí mez pružnosti a těleso se po odstranění síly vrátí do původního stavu,
 - plastické - vzniklé napětí překročilo mez kluzu, deformace zůstávají trvalé a existují dále v tělesech bez napětí,
 - elasticko plastické - vzniklé napětí překročilo mez kluzu a v tělesech dále existuje zbytkové napětí [3].

Elementární deformace svarového spoje

Jsou to zbytkové deformace, které jsou způsobeny smršťováním svaru ve všech směrech a jsou složeny ze 3 druhů smrštění:

příčné smrštění - z_p kolmo na osu svarku,
podélné smrštění - z_l ve směru osy svarku, v blízkosti svaru jsou deformace větší,
úhlové deformace - z_u změna úhlu α před a po svaření závisí od úhlu rozevření a na počtu vrstev svaru [4].

Ve výrobním procesu zpravidla více vadí deformace svarků než vnitřní napětí. Deformace svarků lze odstranit různými metodami mechanického rovnání – kladivem, lisem, lze použít rovnání teplem.

Při tepelném rovnání se využívá intenzivní bodový, klínový nebo plošný ohřev. Při všech těchto metodách se do svařence vnáší další napětí, která lze v případě nutnosti snížit následným zvoleným postupem:

- žíhání na snížení vnitřního pnutí, a to s celkovým ohřevem svarku nebo s místním ohřevem,
- mechanickými způsoby, což je prokováním svaru, vibracemi,
- jednorázovým nebo opakovaným zatížením konstrukce.

3.2.1 Příčné deformace

Příčné deformace vznikají z různých příčin zejména u tupých a koutových svarů. Jsou způsobeny ve směru kolmém na podélnou osu svaru v rovině povrchu plechu.

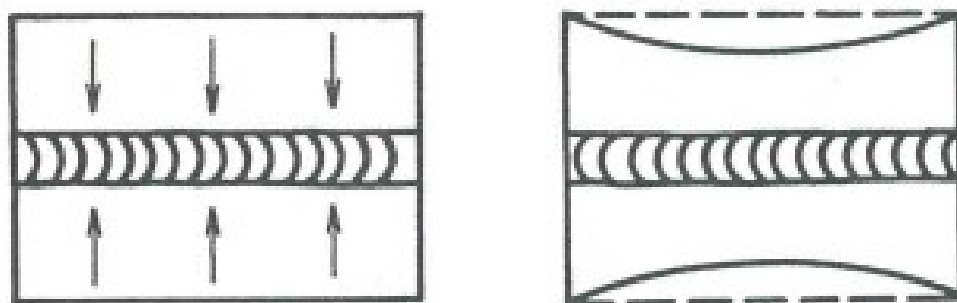
Velikost příčné deformace závisí na množství vneseného tepla do místa svaru, na zvoleném způsobu svařování a stehování, na tvaru svaru a jeho délce, na tloušťce materiálu, na tuhosti daného svarku a také způsobu upnutí dílů.

Pokud jsou plechy upnuty pevně, příčné smrštění způsobí vysoké napětí v materiálu a může tak vést ke vzniku podélné trhliny. Podstatnou část tvoří smrštění základního materiálu, svarový kov se na celkovém smrštění podílí jen asi 10 %, dochází ke změně vzájemné polohy spojovaných plechů v důsledku tepelných účinků při svařování.

Příčné deformace tupých svarů rostou s úhlem rozevření svaru. K nejmenším deformacím dochází u svaru X. Tyto deformace lze snížit přerušovaným svařováním a stehováním.

U vícevrstvých svarů se hodnota příčného smrštění při svařovacím režimu a tloušťce materiálu zvětšuje s počtem vrstev – se vzrůstajícím průřezem svaru.

Hodnoty příčného smrštění u koutových spojů jsou díky malému natavení základního materiálu menší než u tupých svarů. Tyto hodnoty se mění v závislosti na poměru velikosti svaru a tloušťky plechu.



Obr. 13 Příčné deformace [4, 5].

Příčné deformace lze omezit:

- zmenšením průřezu svaru,
- vnějším tuhým upnutím,
- snížením množství tepla na jednotku délky svaru,
- prokováním svaru,
- vhodným stehováním.

3.2.2 Podélné deformace

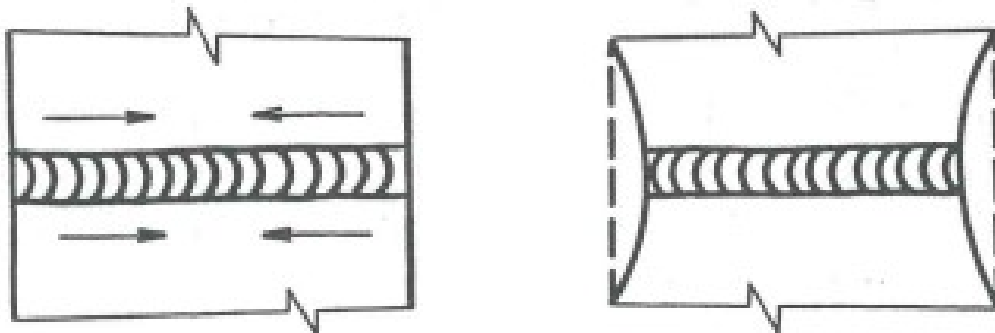
Podélné deformace svařovaného dílu vznikají ve směru osy svaru, kdy jejich velikost je závislá na dané metodě svařování, na zvoleném způsobu vyplňování úkosu a na tuhosti dílu ve směru svařování. Ohřátý základní materiál se během svařovacího procesu v oblasti svarové lázně projevuje dilatací. Ve fázi ohřevu se silně ohřátý materiál v oblasti tvorby svaru plasticky deformuje, ve fázi ochlazování narůstají v oblasti svaru napětí a po ochlazení se v podélném směru projeví smrštění.

U desek s velkou tloušťkou a vysokou tuhostí je podélné smrštění malé a jen na koncích plechu.

U tupých svarů se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,3 mm na 1 m délky svaru.

U tenkých plechů vzhledem k nízké tuhosti dochází k vyboulení.

Podélné smrštění materiálu může vyvolat i prostorové deformace svařovaného dílu. Způsob deformace je závislý na poloze svaru vzhledem k těžišti průřezu svařence.



Obr. 14 Podélné deformace [4, 5].

Podélné deformace lze zásadně ovlivnit:

- svařováním s menším tepelným příkonem,
- svařováním s malým závarem,
- kladením většího počtu menších svarových housenek,
- vhodným způsobem vyplňování úkosu – vratný a střídavý krok, přestávky mezi svary.

3.2.3 Úhlové deformace

Úhlové deformace se projevují odchýlením roviny jedné desky od původní roviny druhé desky vlivem svařování. Úhlová deformace je zvláštní druh deformace příčné, jejíž příčinou je nestejná velikost příčného smrštění ve směru tloušťky materiálu, která se projevuje zejména u svarů vyplňovaných na více vrstev a u svarů s nesymetrickým úkosem – svarů U, V a u koutových svarů.

Velikost těchto deformací je závislá na úhlu rozevření svaru a na počtu a způsobu kladení svarových vrstev. Při stejné tloušťce desek úhlové deformace rostou s rostoucím počtem svarových vrstev a způsobují tak průhyb desek.

U koutových svarů závisí velikost úhlové deformace na poměru velikosti svaru a tloušťky plechu. Pro určitou tloušťku plechu se úhlové smrštění zvětšuje s rostoucí velikostí svarů.



Obr. 15 Úhlové deformace [4, 5].

Úhlové deformace lze snížit:

- postupem kladení svarových housenek,
- vnějším tuhým upnutím,
- vhodnou úpravou svarových ploch,
- volbou svařovacího režimu,
- vhodným sestavením dílů před svařováním,
- co nejmenším počtem housenek,
- případně předběžnou pružnou nebo plastickou deformací svařovaného dílu v opačném směru, než je deformace vznikající při samotném svařování [3].

4 ÚNAVOVÁ ŽIVOTNOST

Únavou materiálu je nazýván řetězec procesů, které v daném materiálu probíhají za působení časově závislých sil, které vedou ke vzniku únavových trhlin, které jsou potom jednou z nejčastějších příčin selhání dané součásti. Při opakovaném působení časově proměnlivých vnějších sil dochází v mikrostruktuře materiálu ke vzniku deformací, které časem vyústí v makrotrhlinu.

Opakované zatěžování součástí strojů a konstrukcí časově proměnlivými vnějšími silami, které v nich vyvolávají napětí, které nepřevyšuje přípustné hodnoty při jejich statickém zatěžování. Proces únavy materiálů představuje postupné a nevratné hromadění poškození (kumulaci) při opakovaném cyklickém mechanickém, tepelném nebo mechanicko – tepelném zatěžování.

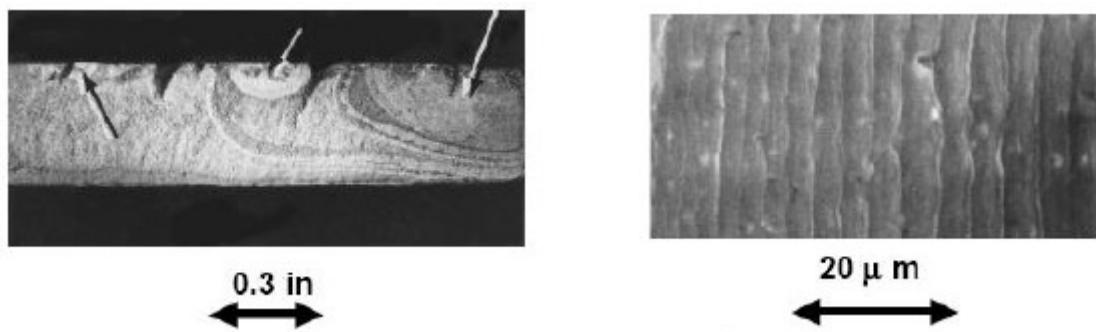
1) Životnost (počet cyklů) závisí na:

- aplikované amplitudě napětí, zatížení nebo deformace,
- kvalitě drátu (škrábance, vrypy, ..).

2) vzniká velké množství tepla, probíhá plastická deformace.

Charakteristické znaky únavy:

- křehký vzhled lomové plochy,
- trhliny se začínají projevovat na povrchu materiálu,
- na lomových plochách lze často i pouhým okem pozorovat lesklé nebo matné plošky připomínající pláž v mořské zátocce,
- při větším zvětšení lze na lomových plochách vidět charakteristické únavové žlábkování [9].



Obr.16 Lomové plochy [9].



Obr. 17 Únava materiálu – vznik trhliny [9].

Při zkoumání únavy lze používat více postupů a zkušebních metod.

Základní rozdělení únavy

4.1 Hodnocení únavové životnosti podle historicky daných koncepčních přístupů:

- z hlediska únavy těles bez trhliny – koncepce lokálního napětí a deformace
 - a) stress – life approach, hledisko řízeného napětí
vysokocyklová oblast $\sigma_a = f(N)$ – Wöhler
počet cyklů do lomu
 - b) strain – life approach, hledisko řízené deformace
nizkokyclová oblast $\varepsilon_{eap} = f(N)$ Manson – Coffin

Hodnocení z hlediska celkové únavové životnosti

$$N = N_i + N_s \quad (1)$$

N - celková únavová životnost

N_i - počet cyklů na iniciaci únavové trhliny

N_s - počet cyklů na šíření únavové trhliny

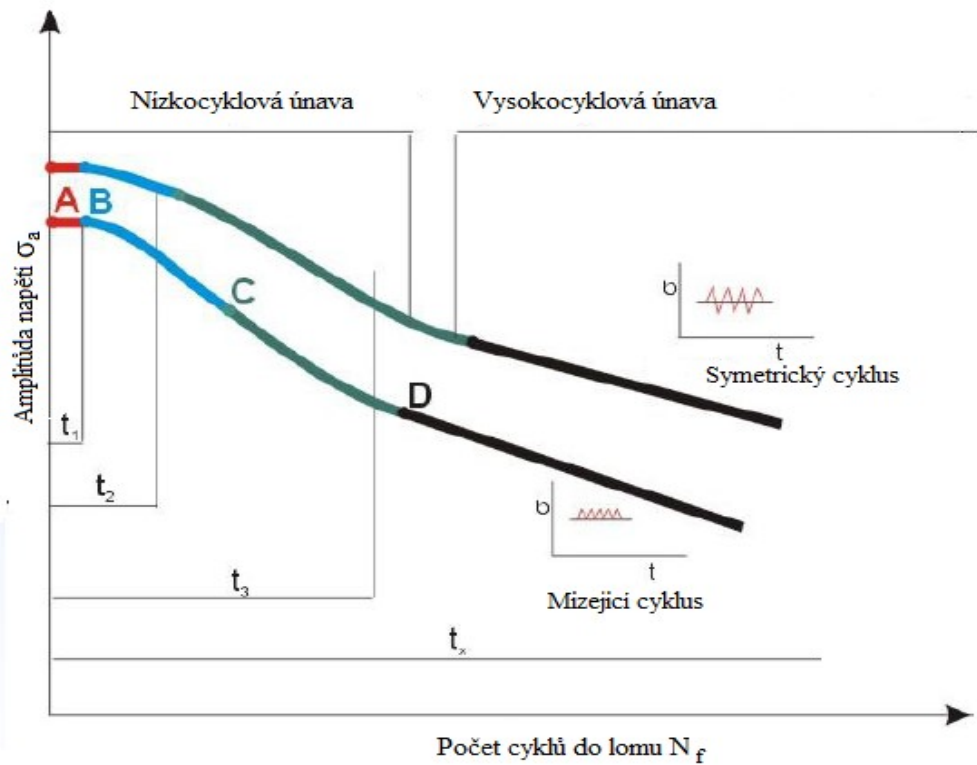
- z hlediska únavy těles s trhlinou – koncepce simulace vrubovaného tělesa
 - c) defekt tolerant approach – přístup z hlediska přítomnosti defektů v nadkritických velikostech využívající poznatků z lomové mechaniky
 $da/dN = f(K_a)$ Paris – Erdogan

Hodnocení z hlediska šíření únavových trhlin

- podle počtu cyklů do lomu:
 - nizkokyclová - vznikají plastické deformace,
 - vysokocyklová - vznikají elastické deformacehranici mezi těmito dvěma je bod zlomu, ultravysokocyklová (gigacyklová) [9].

4.2 Základní Wöhlerova křivka únavové životnosti

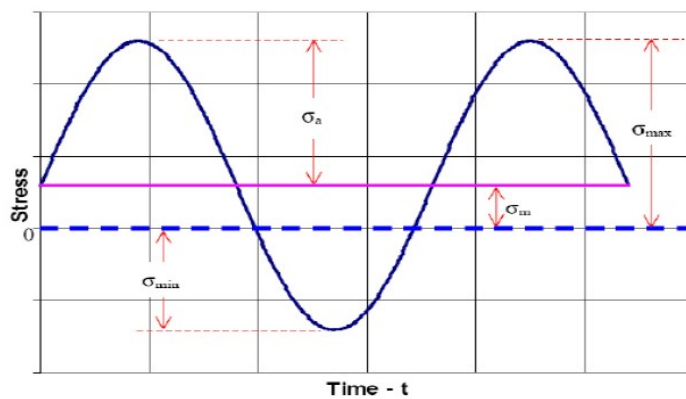
Wöhlerova křivka únavové životnosti - je nejstarší, nejznámější, nejpoužívanější a nejuniverzálnější diagram pro posuzování únavové životnosti,
- vyjadřuje závislost amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů do lomu N_f . Amplituda napětí, při které nedojde k porušení tělesa ani po vysokém počtu cyklů (cca 10^7), se nazývá mez únavy σ_c [9].



Obr. 18 Wöhlerova křivka únavové životnosti [9].

Základní charakteristiky cyklu:

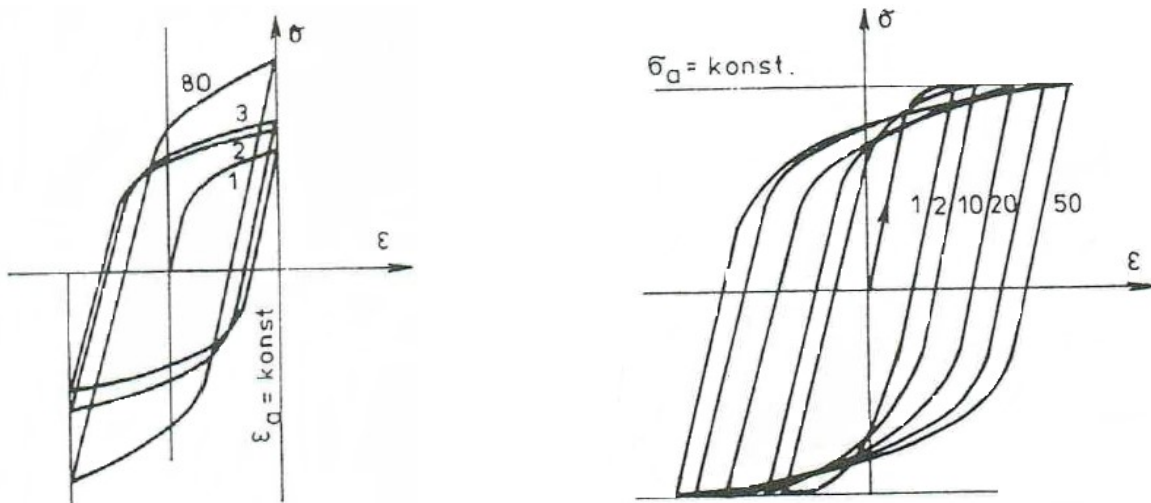
- σ_{\max} = maximální napětí cyklu
- σ_{\min} = minimální napětí cyklu
- σ_{mean} = střední napětí cyklu
- $\Delta\sigma$ = interval výkmitu napětí
- σ_a = amplituda napětí
- R = parametr asymetrie cyklu



Obr. 19 Zobrazení průběhu cyklu [9].

Nízkocyklová – velké deformace a nízký počet cyklů do lomu

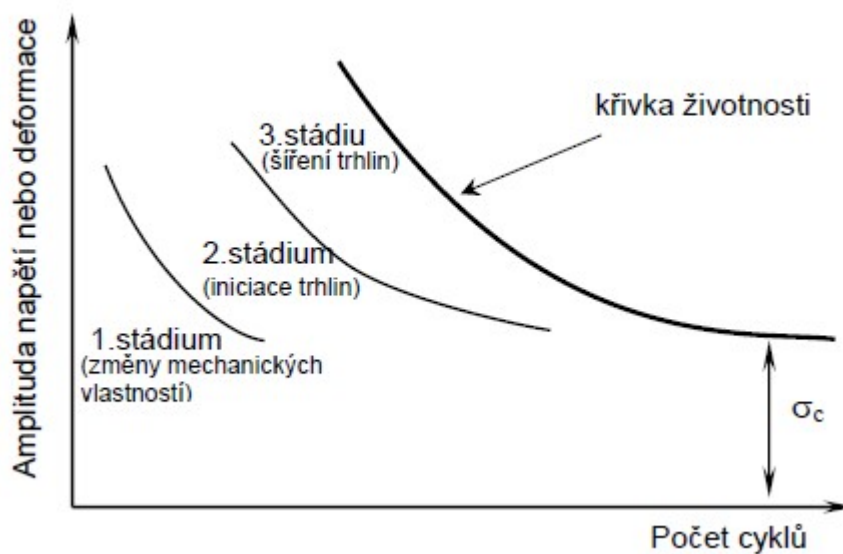
Cyklická deformační křivka charakterizuje závislost amplitudy napětí na amplitudě deformace v oblasti ustáleného chování materiálu při cyklickém zatěžování.



Obr. 20 Cyklické zpevnění a cyklické změkčení [20].

Celkový únavový proces lze rozdělit do tří časově po sobě následujících a mírně se překrývajících stádií:

- I. stádium změn mechanických vlastností,
- II. stádium nukleace mikrotrhlin,
- III. stádium růstu únavových trhlin, které může být zakončeno náhlým lomem [8].



Obr. 21 Stádia únavového procesu [9].

5 EXPERIMENT – PEVNOSTNÍ ANALÝZA

Analyzovanou oblastí výše prezentovaného stroje RONDOPRESS je spojení rámu stroje s žebrem. Ověřovací série byla vyrobena bez zmíněného žebra, ale byl zadán požadavek na provedení analýzy napjatosti a životnosti s přidaným žebrem.

Pro samotný experiment byla zvolena MKP – metoda konečných prvků – numerická metoda, ve které lze na 2D nebo 3D vytvořeném modelu simulovat průběh napětí, deformací, vlastních frekvencí atd. MKP lze používat u navržených konstrukcí pro kontrolu a stanovení kritického místa konstrukce. Pro řešení dané oblasti je nutné rozdělit element na konečný počet prvků, vznikne tzv. síť. Tvar a hustota prvků sítě ovlivňují kvalitu výsledků [18].

Klasifikace napětí vypočítané MKP analýzou vychází z podmínky lineárně elastického modelu materiálu. Princip spočívá v rozdělení napětí do tří kategorií – primární, sekundární a špičkové napětí. U nich se dále rozlišuje, jestli je membránové nebo ohybové. Podle rozsahu oblasti, kterou ovlivňuje, se dělí na lokální a globální [19].

5.1 Úvodní údaje a parametry

Pro experiment byl zvolen program pro MKP výpočty – ANSYS, MathCad pro matematické výpočty. Výpočet životnosti dle principů uvedených v normě EN 13445-3 Netopené tlakové nádoby – Část 3: Konstrukce a výpočet. Kumulativní poškození se vypočte podle postupu uvedeného v normě.

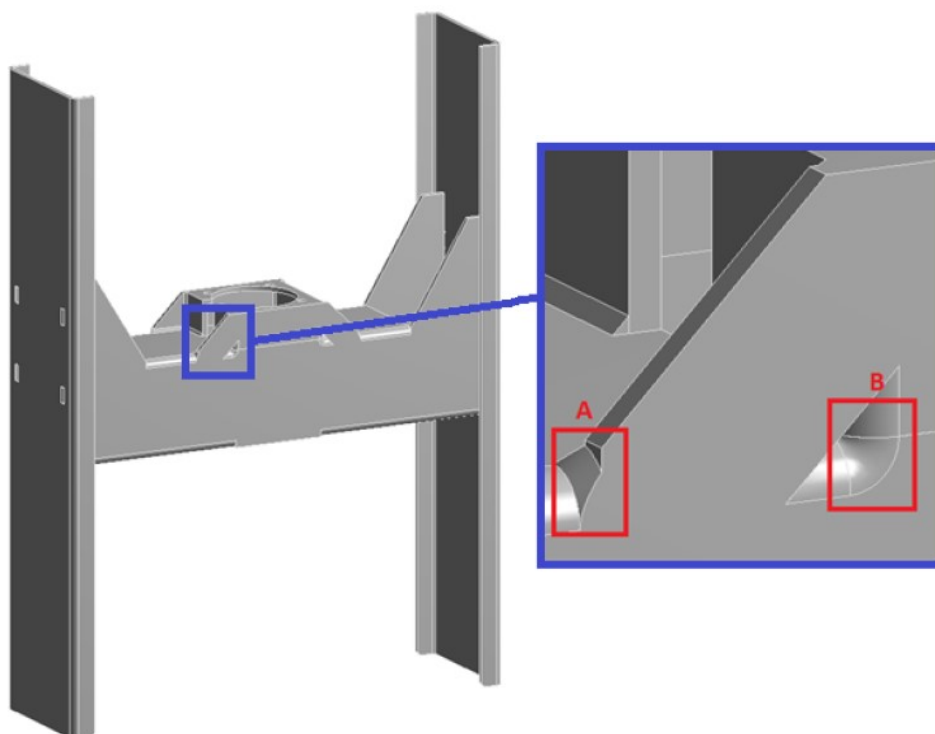
Zatížení použítá pro výpočet životnosti:

Tab. 3 Výpočtové parametry.

| Zatížení a podmínky | Jednotky | Hodnoty |
|-----------------------------------------------|----------|-----------|
| Výpočtový tlak p_v | bar (g) | 45 |
| Výpočtová teplota t_v | ° C | 70 |
| Provozní tlak p_p | bar (g) | 45* |
| Provozní teplota t_p | ° C | 70 |
| Průměr pístu d | mm | 50 |
| Zatěžující síla F_z | N | 8836 ** |
| Požadovaný počet cyklů n | - | 1 825 000 |
| * tlak uvnitř pístu | | |
| ** $F_z = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot p$ | | |

Na níže zobrazeném obrázku jsou v detailu vyznačeny analyzované oblasti spojení pozic:

v detailu A - spojení žebra s částí nosníku, pozice 213 a 217,
v detailu B - spojení žebra s částí rámu válce, pozice 213 a 216.



Obr. 22 Přehled analyzovaných oblastí.

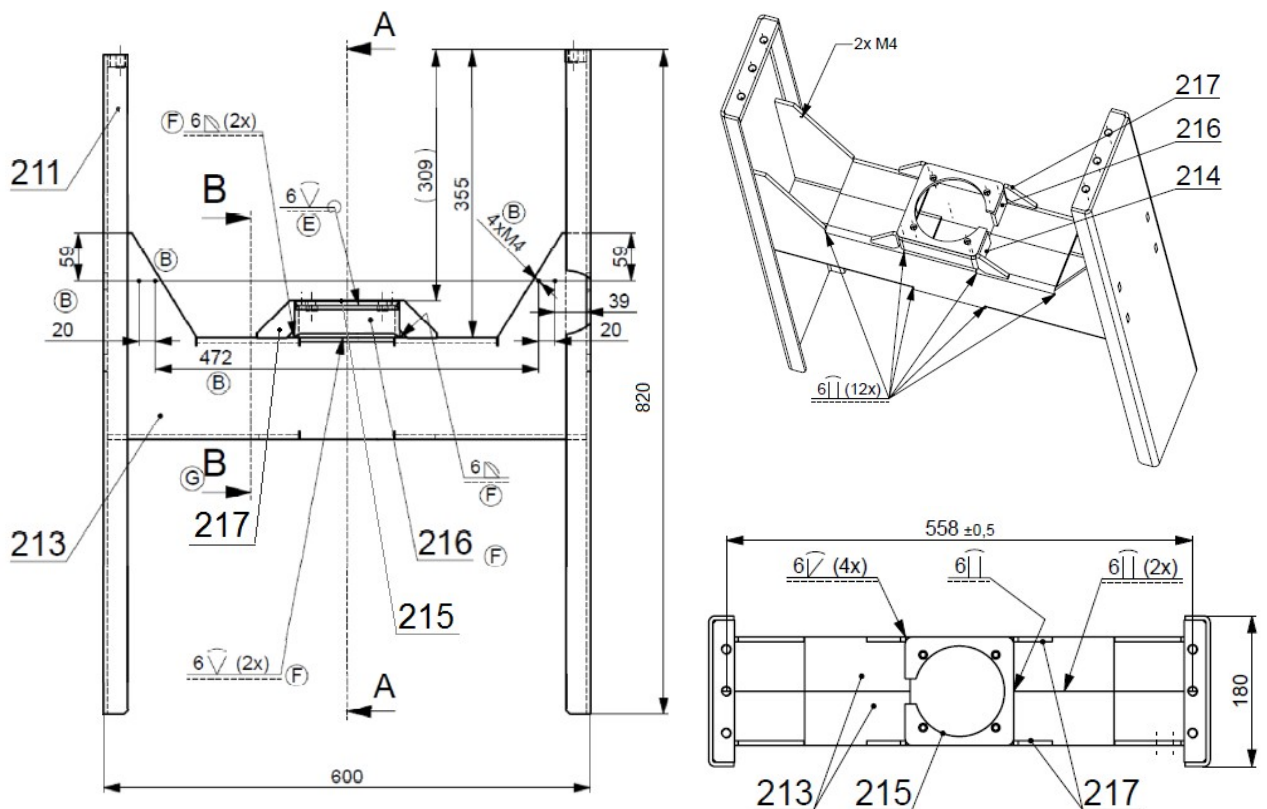
5.2 Svarové spoje

Svarové spoje na dané konstrukci jsou provedeny dle výkresové dokumentace navržené konstruktérem. V procesu svařování byl použit svařovací zdroj FRONIUS TRANSPULS SINERGIC 4000 a svařovací plyn Stargon C – 18. Jako přídatný materiál byl použit drát OK AUTROD 12.51 o průměru 1,0 mm.



Obr. 23 Svařovací zdroj Fronius.

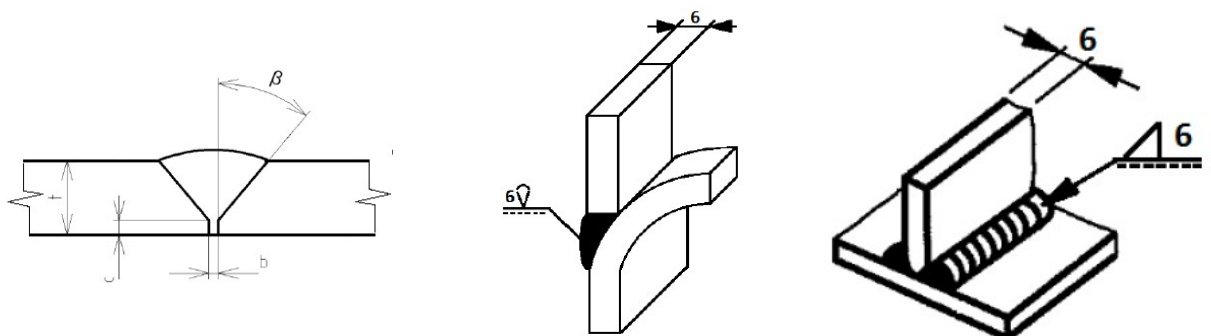
Před zahájením svařování je jednou z nejdůležitějších činností správné a přesné ustavení dílů rámu. Dbát na kolmost, rovnoběžnost a přesnou vzdálenost mezi díly a dodržení stanovených rozměrů. Na obr. 22 jsou vyznačeny použité svary – koutový a tupý V svar.



Obr. 24 Rám pro hydrauliku – vyznačení svaru.

Pro samotné sváření je nutné upravit díly rámu v místě V svaru, viz. obr. 23. Před sestavou svarku provést kontrolu svařovaných ploch podle normy ČSN EN 29692 – Obloukové svařování obalenou elektrodou, obloukové svařování v ochranném plynu a plamenové svařování. Příprava svařových ploch ocelí. Dále věnovat pozornost předepsanému úhlu zkosení a výšce otupení, ty jsou rozhodující podmínkou kvality svarů [4].

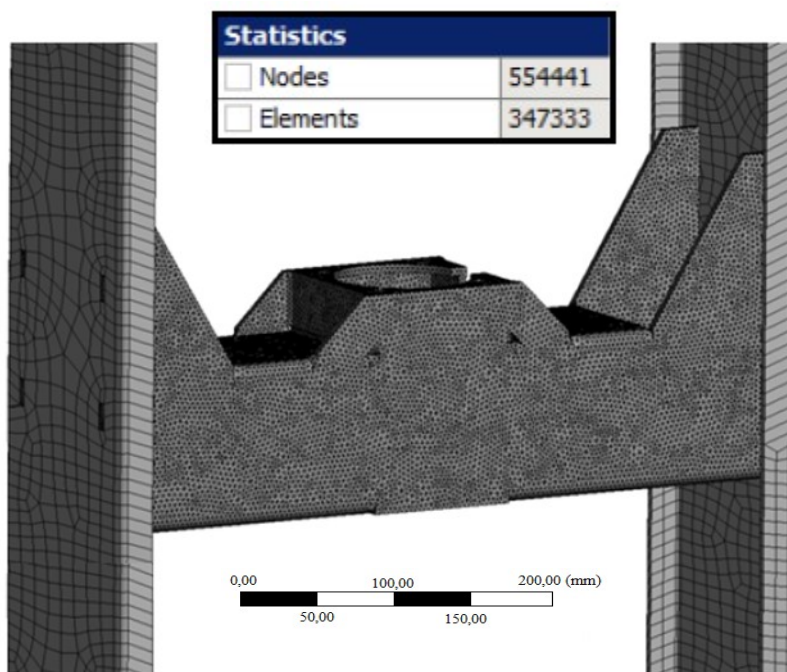
Svary pro navrhovanou konstrukci jsou vyhovující svou velikostí, délkou a provedením. Je prováděna jen nedestruktivní vizuální kontrola. Jen poloviční V svar u části rámu válce je po svaření zabroušen do roviny.



Obr. 25 Zleva tupý V svar, poloviční V svar a koutový svar.

5.3 Průběh napětí a deformace rámu

Pro výpočet napjatosti rámu a žebra byla použita MKP v programu ANSYS, typy prvku SOLID186 a SOLID187. Byla vytvořena optimální síť v počtu prvků 347333 a počtu uzlů 554441.

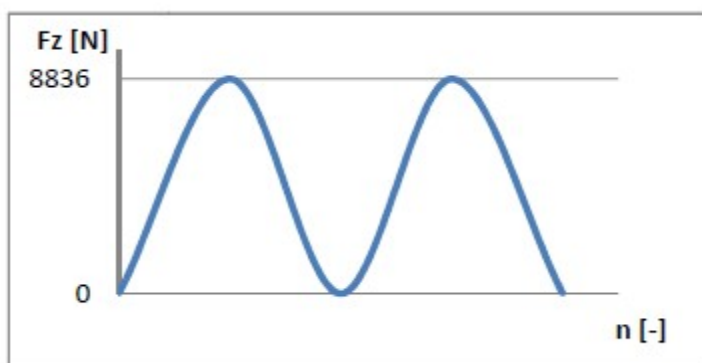


Obr. 26 Model – síť.

Výpočet zatěžující síly

$$F_z = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot p \quad (2)$$
$$F_z = \frac{\pi \cdot (50\text{mm})^2}{4} \cdot 4,5\text{MPa} = 8836 \text{ N}$$

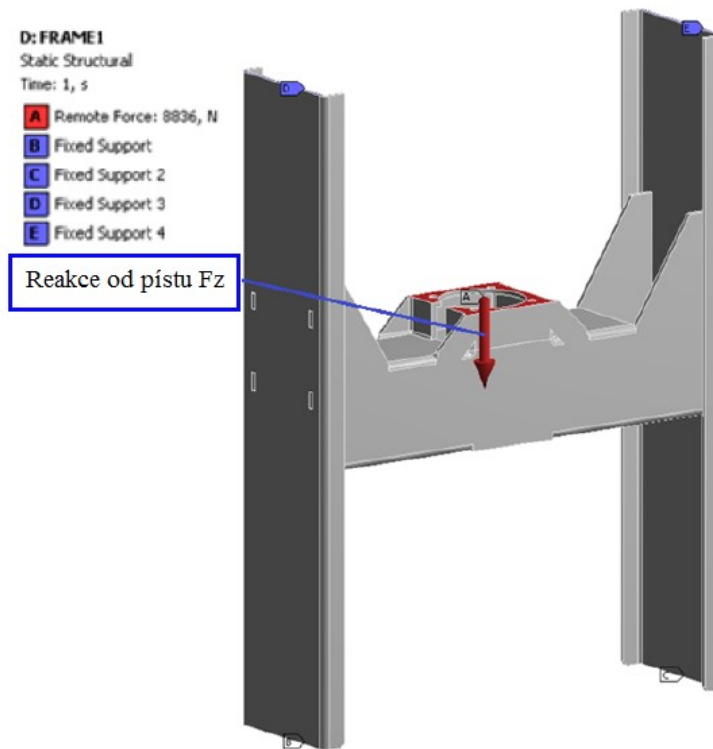
Cyklický charakter zatěžovací síly pístu



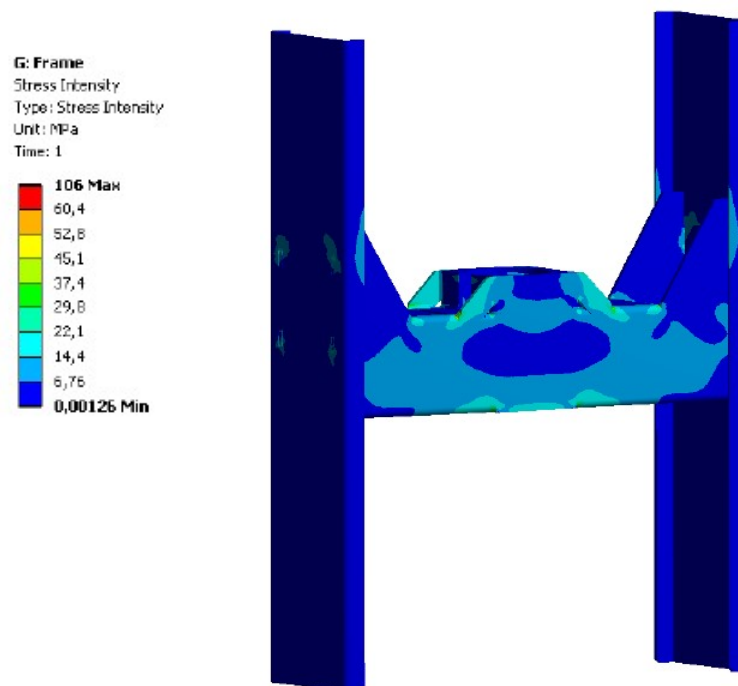
Obr. 27 Cyklický charakter zatěžovací síly pístu.

Okrajové podmínky a zatížení

Nastavení okrajových podmínek je vzhledem ke správnému výpočtu podstatná část při tvorbě MPK modelu. Jedná se o zatížení nosníku od pístu, zatímco ostatní díly jsou zafixovány, tudíž posuv ve všech směrech je roven nule.

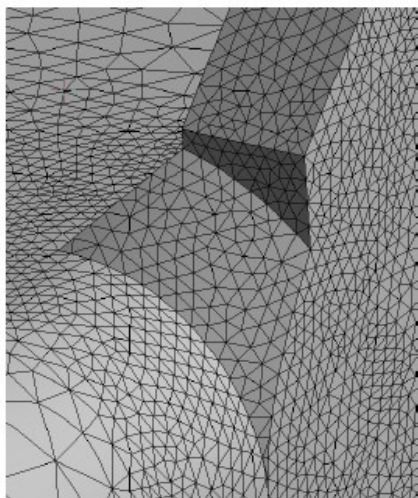


Obr. 28 Okrajové podmínky a zatížení.

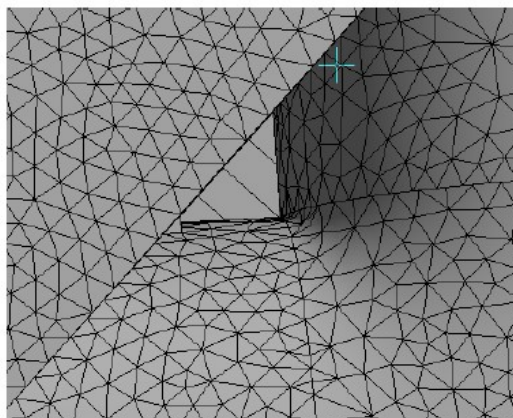


Obr. 29 Průběh intenzity napětí rámu.

Oblast spojení pozic 213 a 217 – detail A

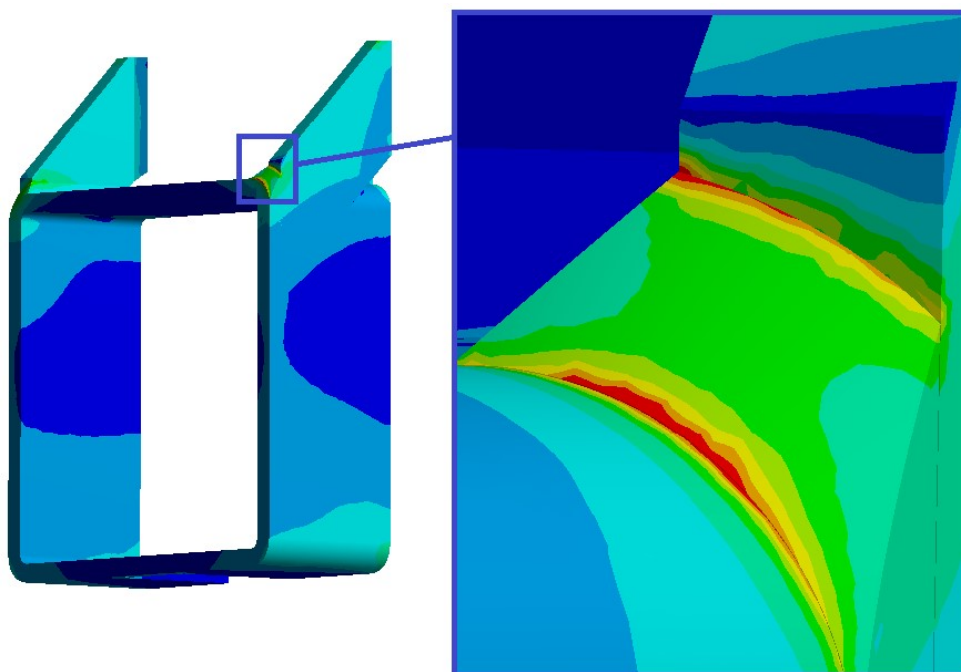
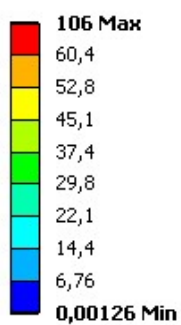


Oblast spojení pozic 213 a 216 – detail B

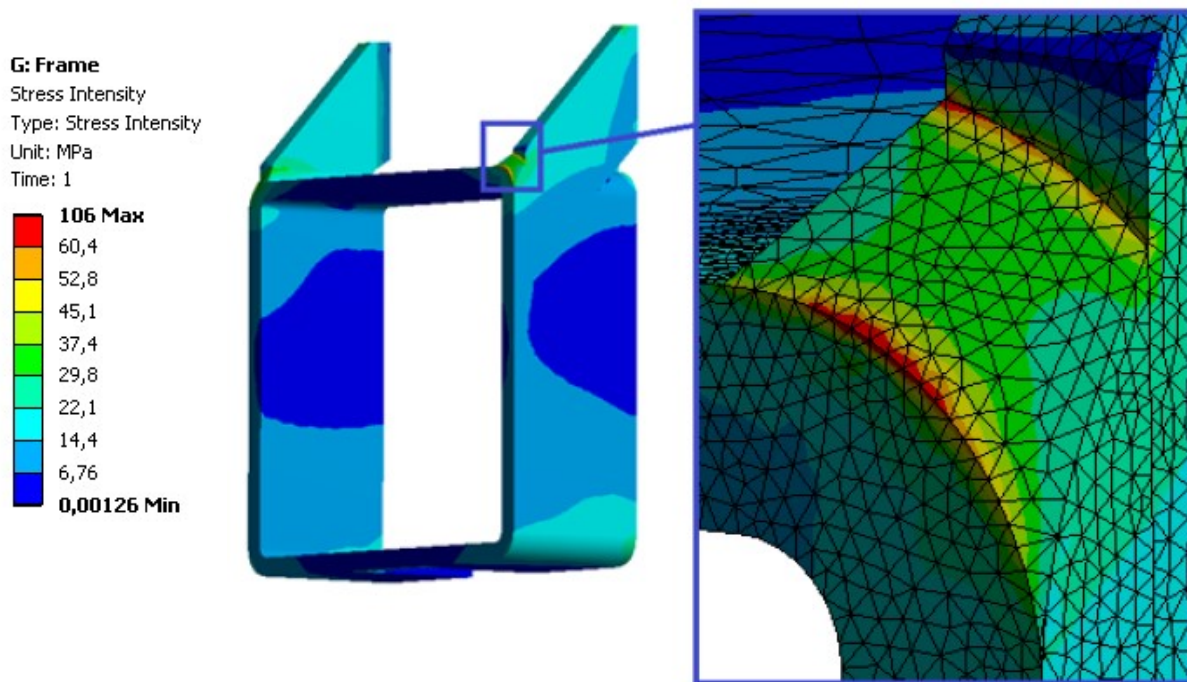


Obr. 30 Síť MKP – detail A, B.

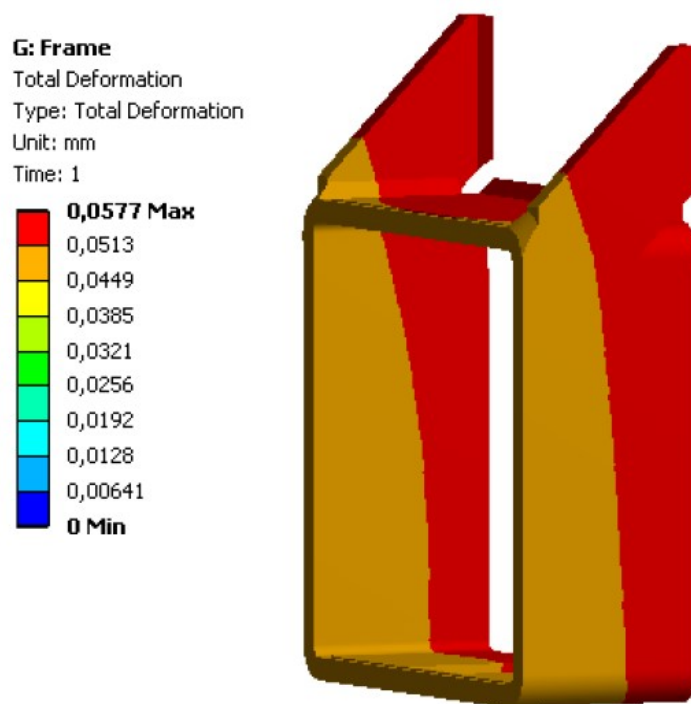
G: Frame
Stress Intensity
Type: Stress Intensity
Unit: MPa
Time: 1



Obr. 31 Rozložení intenzity napětí v řezu A.

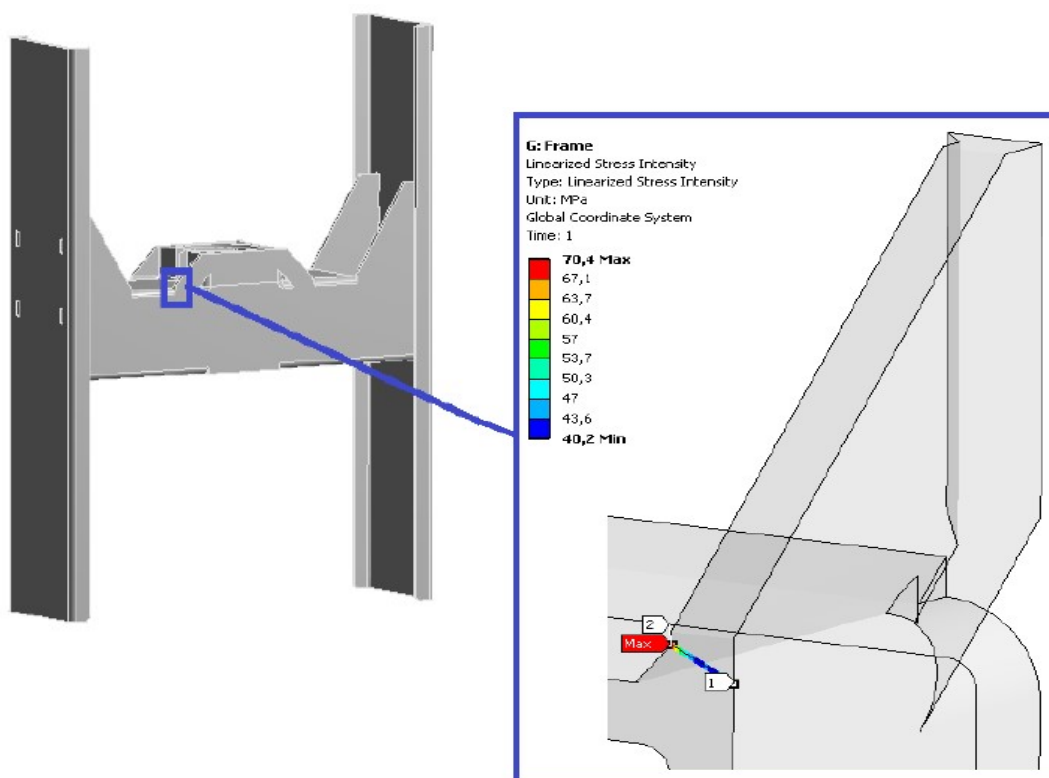


Obr. 32 Průběh intenzity napětí pro kritické místo A.

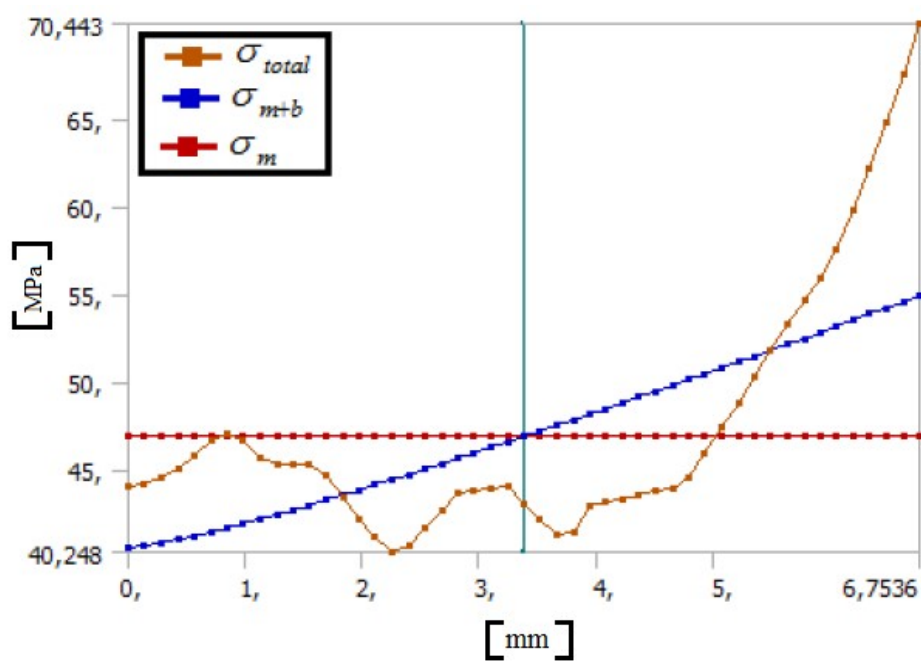


Obr. 33 Deformace v řezu A.

Linearizace intenzity napětí po tloušťce stěny rámu, kritické místo A

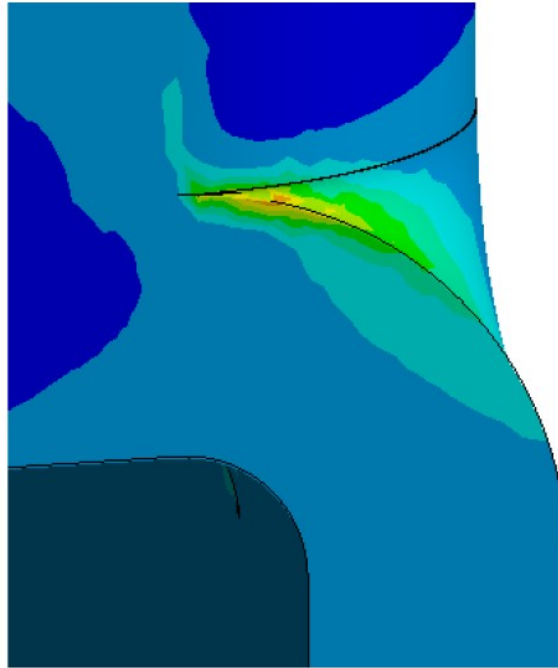
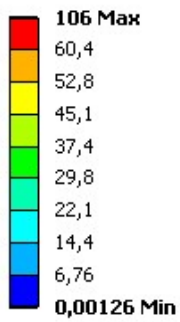


Obr. 34 Linearizované napětí v řezu A.



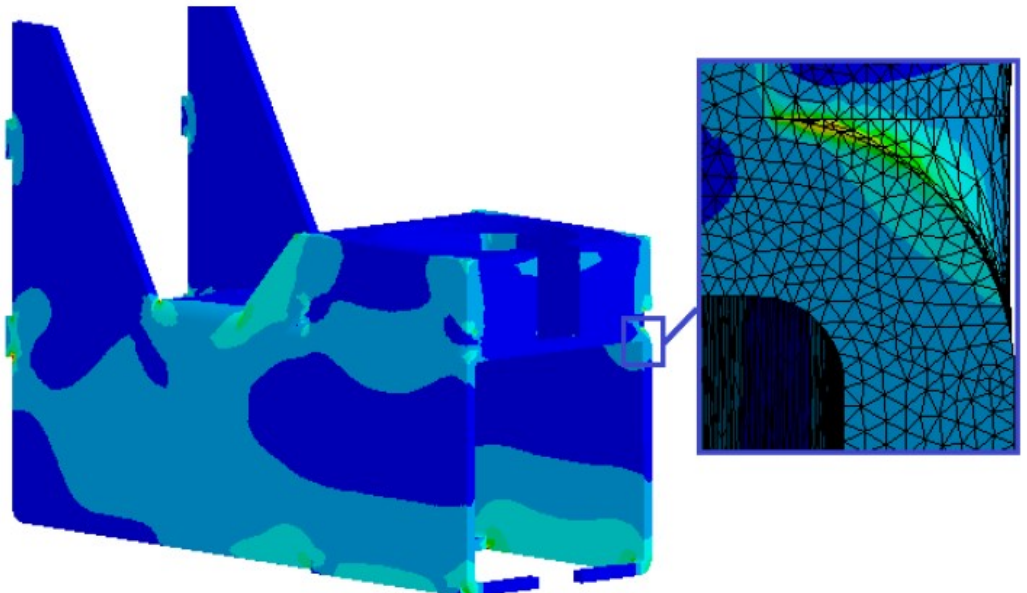
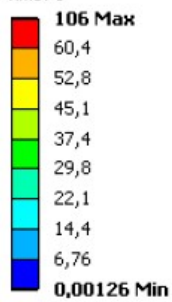
Obr. 35 Průběh intenzity napětí pro kritické místo A.

G: Frame
Stress Intensity
Type: Stress Intensity
Unit: MPa
Time: 1

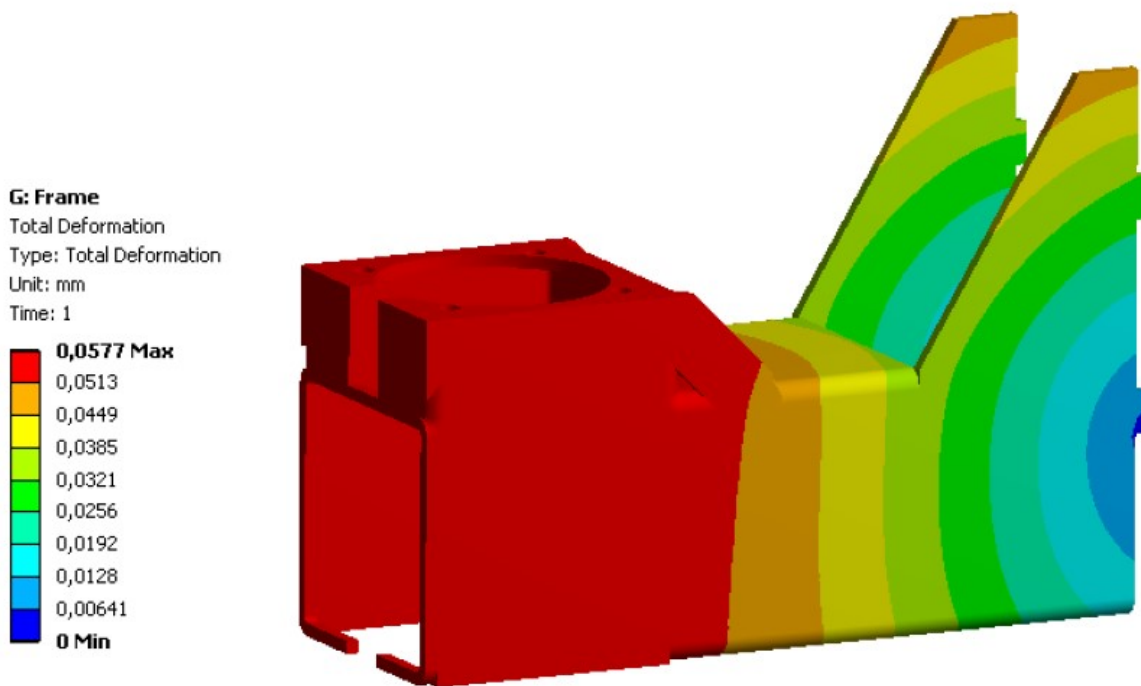


Obr. 36 Rozložení intenzity napětí v řezu B.

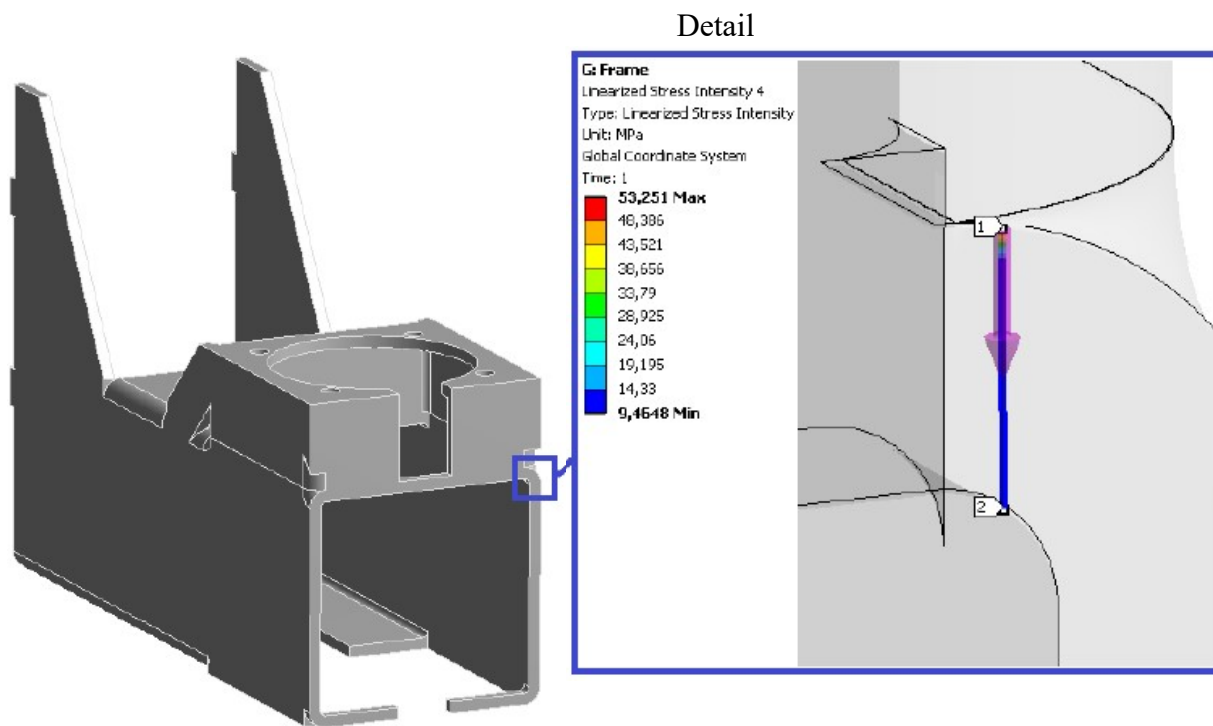
G: Frame
Stress Intensity
Type: Stress Intensity
Unit: MPa
Time: 1



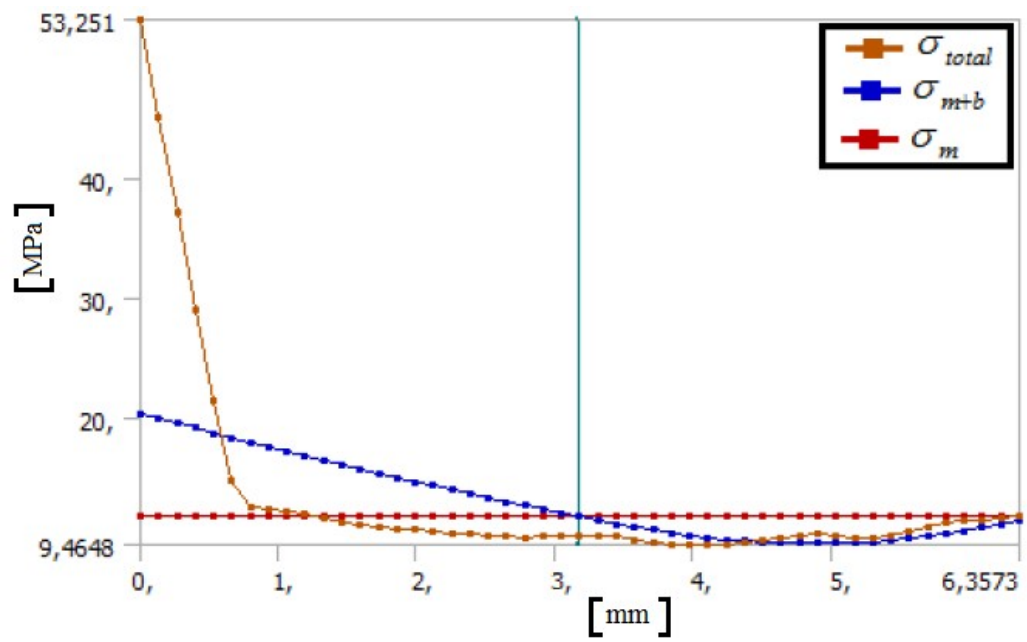
Obr. 37 Průběh intenzity napětí pro kritické místo v řezu B.



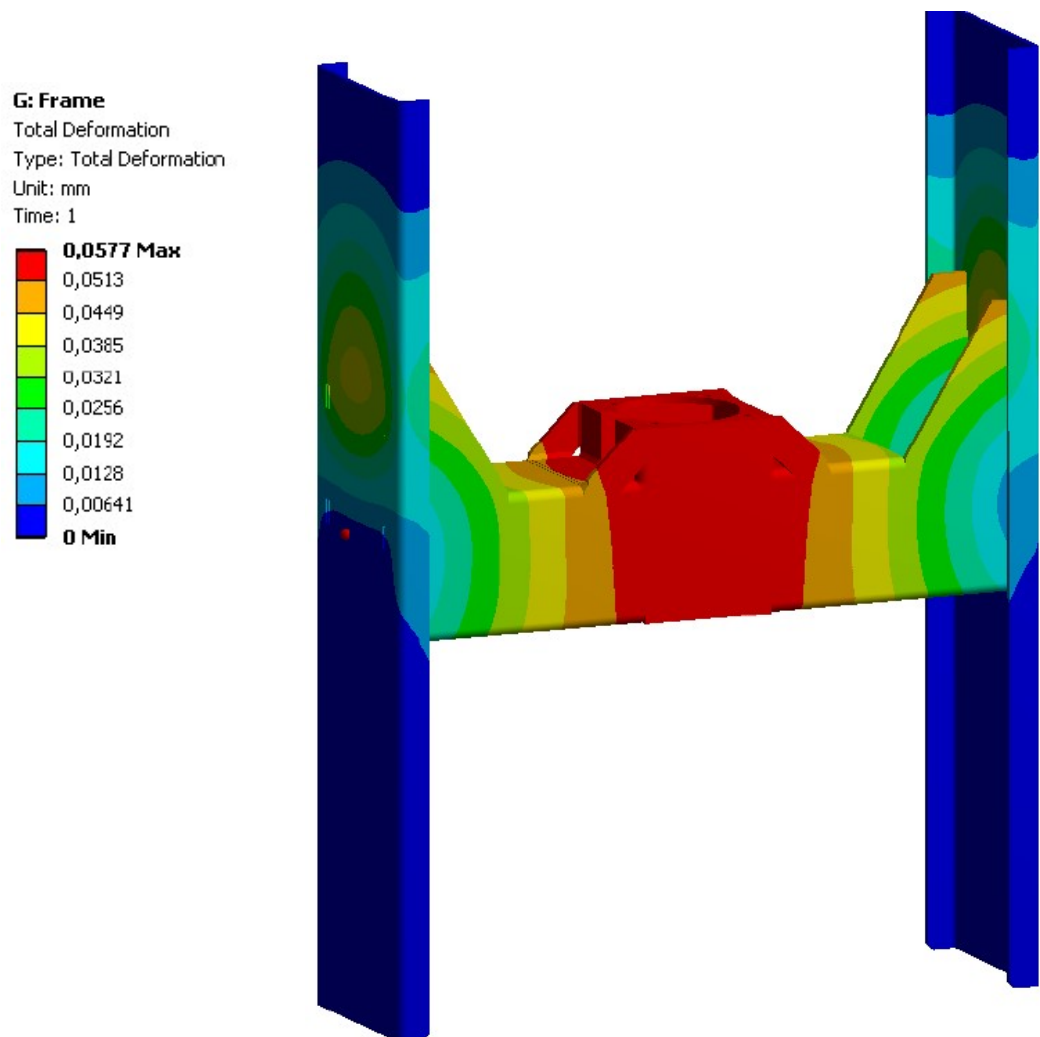
Obr. 38 Deformace v řezu B.



Obr. 39 Linearizované napětí v řezu B.

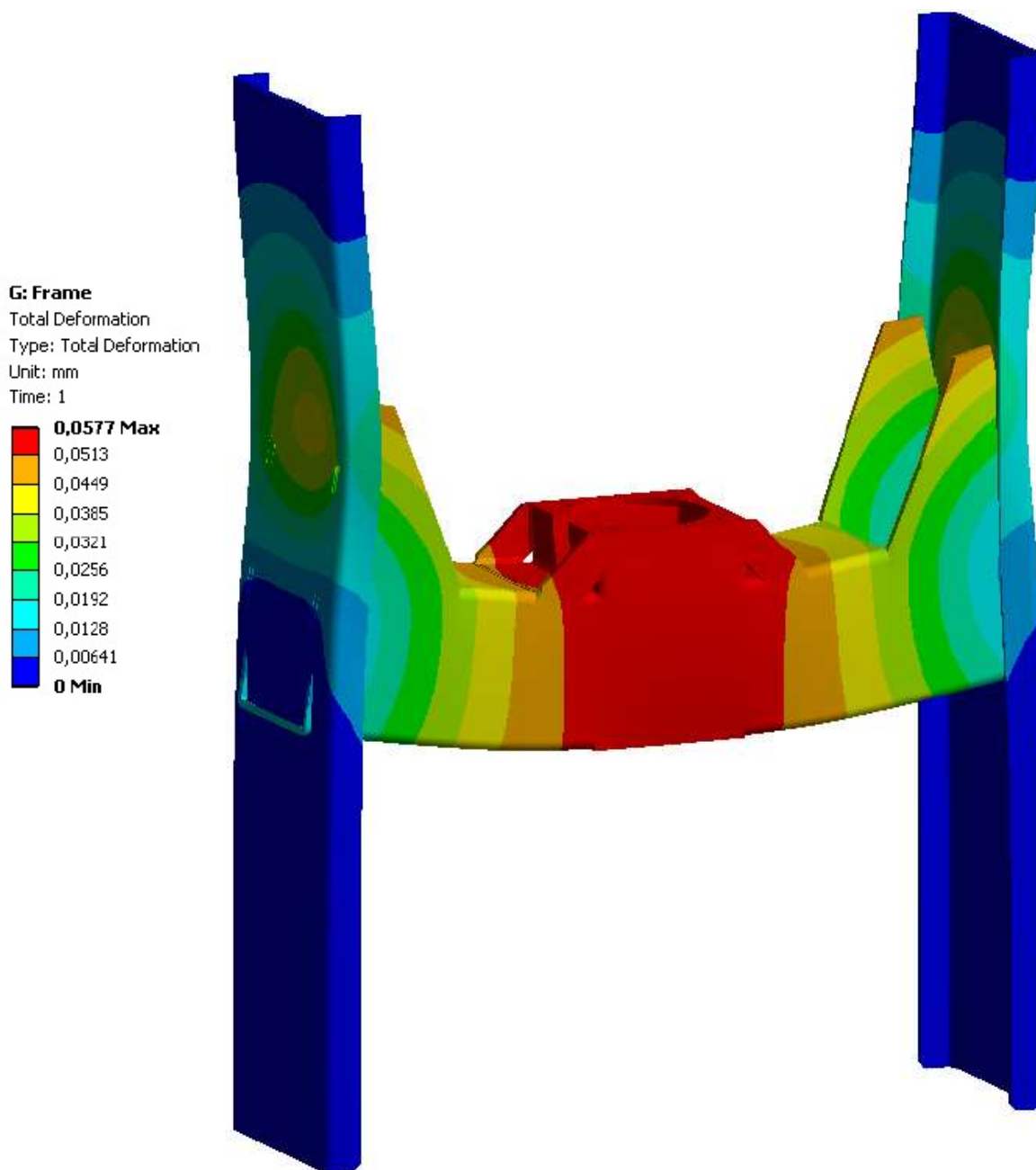


Obr. 40 Průběh intenzity napětí pro kritické místo B.



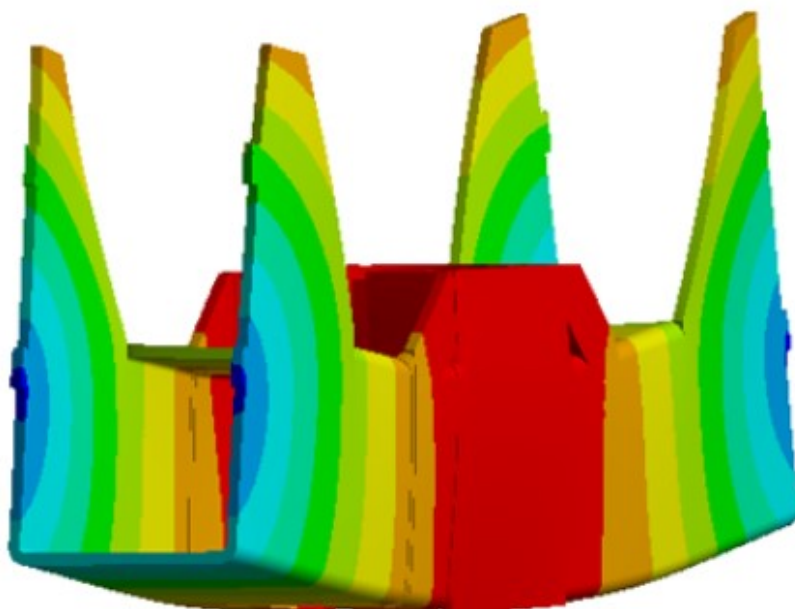
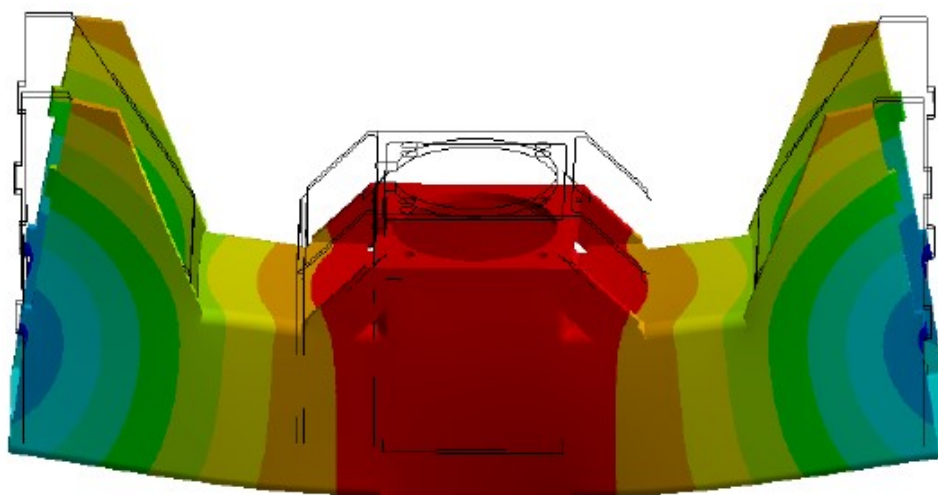
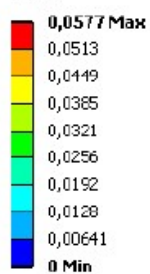
Obr. 41 Celková deformace rámu.

U zvětšení v měřítku 700:1 při simulaci zatěžující síly F_Z je zřetelně vidět deformace rámu.



Obr. 42 Celková deformace rámu (měřítko 700:1).

3: Frame
Total Deformation
Type: Total Deformation
Jnit: mm
Time: 1



Obr. 43 Celková deformace nosníku (měřítko 700:1).

6 POSOUZENÍ ŽIVOTNOSTI VYBRANÝCH OBLASTÍ RÁMU

Výpočet proveden dle normy EN 13445-3, kap. 18. Hodnoty napětí byly převzaty z výpočtu MKP v programu ANSYS. Konzervativně byly použity ekvivalentní napětí místo hlavních vyžadovaných přílohou P normy EN 13445-3. Pro určené dvojice zatěžovacích stavů jsou spočítány rozkmity tohoto napětí. Z rozkmitů je podle postupu v uvedené normě vypočítáno únavové poškození.

6.1 Výpočet součinitele lineárního součtu poškození svařované oblasti žebra a rámu.

Vstupní údaje:

oblast spojení pozic 213 a 217 – tloušťka plechu₁ = 6 mm,

oblast spojení pozic 213 a 216 – tloušťka plechu₂ = 6 mm,

zatěžovací stavy 0 - ZS 0 - výchozí nulový stav, 1 - ZS 1 - provoz,

počet zatěžovacích stavů bez výchozího –n,

zatěžovací stavy s výchozím n_1 i_0 n,

zatěžovací stavy bez výchozího j_1 n,

dvojice zatěžovacích stavů pro výpočty rozkmitů napětí: číslo dvojice ZS = 1,

ZS tvořící dvojici = 0 – 1,

počet dvojic ZS = 1 n

počet cyklů v dané dvojici N_d 1825000

Mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu pro oblast spojení pozic 213 a 217:

průběh ekvivalentního napětí v žebře

materiál

1.0038

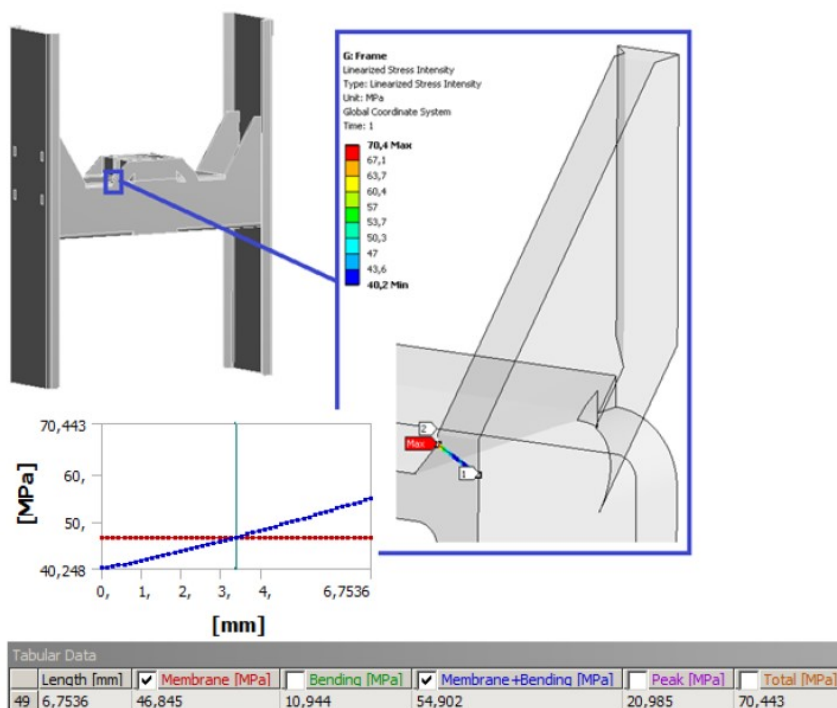
typ oceli

feritická ocel, austenitická ocel

napětí na mezi kluzu v tahu za teploty 20°C 235 MPa

napětí na mezi pevnosti v tahu při 20 °C 360 MPa

rozkmit ekvivalentního napětí 54,9 MPa.

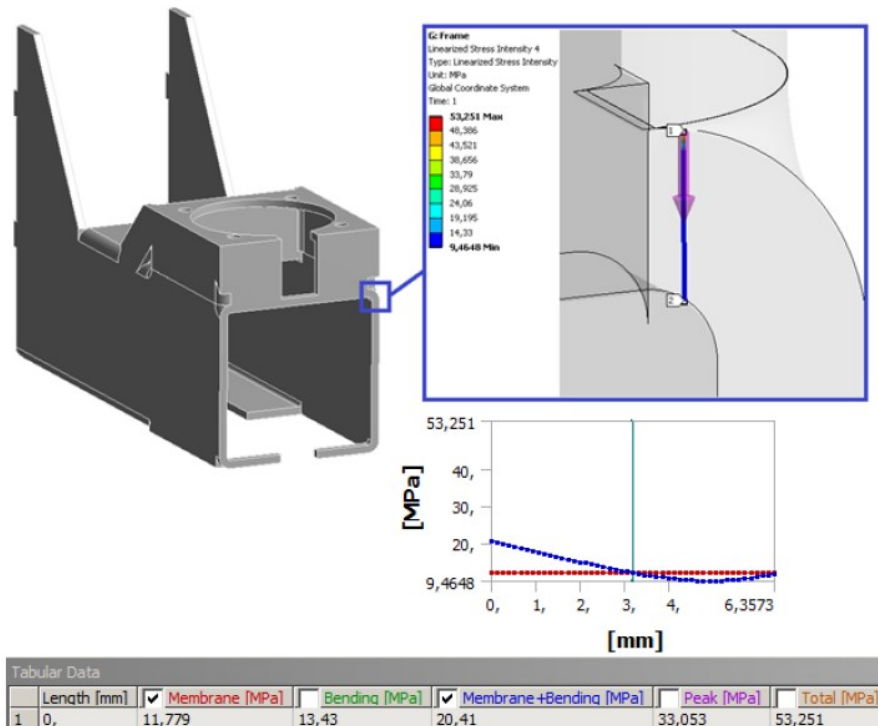


Obr. 44 Průběh ekvivalentního napětí v žebře.

Mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu pro oblast spojení pozic 213 a 216:

průběh ekvivalentního napětí v rámu

| | |
|---------------------------------------------|-----------------------------------|
| materiál | 1.0038 |
| typ oceli | feritická ocel, austenitická ocel |
| napětí na mezi kluzu v tahu za teploty 20°C | 235 MPa |
| napětí na mezi pevnosti v tahu při 20 °C | 360 MPa |
| rozkmit ekvivalentního napětí | 20,4 MPa. |



Obr. 45 Průběh ekvivalentního napětí v rámu.

Teplotní zatížení

Nelineární distribuce teplotních napětí napříč tloušťkou materiálu.

Lineární distribuce teplotních napětí napříč tloušťkou materiálu.

Třída svaru podle tab. P.3 v normě EN 13445-3.

Tab. 4 Parametry pro výpočet únavové křivky pro svařované spoje

| Třída | Únavová pevnost $N = 5 \times 10^6$ MPa $\Delta\sigma_D$ | Dolní mez $N = 5 \times 10^8$ MPa $\Delta\sigma_{Cut}$ | Konstantní únavová křivka | |
|-------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | | | Pro $N \leq 5 \times 10^6$ C1 | Pro $N \geq 5 \times 10^6$ C2 |
| 90 | 66,3 | 36,4 | $1,46 \cdot 10^{12}$ | $6,41 \cdot 10^{15}$ |
| 80 | 58,9 | 32,4 | $1,02 \cdot 10^{12}$ | $3,56 \cdot 10^{15}$ |
| 71 | 52,3 | 28,7 | $7,16 \cdot 10^{11}$ | $1,96 \cdot 10^{15}$ |
| 63 | 46,4 | 25,5 | $5,00 \cdot 10^{11}$ | $1,08 \cdot 10^{15}$ |
| 56 | 41,3 | 22,7 | $3,51 \cdot 10^{11}$ | $5,98 \cdot 10^{14}$ |
| 40 | 29,5 | 16,2 | $1,28 \cdot 10^{11}$ | $1,11 \cdot 10^{14}$ |
| 32 | 23,6 | 12,9 | $6,55 \cdot 10^{10}$ | $3,64 \cdot 10^{13}$ |

Třída svaru pro oblast spojení pozic 213 a 217: vybrané parametry třída 56

$$\Delta\sigma_{D1} = 41,3 \text{ MPa} \quad \Delta\sigma_{\text{Cut1}} = 22,7 \text{ MPa} \quad C_{11} = 3,51 \cdot 10^{11} \text{ MPa}^3 \quad C_{21} = 5,98 \cdot 10^{14} \text{ MPa}^5$$

Třída svaru pro oblast spojení pozic 213 a 216: vybrané parametry třída 32

$$\Delta\sigma_{D2} = 23,6 \text{ MPa} \quad \Delta\sigma_{\text{Cut2}} = 12,9 \text{ MPa} \quad C_{12} = 6,55 \cdot 10^{10} \text{ MPa}^3 \quad C_{22} = 3,64 \cdot 10^{13} \text{ MPa}^5$$

Nejvyšší pracovní teplota v daném zatěžovacím stavu $T_{ZSi} = 70^\circ\text{C}$

Předpokládaná střední teplota v dané DZS dle normy EN 13445-3, kap. 18.10.6.2, vzorec 18.10.12 – 18.10.14.

$$T_{\min d} = \min(T_{ZS d}, T_{ZS 1}) \quad T_{\min 1} = \min(T_{ZS 1}, T_{ZS 0}) \quad T_{\min d} = 70^\circ\text{C}$$

$$T_{\max d} = \max(T_{ZS d}, T_{ZS 1}) \quad T_{\max 1} = \max(T_{ZS 1}, T_{ZS 0}) \quad T_{\max d} = 70^\circ\text{C}$$

$$T' = 0,75 T_{\max} + 0,25 T_{\min} \quad T' = 70^\circ\text{C}$$

T' = předpokládaná průměrná teplota během cyklu zatížení

6.2 Výpočet součinitele lineárního poškození pro oblast spojení pozic 213 a 217

Elasticko-plastické podmínky

Mechanické zatížení dle EN 13445-3, kap. 18.8.1.1

$$\begin{aligned} A_{0 \text{ plech } 1} &= 0,4 \text{ když materiál plech 1 = Aust. plech1} \\ &= 0,4 \text{ když materiál plech 1 = Ferit. plech1} \\ &= 0,4 + \left(\frac{R_m - 50}{3000} \right) \text{ plech1 = Fer. } 500 \text{ MPa} \leq R_m \leq 800 \text{ MPa} \\ &= 0,5 \text{ když materiál plech1 = Fer. } 800 \text{ MPa} \leq R_m \leq 1000 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$A_{0 \text{ plech } 1} = 0,4$$

dle EN 13445-3, kap. 18, vzorec (18.8-1)

$$k_e = 1 + A_0 \left(\frac{\Delta\sigma_{eq,l}}{2R_{p0,2}/t^*} \right) - 1 \quad (4)$$

$$k_{e \text{ plech}} = 0,647$$

k_e - faktor zvětšení pro mechanické namáhání

$\Delta\sigma_{eq,l}$ - ekvivalentní rozsah napětí v lineární části

Teplotní zatížení dle EN 13445-3, kap. 18, vzorec (18.8-2)

$k_v = 1$ - teplota lineární

$$k_v = \frac{0,7}{0,5 + \frac{0,4}{\left(\frac{\Delta\sigma_{eq,l}}{R_{p,2}/t^*} \right)}} - \text{nelineární} \quad (5)$$

$$k_{v \text{ plech}} = 1$$

k_v - faktor zvětšení pro tepelné namáhání

$$\Delta\sigma_{eq} = k_v \cdot \Delta\sigma_{eq,l} \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_{eq} = k_v \cdot \Delta\sigma_{eq,t} \quad (7)$$

Korekční součinitele

Korekce na tloušťku stěny dle EN 13445-3, kap. 18, vzorec (18.10-11)

$$f_{ew} = \left(\frac{25}{e_n}\right)^{0,25} \quad (8)$$

$$f_{ew_plech1} = 1$$

f_{ew} - korekční faktor pro tloušťku stěny

Korekce na teplotu dle EN 13445-3, kap. 18, vzorec (18.10-12) – (18.10-14)

Pro feritický mat.

$$f_{t^*} = 1,03 - 1,5 \cdot 10^{-4}t^* - 1,5 \cdot 10^{-6}t^{*2} \quad (9)$$

Pro austenitický mat.

$$f_{t^*} = 1,043 - 4,3 \cdot 10^{-4}t^* \quad (10)$$

$$f_{t_plech1d} = 1$$

f_{t^*} - teplotní faktor

Fiktivní rozkmit napětí

$$\Delta\sigma_{plech1d} = \frac{\Delta\sigma_{eq_plech_d}}{f_{ew_plech1} \cdot f_{t_plech1d}} \quad (11)$$

$$\Delta\sigma_{plec_d} = 54,9\text{MPa}$$

$\Delta\sigma$ - maximální hlavní rozsah napětí

Dovolený počet cyklů dle EN 13445-3, kap. 18.10.7

$$N = \frac{C_1}{\left(\frac{\Delta\sigma}{f_w}\right)^{m_1}} \quad (12)$$

$$N = \frac{C_2}{\left(\frac{\Delta\sigma}{f_w}\right)^{m_2}} \quad (13)$$

$$N_{plec_d} = 2,121 \cdot 10^6$$

N - přípustné zatížení cykly

C1, C2 - konstanty

m_1, m_2 - exponent v rovnicích únavových křivek pro svařované díly

Poškození jednou dvojicí zatěžovacích stavů dle EN 13445-3, kap. 18.5.6

$$D = \frac{n_1}{N_1} \quad (14)$$

$$D_{plech_d} = 0,86$$

D - míra poškození

n - skutečný počet cyklů

Poškození celkové

$$D_{C_plech1} = \sum_{d=1}^n D_{plec_d} \quad (15)$$

$$D_{C_plech} = 0,86035$$

Dle EN 13445-3, kap. 18.5.6, hodnota $D_C \leq 1$. Výsledná hodnota vyhovuje.

6.3 Výpočet součinitele lineárního poškození pro oblast spojení 213 a 216

Elasticko-plastické podmínky

Mechanické zatížení dle EN 13445-3, kap. 18.8.1.1

$$\begin{aligned}
 A_{0 \text{ plech2}} &= 0,4 \text{ když materiál plech 2 = Aust. plech2} \\
 &= 0,4 \text{ když materiál plech 2 = Ferit. plech2} \\
 &= 0,4 + \left(\frac{R_m - 500}{3000} \right) \text{ plech2 = Fer. 500 MPa} \leq R_m \leq 800 \text{ MPa} \\
 &= 0,5 \text{ když materiál plech2 = Fer. 800 MPa} \leq R_m \leq 1000 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$A_{0 \text{ plech2}} = 0,4$$

dle EN 13445-3, kap. 18, vzorec (18.8-1)

$$k_e = 1 + A_0 \left(\frac{\Delta \sigma_{eq,l}}{2R_{p0,2}/t^*} \right) - 1 \quad (4)$$

$$k_{e \text{ plech2d}} = 0,617$$

k_e - faktor zvětšení pro mechanické namáhání

$\Delta \sigma_{eq,l}$ - ekvivalentní rozsah napětí v lineární části

Teplotní zatížení dle EN 13445-3, kap. 18, vzorec (18.8-2)

$k_v = 1$ - teplota lineární

$$k_v = \frac{0,7}{0,5 + \frac{0,4}{\left(\frac{\Delta \sigma_{eq,l}}{R_{p,2}/t^*} \right)}} - \text{nelineární} \quad (5)$$

$$k_{v \text{ plech}} = 1$$

k_v - faktor zvětšení pro tepelné namáhání

$$\Delta \sigma_{eq} = k_v \cdot \Delta \sigma_{eq,l} \quad (6)$$

$$\Delta \sigma_{eq} = k_v \cdot \Delta \sigma_{eq,t} \quad (7)$$

Korekční součinitele

Korekce na tloušťku stěny dle EN 13445-3, kap. 18, vzorec (18.10-11)

$$f_{ew} = \left(\frac{25}{e_n} \right)^{0,25} \quad (8)$$

$$f_{ew \text{ plech2}} = 1$$

f_{ew} - korekční faktor pro tloušťku stěny

Korekce na teplotu dle EN 13445-3, kap. 18, vzorec (18.10-12) – (18.10-14)

Pro feritický mat.

$$f_{t^*} = 1,03 - 1,5 \cdot 10^{-4} t^* - 1,5 \cdot 10^{-6} t^{*2} \quad (9)$$

Pro austenitický mat.

$$f_{t^*} = 1,043 - 4,3 \cdot 10^{-4} t^* \quad (10)$$

$$f_{t \text{ plech2d}} = 1$$

f_{t^*} - teplotní faktor

Fiktivní rozkmit napětí

$$\Delta\sigma_{\text{plech2d}} = \frac{\Delta\sigma_{\text{eq,plech2d}}}{f_{\text{ew,plech2}} \cdot f_{\text{t,plech2d}}} \quad (11)$$

$$\Delta\sigma_{\text{plech1d}} = 20,4\text{MPa}$$

$\Delta\sigma$ - maximální hlavní rozsah napětí

Dovolený počet cyklů dle EN 13445-3, kap. 18.10.7

$$N = \frac{C_1}{\left(\frac{\Delta\sigma}{f_w}\right)^{m_1}} \quad (12)$$

$$N = \frac{C_2}{\left(\frac{\Delta\sigma}{f_w}\right)^{m_2}} \quad (13)$$

$$N_{\text{plech2d}} = 1 \cdot 10^{307}$$

N - přípustné zatížení cykly

C1, C2 - konstanty

m_1, m_2 - exponent v rovnicích únavových křivek pro svařované díly

Poškození jednou dvojicí zatěžovacích stavů dle EN 13445-3, kap. 18.5.6

$$D = \frac{n_1}{N_1} \quad (14)$$

$$D_{\text{plech2d}} = 0$$

D - míra poškození

n - skutečný počet cyklů

Poškození celkové

$$D_{\text{C,plech2}} = \sum_{d=1}^n D_{\text{plech d}} \quad (15)$$

$$D_{\text{C,plech2}} = 0$$

Dle EN 13445-3, kap. 18.5.6, hodnota $D_C \leq 1$. Výsledná hodnota vyhovuje.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vypracovat studii svařitelnosti uhlíkových ocelí včetně zvolení vhodné metody svařování v ochranné atmosféře plynu - MAG. V souvislosti se svařováním vznikají deformace a zbytková napětí ve svarech, která je vždy třeba v co největší míře eliminovat, což znamená vybrat vhodné typy svarů pro danou konstrukci a provést vyhodnocení životnosti svarových spojů v oblastech největšího, a tím také nejrizikovějšího zatížení konstrukce rámu.

Hlavním tématem praktické části bylo vypracování počítačového modelu rámu svařované konstrukce a provedení výpočtů napjatosti a životnosti dle požadavku zákazníka. Výsledkem celého procesu je splnění zadaných parametrů a vyhodnocení posuzovaných oblastí rámu ve vybraných oblastech s nejvyšším kumulativním poškozením.

Z výsledků simulace vyplývá, že všechny výsledky kumulativního poškození jsou vyhovující. Svařený rám splňuje požadavek na napjatost a životnost při zadaném počtu 1825000 cyklů. V ověřovací sérii byl rám vyroben bez žebra, ale do výpočtové simulace bylo přidáno žebro a z výsledků vyplývá pro zadání do výroby doporučení doplnit toto žebro do rámu při sériové výrobě stroje. V simulaci deformace nepřekračovaly maximální přípustnou mez.

Svarové spoje je doporučeno provádět dle podmínek normy ČSN EN 13445-3: Netopené tlakové nádoby – Část 3: Konstrukce a výpočet, kap. 18.4. Vady ve svarových spojích snižují jakost a životnost dané konstrukce. Je třeba dbát na precizní sestavení jednotlivých dílů před samotným svářením, vizuální kontrolu provádět i v průběhu procesu sváření a následně po jeho ukončení. Kontrolovat provedení svarů, nesmí být zápaly, neprovařený kořen a ani trhliny, je nutné provádět 100% vizuální kontrolu. Dále je doporučeno v rámci NDT provádět kontrolu penetrační, případně magnetickou.

Celkové hodnocení součinitele lineárního poškození pro jednotlivé posuzované oblasti je vyhovující. V jiných místech rámu je napětí nízké, proto je z hlediska únavy v těchto místech také vyhovující.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1.vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3.
2. KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie svařování a zařízení*. 1.vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0.
3. KOLEKTIV AUTORŮ. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. 1.vyd. Ostrava: Zeross, 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1.
4. MALINA, Zdeněk. *Základní kurz svařování MIG/MAG*, 5.vyd.Ostrava: Zeross, 2000, 125s. ISBN 80-85771-76-4.
5. MALINA, Zdeněk, Miroslav Néma. *Základní kurz svařování ZK 141 W 21*. 1.vyd. Ostrava: Zeross, 2004, 93s. ISBN 80-86698-02-5.
6. MESSLER, Robert W. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. New York, USA: John Wiley&Sons, 1999, 662s. ISBN 04-712-5376-6
7. VLÁŠEK, Milan. *Svařování kovů* [online]. 2010 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://svarovani-kovu.webnode.cz>
8. KOLEKTIV AUTORŮ. *Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení*. 1.vyd. Ostrava: Zeross, 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5.
9. Vzťah únava a povrch kovových materiálův. KMI Katedra materiálového inžinierstva. Dostupné z: <http://www.integrita.zcu.cz/download/skola1/zilina-prez2.pdf>
10. Koncepcie a strategie: Koncepcie a strategie pro růst. Dostupné z: <http://www.eagri.cz/public/web/mze/ministerstvo>
11. ONDREJČEK, Peter. *Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou*. Bratislava : ETERNA PRESS s.r.o, 2003. 202 s. ISBN 80-968359-5-5.
12. Potravinářský a tabákový průmysl – Budoucnost profesí. Dostupné z: <http://www.budoucnostprofesi.cz/cs/vyvoj-v-odvetvich/05.html>
13. ČSN 41 1373. *Ocel 11373*. Praha: Český normalizační institut, 1.4.1994
14. Technické normy: Materiálové listy ocelí.
15. RONDOPRESS. Dostupné z: <http://www.pekass.cz/rondopress>
16. KANDUS, Bohumil a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
17. MORAVEC, Jaromír. *Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně při svařování v ochranných atmosférách*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011, 101s. ISBN 978-80-7372-805-2.
18. VRBKA, Martin a Michal VAVERKA. *Metoda konečných prvků*. 2006. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf
19. ČSN EN 13445-3: *Netopené tlakové nádoby – Část 3: Konstrukce a výpočet*, 2009.
20. ONDRÁČEK, E., VRBKA, J., JANÍČEK, P. a BURŠA, J.: *Mechanika těles: Pružnost a pevnost II*. 4. přeprac. vyd. BRNO: CERM, 2006, 262s. ISBN 80-214-3260-8.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | | |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------|
| MIG | Metal inert gas | |
| MAG | Metal activ gas | |
| TOO | Tepelně ovlivněná oblast | |
| ROE | Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou | |
| MKP | Metoda konečných prvků | |
| 131 | Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu | |
| 135 | Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu | |
| Z_p | Příčné smrštění | mm |
| Z_l | Podélné smrštění | mm |
| Z_u | Úhlové smrštění | mm |
| S | Smrštění | mm |
| k_e | Faktor zvětšení pro mechanické namáhání | |
| A | Tažnost | % |
| t | Síla materiálu | mm |
| T_{min} | Minimální provozní teplota během cyklu | °C |
| T_{max} | Maximální provozní teplota během cyklu | °C |
| $\Delta\sigma$ | Maximální hlavní rozsah napětí | N/mm ² |
| $\Delta\sigma^*$ | Fiktivní rozkmit napětí | N/mm ² |
| $\Delta\sigma_D$ | Únavové vlastnosti při konstantním rozkmitu napětí | N/mm ² |
| $\Delta\sigma_{CUT}$ | Spodní hranice rozsahu napětí | N/mm ² |
| $\Delta\sigma_{eq}$ | Ekvivalentní rozkmit napětí | N/mm ² |
| $\Delta\sigma_{eq,t}$ | Ekvivalentní rozkmit napětí | N/mm ² |
| $\Delta\sigma_{eq,l}$ | Ekvivalentní rozsah napětí v lineární části | N/mm ² |
| f_{ew} | Korekční faktor pro tloušťku stěny | |
| f_t^* | Teplotní faktor | |
| t^* | Předpokládá se průměrná teplota v průběhu 1 cyklu | |
| C1, C2 | Konstanty | |
| m1, m2 | Exponent v rovnicích únavových křivek pro svař. díly | |
| k_v | Faktor zvětšení pro tepelné namáhání | |
| f_w | Celkový korekční faktor pro svařované komponenty | |
| D | Míra poškození | |
| N | Přípustné zatížení cykly | |
| D_C | Celkové poškození | |

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 – Výkres RP 1 110 S
- Příloha 2 – Výkres RP 1 211 W
- Příloha 3 – Výkres RP 1 213 W
- Příloha 4 – Výkres RP 1 214 W
- Příloha 5 – Výkres RP 1 215 W
- Příloha 6 – Výkres RP 1 216 W
- Příloha 7 – Výkres RP 1 217 W