



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# SVAŘOVÁNÍ DÍLČÍ ČÁSTI KAPLANOVY TURBÍNY

WELDING OF SUB-PARTS OF KAPLAN TURBINE

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Keprt

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2017

## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Michal Keprt</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jaroslav Kubíček</b>
Akademický rok:	2016/17

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 diplomové práce:

### Svařování dílčí části Kaplanovy turbíny

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařování energetických zařízení je vždy velmi náročná činnost. Při stavbě Kaplanovy turbíny se jedná o velké tloušťky svařenců s náročnými tvarovými konstrukcemi. Charakterem práce je navrhnout a statickým výpočtem pomocí metody konečných prvků - programem SolidWorks® 2013 ověřit možnost vytvoření svarových spojů požadované kvality.

#### Cíle diplomové práce:

1. Definovat vybrané komponenty Kaplanovy turbíny.
2. Provést studii svařitelnosti a vhodné metody svařování.
3. Navrhnout a statickým výpočtem pomocí metody konečných prvků - programem SolidWorks® 2013. Ověřit možnost vytvoření svarových spojů požadované kvality.
4. Vypracovat postupy svařování - WPS.

#### Seznam doporučené literatury:

ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou. ETERNA PRESS s.r.o. 2003. Bratislava.

PILOUS, V. Materiály a jejich chování při svařování. Škoda-welding s.r.o. Plzeň. 2009.

KOUKAL, J. a Kolektiv autorů. Materiály a jejich svařitelnost. Škola-welding s.r.o. Plzeň. 2011.

AMBROŽ, O. a Kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. Škola-welding s.r.o. Plzeň. 2011

VEJVODA, S. a Kolektiv autorů. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení. Škola-welding s.r.o. Plzeň. 2011.

BARTÁK, J. a Kolektiv autorů. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování. Škola-welding s.r.o. Plzeň. 2011.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4.11.2016

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

KEPRT Michal: Svařování dílčí části Kaplanovy turbíny.

---

Cílem práce je popis konstrukčního návrhu a návrh technologie výroby svařováním vnějšího lopatkového kruhu Kaplanovy turbíny na malé vodním elektrárně Hříchov. Konstrukční návrh a jeho následná pevnostní kontrola pomocí metody konečných prvků byl proveden za využití statické analýzy v programu SolidWorks® 2013. Materiál dílců vnějšího lopatkového kruhu byl navržen S 355 J2 G3, který je schopen snést dané zatížení. Při návrhu technologie svařování pak byla zvolena metoda tavného svařování MAG, s použitím aktivní směsi plynů Ar+18%CO<sub>2</sub>. Přídavným materiálem pro svařování bude OK Autrod 12.51, dle označení firmy ESAB s.r.o. Pro každý svar je třeba vytvořit úpravu svarové hrany, kterou provedeme na počítačem řízených obráběcích strojích. Při výrobě požadujeme striktní dodržení předepsaného pracovního postupu a splnění protokolu WPS. Po svaření a obrobení vnějšího lopatkového kruhu budou provedeny zkoušky svarů, konkrétně pak zkouška vizuální, penetrační a ultrazvuková.

**Klíčová slova:** Vnější lopatkový kruh, konstrukce, MKP, technologie svařování, svařování, kontrola svaru, technologický postup, WPS.

## **ABSTRACT**

KEPRT Michal: Welding of sub-parts of Kaplan turbine.

---

Aim of this work is description of design and manufacturing by welding technology of adjustable runner blades circle of Kaplan turbine. For designing and its subsequent strength control using the finite element method were performed with using static analysis in the program SolidWorks ® 2013. Material of adjustable runner blades circle's parts was designed S 355 J2 G3, which is able to withstand a given load. In the design of technology of welding there was elected MAG-welding method, with the active gas mixture Ar +18% CO<sub>2</sub>. Additive material for welding will be OK Autrod 12.51, like it's marked by ESAB s.r.o. For each weld is necessary to create the welding edge, which is made on computer controlled machining machines. In the production we require strict adherence to the prescribed workflow and compliance with WPS protocol. After welding and machining of adjustable runner blades circle we will make weld test, visual examination, dye penetrant and ultrasonic examination.

**Keywords:** Adjustable runner blades circle, design, FEM, technology of welding, welding, examination of weld, technological process, WPS.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KEPRT, Michal. *Svařování dílčí části Kaplanovy turbíny*. Brno, 2017. 45s, 10 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Obor technologie svařování a povrchových úprav. 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 s panem Ing. Františkem Svěrákem, a pod vedením vedoucího diplomové práce pana Ing. Jaroslava Kubíčka.

V Jedovnicích dne 25. 5. 2017

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkoví, za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále chci poděkovat panu Ing. Františku Svěrákovi za pomoc při řešení problematiky MKP, také svým rodičům, za podporu ve studiu a svým kamarádům za jejich psychickou podporu.

# OBSAH

<b>BIBLIOGRAFICKÁ CITACE</b> .....	<b>5</b>
<b>ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ</b> .....	<b>6</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ</b> .....	<b>7</b>
<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 POPIS KONSTRUKCE A NÁVRHU [1,12,16]</b> .....	<b>11</b>
1.1    PARAMETRY TURBÍNY A MATERIÁL VNĚJŠÍHO LOPATKOVÉHO KRUHU [1,12,16] .....	12
1.2    DÍLCE VNĚJŠÍHO LOPATKOVÉHO KRUHU .....	13
<b>2 STATICKÝ VÝPOČET POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ PRO OVĚŘENÍ POŽADOVANÉ KVALITY SVAROVÝCH SPOJŮ[2,7,13,17]</b> .....	<b>16</b>
2.1    POPIS METODY KONEČNÝCH PRVKŮ [2] [7] [13] .....	16
2.2    DISKRETIZACE A ZÁKLADNÍ PRVKY MKP[2][7] .....	17
2.2.1    Diskretizace (triangulace) tělesa pomocí konečných prvků[2] .....	17
2.2.2    Tvary prvků ve 2D a 3D[7] .....	17
2.3    LINEÁRNÍ STATICKÁ ANALÝZA .....	18
2.4    VÝSLEDKY LINEÁRNĚ STATICKÉ ANALÝZY .....	20
<b>3 NÁVRH TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ[5,7,8,9,10,11]</b> .....	<b>24</b>
3.1    SVAŘOVÁNÍ ELEKTRICKÝM OBLOUKEM[9] .....	25
3.2    SVAŘOVÁNÍ TAVÍCÍ SE ELEKTRODOU V OCHRANNÉM PLYNU METODOU MIG/MAG[9,10,11] .....	25
3.3    ZHODNOCENÍ SVAŘITELNOSTI [3,9] .....	28
3.4    TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ PO SVAŘOVÁNÍ [15] .....	31
3.4    SUMARIZACE NÁVRHU TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ [3,6,9] .....	31
<b>4 NÁVRH ÚPRAVY SVAROVÉ HRANY</b> .....	<b>32</b>
<b>5 VYPRACOVÁNÍ TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU SVAŘOVÁNÍ A WPS</b> ....	<b>34</b>
<b>6 NÁVRH METODIKY KONTROLY SVARU[4,5,14]</b> .....	<b>39</b>
6.1    TYPY VAD A KONTROLY SVARŮ[4].....	39
6.2    NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY[4,5] .....	39
6.3    VIZUÁLNÍ ZKOUŠKA (VT) [4,5].....	40
6.4    PENETRAČNÍ-KAPILÁRNÍ ZKOUŠKA (PT) [4,5] .....	40
6.5    ZKOUŠKA MAGNETICKÁ PRÁŠKOVÁ (MT) [4,5,14].....	41
6.6    ZKOUŠKA ULTRAZVUKOVÁ (UT) [4,5,14].....	42
6.7    NÁVRH NEDESTRUKTIVNÍ KONTROLY SVARŮ VNĚJŠÍHO LOPATKOVÉHO KRUHU .....	43
<b>7 ZÁVĚR</b> .....	<b>44</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b>	
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	



# ÚVOD

Lidé se stále snaží pokrýt vlastní spotřebu elektrické energie za cenu co nejnižšího dopadu na životní prostředí. Bohužel společnost spotřebuje takové množství energií, že se nevyhneme využití jaderných či tepelných elektráren. Stále se však snažíme zvyšovat procento energie vyrobené z takzvaných obnovitelných zdrojů. V České republice je jedním z hlavních producentů této čisté (alternativní) energie bezesporu hydroenergetický průmysl, využívající vodních toků či nádrží.

Avšak i tyto vodní elektrárny (viz Obr. 1) mají svoji životnost a po čase musíme přistoupit k procesu renovace dílců a součástí těchto komplexů. Hlavní části vodních elektráren jsou často poškozené, či již neplní provozní požadavky a tak dochází k renovaci, nebo úplnému vyřazení a nahrazení novými díly. V našem případě se jedná o renovaci malého vodního díla, využívajícího jedné horizontální Kaplanovy turbíny na vodní nádrži Hričov nedaleko slovenského města Žilina.

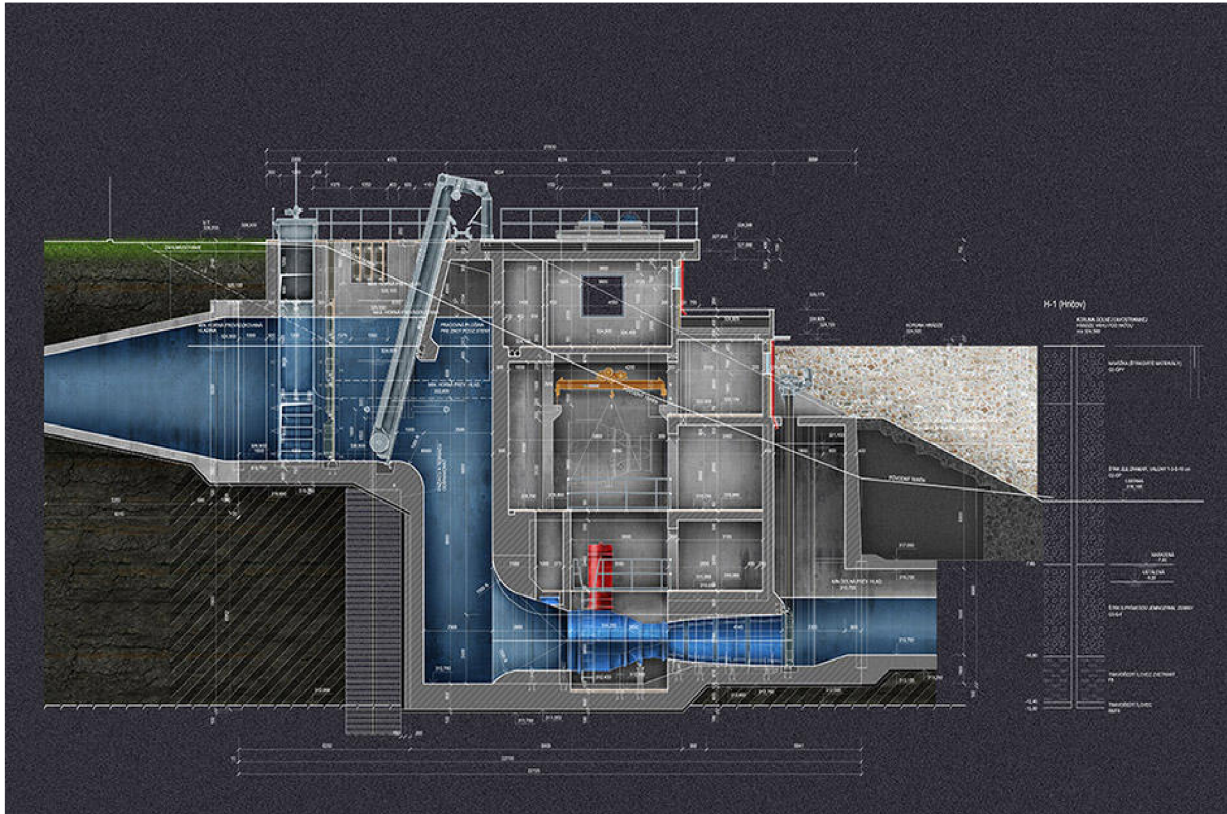
Jelikož se jedná o soustrojí, kterým protéká voda mající určitý tlak, můžeme dílce vedoucí kapalinu považovat za tlakové nádoby, pro které jsou velmi přísná kritéria, jak provedení svarových spojů, tak i jejich následné kontroly. V této diplomové práci je popsána konstrukce, včetně provedení výpočtu pevnosti navržených svarů, technologie svařování, úprava svarových hran jednotlivých dílců a metod kontroly svarů vnějšího lopatkového kruhu Kaplanovy turbíny.



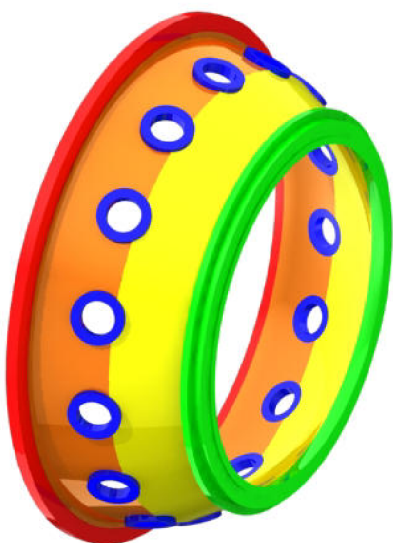
Obr. 1 Vodní elektrárny

# 1 POPIS KONSTRUKCE A NÁVRHU [1,12,16]

Malá vodní elektrárna Hričov lze označit za akumulární, jelikož pracuje na principu akumulace vodní masy ve vodní nádrži, čímž je zajištěn spád, nízkotlakou, protože spád je menší než 20 metrů a konečně přetlakovou, z důvodu, že tlak vody je před oběžným kolem větší než za ním. Zdrojem energie je množství vody, které protéká skrze celé její ústrojí a proto se jako nejvhodnější varianta jeví horizontální Kaplanova turbína. Ta se skládá z několika základních částí, jako jsou česle, oběžné kolo, rozvaděč, stator, generátor atd.



Obr. 1 Sestava přívodního potrubí [12]



Obr. 2 Sestavení vnějšího lopatkového kruhu

Ve většině případů se jedná o dílce, které jsou buďto spojeny šroubovým spojem, nebo svařence. Pro tuto práci byl zvolen svařenec rozvaděče, nacházející se před oběžným kolem, v místě, kde jsou rozváděcí lopatky a jedná se o vnější lopatkový kruh. Ten se skládá z pěti základních dílců, jimiž jsou dvě příruby, které slouží ke spojení s komorou oběžného kola (Obr. 2 - označen zeleně) a spojení se statorem (Obr. 2 - označen červeně). Dále pak dva pláště tvořící vlastní těleso vnějšího lopatkového kruhu (Obr. 2 - označeny žlutě a oranžově) a nákrůžek (Obr. 2 - označen modře), který slouží k uchycení pouzdra pro čep rozváděcí lopaty, spojené táhlem s mechanismem korigujícím natočení rozváděcích lopatek.

Konstrukční návrh, jako takový, byl zhotoven ve firmě Strojírny Brno, a.s. se sídlem v Kuřimi, pro kterou jsem dle výkresové dokumentace zhotovoval 3D vizualizaci, jakožto brigádník v roce 2014. Statická analýza zatížení byla zhotovena mnou pod vedením pana Ing. Františka Svěráka.

## 1.1 Parametry turbíny a materiál vnějšího lopatkového kruhu [1,12,16]

<b>Průměr oběžného kola:</b>	ø1150 mm
<b>Zkušební tlak tělesa:</b>	0,12 MPa
<b>Předpokládaný provozní tlak:</b>	0,085 MPa
<b>Maximální průtok:</b>	$Q_{\max} = 8\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
<b>Typ přenosu výkonu na generátor :</b>	pravoúhlým převodem
<b>Výroba el. energie v roce (předpoklad):</b>	4750 MWh
<b>Připojení/přivaření:</b>	připojeno šroubovými spoji ke statoru a komoře oběžného kola / svařeno mezi přírubami a pláští (1/2 U svařem s překrytím koutovým svařem), mezi pláští (oboustranný 1/2 V svař, tzv. "K" svař), mezi nákrůžkem a pláštěm (oboustranný 1/2 V svař, tzv. "K" svař s překrytím koutovým svařem).

**Materiál:** Příruby, pláště i nákrůžek jsou z materiálu S 355 J2 G3.

Tab.1 Chemické složení oceli S355J2G3 v hmotnostních procentech[1]

Chemické složení v hmotnostních % (rozběr tavby)								
	C max. pro tloušťku v mm							
Označení	≤ 16mm	> 16mm ≤ 40 mm	> 40 mm	Mn	Si	P	S	N
S355J2	max. 0,20	max. 0,20	max. 0,22	max. 1,60	max. 0,55	max. 0,04	max. 0,04	max. 0,009

Pro profily o jmenovité tloušťce nad 100 mm se obsah C stanoví po dohodě.

### Technologické a konstrukční vlastnosti materiálu S 355 J2 G3[1]:

- *Svařitelnost* – materiál S355J2G3 je nelegovaná jakostní konstrukční ocel, vhodná ke svařování všemi obvykle používanými způsoby svařování. S rostoucí tloušťkou a rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu se zvyšuje riziko výskytu trhlin za studena v oblasti sváru. Je účelné dbát doporučení stanovující podmínky pro svařování.
- *Tváření za tepla* – jsou-li dodané výrobky dále tvářené za tepla, splňují uvedené mechanické hodnoty pouze po následném normalizačním žíhání.
- *Mechanické vlastnosti* – vypsány v Tab. 2 (platí pro tlusté plechy válcované za tepla).

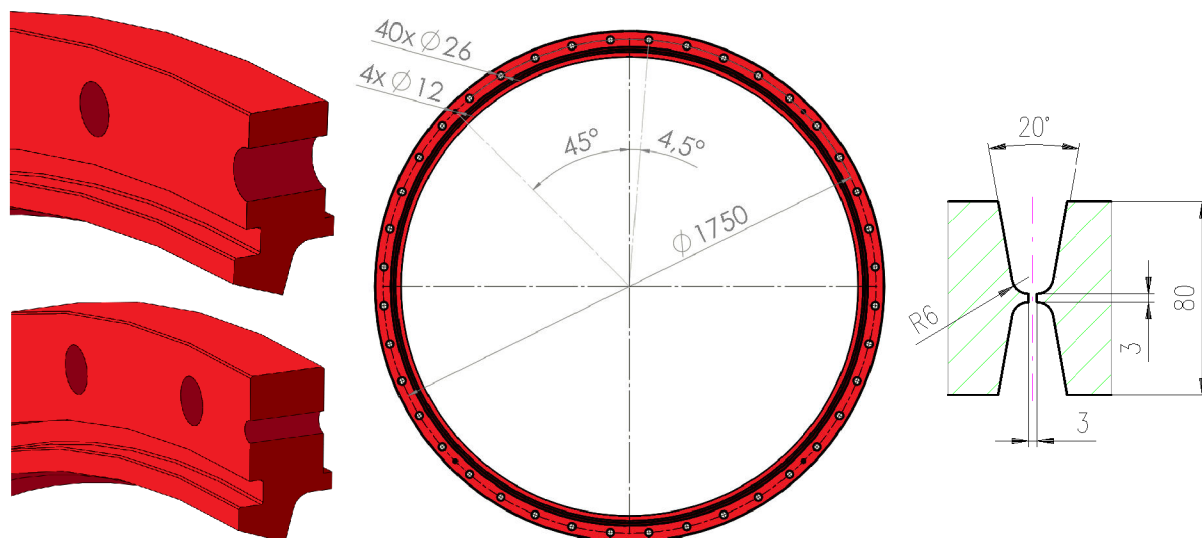
Tab.2 Mechanické vlastnosti oceli S355J2G3 (dle ČSN 11523.0) [16]

Mechanické vlastnosti oceli S355J2G3						
Rozměr d, t [mm]	3-16	16-14	40-63	63-80	80-100	>100
Mez kluzu $R_e$ [MPa] min	355	345	335	325	315	295
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	490-630					470-630
Tažnost $A_5$ [%] min	napříč 20		napříč 19	napříč 18		
Nárazová práce $KV^\circ$ [J] min	27			-		

**Zkoušky po ukončení výroby:** tlaková – tlakováno na 1,5 násobek výpočtového tlaku (0,128 MPa)

## 1.2 Dílce vnějšího lopatkového kruhu

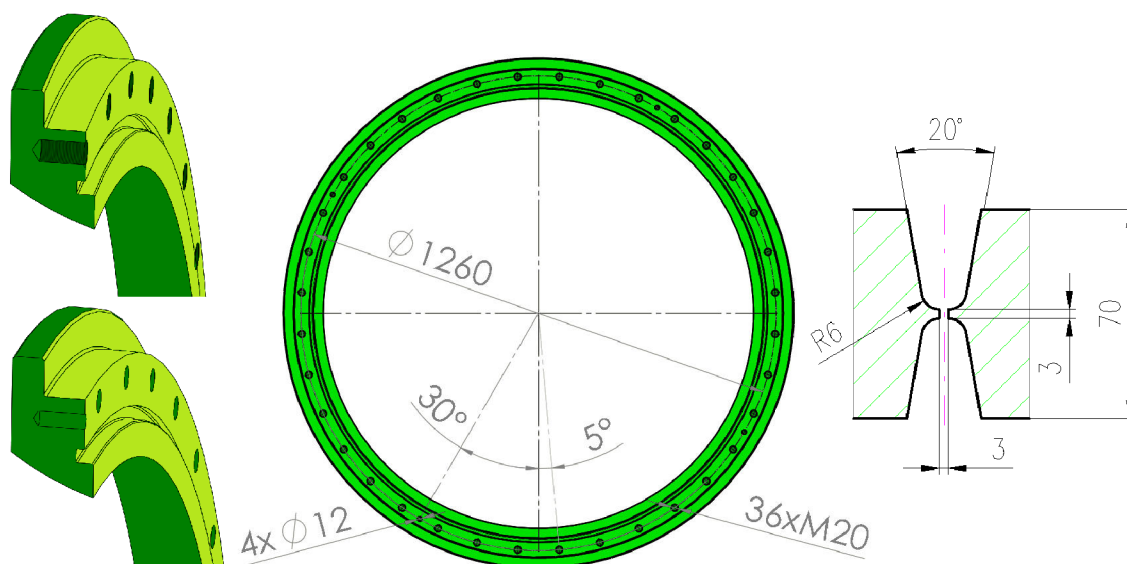
### a) Příruba spojující vnější lopatkový kruh se statorem



Obr. 3 Příruba spojující vnější lopatkový kruh se statorem

Jedná se o přírubu, která slouží k připojení vnějšího lopatkového kruhu k tělesu statoru. Příruba je tvořena šesti segmenty vypálenými z plechu tloušťky 70 mm, jež jsou k sobě následně přivařeny v přípravku oboustranným U svarem s rozevřením 20° (viz Obr. 3). Svařený polotovár příruby je následně opracován na požadovaný profil na CNC obráběcím centru, tím je myšlena úprava svarové hrany. Finální profil včetně drážky pro těsnění, děr  $\varnothing 26$  mm pro šrouby a děr  $\varnothing 12$  mm pro kolíky jsou obrobena a vrtány až po svaření všech dílců vnějšího lopatkového kruhu z technologických důvodů, jakými jsou možné zkroucení svařence a následná nesouosost děr s protikusem.

### b) Příruba spojující vnější lopatkový kruh ke komoře oběžného kola

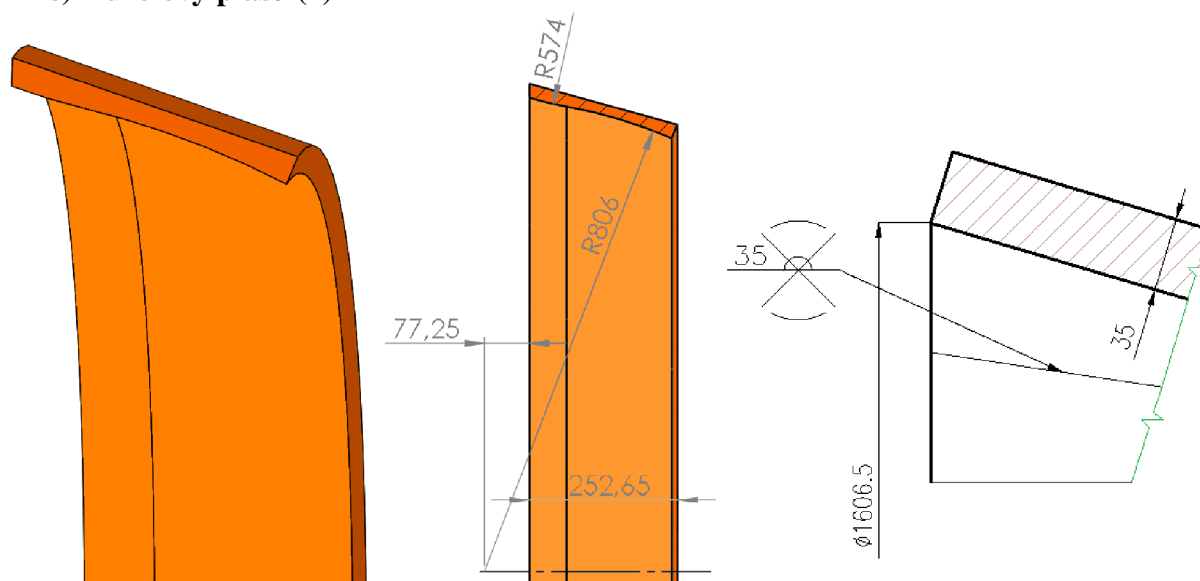


Obr. 4 Příruba spojující vnější lopatkový kruh ke komoře oběžného kola

Jedná se o přírubu, která slouží k připojení vnějšího lopatkového kruhu ke komoře oběžného kola. Příruba je tvořena čtyřmi segmenty vypálenými z plechu tloušťky 80 mm, jež jsou k sobě následně přivařeny v přípravku oboustranným "U" svarem s rozevřením 20° (viz

Obr. 4). Finální profil včetně drážky pro těsnění, závitových děr M20 mm pro šrouby a děr  $\varnothing 12$  mm pro kolíky jsou obrobena a vrtány až po svaření všech dílců vnějšího lopatkového kruhu z technologických důvodů, jakými jsou možné zkroucení svařence a následná nesouosost děr s protikusem.

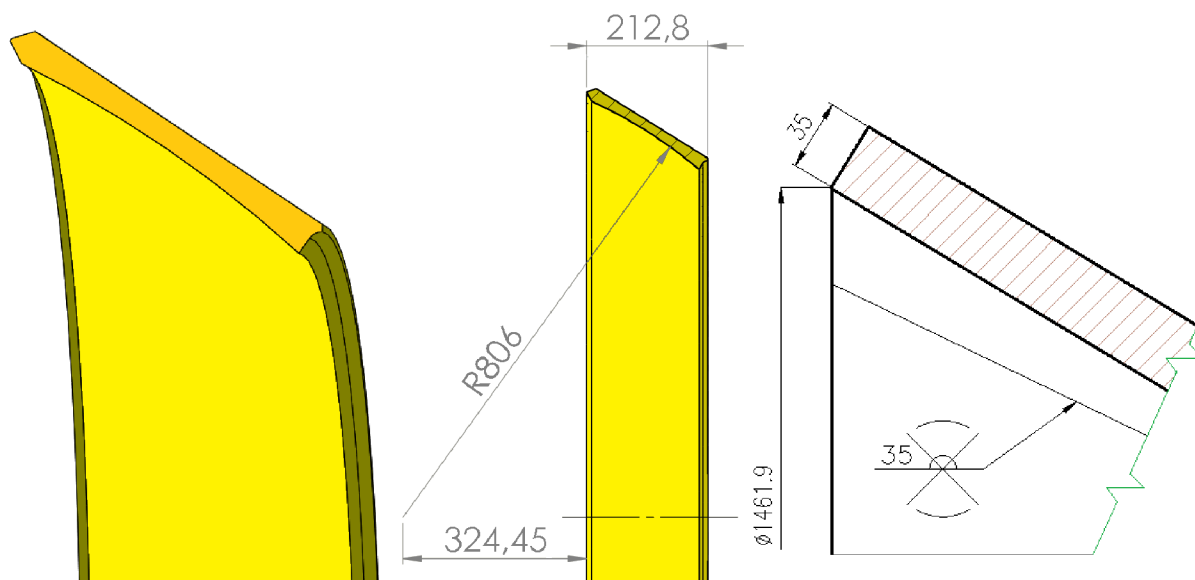
### c) Kuželový plášť (1)



Obr. 5 Kuželový plášť (1)

Kuželový plášť je vyroben z výpalku tloušťky 35 mm, který je následně skružen a svařen oboustranným "V" svarem (viz Obr.5). Ten je pak zabroušen a svařený polotovár je následně opracován dle požadovaného tvaru profilu až po svaření všech dílců vnějšího lopatkového kruhu..

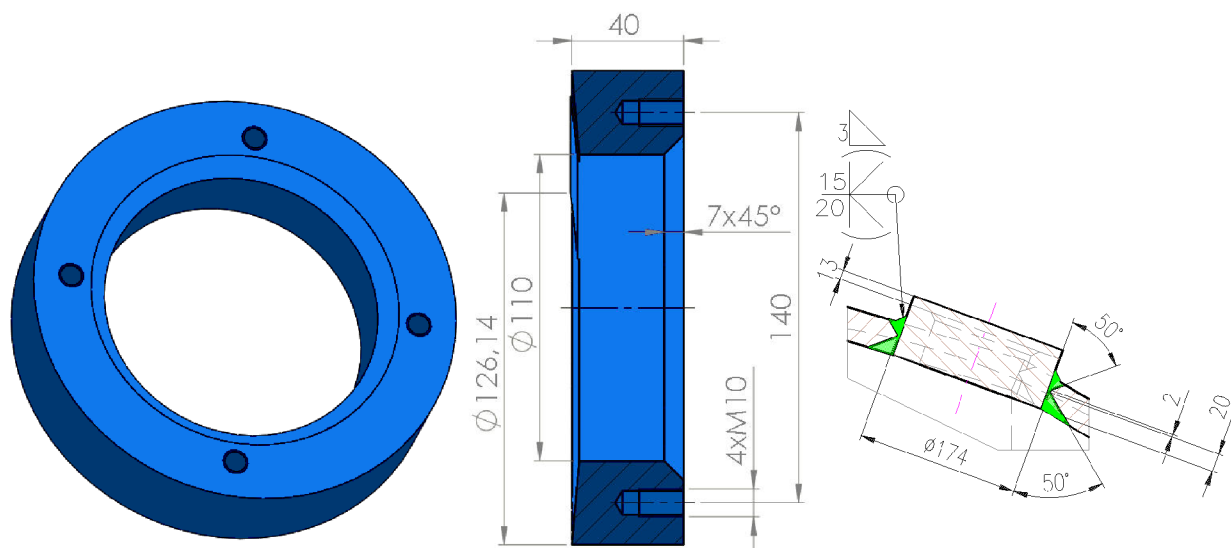
### d) Kuželový plášť (2)



Obr. 6 Kuželový plášť (2)

Kuželový plášť je vyroben z výpalku tloušťky 35 mm, který je následně skružen a svařen oboustranným "V" svarem (viz Obr.6). Ten je pak zabroušen a svařený polotovár je následně opracován dle požadovaného tvaru profilu včetně svarových hran, které musí být obráběny na CNC obráběcím centru z důvodu složitosti tvaru (úprava svarové hrany pro "1/2 U" svar).

### e) Nákrůžek



Obr. 7 Nákrůžek

Nákrůžek slouží k uchycení pouzdra pro čep rozváděcí lopaty, za pomoci čtyř šroubů M10, spojené táhlem s mechanismem korigujícím natočení rozváděcích lopatek. Polotovár o průměru 174 mm a výšce 67 mm je přivařen za pomoci oboustranného "1/2 V" svaru s překrytím z vnější strany koutovým svarem. K obrobení dojde až po svaření celého vnějšího lopatkového kruhu z důvodu požadované přesnosti a možnosti vzniku nesouososti vlivem svařování. Jelikož zde budou ukotveny rozváděcí lopatky, klademe velký důraz na přesnost obrobení těchto patnácti přivařených kusů.

## 2 STATICKÝ VÝPOČET POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ PRO OVĚŘENÍ POŽADOVANÉ KVALITY SVAROVÝCH SPOJŮ[2,7,13,17]

### 2.1 Popis metody konečných prvků [2] [7] [13]

Metoda konečných prvků (dále jen MKP) je v současné době jednou z nejuniverzálnějších metod pro řešení napěťově-deformačních úloh, souvisejících s problematikou teorie polí. Pro správné řešení je základním předpokladem znalost funkcionálu  $\pi$ , definovaného na množině funkcí. MKP je založena na zcela jiném principu než analytické metody pružnosti. Zatímco analytické metody jsou založeny na diferenciálním a integrálním počtu, MKP je založena na obecně méně známém počtu variačním, hledá minimum nějakého funkcionálu.

*Funkcionál* – jedná se o zobrazení z množiny funkcí do množiny čísel.

MKP je dobře použitelná v celé řadě oblastí fyziky, např. v:

- mechanice kontinua (teorie pružnosti, plasticity, atd.)
- vedení tepla
- difuze, prosakování
- elektřině a magnetismu (teorie elektrického a magnetického pole)

K velkým přednostem MKP v oblasti mechaniky kontinua patří zejména:

- možnost řešení úlohy pro obecný geometrický tvar tělesa, obecné zatížení a uložení i pro komplikované podstatné vztahy materiálu
- snadné řešení materiálově nehomogenních problémů (např. ve srovnání s metodou hraničních prvků (MHP))
- dobré matematické vlastnosti (numerická stabilita u statických a kvasistatických problémů s malými setrvačnými silami, stacionárních dynamických úloh v oblasti kmitání a resonance [problematika vlastních čísel]) [7]

Praktický výpočet probíhá tak, že za pomoci počítačového programu, v našem případě SolidWorks® 2013, je vytvořen geometrický model tělesa, nebo soustavy těles, pro přípravu vstupních dat (preprocesingu), který se beze zbytku rozdělí na prvky konečných rozměrů a to tak, že je využit modul vytvoření sítě. Program vyhodnotí nejideálnější velikost prvku vzhledem ke složitosti a náročnosti pro výpočet. V našem případě byla zvolena ještě jemnější síť, což má za následek delší výpočtový čas, avšak dosáhneme přesnějších výsledků výpočtu. Základním prvkem této sítě v rovině je čtyřúhelník (viz Obr. 9), v prostoru pak šestistěn (viz Obr. 10), bohužel je někdy nutné použít zjednodušených tvarů prvků (trojúhelník, čtyřstěn), které jsou příznivější pro výpočet. Rohy těchto prvků, případně některé další význačné body, jako například středy hran, jsou uzlovými body, v nichž se určují neznámé hodnoty posuvů, strany (hrany) prvků vytvářejí síť, jejíž hustota je rozhodující pro přesnost výsledků. Hrany prvků jsou obvykle přímé, ale pomocí kvadratických prvků lze realizovat i zakřivené. Kvadratické prvky mají kromě rohových uzlů ještě další uzly uprostřed stran (resp. hran), čímž dostáváme v rovině prvek osmi-uzlový a v prostoru prvek dvaceti-uzlový. Tyto prvky lépe vystihují lokální koncentraci napětí i při použití hrubé sítě.

## 2.2 Diskretizace a základní prvky MKP[2][7]

### 2.2.1 Diskretizace (triangulace) tělesa pomocí konečných prvků[2]

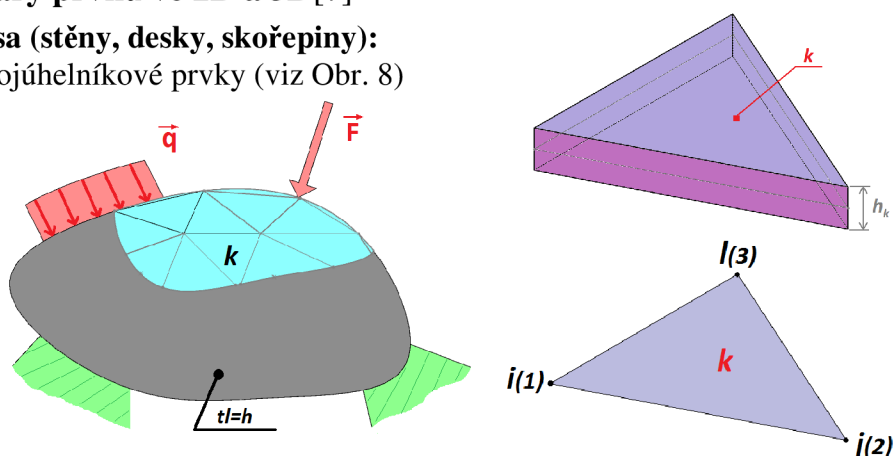
Z matematického hlediska je MKP variační metodou. Vyřešení soustavy lineárních (parciálních) diferenciálních rovnic je koncipováno jako lineární kombinace bazových funkcí. To lze objasnit tak, že úloha najít řešení spojitě funkce bude transformována na úlohu najít diskrétní množinu reálných čísel – koeficientů dané lineární kombinace. Z tohoto důvodu se tomuto procesu říká diskretizace.[2] Zjednodušeně řečeno, že diskretizace znamená rozdělení tělesa na části (prvky), které jsou matematicky snadno popsatelné.

Diskretizace oblasti musí být provedena tak, aby nikde nevznikly mezery nebo přesahy, což omezuje výběr prvků. [7]

### 2.2.2 Tvary prvků ve 2D a 3D[7]

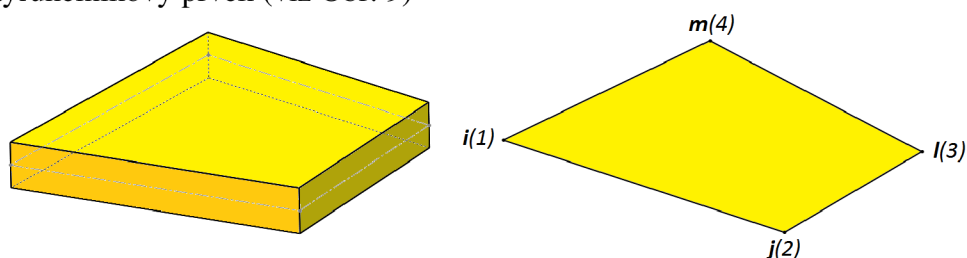
- **2D tělesa (stěny, desky, skořepiny):**

- trojúhelníkové prvky (viz Obr. 8)



Obr. 8 Diskretizace obecného 2D tvaru pomocí trojúhelníkového prvku a trojúhelníkový prvek

- čtyřúhelníkový prvek (viz Obr. 9)

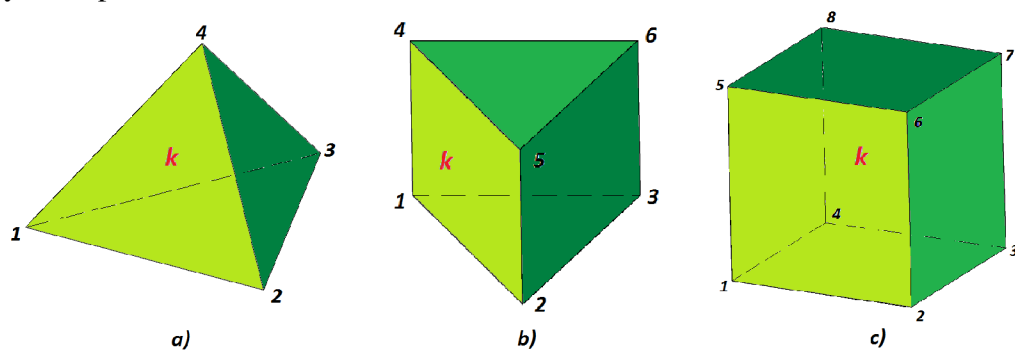


Obr. 9 Čtyřúhelníkový prvek

- isoparametrický prvek (rovnice hraniční křivky i aproximační funkce pro posuvy jsou stejného charakteru – např. kvadratická parabola)

- **3D tělesa**

- čtyřstěn, pětistěn, šestistěn



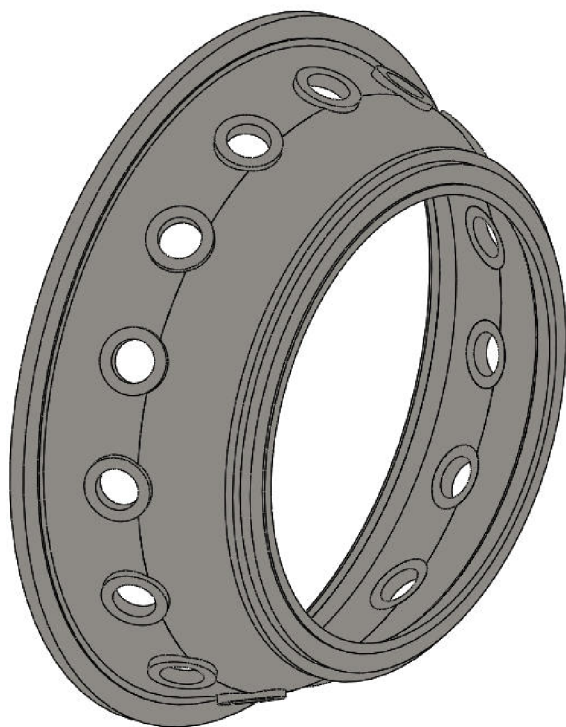
Obr. 10 Prvky 3D těles; a) čtyřstěn, b) pětistěn, c) šestistěn

- isoparametrický čtyřstěn, pětistěn, šestistěn



## 2.3 Lineární statická analýza

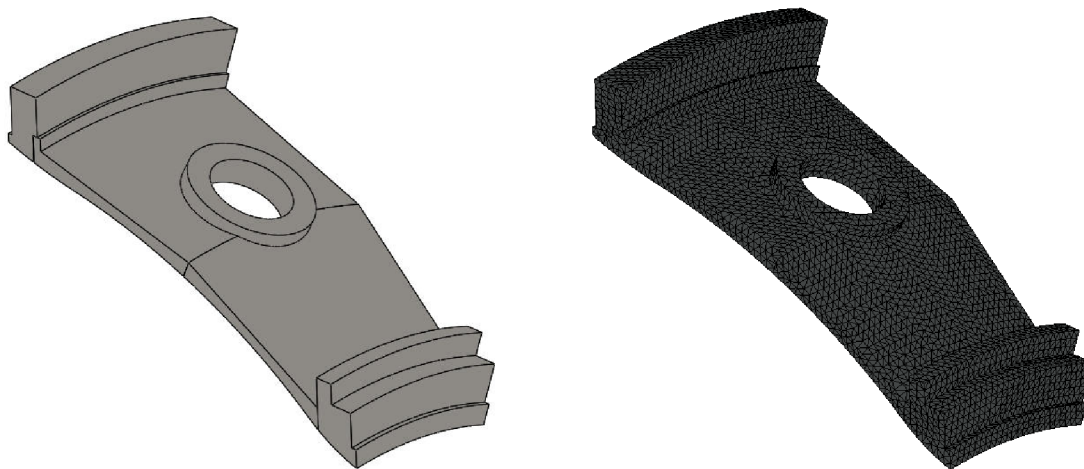
Analýza je součástí programu SolidWorks® Professional 2013, jež využívá k výpočtu napětí, namáhání a posuvu metodu konečných prvků. Pro dílce jakými jsou např. části turbíny,



tlakové nádoby, v podstatě veškeré ocelové konstrukce nějak zatížené, je tento výpočtový modul vhodný z hlediska takzvané predikce chování dané soustavy. Můžeme si otestovat, jak se bude daný dílec či soustava dílců chovat při zatížení tlakem, sílou, spojitým zatížením, atd. Znalost toho, jak se bude navrhovaný prototyp chovat pro dané podmínky zatížení, umožňuje uživatelům změny ještě před výrobou prototypů, čímž šetří čas a hlavně prostředky. Díky integraci produktů návrhu a analýzy může být pevnostní analýza provedena jako jedna ze základních částí procesu návrhu. Všechny specifikace analýzy (zatížení, uchycení atd.) jsou použity na geometrii místo na vytvořenou síť MKP a díky tomu je zachována asociativita dat analýzy, i pokud dojde ke změně návrhu.[7]

Obr. 11 Zjednodušený model vnějšího lopatkového kruhu

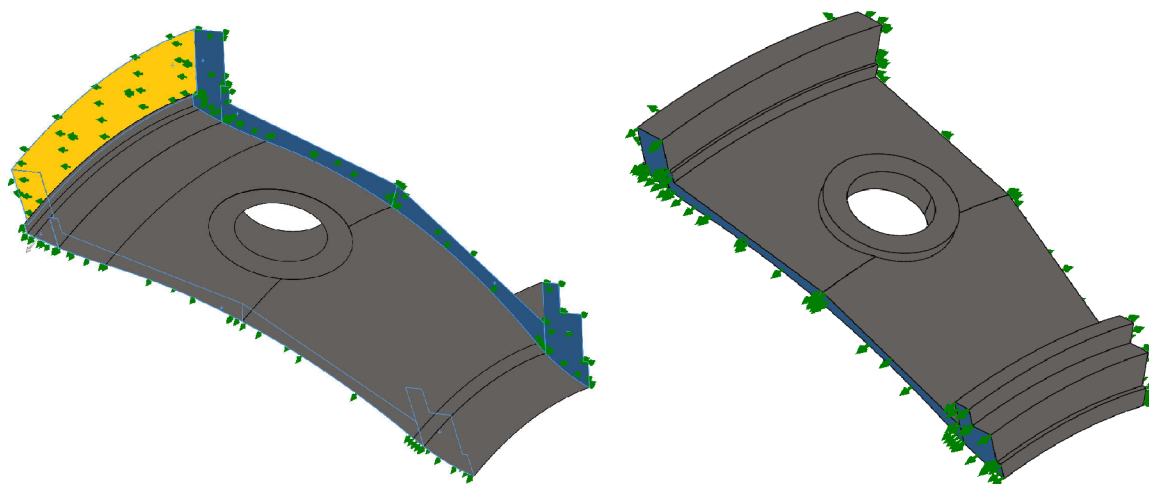
Pro výpočet napětí a posuvů ve vnějším lopatkovém kruhu můžeme provést zjednodušení celkové soustavy (viz Obr. 11). Zjednodušením se myslí odstranění drážek pro těsnění, děr a závitů pro spojení vnějšího lopatkového kruhu s tělesem statoru a komorou oběžného kola šroubovými spoji a kolíky. Dále pak místo, kde bude svár, zaplníme plným materiálem (nesmíme zapomenout při hodnocení ponížít dovolené napětí vzhledem k této podmínce vstupních parametrů výpočtu). Následným krokem pro zjednodušení je možnost rozdělení tělesa na patnáct stejných výřezů, vzhledem k možnosti využití symetrie pro zadaný model, což nám značně urychlí a zjednoduší výpočet (viz Obr. 12).



Obr. 12 Segment vnějšího lopatkového kruhu pro výpočet a znázornění sítě na segmentu

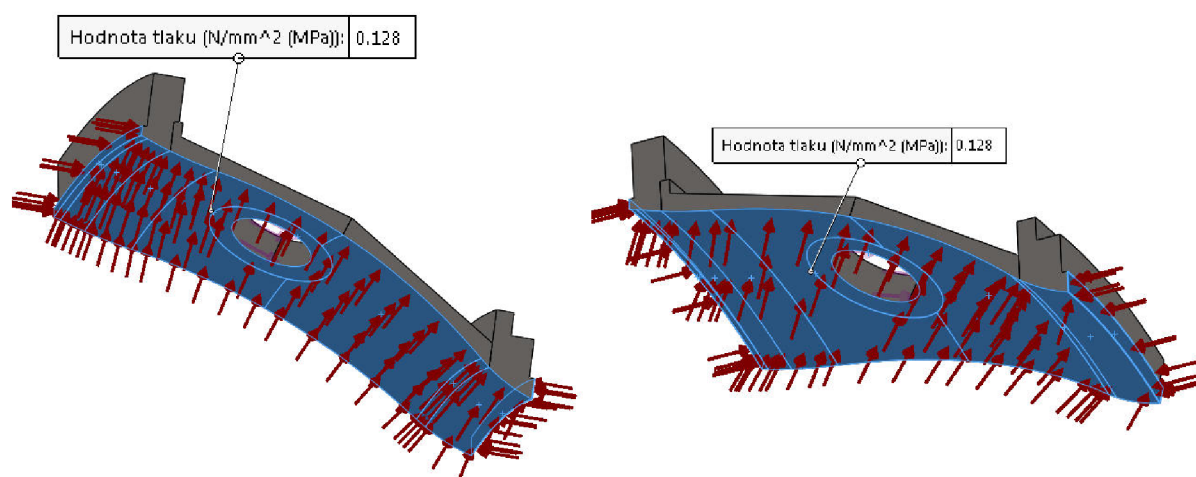
Pro tento daný segment pak byla použita síť tvořená 3D tetraedrickými (čtyřstěnnými) objemovými prvky (viz Obr. 10a) a jako parametry sítě byla zvolena standardní objemová síť s prvky, jejichž globální velikost byla nastavena na 10 mm s tolerancí 0,5 mm (viz Obr. 12).

Dalším bodem ve statické analýze je nastavení parametru uchycení segmentu. Způsob uchycení vychází z predikce, že vnější lopatkový kruh bude fixovaný šroubovými spoji, tím pádem bude moci docházet k posuvu celé soustavy v axiálním směru osy rotace. To je také podmíněno volbou prvků Tetra10, což je čtyřstěn obsahující uzly nejen ve vrcholech, ale i ve středu jeho hran, jež umožňují pouze posuv ve směru této osy, nikoliv však natočení, z důvodu zadání tohoto parametru do výpočtového modulu. Z těchto důvodů bylo zvoleno uchycení na rovinné ploše spojující vnější lopatkový kruh s tělesem statoru (viz obr. 13) a s využitím symetrie segmentu pak další dvě uchycení na postraních plochách segmentu.



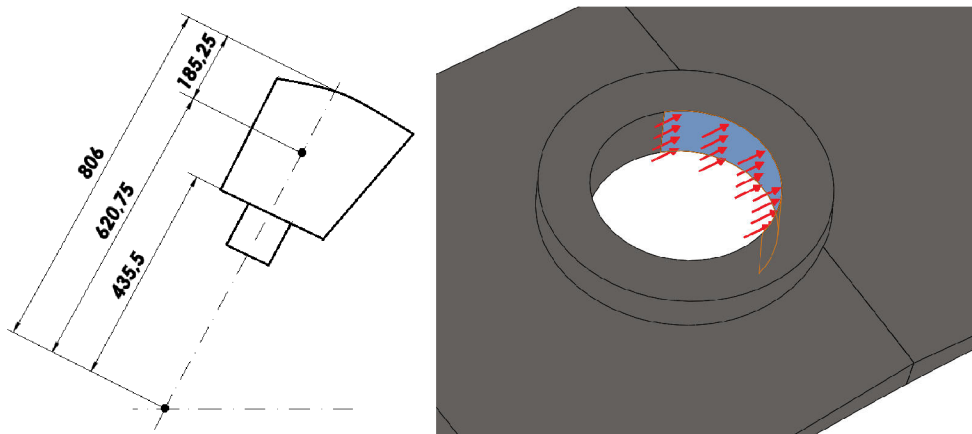
Obr. 13 Zobrazení uchycení segmentu vnějšího lopatkového kruhu

Poslední a velmi důležitý bod statické analýzy je přiřazení zatížení segmentu od tlaku vody (viz Obr. 14) a také síly působící na rozváděcí lopatku. Tlak vody je stanoven rozdílem výšek hladin, před česlem a za kuželovou savkou, který činí 8,5m a pro výpočet je tento tlak navýšen na 1,5 násobek, tudíž do systému zadáváme hodnotu 0,128 MPa.



Obr. 14 Zobrazení zatížení segmentu vnějšího lopatkového kruhu výpočtovým tlakem

Sílu zatěžující jednu rozváděcí lopatku pak můžeme spočítat zjednodušeným způsobem, kdy spočteme plochu pláště komolého kužele, který je tvořen orotovaným průmětem v ose lopatky, ten se pronásobí tlakem a vydělíme počtem symetrických dílců. Tato síla pak působí na ploše nákržku, jak můžete vidět na Obr. 15.



Obr. 15 Náčrt geometrie pro výpočet síly a zobrazení působení síly na nákrůžek

Pak tedy tuto sílu můžeme spočítat dle vzorce:

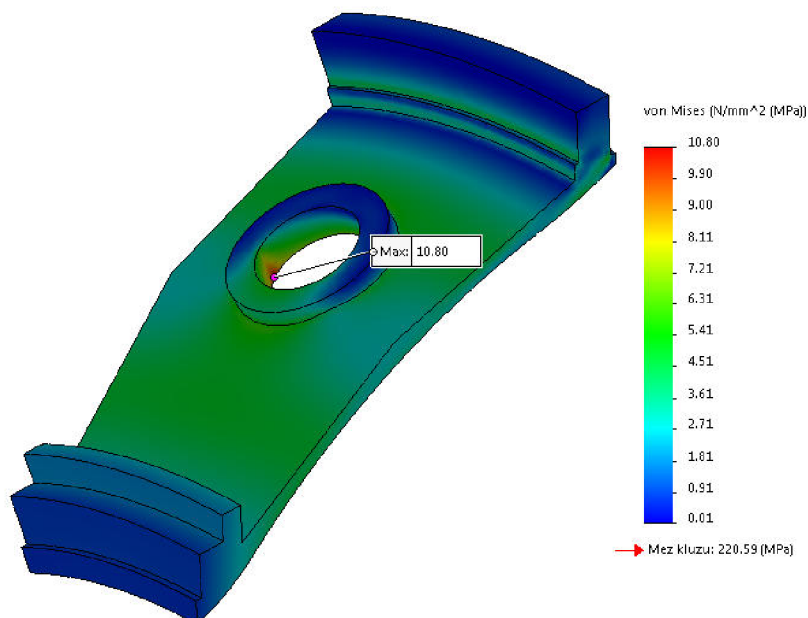
$$F_{1L} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot L \cdot p}{15} \quad [\text{MPa}], \quad (2.1.)$$

kde:

$F_{1L}$ [N]	– síla zatěžující jednu rozváděcí lopatku
R [mm]	– vzdálenost mezi středem lopatky a středem rotace
L [mm]	– výška lopatky v délce osy rotace lopatky
p [MPa]	– zkušební (výpočtový) tlak

$$F_{1L} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot L \cdot p}{15} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 620,75 \cdot 370,5 \cdot 0,128}{15} = \underline{\underline{12331,15}} [\text{N}]$$

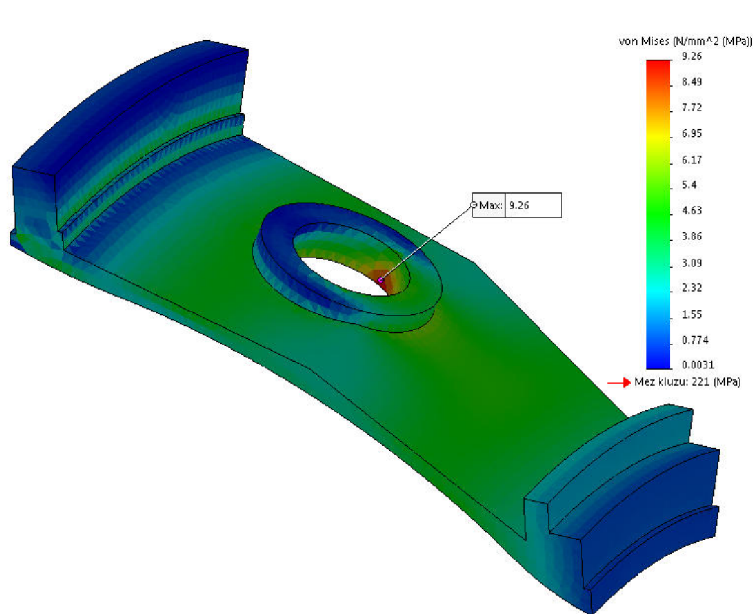
## 2.4 Výsledky lineárně statické analýzy



Po zadání parametrů výpočtu do programu proběhne samotný výpočet, který nám poskytuje značné množství dat k vyhodnocení zatížení segmentu. Zejména nás tedy zajímá maximální hodnota napětí na tělese a také hodnoty napětí v místech svarů. Program SolidWorks® nám nabízí možnost zkoumání napětí jak v uzlech prvků, tak i ve středech těchto prvků.

Obr. 16 Výsledky napětí v uzlech prvků (3D pohled)

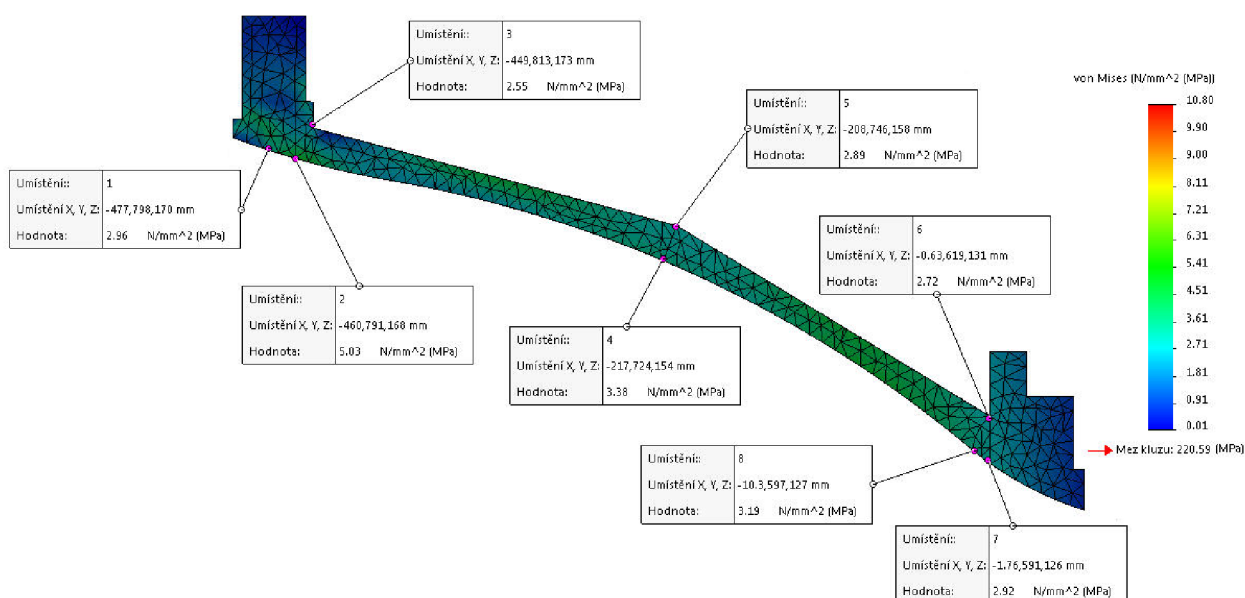
Při zatížení modelu výpočtovým tlakem  $p = 0,128$  MPa (viz Obr. 14, provozní tlak je nižší) a silou  $F_{L1} = 12331,15$  N dostáváme maximální hodnotu napětí v uzlech prvků 10,8 MPa (viz Obr. 16) a pro středy prvků pak hodnotu 9,26 MPa (viz Obr. 17). Obě tyto hodnoty se nacházejí na vnitřní straně nákrůžku, což odpovídá působení zatěžující síly na rozváděcí



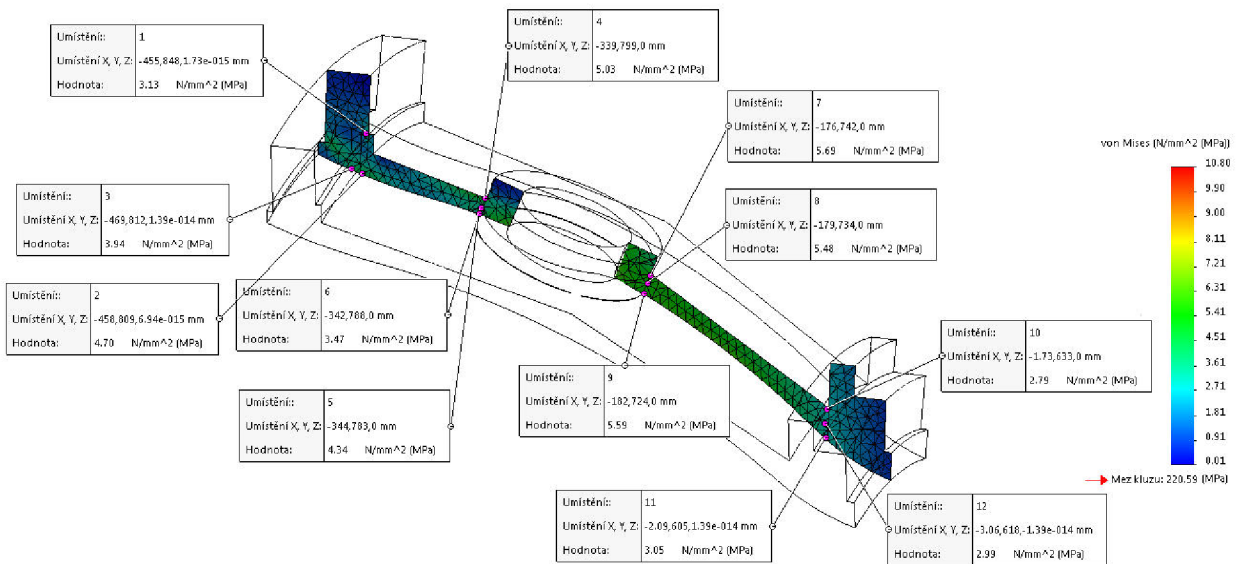
lopatku, protože v tomto místě dojde k opření čepu lopatky o ložisko a to tlačí na námi navržený nákržek. Hodnoty posuvu na segmentu jsou velmi nízké, což dokazuje i jejich maximální hodnota 0,018 mm. Pokud několikrát zvětšíme měřítko tohoto posuvu a zahájíme simulaci, vidíme, že se segment chová jako část nafukovacího balónku při opětovném roztahování a smršťování. Tato vlastnost nám udává fakt, že se těleso vnějšího lopatkového kruhu bude opravdu chovat jako tlaková nádoba.

Obr. 17 Výsledky napětí ve středech prvků (3D pohled)

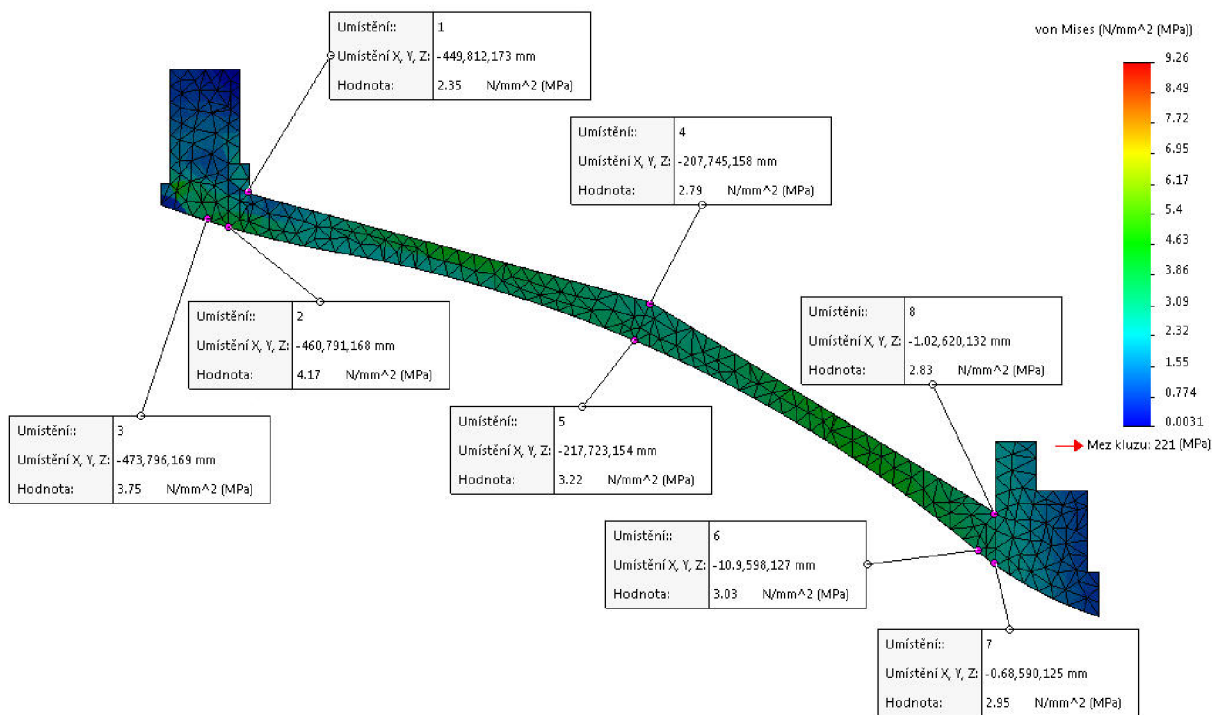
Pro vyhodnocení napětí v místech svaru je třeba vytvořit řez segmentem, ve kterém jsme schopni vyznačit dostatečné množství bodů tak, abychom dokázali určit zatížení v místě svarového spoje. Tento řez pak provedeme ve třech místech tělesa. Nejdříve na okraji, kde můžeme zkoumat napětí ve svarovém spoji mezi oběma pláští a mezi pláštěm a přírubou na obou stranách (viz Obr. 18). Z podmínky symetrie pak predikujeme, že toto zatížení bude shodné i na zrcadlové straně segmentu. Další řez provedeme přímo v ose segmentu (viz Obr. 19), kde můžeme prozkoumat napětí ve svaru okolo nákržku a také ve svarech spojujících plášť s přírubami tělesa statoru a komory oběžného kola. Poslední řez pak v rovině, která je kolmá na normálovou rovinu osy nákržku (viz Obr. 20). Tyto řezy provedeme jak pro výsledky napětí v uzlech, tak ve středech prvků (viz Obr. 21,22,23).



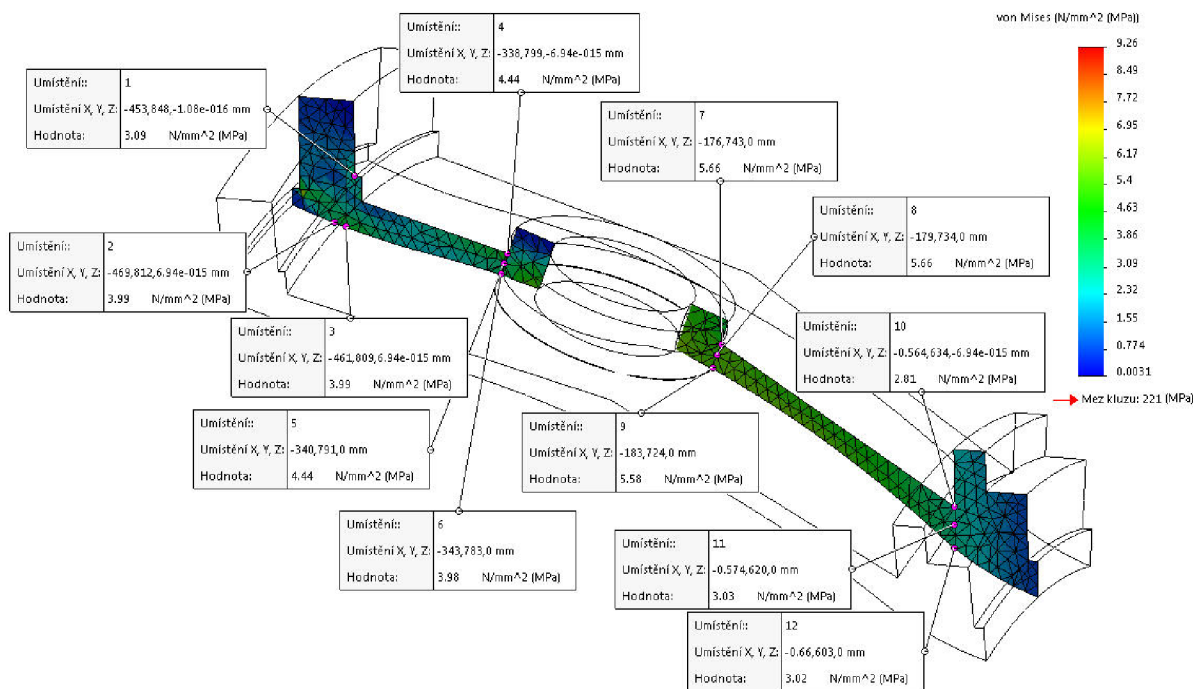
Obr. 18 Výsledky napětí v uzlech prvků - na vnější straně segmentu



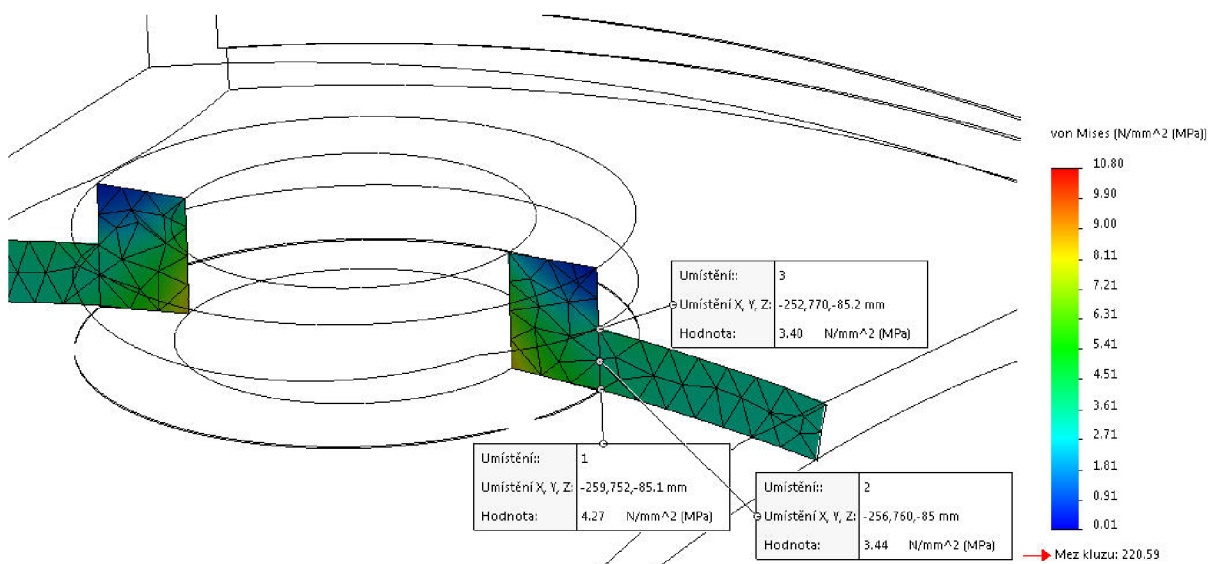
Obr. 19 Výsledky napětí v uzlech prvků - v řezu osy symetrie segmentu



Obr. 20 Výsledky napětí ve středech prvků - na vnější straně segmentu



Obr. 21 Výsledky napětí ve středech prvků - v řezu osy symetrie segmentu



Obr. 22 Výsledky napětí v uzlech prvků - řez kolmý na normálovou rovinu osy nákrčku

Pro materiál S 355 J2 s hodnotou meze kluzu 345MPa volím dovolené napětí dle vzorce:

$$\sigma_D = \frac{R_e}{2} \cdot k \quad [\text{MPa}], \quad (2.1.)$$

kde:  $\sigma_D$  [MPa] – dovolené napětí (nejnižší hodnota dle Tab. 2)  
 $R_e$  [MPa] – mez kluzu  
 $k$  [-] – koeficient ponížení z důvodu svarového spoje

$$\sigma_D = \frac{R_{eH}}{2} = \frac{325}{2} \cdot 0,85 = \underline{138,13 \text{ MPa}}$$

Jelikož jsou hodnoty vypočteného napětí jak v uzlech, tak ve středu prvku nižší než hodnota dovoleného napětí, tak můžeme říci, že takto dimenzovaný vnější lopatkový kruh i jeho svarové spoje vyhovují a vydrží jak pracovní, tak zkušební tlak. Tento výpočet jsem provedl za dozoru a velmi cenných rad pana Ing. Františka Svěráka.

### 3 NÁVRH TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ[5,7,8,9,10,11]

Svařování se s výhodou uplatňuje ve strojírenství, u silničních a železničních dopravních prostředků, pro stavbu lodí, u ocelových konstrukcí (např. mosty, jeřáby, atd.), u tlakových nádob pro chemický, energetický a potravinářský průmysl, v elektrotechnice, při výrobě zařízení a strojů.

Svařování patří svým druhem do skupiny nerozebíratelných spojení dvou nebo více dílů za pomoci přídavného materiálu, nebo i bez něj. Ke spojení dojde v důsledku dodání určitého množství energie do místa styku dílů. Svaření vznikne dosažením meziatomových vazeb mezi spojovanými díly při jejich ohřevu, nebo díky plastické deformaci, popřípadě za působení obou těchto metod zároveň. V důsledku pak můžeme rozdělit obecně svařování na dva typy a to:

- a) **Svařování tavné** – nerozebíratelné spojení je zhotoveno místním natavením spojovaných součástí bez použití tlaku.
- *Svařování elektrickým obloukem:*
    - bez ochranného plynu – obloukové svařování obalenou elektrodou  
– obloukové svařování plněnou elektrodou
    - v ochranném plynu – taví se elektrodou v inertním plynu (MIG)  
– taví se elektrodou v aktivním plynu (MAG)  
– wolframovou (netavící se) elektrodou v inertním plynu (WIG)  
– plazmové  
– atomovodíkové
    - pod tavidlem – drátovou elektrodou  
– páskovou elektrodou  
– plněnou elektrodou
  - *Svařování plamenem*
  - *Elektrostruskové svařování*
  - *Elektronové svařování*
  - *Laserové svařování*
- b) **Svařování za použití tlaku** – nerozebíratelné spojení je zhotoveno za použití tlaku.
- *Odporové svařování* – Teplo ke svaření vzniká průchodem elektrického proudu skrze přitlačené spojované díly.
  - *Třecí svařování* – Teplo ke svaření vzniká třením stykových ploch při vzájemném pohybu svařovaných dílců.
  - *Tlakové svařování* – Je uskutečněno plastickou deformací spojovaných dílců, při teplotách nižších než je jejich tavící teplota.
  - *Svařování ultrazvukem* – Při současném působení mechanického kmitání vyvolaného ultrazvukem a tlaku. Mechanickými kmity spojovaných dílů se vyvolá třením teplo, které je nedostatečné pro natavení, ale podpoří difúzi atomů.
  - *Svařování explozí* – Spojení vzniká přeměnou tlakové energie exploze na deformační a materiály na kontaktní ploše zplastizují.

Vzhledem ke konstrukci vnějšího lopatkového kruhu se jeví jako nejvíce vhodnou metoda tavného svařování, svařování elektrickým obloukem taví se elektrodou v ochranném aktivním plynu (MAG). V následujících podkapitolách si popíšeme teorii pro zvolenou metodu svařování.

### 3.1 Svařování elektrickým obloukem[9]

Elektrický oblouk, využitelný ve svařování, je nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj, který hoří v prostředí ionizovaného plynu. Stabilně hoří za předpokladu napětí dostatečného pro ionizaci daného prostředí a proudu udržujícího plazma oblouku v ionizovaném stavu.[9]

Charakteristické znaky oblouku jsou[9]:

- malý anodový úbytek napětí
- malý potenciální rozdíl na elektrodách
- proud řádově ampéry až tisíce ampér
- velká proudová hustota katodové skvrny
- intenzivní vyzařování světelného záření z elektrod i sloupce oblouku
- intenzivní vyzařování UV záření

Části elektrického oblouku:

- ◆ **Katodová skvrna** – je ostře ohraničená oblast, která termickou emisí emituje prvotní elektrony důležité pro zapálení oblouku a ionizaci plynného prostředí. Elektrony získávají v oblasti katodového úbytku napětí velkou kinetickou energii, díky níž jsou schopny při srážení ionizovat neutrální atomy na kladné ionty a sekundární elektrony. Teplota katodové skvrny je cca 2600 °C.
- ◆ **Anodová skvrna** – neutralizuje a odvádí dopadající záporné částice. Kinetická energie částic se konvertuje na tepelnou a z částičně i na elektromagnetické záření. Teplota anodové skvrny je přibližně 3000 °C.
- ◆ **Sloupec oblouku** – je zářivá svítící oblast disociovaného a ionizovaného plynu v plazmatické formě tvořené mezi elektrodami, která dosahuje velmi vysokých teplot 4000 až 7000° C. [9]

### 3.2 Svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu metodou MIG/MAG[9,10,11]

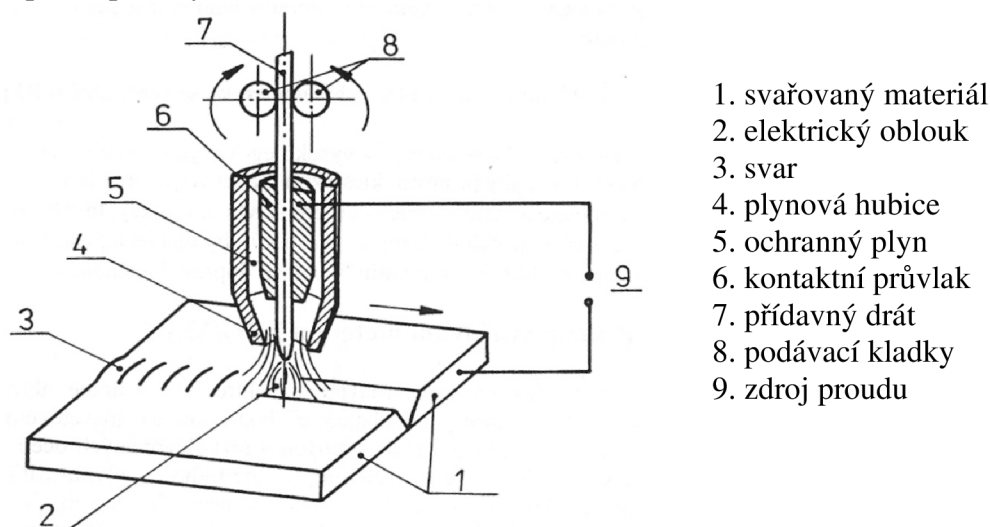
Svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu MAG patří se svařováním obalenou elektrodou v celosvětové produkci k nejrozšířenějším metodám pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Svařování metodou MIG v netečném plynu získává na důležitosti z důvodu růstu objemu konstrukcí, staveb, lodí a dopravních prostředků vyráběných z hliníkových slitin. Hlavními důvody rozšíření metody MIG/MAG jsou: velký výběr přídavných materiálů a ochranných plynů, snadná mechanizace a robotizace, velký sortiment svařovacích zařízení a především podstatné výhody a charakteristiky této metody svařování.

Metodika svařování je založena na hoření oblouku mezi tavící se elektrodou (drátem) a základním materiálem v ochranné atmosféře inertního nebo aktivního plynu. Napájení drátu elektrickým proudem je opatřeno třecím kontaktem na konci hořáku tak, aby elektricky zatížená délka drátu byla co nejkratší. Drát je podáván podávacími kladkami umístěnými v podavači, ve vlastním hořáku, nebo kombinací obou způsobů podávání z cívky o běžné hmotnosti 15 kg. Proudová hustota je u svařování MAG nejvyšší ze všech metod obloukového svařování. Dosahuje až 600 A.mm<sup>-2</sup> a svařovací proudy se pak pohybují od 30 A u svařování tenkých plechů drátem o průměru 0,6–0,8 mm, až do 800 A u mechanizovaných metod s vysokým výkonem. Parametry svařování a druh ochranného plynu závisí na charakteru přenosu kovu obloukem. Pro tenké plechy se využívá tzv. zkratový přenos a pro plechy s větší tloušťkou pak přenos sprchový. U vysokých proudů se mění typ přenosu kovu obloukem a díky působení elektromagnetických sil se dosahuje rotujícího oblouku.

Teplota kapek kovu se při MAG svařování pohybuje v rozmezí 1700 až 2500 °C a teplota tavné lázně se v závislosti na technologii, parametrech svařování, chemickém složení a vlastnostech materiálu pohybuje mezi 1600 až 2100 °C. Díky vysokým proudům můžeme



dosáhnout svařovací rychlosti blížící se až k  $150 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$  a rychlosti kapek přenášených obloukem přesahující až  $130 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Ochranná atmosféra se volí podle vlastností svařovaného materiálu, ovlivňuje však také přenos kapek v oblouku, rozstřík, rozsah chemických reakcí a teplotní poměry v oblouku.



Obr. 23 Princip svařování tavicí se elektrodou v inertním nebo aktivním plynu-MIG/MAG.[9]

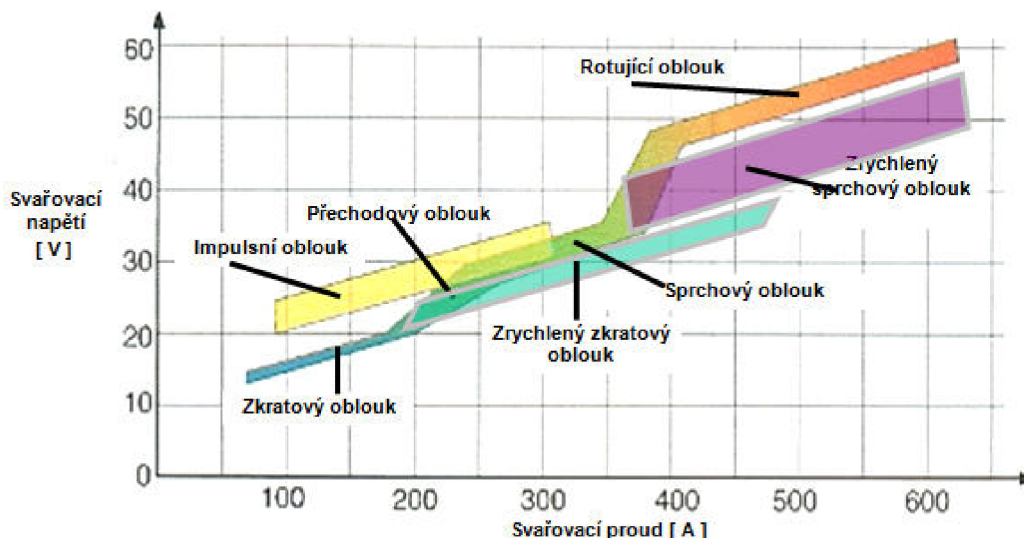
### Přenos kovu v oblouku

Přenos kovu v elektrickém oblouku patří mezi základní charakteristiky metody svařování elektrickým obloukem tavicí se elektrodou a závisí především na parametrech svařování tj. napětí a proudu. Významně však jeho charakter ovlivňuje chemické složení ochranného plynu, druh přídatného materiálu a technika svařování.

### Přenos kovu v oblouku můžeme rozdělit na jednotlivé typy (viz Graf 1):

- krátký oblouk se zkratovým přenosem kovu
- krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem
- přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty
- dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem
- impulzní bezzkratový oblouk
- moderovaný bezzkratový přenos
- dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu

Graf 1 - Oblasti přenosu kovu v oblouku. [9]



## Ochranné plyny

Hlavní úlohou ochranných plynů je zamezit přístupu vzduchu do oblasti svařování tj. především chránit elektrodu, oblouk i tavnou lázeň, její okolí a kořen svaru před účinky vzdušného kyslíku, který způsobuje oxidaci, naplynění, pórovitost a propal prvků. Jako nejvíce využívaný plyn pro metodu MAG se používá oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>). Ochranné plyny mají také významný vliv na:

- typ přenosu kovu v oblouku
- přenos tepelné energie do svaru
- chování tavné lázně
- hloubku závaru
- rychlost svařování
- další parametry svařování

V současnosti se častěji používají vícesložkové směsné plyny se základem argonu – Ar + CO<sub>2</sub>, Ar + O<sub>2</sub>, Ar + CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> a Ar + He + CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>.

Jako ochranný plyn volím M21 dle EN ISO 14175 obsahující argon a 18% CO<sub>2</sub>.

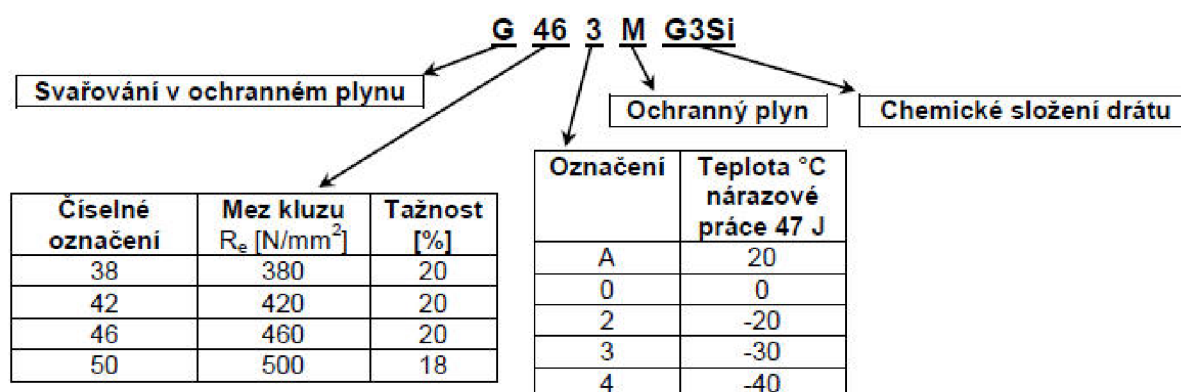
### Ochranný plyn svým složením a množstvím ovlivňuje tyto charakteristiky svařování:

- vytvoření ionizovaného prostředí pro dobrý start a hoření oblouku
- metalurgické děje v době tvoření kapky
- při přenosu kapky obloukem a ve svarové lázni síly působící v oblouku
- tvar a rozměry oblouku
- charakter přenosu kovu v oblouku
- tvar a rozměry kapek a rychlost jejich přenášení obloukem
- tvar a rozměry průřezu svaru
- hladkost povrchu svaru a jeho přechod na základní materiál
- kvalitu, celistvost a mechanické vlastnosti svarového spoje

## Přídavné materiály

Pro metodu MIG/MAG se vyrábí plné a plněné (trubičkové) dráty. Plné dráty jsou vyráběny a dodávány v průměrech 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0 a 2,4 mm. Nejčastěji používané průměry jsou 0,8 až 1,6 mm. Nejčastěji se dodávají na cívkách s gramáží 15 kg.

**Norma ČSN EN ISO 14341** označuje klasifikaci dle systému A přídavných materiálů pro svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí MIG/MAG takto[9]:



Obr. 24 Značení přídavných materiálů dle ČSN EN ISO 14341 systém A[9]  
Jako přídavný materiál volím **G 42 3 M21 3Si1**.

### 3.3 Zhodnocení svařitelnosti [3,9]

Pro zhodnocení svařitelnosti vycházíme z toho, jaký byl zvolen základní materiál pro konstrukci vnějšího lopatkového kruhu. Ocel S355J2G3 je považována za ocel jemnozrnnou s obsahem uhlíku 0,2 - 0,22 hmotnostního procenta v maximálním stavu. U jemnozrnných ocelí dochází k dolegování materiálu malými obsahy prvků jako Al, Ti, Nb a V. Příznivé působení uvedených prvků spočívá v tom, že umožňují vznik jemnozrnné struktury a navíc svou vazbou na uhlík a dusík zvyšují pevnostní vlastnosti materiálu. Zvýšíme mez kluzu a mez pevnosti při zachování jejich dobré houževnatosti a zároveň potlačíme nepříznivý vliv uhlíku na jejich svařitelnost. Polotovary z jemnozrnných ocelí se vyrábějí nejčastěji řízeným válcováním v kombinaci s tepelným zpracováním, které zvýrazňuje vliv mikrolegur (Al, Ti, Nb a V) na vlastnosti materiálu.

Vzhledem k tomu, že chemické složení jemnozrnných mikrolegovaných ocelí je podobné jako chemické složení nelegovaných konstrukčních uhlíkových ocelí, můžeme říci, že pro ně platí obecné zásady svařitelnosti uvedené u těchto materiálů s následujícími odlišnostmi:

- Při svařování jemnozrnných mikrolegovaných ocelí můžeme očekávat růst zrn v tepelně ovlivněné oblasti svarových spojů a tím i pokles plastických vlastností v této oblasti.
- Svařujeme s limitovaným měrným tepelným příkonem při svařování.
- V případě nutnosti aplikace předehřevu postačí obvykle teploty v rozmezí 100 až 150 °C.
- U svarových spojů můžeme také očekávat snížení tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti v teplotní oblasti kolem teploty  $A_{c1}$  - tzv. „změkčená zóna“. Strukturální změny signalizované snížením tvrdosti jsou příčinou poklesu pevnosti svarových spojů. I v tomto případě je řešením snížení měrného tepelného příkonu do svaru, aby šířka tepelně ovlivněné oblasti a tím i „změkčené zóny“ byla co nejmenší a neprojevila se významně na pevnosti svarového spoje.

Norma ČSN EN 1110-2 zabývající se doporučením pro svařování kovových materiálů, především pak obloukovým svařováním feritických ocelí, dle metody B (eliminace vodíkového praskání v nelegovaných, jemnozrnných a nízkolegovaných ocelích) v příloze C3 pojednává o eliminaci studeného praskání správně zvoleným předehřevem, za účelem prodloužení doby ochlazování svaru, což způsobí vyprchání vodíku v kratším čase z většího objemu po svařování, než bez předehřevu a také díky předehřevu snížíme rozložení vnitřního napětí ve svaru. Teplotou předehřevu se myslí nejnižší možná teplota, které musí být dosaženo v oblasti svaru před započítáním vlastního svařování, aby nedošlo ke studenému praskání (vznik trhlin za studena). K praskání za studena, nebo také vodíkové křehkosti dochází při teplotách pod 150°C ihned po svařování, ale často také se zpožděním několika hodin až dnů, jelikož vodík má na vznik trhlin zásadní vliv. Trhliny se nejčastěji nacházejí v podhousenkové oblasti. Toto vodíkové praskání ovlivňuje hned několik faktorů, jakými jsou například:

- **Tloušťka plechu** - vzhledem ke konstrukčnímu návrhu, musíme při výpočtu parametrů svařitelnosti brát na vědomí, že pro různé tloušťky základních materiálů budeme potřebovat různé parametry pro svařování a ty nám ovlivní výsledné hodnoty teploty předehřevu a teploty interpass
- **Přídavný materiál** - použití odmaštěného drátu, nízkovodíkových elektrod, sušených a správně skladovaných dle předpisu výrobce
- **Základní materiál** - vliv chemického složení vystihuje uhlíkový ekvivalent (viz vzorec 3.1), popisující vztah jednotlivých legujících prvků vzhledem k vlivu uhlíku na studené praskání ocelí.

Uhlíkový ekvivalent CET spočteme dle vzorce[3]:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\%], \quad (3.1.)$$

kde: CET [%] – uhlíkový ekvivalent  
 C [%] – hmotnostní procenta uhlíku  
 Mn [%] – hmotnostní procenta manganu  
 Mo [%] – hmotnostní procenta molybdenu  
 Cr [%] – hmotnostní procenta chromu  
 Cu [%] – hmotnostní procenta mědi  
 Ni [%] – hmotnostní procenta niklu

$$CET_{80,70} = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} = 0,22 + \frac{16+0}{10} + \frac{0+0}{20} + \frac{0}{40} = 0,38\%$$

$$CET_{35} = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} = 0,20 + \frac{16+0}{10} + \frac{0+0}{20} + \frac{0}{40} = 0,36\%$$

- **Obsah vodíku** - vyšší obsahu vodíku ve svarovém kovu vyžaduje vyšší teplotu předehřevu. Pro náš případ svařování je obsah vodíku ve svarovém kovu 6 ml/100g svarového kovu.
- **Vnitřní napětí** - odstraňujeme z větší části použitím tepelného zpracování po svařování
- **Tepelný příkon** - čím vyšší tepelný příkon Q během svařování máme, tím nižší teplotu předehřevu můžeme zvolit.

Pro výpočet tepelného příkonu byly zvoleny parametry svařování viz Tab. 3:

Tab. 3 Parametry svařování

Parametry svařování			
	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [cm/min]
Pásmo I. (kořen svaru)	220-240	23-24	30
Pásmo II. (d ≤ 35mm)	260-320	27-29	25
Pásmo III. (d > 35mm)	280-340	28-30	20

Pak můžeme spočítat tepelný příkon dle normy ČSN EN 1011-2 v příloze D jako[3]:

$$Q = \frac{\varepsilon \cdot U \cdot I}{v \cdot 1000} \cdot \frac{60}{10} \quad [\text{kJ/mm}], \quad (3.2.)$$

kde: Q [kJ/mm] – Tepelný příkon  
 ε [-] – tepelná účinnost metody svař. (dle ČSN EN 1011-2  
 ε=0,85 pro metodu MAG (135))  
 U [V] – napětí  
 I [A] – proud

$$Q_I = \frac{\varepsilon \cdot U \cdot I}{v \cdot 1000} \cdot \frac{60}{10} = \frac{0,85 \cdot (23 \div 24) \cdot (220 \div 240)}{30 \cdot 1000} \cdot \frac{60}{10} = 0,86 \div 0,98 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{II} = \frac{\varepsilon \cdot U \cdot I}{v \cdot 1000} \cdot \frac{60}{10} = \frac{0,85 \cdot (27 \div 29) \cdot (260 \div 320)}{25 \cdot 1000} \cdot \frac{60}{10} = 1,43 \div 1,89 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{III} = \frac{\varepsilon \cdot U \cdot I}{v \cdot 1000} \cdot \frac{60}{10} = \frac{0,85 \cdot (28 \div 30) \cdot (280 \div 340)}{20 \cdot 1000} \cdot \frac{60}{10} = 2,0 \div 2,6 \text{ kJ/mm}$$

Všechny tyto faktory pak můžeme využít pro výpočet teploty předehřevu, který platí pro konstrukční oceli s mezí kluzu do 1000 MPa. Teplotu předehřevu tedy vypočteme dle následujícího vztahu udávaného normou ČSN EN 1011-2 v příloze C3 dle metody B[3]:

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328 \quad [^{\circ}\text{C}], \quad (3.3.)$$

kde:  $T_p$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – teplota předehřevu  
 $d$  [mm] – tloušťka plechu  
 $HD$  [ml/100g svar. kovu] – obsah vodíku

$$T_{p80} = 697 \cdot 0,38 + 160 \cdot \tanh\left(\frac{80}{35}\right) + 62 \cdot 6^{0,35} + (53 \cdot 0,38 - 32) \cdot 0,86 - 328 = 199,5^{\circ}\text{C}$$

$$T_{p70} = 697 \cdot 0,38 + 160 \cdot \tanh\left(\frac{70}{35}\right) + 62 \cdot 6^{0,35} + (53 \cdot 0,38 - 32) \cdot 0,86 - 328 = 197^{\circ}\text{C}$$

$$T_{p35} = 697 \cdot 0,36 + 160 \cdot \tanh\left(\frac{35}{35}\right) + 62 \cdot 6^{0,35} + (53 \cdot 0,36 - 32) \cdot 0,86 - 328 = 149,7^{\circ}\text{C}$$

Vzhledem k navrhnutým teplotám předehřevů a spočteným tepelným příkonům, můžeme uvažovat pro výpočet doby ochlazování trojrozměrný tepelný tok, jelikož zvolené tloušťky svařovaných dílců můžeme považovat za dostatečně tlusté na to, aby tuto podmínku splnily. Pro výpočet času ochlazování dle normy ČSN EN 1011-2 v příloze D a vzorce určeného pro nelegované a nízkolegované oceli, pokud máme trojrozměrný tepelný tok, musíme zvolit součinitel tvaru  $F_3$  dle tvaru svaru. Všechny námi provedené svary vyhovují volbě koeficientu  $F_3 = 0,9$  pro svar mezi housenkami u tupých svarů. Pak můžeme psát že[3]:

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot T_0) \cdot Q \cdot \left( \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \cdot F_3 \quad [\text{s}], \quad (3.4.)$$

kde:  $t_{8/5}$  [s] – doba ochlazování  
 $T_0$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – počáteční teplota plechu ( $T_p$ )  
 $F_3$  [-] – součinitel tvaru

$$t_{8/5,80} = (6700 - 5 \cdot 199,5) \cdot 0,86 \cdot \left( \frac{1}{500 - 199,5} - \frac{1}{800 - 199,5} \right) \cdot 0,9 = 7,33 \text{ s}$$

$$t_{8/5,70} = (6700 - 5 \cdot 197) \cdot 0,86 \cdot \left( \frac{1}{500 - 197} - \frac{1}{800 - 197} \right) \cdot 0,9 = 7,26 \text{ s}$$

$$t_{8/5,35} = (6700 - 5 \cdot 149,7) \cdot 0,86 \cdot \left( \frac{1}{500 - 149,7} - \frac{1}{800 - 149,7} \right) \cdot 0,9 = 6,07 \text{ s}$$

### 3.4 Tepelné zpracování po svařování [15]

Cílem tepelného zpracování ovlivněných oblastí svarového spoje je zajistit požadované mechanické, fyzikální, chemické a technologické vlastnosti tak, aby dosáhly v místě spoje vlastností nesvařovaného materiálu. Základem žíhání ke snížení napětí po svařování, je ohřev přesně stanovenou rychlostí ohřevu na teplotu TZ, následná výdrž na předepsané teplotě a ochlazení předepsanou ochlazovací rychlostí na určenou teplotu. Rychlost ohřevu zaručí rovnoměrný ohřev tepelně zpracovaného svařence mezi středem a povrchem, musí být dána velikostí průřezu a tvarovou složitostí svařence. Rozdílné teploty mezi povrchem a středem svařence mohou mít za následek napěťové stavy, které mohou způsobit deformace a při překročení mezních hodnot únosnosti materiálu svařence mohou vést až ke vzniku trhlin. Podle zvyklostí je doporučován ohřev svařence na požadovanou teplotu rychlostí 60-80 °C/hod. Setrvání na teplotě slouží k prohřátí celého průřezu s možností průběhu reakcí, jmenovitě rozpouštění karbidických, nitridických a karbonitridických fází, difúzních mechanismů k vyrovnání chemického složení a ke snížení stavu napjatosti především v povrchových částech svařence. Setrvání na teplotě bývá při žíhání k potlačení stavu napjatosti 1 hodina na 20 mm tloušťky tepelně zpracovaného svařence. Teplota by neměla překročit hodnotu 600 °C. V rámci žíhání ke snížení vnitřních napětí bývá zvyklostí ochlazovat svařence rychlostí 60-80 °C/hod do teploty 150-200 °C, poté se ochladí svařence na klidném vzduchu. Tepelné zpracování se uskutečňuje v průmyslových odporově vytápěných komorových pecích se vzdušnou atmosférou, nebo lépe s řízenou atmosférou k zabránění oxidace a oduhličování povrchu svařenců.

Tab. 4 Teploty žíhání a doby setrvání na teplotě svařených konstrukcí v závislosti na tloušťce z normalizačně žíhaných a normalizačně válcovaných ocelí S355N a S355+N[15]

Ocel	Tloušťka (mm)	Teplota a doba		
		580 °C Doba (minut)	560 °C Doba (minut)	540 °C Doba (minut)
S355N	10	30	45	60
	20	50	80	100
	35	80	120	160
	80 a více	120	180	240
S355+N	10	25	40	50
	20	35	70	90
	30	70	110	150
	80 a více	100	160	220

Dle Tab. 4 volím teplotu ohřevu 70 °C/hod, teplotu setrvání 580 °C, dobu setrvání 120 minut a rychlost ochlazování 70° C/hod, po dosažení teploty 160°C ochlazení na klidném vzduchu.

### 3.4 Sumarizace návrhu technologie svařování [3,6,9]

Jako nejvhodnější technologie pro provedení svarů na vnějším lopatkovém kruhu byla zvolena technologie tavného svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu (metoda **MAG – 135**). Vzhledem k nutnosti použití ochranného plynu byl zvolen **ochranný plyn M21** dle EN ISO 14175 obsahující argon a 18% CO<sub>2</sub>. Jako **přídavný materiál** byl zvolen plný drát **G 42 3 M21 3Si1** s označením **OK Autrod 12.15** o průměru **1,2 mm** dle katalogu distribuční firmy ESAB. Pro vlastní svařitelnost základního materiálu pak byly zvoleny parametry svařování dle Tab. 3. Teploty předehřevu a doba ochlazování pro první svar byly spočteny dle ČSN EN 1011-2 pro tloušťky plechů 80, 70 a 35 mm, přičemž teplota interpass je vždy o cca 100°C vyšší než teplota předehřevu. Pak pro dobu ochlazování  $t_{8/5}$  můžeme říci, že pokud tato doba je nad hodnotou 6 sekund, je předpoklad omezení vzniku martenzitické struktury a tím i trhlin

za studena. Dohřev svarů byl zajištěn tak, že se použijí termoizolační materiály, kterými se svar překryje. Ochlazování svaru pak probíhá na klidném vzduchu. Následně bylo zvoleno tepelné zpracování svaru, konkrétně pak žíhání pro snížení zbytkových napětí po svařování. Pro něj bylo zvolena teplota ohřevu 70 °C/hod, teplotu setrvání 580 °C, dobu setrvání 120 minut a rychlost ochlazování 70° C/hod, po dosažení teploty 160°C ochlazení na klidném vzduchu.

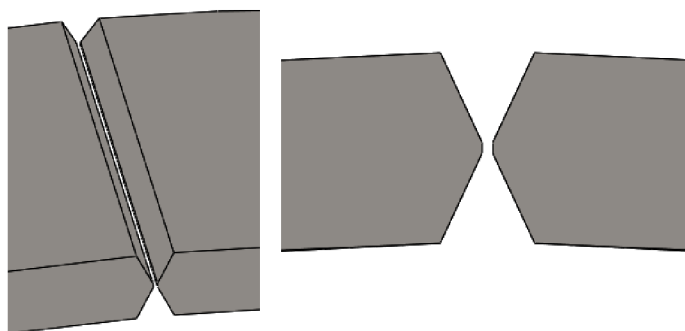
## 4 NÁVRH ÚPRAVY SVAROVÉ HRANY

Pro svařované konstrukce by mělo být dodrženo, že dílce by měly být voleny pokud možno ze stejných základních materiálů – nejlépe však se zaručenou svařitelností a před vlastním svařováním je nutno ve většině případů provést tzv. úpravu svarové hrany – připravit svarové plochy – většinou mechanicky obráběním např. frézováním, úhlovou bruskou, kartáčováním apod., aby byly zbaveny oxidů a měly kovově čistý povrch, zejména bez rzi. To je ovlivněno velkým množstvím faktorů jako jsou:

- tloušťka svařovaných dílců
- způsob svařování (jiné úhly rozevření pro svařování ruční plamenové a pro svařování tavící se elektrodou v CO<sub>2</sub> při stejné tloušťce svařovaného ocelového plechu)
- konstrukční řešení svařovaných dílů a místní přístupnost pro vlastní svaření
- technologie svařování, možnost předehřevu dílu a kontroly svaru
- provozní podmínky svarového spoje, druh zatížení (statické, dynamické)
- výrobní možnosti (způsob vytvoření svarové hrany jako např. soustružením, frézováním, broušením, řezáním kyslíkem)

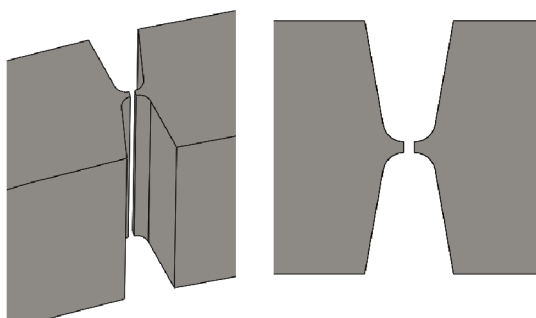
Při tavném svařování dojde působením tepla k natavení takto vytvořených svarových ploch, k promísení základního kovu s roztaveným přídavným materiálem a vytvoří se nejprve tzv. kořen svaru, na který se postupně kladou další housenky, až se vyplní celý průřez svaru.

Pro spojení dílců vnějšího lopatkového kruhu bude využita metoda tavného svařování, proto musíme u těchto dílců provést úpravu svarové hrany. Z důvodu manipulace a hlavně požadované přesnosti i tvarové náročnosti některých svarových hran se jeví jako nejvhodnější



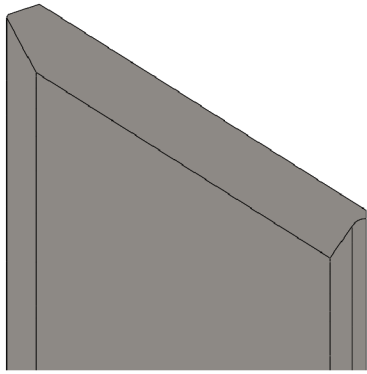
použití obrábění pomocí frézování na počítačem řízeném obráběcím centru, umožňujícím pohyb nástroje v pěti osách. Pro svaření obou pláště, které jsou tvořeny skruženými výpalky z plechu tloušťky 35 mm bude použit oboustranný "V" svar s rozevřením 45° a kořenová mezera pak má průřez čtverce s délkou hrany 2 mm (viz Obr. 25).

Obr. 25 Náhled svarové hrany pro oba pláště



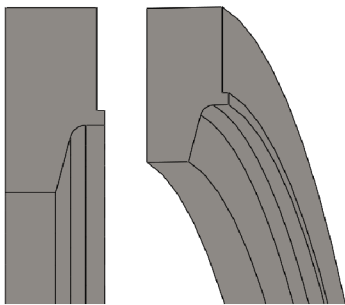
Příruby jsou tvořeny vypálenými segmenty, které je k sobě nutné svařit. Jelikož se jedná o svařence s velkou tloušťkou, jedna z přírub 70mm (6 segmentů), druhá pak 80mm (4 segmenty), je použito oboustranného "U" svaru s rozevřením 20° (viz Obr. 26), z důvodu mít co nejmenší vyložení drátu za dodržení úplného průvaru svaru bez vzniku studených spojů, či jiných nepřijatelných defektů.

Obr. 26 Náhled svarové hrany pro svaření segmentů přírub



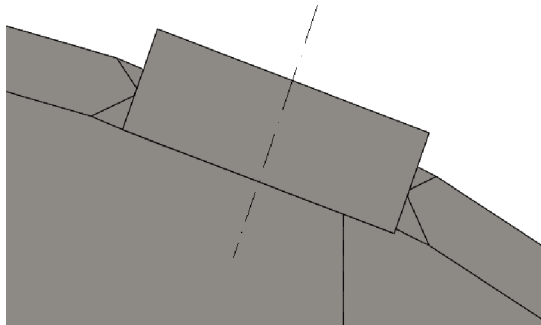
Obr. 27 Úprava svarové hrany pravého pláště

Aby bylo vytvořeno nerozebíratelné spojení vyhovující kvality mezi přírubami a také mezi pláští, i zde je nutné provést úpravu svarové hrany. Na pravém pláští musíme takto upravit obě dvě dosedací hrany. Nejdříve mezi pláští, kde bude vytvořen nesymetrický oboustranný " $\frac{1}{2}$  V" svar a na druhém konci pak bude vytvořen " $\frac{1}{2}$  U" svar (viz Obr. 27), z vnější strany pak koutový svár. Tato úprava, jako i předešlé úpravy, se provede v počítačem řízeném obráběcím centru s možností pohybu nástroje v pěti osách.



Obr. 28 Znárodnění úpravy svarové hrany pro " $\frac{1}{2}$  U" svar na přírubě

Připojení levé příruby k pláští vnějšího lopatkového kruhu je provedeno za pomoci " $\frac{1}{2}$  U" svaru (viz Obr. 28), který je z vnější strany překrytý koutovým svarem. Z důvodu tvarové složitosti je opět provedena úprava svarové hrany na počítačem řízeném obráběcím centru s možností pohybu nástroje v pěti osách.

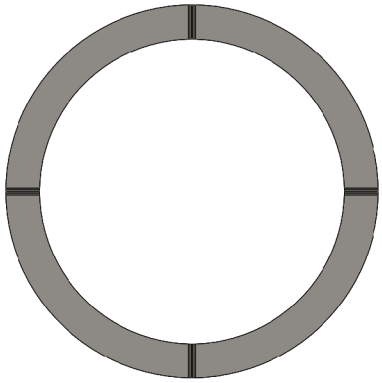
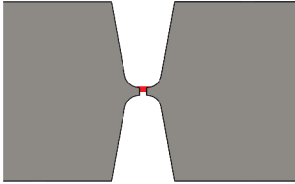
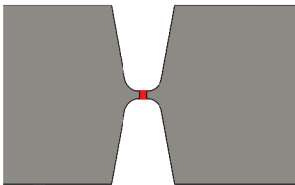
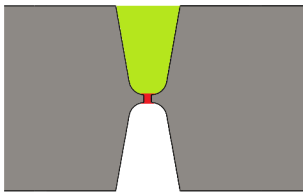
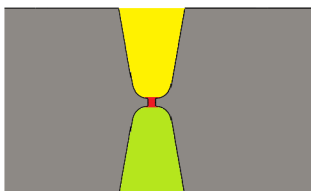


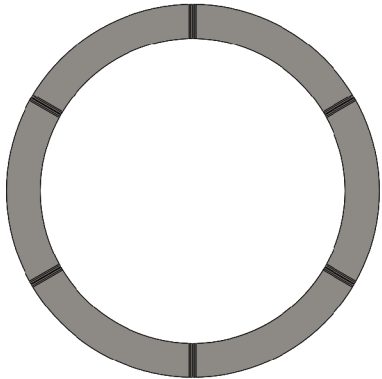
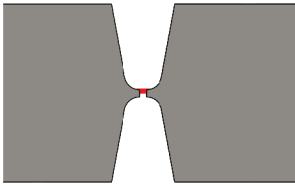
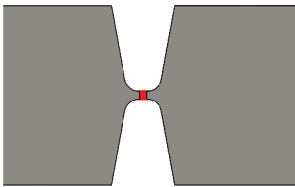
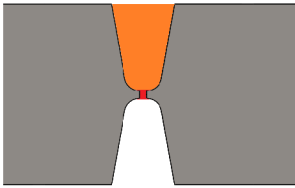
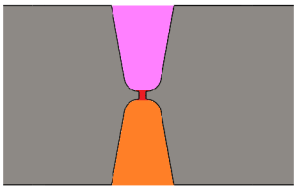
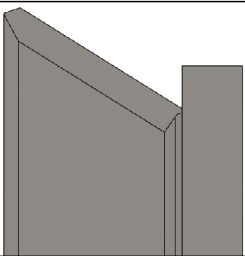
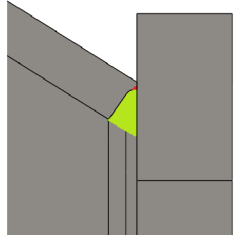
Obr. 29 Znárodnění úpravy svarové hrany otvoru nákrůžku

Poslední úprava pro svarovou hranu je provedena na okrajích vypáleného otvoru pro vsazený nákrůžek, který je v pozici svařen za pomoci nesymetrického oboustranného " $\frac{1}{2}$  V" svaru (viz Obr. 29), jež je proveden kolem dokola tohoto nákrůžku. Všechny svary musejí být provedeny jako vodotěsné. Z důvodu složitosti svarové hrany (nikoliv tvarem, ale svým prostorovým řešením) bude všech 15 kruhových otvorů upraveno na počítačem řízeném obráběcím centru s možností pohybu nástroje v pěti osách.

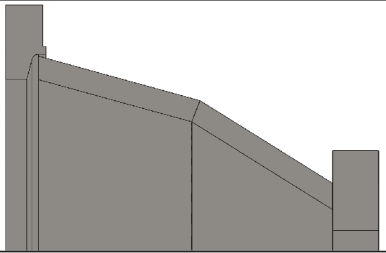
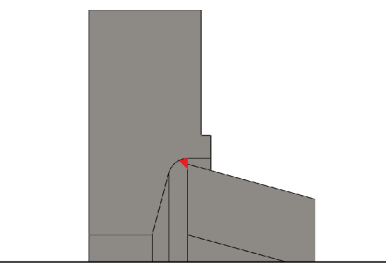
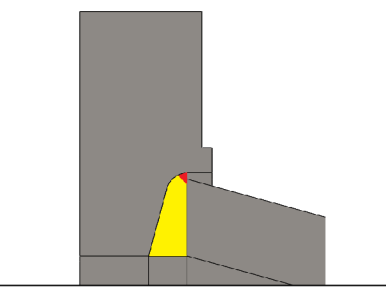
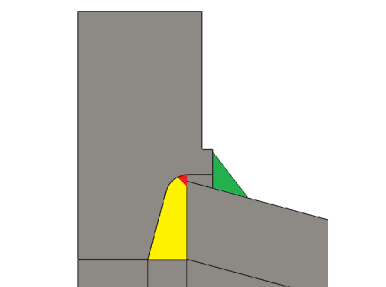
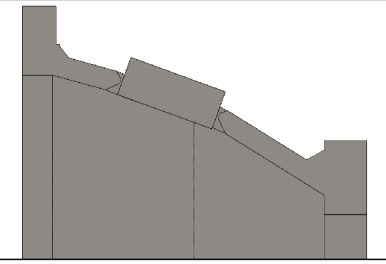
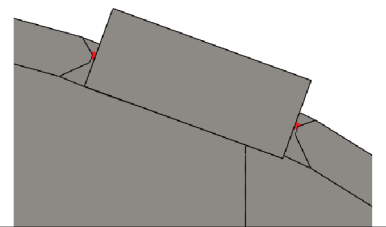
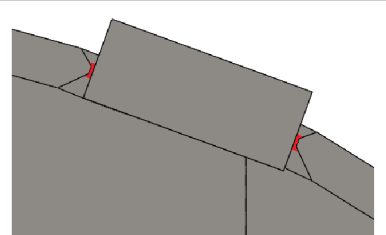


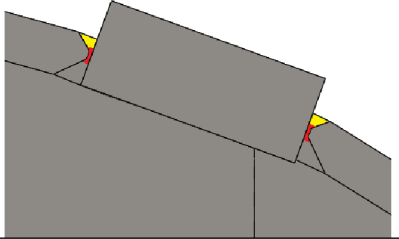
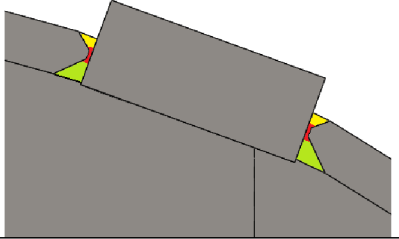
## 5 VYPRACOVÁNÍ TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU SVAŘOVÁNÍ A WPS

Technologický postup svařování			
Datum:	Vyhotovil:	Název součásti:	Číslo výkresu:
7. 5. 2017	Keprt Michal	Vnější lop. kruh	1HRI-1272a
Operace	Popis činnosti	Podmínky	Vyobrazení
1	Přejímka dílů Kontrola rozměrů		
2	Očistit hrany pro svar. Sestavit a slícovat výpalky segmentů příruby 3HRI-4714 v přípravku		
3	Svařit kořen U svaru (4x)		
4	Otočit		
5	Svařit kořen U svaru (4x)		
6	Svařit U svar (4x)		
7	Otočit		
8	Svařit U svar (4x)		
9	Kontrola rozměrů		

10	Očistit hrany pro svar. Sestavit a slícovat výpalky segmentů příruby 3HRI-4713 v přípravku		
11	Svařit kořen U svaru (6x)		
12	Otočit		
13	Svařit kořen U svaru (6x)		
14	Svařit U svar (6x)		
15	Otočit		
16	Svařit U svar (6x)		
17	Kontrola rozměrů		
18	Očistit hranu pro svar, Slícovat přírubu 3HRI-4714 s pláštěm 3HRI-4716 v přípravku		
19	Svařit kořen, následně celý 1/2 U svar		
20	Kontrola rozměrů		

21	Svařit krycí koutový svar		
22	Kontrola rozměrů		
23	Očistit hranu pro svar, Slícovat svařenec s pláštěm 3HRI-4715 v přípravku		
24	Svařit kořen 1/2V svaru (z vnější strany)		
25	Svařit kořen 1/2V svaru (z vnitřní strany)		
26	Kontrola rozměrů		
27	Svařit 1/2V svar vnější		
28	Svařit 1/2V svar vnitřní		
29	Kontrola rozměrů		

30	Očistit hranu pro svar, Slícovat svařenec s přírubou 3HRI-4713 v přípravku		
31	Svařit kořen 1/2U svaru (z vnitřní strany)		
32	Svařit 1/2U svar		
33	Svařit krycí koutový svar		
34	Kontrola rozměrů		
35	Očistit hranu pro svar, Slícovat svařenec s polotovarem nákrůžku v přípravku		
36	Svařit kořen 1/2V svaru (z vnější strany)		
37	Svařit kořen 1/2V svaru (z vnitřní strany)		

38	Svařit 1/2V svar vnější		
39	Svařit 1/2V svar vnitřní		
40	Kontrola rozměrů		
41	Body 35 - 40 opakovat pro každý nákrůžek		
42	Kontrola svarů VT	100%	
43	Kontrola svarů PT	100%	
44	Kontrola svarů UT	100%	
45	Přesun svařence na obráběcí centrum, kde je obroben do požadovaného tvaru dle výkresu		

Vypracované WPS naleznete v příloze této práce.

## 6 NÁVRH METODIKY KONTROLY SVARU[4,5,14]

Ve skutečnosti každý kovový materiál obsahuje již z výroby veliké množství submikroskopických vad (na úrovni krystalových mřížek, atomů a zrn), které zcela zásadně ovlivňují jeho vlastnosti. Tyto vady obsaženy ve všech technicky vyrobených materiálech, proto se zaměřujeme hlavně na vady makroskopické, které jsou snadněji zjištěitelné a které podstatně určují užité vlastnosti, které můžeme ovlivnit, například správnou volbou technologie svařování a podmínek pro svařování.

### 6.1 Typy vad a kontroly svarů[4]

Vadami výrobku obecně rozumíme každou odchylku od vlastností předepsaných technickými normami. Vady výrobku rozdělujeme na vady **zjevné**, které lze zjistit při prohlídce výrobku pouhým okem nebo jednoduchými optickými pomůckami, nebo vady **skryté**, které obvykle zjistíme pomocí přístrojů nebo zkouškami v laboratorním prostředí. Podle ustanovení příslušných předpisů, mohou být vady **přípustné** nebo **nepřípustné**. Vady přípustné jsou takové, které normy dovolují a jejich odstranění není nutné. Za vady nepřipustné považujeme ty, které neodpovídají dovoleným hodnotám. Tyto vady mohou být buď opravitelné, nebo neopravitelné.

Defekty vyskytující se v návarech a svarových spojích pak můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin, na vady **plošné** a **objemové**. Do skupiny plošných vad zařazujeme vady typu trhlin, neprůvarů a studených spojů. Do skupiny objemových vad zařazujeme především vady typu pórů, bublin, kovových i nekovových vměstků, ale také vruby, nedodržení rozměrů a nepravidelnost povrchu svarů.

#### Kontrola svarů

Zkoušky svarů provádíme z důvodu zajištění bezpečnosti, kvality-jakosti daného svarového spoje a volí se takové druhy zkoušek, aby jich bylo možno provést na svarovém spoji i více. Zkoušky se řídí podle příslušnými normami. Kontrolu svarů (zkoušky svarů) rozdělujeme podle vlivu, který mají na svarový spoj na:

- nedestruktivní (nedochází k porušení svaru)
- destruktivní (s porušením svaru, například jeho rozlomením, ohýbáním, atd.)

Vzhledem k náročnosti konstrukčního řešení a ceně výroby vnějšího lopatkového kruhu se jako nejvíce vhodné jeví zkoušky nedestruktivní, jelikož nedestruktivními zkouškami můžeme zkontrolovat provedené svary bez jejich mechanického poškození. Díky těmto zkouškám zjistíme jak povrchové, tak vnitřní vady svarů a můžeme vyhodnotit jejich kvalitu a bezpečnost vzhledem k danému zatížení.

### 6.2 Nedestruktivní zkoušky[4,5]

Nedestruktivní zkoušky svarů jsou nejrozšířenější skupina zkoušek svarových spojů, protože výrobky se po zkoušce dají bez problémů dále používat. Nedestruktivní zkoušky představují velmi důležitý krok při zjišťování jakosti ve všech etapách výroby a provozní spolehlivosti všech svařovaných dílců. Význam nedestruktivní kontroly spočívá v zajištění kvality výrobku, potažmo jeho technické způsobilosti a funkční bezpečnosti. Základní nedestruktivní metody jež jsou užívané pro kontrolu jakosti svarů dělíme podle toho, zda chceme odhalovat vady na povrchu svaru nebo uvnitř svaru.

#### K zjišťování povrchových vad se používají metody:

- vizuální – EN 17637
- penetrační (kapilární) – EN ISO 23277
- magnetická prášková - ČSN EN 1290 a ČSN EN 1291

#### **Vnitřní vady se zjišťují metodami:**

- prozářením – ČSN EN 12517-1
- ultrazvukem – ČSN EN 1714 a ČSN EN 1712

### **6.3 Vizuální zkouška (VT) [4,5]**

Jedná se o nejjednodušší, nejdostupnější a nejlevnější defektoskopickou kontrolu svarů, kdy pouhou prohlídkou prostým zrakem, nebo v přísnější podobě, pomocí zraku a optických přístrojů s několikanásobným zvětšením (lupy, speciální zvětšovací), zjišťujeme povrchové defekty a ověřujeme splnění podmínek pro další eventuální nedestruktivní kontrolu.

Podle přístupnosti kontrolovaného povrchu rozlišujeme **vizuální kontrolu přímou** (prováděnou pouhým okem nebo při použití jednoduchých optických pomůcek – lupy) a **nepřímou** (prováděnou za pomoci optických přístrojů např. endoskopy, abychom mohli rozeznat na povrchu detaily, které nejsou přímou vizuální zkouškou pozorovatelné, např. vnitřní povrch svaru nádob).

#### **Základem této zkoušky je několik předpokladů:**

- dobře očištěný povrch svaru od strusky, rozstříku apod.
- zkouška by měla být provedena před dalšími technologickými operacemi (např. nátěry)
- dobře přístupný povrch svaru pro vizuální prohlídku
- dobré osvětlení prohlíženého místa přirozeným nebo umělým světlem
- ostrý zrak zkoušejícího, který je schopen rozeznat drobné detaily a od sebe je odlišit

Tato kontrola bývá zpravidla doplněna kontrolou vnějších rozměrů svaru, například měření převýšení svaru (líce i kořene), měření překročení nebo podkročení velikosti koutového svaru, měření úhlu přechodu povrchu svaru a povrchu základního materiálu, měření profilu povrchu svaru, měření hloubky a délky povrchových vad, měření úchylek celého svarového spoje (přesazení) apod.

Závěry a výsledky vizuální zkoušky jsou velmi důležité a mají vždy předcházet všem ostatním kontrolám. Zkušený defektoskopický pracovník již podle vzhledu povrchu jednotlivých vrstev svaru posuzuje jakost práce svářeče a bývá schopen předložit správné závěry o možnosti výskytu vnitřních vad (povrch svaru je nepravidelný, jsou zřetelně vidět místa napojování housenek, je různá šířka krycí housenky, je velmi odlišný povrch svaru v různých polohách). Vizuální hodnocení má následovat po každé dílčí části svařovacího procesu, jehož provedení je spojeno s určitými těžkostmi. V případech dílčí pochybnosti může být vizuální zkouška účelně doplněna magnetickou nebo např. kapilární zkouškou.

### **6.4 Penetrační-kapilární zkouška (PT) [4,5]**

Tato zkouška umožňuje zjišťovat povrchové vady, které však musí souviset s povrchem, to znamená, že musí být na povrchu otevřené, aby do nich mohla vniknout tekutina odhalující danou vadu. Je založena na vzlínivosti určitých kapalin (např. petroleje) do otevřených dutin v materiálu. Využívá se při ní kapilárních jevů, především smáčivost a vzlínavost.

Metoda má tyto časové fáze zkoušení. První spočívá v dokonalé přípravě povrchu, umytím a odmaštěním zkoušeného povrchu. Druhá je nanesení zkušební kapaliny na zkoušený povrch (aplikace detekční tekutiny se pro menší svařence provádí ponořením do lázně, u větších pak natíráním nebo nastříkáním - kapalina zateče do dutin vad), doba působení bývá 10 – 30 minut. Třetí fází je odstranění přebytku penetrantu umytím povrchu (většinou proudem vody) od zkušební kapaliny. Jedná se o poměrně kritickou operaci, jelikož nedostatečné odstranění kapaliny vede k výskytu nepravých indikací, avšak příliš důkladné vymývání vede k vyplavení detekční kapaliny z vad). Následuje sušení povrchu a vyvolání indikace, nanesením „vývojků“ (tzn. vytvoření kontrastního a nasákavého podkladu pro kapalinu vzlínající z dutin vady a zajišťuje lepší viditelnost vady). Základem vývojek je bílý prášek, např. oxid

zinečnatý, nejčastěji rozptýlený v těkavém rozpouštědle, např. acetonu. Poslední fází je prohlídka zkoušeného povrchu a případné posouzení a vyhodnocení indikovaných vad. Velmi důležité je dodržovat správný postup zkoušení a před kontrolou je důležité důkladné očištění a odmaštění povrchu svarového spoje.

Podle detekčních prostředků rozeznáváme:

- **metodu barevné indikace** - přítomnost vady se projeví vznikem kontrastní barevné indikace, hodnocení se provádí na denním světle – nejjednodušší je zkouška petrolejem, kdy se vada projeví mastnými skvrnami na povrchu naneseného povlaku z vápna
- **metodu fluorescenční** - zkušební kapalina je pro zvýšení citlivosti fluoreskující a vada se projeví světélkující indikací při ozáření ultrafialovým světlem
- **metodu dvouúčelovou** - kdy použitý penetrant obsahuje fluorescenční látku, která je zároveň barvivem

Hodnocení je subjektivní a vyžaduje zkušenosti. Výhodou této metody je nenáročnost, nízká cena a snadná indikace vad. Nevýhodou je odhalení pouze vad spojených s povrchem, potřeba čistého a hladkého povrchu ( $R_a$  3,2  $\mu\text{m}$ ), nestálost výsledků (vady je třeba hledat brzy po nanesení vývojky, po delší době mohou malé vady zmizet, velké se zase rozpíjí a jeví se větší) a obtížná registrace vad. Tuto metodu lze aplikovat u všech materiálů (magnetických i nemagnetických) a lze zkoušet i těsnost tlakových nádob. I tato zkouška se doplňuje zkouškami prozářením nebo ultrazvukovou zkouškou.

## 6.5 Zkouška magnetická prášková (MT) [4,5,14]

Tato metoda umožňuje zjišťovat povrchové vady, nebo vady skryté těsně pod povrchem (max. do 3 mm). Její princip je založen na zviditelnění magnetických siločar vystupujících na povrch feromagnetických materiálů (což je určité omezení této metody – feromagnetické jsou např. nelegované a legované oceli kromě ocelí austenitických). Pokud se na povrchu, nebo těsně pod ním, vyskytuje vada ve zkoušeném materiálu (která není feromagnetická, např. trhlina, struska, bublina), tak magnetické siločáry „obcházejí“ tuto vadu a uzavírají se vzduchem a vystupují nad povrch materiálu, kde tvoří tzv. rozptylové magnetické pole.

Princip je založen na zjišťování rozptylu magnetického toku, který vznikne ve zmagnetovaném feromagnetickém materiálu v místě nečelistvostí (trhlin), nebo náhlé změny magnetických vlastností (struska). Vystupující siločáry lze zviditelnit například jemným železným prachem, který může být rozptýlený suchý, nebo ve vhodné kapalině (např. petrolej) – tzv. **polévací zkouška**. V místě, kde vycházejí siločáry z povrchu zkoušeného svaru, dojde k ulpění železného prachu a tím k zobrazení umístění vady. V neporušených místech železný prach neulpí a steče dolů. V místě vzniklého rozptylového pole je prášek přitahován a vytváří zřetelnou stopu, která je obrysem vady. Pro lepší kontrast a zvýšení citlivosti metody natíráme zkoušený povrch bílou barvou, nebo železný prach zbarvíme fluoreskující barvou, která po osvětlení ultrafialovým světlem intenzivně září.

Zkoušený předmět magnetizujeme buďto průchodem elektrického proudu (stejnoseměrného nebo střídavého), potom se jedná o tzv. **magnetování proudové**, nebo elektromagnetem ve tvaru jha (zkoušený předmět je vkládán mezi dva póly magnetu, viz Obr. 26), tzv. **magnetování pólové**. Směr průchodu proudu, nebo směr magnetických siločar by měl být pokud možno kolmý k rovině předpokládané vady, tehdy je metoda nejúčinnější. Proto v praxi magnetujeme nejméně ve dvou na sebe kolmých



Obr. 26 Ruční elektromagnet jha [14]



směrech, abychom odhalili co nejvíce vad. Výhodou magnetické zkoušky je rychlost, malé náklady na zařízení, snadná obsluha a schopnost odhalit vady skryté těsně pod povrchem. Nevýhodou je práce se špinící kapalinou, možnost opálení povrchu při magnetizaci průchodem proudu, obtížná zjistitelnost malých a oblých vad. Obtížný je i záznam výsledku zkoušky.

## 6.6 Zkouška ultrazvuková (UT) [4,5,14]

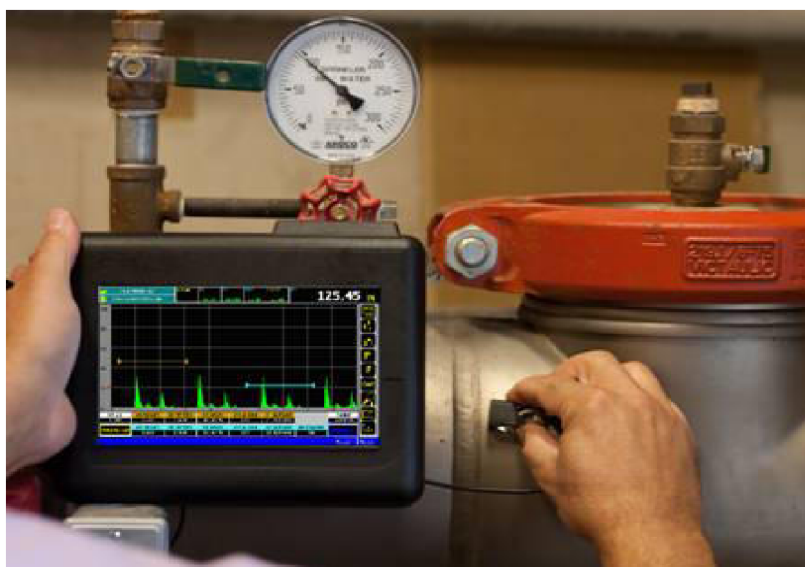
Tato zkouška je založena na principu odrazu vlnění na rozhraní dvou prostředí, která mají odlišné vlastnosti při šíření tohoto vlnění. Mechanické vlnění se šíří celistvým prostředím určitou rychlostí, která je závislá především na druhu prostředí a na frekvenci vlnění. Pokud se náhle změní druh prostředí, změní se náhle i poměry v šíření vlnění na rozhraní dvou různých prostředí. Říkáme, že se vlnění láme nebo odráží. Konstatujme tedy, že tato metoda je založena na principu šíření akustického vlnění zkoušeným předmětem, jeho reakci na změny ve zkoušeném předmětu a následnou registraci.

Zdroje ultrazvukových impulsů jsou ultrazvukové zkušební sondy, jejichž základním prvkem je elektroakustický měnič. Tyto měniče mění elektrický signál na mechanický a nejčastěji se používají měniče piezoelektrické. Podle druhu vln, které sonda vysílá a přijímá, se dělí sondy na přímé a úhlové.



Obr. 27 Zkušební sondy, a) úhlové; b) přímé s ochranou membránou[14]

Jako indikátor se používá defektoskop s obrazovkou, na jejímž stínítku se zobrazují vysílané a přijímané impulsy. V okamžiku vysílání se na obrazovce objeví vysílací impuls (počáteční echo) a koncové echo. Mezi nimi jsou potom případná echa signalizující vadu v kontrolovaném výrobku. Vzdálenost mezi počátečním a koncovým echem je přímo úměrná tloušťce základního materiálu.



Obr. 28 Defektoskop od firmy Danatronics iFlaw v praxi[14]

Nejjednodušší metodou zkoušení ultrazvukem je **metoda průchodová**. Vady v materiálu jsou bariérou, za níž se vytvoří ultrazvukový stín, tj. akustický tlak procházející ultrazvukové vlny se sníží. Na dvou protilehlých površích se do jedné osy umístí vysílací a přijímací sonda. Základem metody je měření množství ultrazvukové energie, která projde zkoušeným svarem.

Pokud je mezi vysílačem vada, akustický tlak poklesne a tím zjistíme, že je v materiálu vada. Průchodová metoda je vhodná pro výrobky menších tloušťek s rovnoběžnými povrchy přístupnými z obou stran. Nevýhodou je nemožnost odlišit, zda pokles akustického tlaku je v důsledku vady nebo nedokonalým akustickým navázáním. Další nevýhodou je nutnost použít dvou oddělených ultrazvukových sondy, které musí být umístěny v jedné ose.

Nejpoužívanější je tzv. **metoda odrazová – impulsová**. Je všestranně použitelná a získané informace touto metodou jsou nejen o vadách, ale i o struktuře materiálu, rozměrech atd. Princip metody spočívá ve vysílání krátkého ultrazvukového impulsu, který se ve zkoušeném materiálu odrazí od všech rozhraní (vad i povrchů), vrací se zpět do sondy a časový průběh je zobrazen na obrazovce. Generátor tedy vybudí ultrazvukovou sondu vysílající a přijímající ultrazvukové impulsy, která je akusticky navázaná na zkoušené prostředí. Generátor je spouštěn synchronizátorem současně se zdrojem časové základny, která se přivádí na horizontální vychylovací destičky obrazovky. Na její vertikální vychylovací systém je připojen výstup zesilovače. Impulsová odrazová metoda podává informaci o vzdálenosti odrazové plochy podle zpoždění, s nímž se odražený impuls (echo) vrátí do sondy a o velikosti odrazové plochy podle výšky echa. Výhodou této metody je využití pro kontrolu výrobků přístupných jen z jedné strany, jelikož signál lze vysílat i přijímat pomocí jedné sondy.

Ultrazvukem dokážeme dobře identifikovat vady plošného charakteru, kdy rovina vady je přibližně kolmá na směr šíření signálu. Obtížně zjistitelné jsou vady objemové, např. bubliny, póry a plošné vady umístěné rovnoběžně ve směru vlnění. Nelze téměř vůbec posoudit typ vady, je možné pouze stanovit, že se jedná o nějakou vadu a přibližně určit velikost dané vady. Z této vlastnosti je patrné, že zjistitelnost vad u zkoušky prozařováním a ultrazvukem se velmi dobře doplňuje. Proto se často používá kombinace těchto dvou metod. Výhodou ultrazvuku je v podstatě okamžitý výsledek zkoušky, nízká cena zkušebního zařízení, než u prozařování a snadné zkoušení velkých tloušťek. Vzhledem k charakteru metody, ji můžeme také používat k měření tloušťek, případně ke zjišťování změny tloušťky. Nejsou také potřeba žádná zvláštní a nákladná bezpečnostní opatření oproti prozařování. Kontrolující pracovník musí mít velmi dobré zkušenosti, aby byly výsledky hodnověrné. Nevýhodou je obtížné, spíše nemožné rozpoznání druhu vady a výsledky nejsou zpravidla dokumentovány, jelikož neexistuje trvalý záznam obrazu vady.

## **6.7 Návrh nedestruktivní kontroly svarů vnějšího lopatkového kruhu**

Pro kontrolu svarů na vnějším lopatkovém kruhu Kaplanovy turbíny byly zvoleny nedestruktivní metody kontroly svarů, z důvodu zachování a nezničení vyrobeného kusu, konkrétně pak vizuální kontrola, penetrační kontrola a kontrola za pomoci ultrazvuku. Tyto zkoušky jsou dostačující z hlediska bezpečnosti a funkčnosti svarů. Hlavní je zkouška ultrazvukem, která by měla zajistit odhalení vnitřních vad svarů, především pak vad plošných. Vnější vady svarů pak odhalí vizuální a penetrační zkoušky. Jako další možnou zkoušku bychom mohli zvolit zkoušku prozářením, ale ta by značně prodražila výrobní náklady (zkoušky) vnějšího lopatkového kruhu a také vzhledem k napětím zatěžujícím svár můžeme predikovat, že pokud nebude ve svaru nějaká rozsáhlá vada, která by mohla mít negativní vliv na jeho mechanické vlastnosti, svary jsou dostatečně naddimenzované tak, aby zvládly nápor provozních podmínek, proto se zkouška prozářením neprovádí.

## 7 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl popis konstrukčního řešení, statickým výpočtem pomocí metody konečných prvků ověřit požadovanou kvalitu svarových spojů, navrhnout technologii výroby pomocí svařování, vypracování technologického postupu svařování, zpracování WPS a návrh metodiky kontroly svarů pro dílčí část Kaplanovy turbíny, konkrétně pak pro vnější lopatkový kruh rozvaděče, který se nachází v malé vodní elektrárně na vodním díle Hričov, nedaleko slovenského města Žilina.

Vnější lopatkový kruh se nachází mezi tělesem statoru a komorou oběžného kola a skládá se z pěti základních dílců, jimiž jsou dvě příruby, které slouží ke spojení s již zmíněným státorem a komorou oběžného kola. Tyto příruby jsou přivařeny k plášti kruhu, vytvořenému dvěma k sobě svařenými kuželovými tělesy s tloušťkou stěny 35mm před obrobením. Posledním dílcem je nákrůžek, jež slouží k uchycení pouzdra pro čep rozváděcí lopaty, spojené táhlem s mechanismem korigujícím natočení rozváděcích lopatek. Takovýchto nákrůžků je do předem vypálených otvorů vloženo a přivařeno celkem 15 kusů, vzhledem k tomu, že je použito 15 rozváděcích lopatek. Po svaření bude svařenec obroben dle výkresové dokumentace tak, aby splnil všechna požadovaná kritéria pro funkčnost tohoto dílce.

Kvalita svarových spojů, respektive jejich schopnost odolat vnějšímu zatížení, byla zkoumána při provedení pevnostního výpočtu za pomoci lineární statické analýzy v programu SolidWorks® Professional 2013, využívajícího pro výpočet metodu konečných prvků. Vzhledem k předpokladu symetrie, lze celé těleso rozdělit na 15 totožných segmentů, díky čemuž dosáhneme zjednodušení původní výpočetní úlohy. Vnější lopatkový kruh musí odolat tlakovému zatížení od vody proudící uvnitř (tlak  $p$  na vnitřní stěnu kruhu) a také silovému zatížení způsobnému rozváděcími lopatkami, na jejichž plochu působí proudící médium (síla  $F_{IL}$  působící na jednu lopatku). Tlak vody je pro výpočet uvažován jako zkušební tlak, který má hodnotu 1,5 násobku provozního tlaku ( $p = 0,128$  MPa). Pro takto zatížený segment pak z výsledku výpočtu predikujeme maximální hodnotu zatížení 10,8 MPa v uzlech prvků sítě a 9,6 MPa ve středech těchto prvků, přičemž se maximální hodnoty nachází v místě styku čepu lopatky s nákrůžkem. V oblasti svarů pak hodnoty zatížení nepřesáhnou hranici cca. 6 MPa a vzhledem ke spočtenému dovolenému napětí 138,13 MPa můžeme tvrdit, že takto navržený vnější lopatkový kruh při dodržení všech předepsaných technologiích výroby pro dané provozní zatížení vyhovuje.

Při volbě technologie svařování byla zvolena po konzultaci se svářecím technologem jako nejvhodnější metoda tavného svařování v aktivním plynu MAG (135). Vzhledem k nutnosti použití ochranného plynu byl zvolen ochranný plyn M21 dle EN ISO 14175 obsahující argon a 18% CO<sub>2</sub>. Jako přídatný materiál byl zvolen plný drát G 42 3 M21 3Si1 s označením OK Autrod 12.15 o průměru 1,2 mm dle katalogu distribuční firmy ESAB. Pro svařování bez následného vzniku nežádoucí struktury, respektive vad (především praskání za studena) v oblasti svaru či tepelně ovlivněné oblasti, byly spočteny hodnoty teploty předehřevu dle zvolených parametrů svařování a základního materiálu. Tyto hodnoty byly stanoveny dle normy ČSN EN 1011-2 a to pro tloušťky 80,70 a 35 mm svařovaných dílů. Teplota interpass pak bude vždy o cca 100°C vyšší než teplota předehřevu. Doba ochlazování  $t_{8/5}$  je dle výpočtů větší než 6 sekund, což znamená předpoklad omezení vzniku martenzitické struktury a tím i trhlin za studena. Dohřev svarů byl zajištěn použitím termoizolační materiály, kterými se svar překryje. Ochlazování svaru pak probíhá na klidném vzduchu. Následně bylo zvoleno tepelné zpracování svaru, konkrétně pak žhánání pro snížení zbytkových napětí po svařování. Pro něj bylo zvolena teplotu ohřevu 70 °C/hod, teplotu setrvání 580 °C, dobu setrvání 120 minut a rychlost ochlazování 70° C/hod, po dosažení teploty 160°C ochlazení na klidném vzduchu.

Jelikož se jedná o velké tloušťky svařovaných materiálů, je nutné k dosažení kvalitního svarového spoje vytvořit v místě svaru takzvanou úpravu svarové hrany. Ta vychází z

konstrukčního návrhu, potažmo volby typu jednotlivých svarů. V našem případě je nutnost provést tuto úpravu na počítačem řízeném stroji, z důvodu složitosti řešení jednotlivých tvarů v prostoru, jako jsou například zkosení pro svaření vsazených nákrůžků, či tvar úkosu pro 1/2 U svary.

Jelikož se jedná o svařenec, využívaný v hydroenergetickém průmyslu, nejsou zde přípustné jakékoliv vady svaru, jak na povrchu tak uvnitř. Proto byly zvoleny tyto metody kontroly svarových spojů: vizuální kontrola, při které pracovní zkontroluje vnější povrchové vady svarů pouhým okem, následně pak penetrační kapilární zkouška pomocí níž odhalíme taktéž vnější povrchové vady a zkouška ultrazvuková, při níž naležeme vnitřní vady ve svarech, především pak vady plošného charakteru. Zkouška prozářením se neprovádí, vzhledem k navýšení nákladů na výrobu.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BOHDAN BOLZANO, s.r.o. *Přehled vlastností oceli S355J2*. [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/techprirI/tycovaocel/EN10025/S355J2G3/>
- [2] BURŠA, Jiří. *Metoda konečných prvků* [online]. 2013 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud\\_opory/MKP4.pdf](http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud_opory/MKP4.pdf)
- [3] ČSN EN 1011-2. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí*. V Praze: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2012.
- [4] ČVUT PRAHA. *Hodnocení kvality svarového spoje: Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I* [online]. 2005 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/104/def-kontrola-sv.pdf>
- [5] DOLEJSKÝ, T. *Základní kurz svařování metodou 135*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 79 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Kubíček. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=38474](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38474)
- [6] ESAB, s.r.o. *Katalog výrobků 2012* [online]. 2012 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [http://bcz.vamberk.eu/cd-dst-2013/PDF/1\\_pridavne\\_svarovaci/Katalog\\_CZ\\_2012.pdf](http://bcz.vamberk.eu/cd-dst-2013/PDF/1_pridavne_svarovaci/Katalog_CZ_2012.pdf)
- [7] KEPRT, Michal. *Technologie svařování a montáž odbočnice* [online]. Brno, 2014 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=85816](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85816). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.
- [8] KOVAŘÍK, R. *Technologie svařování*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-697-5.
- [9] KUBÍČEK, J. VUT BRNO. *TECHNOLOGIE II ČÁST SVAŘOVÁNÍ: Díl 1 ZÁKLADNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ* [online]. Brno, 2007 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/technologie\\_2\\_\\_svarovani/technologie\\_2\\_\\_svarovani\\_tavne.doc](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_2__svarovani/technologie_2__svarovani_tavne.doc)
- [10] KUBÍČEK, J. *TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ: Studijní opory pro výuku v kurzech 5TE, ETV, ETV-K ÚST, odbor svařování a PÚ* [online]. 2010 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/technologie\\_svarovani\\_\\_5te\\_etv\\_etv-k\\_\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_svarovani__5te_etv_etv-k__kubicek.pdf)
- [11] KURCIK, J. *Svařování* [online]. 2011 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://techstroj.g6.cz/TT08.pdf>
- [12] Malá vodná elektrárna Hričov. *VODOTIKA, a. s* [online]. VODOTIKA [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://vodotika.sk/projekt/mala-vodna-elektren-hricov/>
- [13] PROCHÁZKA, Karel. *Jak na metodu konečných prvků: učební text pro seznámení se s MKP* [online]. Střední škola průmyslová a umělecká, Opava [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [www.sspu-opava.cz/~prochazka/ruzne/MKP.doc](http://www.sspu-opava.cz/~prochazka/ruzne/MKP.doc)
- [14] PTS JOSEF SOLNAŘ s.r.o. [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/index.php/cs/>
- [15] PILOUS, Václav. *Tepelné zpracování konstrukcí svařených z normalizačně žíhaných a normalizačně válcovaných ocelí S235 a S355 ve shodě s ČSN EN ISO 17663. Konstrukce: svařování a dělení* [online]. 2012 [cit. 2017-05-24]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/tepelne-zpracovani-konstrukci-svarenych-z-normalizacne-zihanych-a-normalizacne-valcovanych-oceli-s235-a-s355-ve-shode-s-csn-en-iso-17663/>
- [16] Strojírenství: Technické materiály. *Techportál.cz* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrODF32bS3UUhLt43w9y1W\\_Xp75N8MGgz73w](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrODF32bS3UUhLt43w9y1W_Xp75N8MGgz73w)
- [17] ŠPANIEL, M. ČVUT. *Modelování konstrukcí metodou konečných prvků* [online]. 2. 3. 2009. Praha, 2009 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://mechanika2.fs.cvut.cz/old/pme/predmety/mmkp/podklady/mod.pdf>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

OZNAČENÍ	VÝZNAM	JEDNOTKA
$A_5$	Tažnost	[%]
CET	uhlíkový ekvivalent	[%]
d	tloušťka plechu	[mm]
$F_{1L}$	Síla zatěžující jednu rozváděcí lopatku	[N]
$F_3$	součinitel tvaru	[-]
HD	obsah vodíku	[ml/100g svar. kovu]
I	proud	[A]
k	koeficient ponížení z důvodu svarového spoje	[-]
KV	Nárazová práce	[J]
L	výška lopatky v délce osy rotace lopatky	[mm]
p	zkušební (výpočtový) tlak	[MPa]
Q	Tepelný příkon	[kJ/mm]
$Q_{max}$	Maximální průtok	[m.s <sup>-1</sup> ]
R	vzdálenost mezi středem lopatky a středem rotace	[mm]
$R_{eH}$	Mez kluzu	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti	[MPa]
$T_p$	teplota přehřevu	[°C]
$T_0$	počáteční teplota plechu	[°C]
$t_{8/5}$	doba ochlazování	[s]
U	napětí	[V]
$\varepsilon$	tepelná účinnost metody svařování	[-]
$\sigma_D$	Dovolené napětí	[MPa]

## SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: Tabulka porovnání vlastností ochranných plynů

PŘÍLOHA 2: Tabulka vlastností přídavného materiálu, ESAB VAMBERK, s.r.o.

PŘÍLOHA 3: Rozdělení plynů dle chemického charakteru – ČSN EN ISO 14 175

PŘÍLOHA 4: Výkres vnějšího lopatkového kruhu

PŘÍLOHA 5: WPS-2726-3-PT-1

PŘÍLOHA 6: WPS-2726-3-PT-2

PŘÍLOHA 7 :WPS-2726-3-PT-3

PŘÍLOHA 8 :WPS-2726-3-PT-4

PŘÍLOHA 9 :WPS-2726-3-PT-5

PŘÍLOHA 10 :WPS-2726-3-PT-6

PŘÍLOHA 1: Tabulka porovnání vlastností ochranných plynů

Vlastnosti	Ar + CO <sub>2</sub>	Ar + O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Závar <ul style="list-style-type: none"> <li>normální poloha</li> <li>nucená poloha</li> </ul>	dobry spolehlivější s rostoucím % CO <sub>2</sub>	dobry může být kritický z důvodu předbíhání svarové lázně	dobry spolehlivý
Tepelné zatížení hořáků	vysoké, snižuje se s rostoucím % CO <sub>2</sub>	vysoké, výkon může být omezen, jestliže je hořák příliš horký	nizké díky dobre tepelné vodivosti
Stupeň oxidace	nizký, stoupá s rostoucím % CO <sub>2</sub>	výrazně závisí na obsahu O <sub>2</sub> (1 – 8%)	vysoký
Porozita	snizuje se s rostoucím obsahem CO <sub>2</sub>	vysoká citlivost	spolehlivá
Přemostitelnost mezery	zlepšuje se s poklesem % CO <sub>2</sub>	dobrá	horší než u směsných plynů
Tvorba rozstříku	stoupá s rostoucím % CO <sub>2</sub>	téměř bez rozstříku	vysoká, stoupá s rostoucím výkonem
Vnášení tepla do svaru	stoupá s rostoucím % CO <sub>2</sub> nižší rychlost ochlazování menší nebezpečí vzniku trhlin	nejnižší vysoká rychlost ochlazování, nebezpečí vzniku trhlin větší	vysoké malá rychlost ochlazování, nebezpečí vzniku trhlin malé
Typ přenosu kovu obloukem	všechny typy	všechny typy	zkratový, kapkový

PŘÍLOHA 2: Tabulka vlastností přídatného materiálu, ESAB VAMBERK, s.r.o.



**Použití:**

Pro svařování nelegovaných konstrukčních ocelí, pro výrobu tlakových nádob s pevností do 530 MPa a jemnozrných ocelí s mezí kluzu do >420 MPa. Drát umožňuje svařování vysokým proudem (sprchový proces) a má krátký přenos oblouku v poloze vodorovné i mimo ní. Drát je dodáván i ve velkokapacitním balení MARATHON PAC™ (platí pro průměr 0,8, 1,0 a 1,2 mm).

**Vhodnost pro svařování, napí.:**

P 235/S 235 až P 420/S 420

**Klasifikace, certifikace:**

CE EN 13479  
 ABS 3YSA  
 BV SA 3YM  
 DB 42.039.06  
 DNV III YMS  
 GL 3YS  
 LR 3S, 3YS  
 TÜV 00899  
 další: PRS, RS

**Ochranný plyn (EN ISO 14175):**

M21, C1

**Klasifikace svarového kovu:**

EN ISO 14341-A: G 38 2 C1 3Si1  
 G 42 3 M21 3Si1

**Svařovací proud:**

**Typické chemické složení drátu (%):**

C	Si	Mn
0,09	0,90	1,50

**D**

**Polohy svařování:**



**Typické mechanické hodnoty čistého svarového kovu:**

Podmínky	Stav	Plyn	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>el</sub> (R <sub>p0,2</sub> ) MPa	A <sub>5</sub> (A <sub>6</sub> ) %	KV (J)/°C			
						+20	-20	-30	-29
EN	TZ 0	M21	560	470	26	130	90	70	
EN	TZ 1	M21	495	370	28	120	90		
EN	TZ 2	M21	455	310	32	100	75		
EN	TZ 0	C1	540	450	25	110	70		
AWS	TZ 0	C1	>480	(>400)	(>22)				>27

TZ 0 - stav po svařování, TZ 1 - stav po žhání 620°C/15 h, TZ 2 - stav po norm. žhání 920°C/0,5h.

**Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty:**

Ø d (mm)	Proud (A)	Napětí (V)	Výtěžnost svar. kovu g/100g drátu	Spotřeba plynu (l/min)	Rychlost podávání (m/min)	Výkon svařování (kg/h)
0,6	30 - 100	15 - 20	95	12	5,5 - 13,0	0,7 - 1,7
0,8	60 - 200	18 - 24	95	14	3,2 - 13,0	0,8 - 3,0
1,0	80 - 300	18 - 32	96	16	2,7 - 15,0	1,0 - 5,6
1,2	120 - 380	18 - 34	97	18	2,5 - 15,0	1,3 - 8,0
1,6	225 - 550	28 - 38	98	20	2,3 - 12,0	2,1 - 11,4



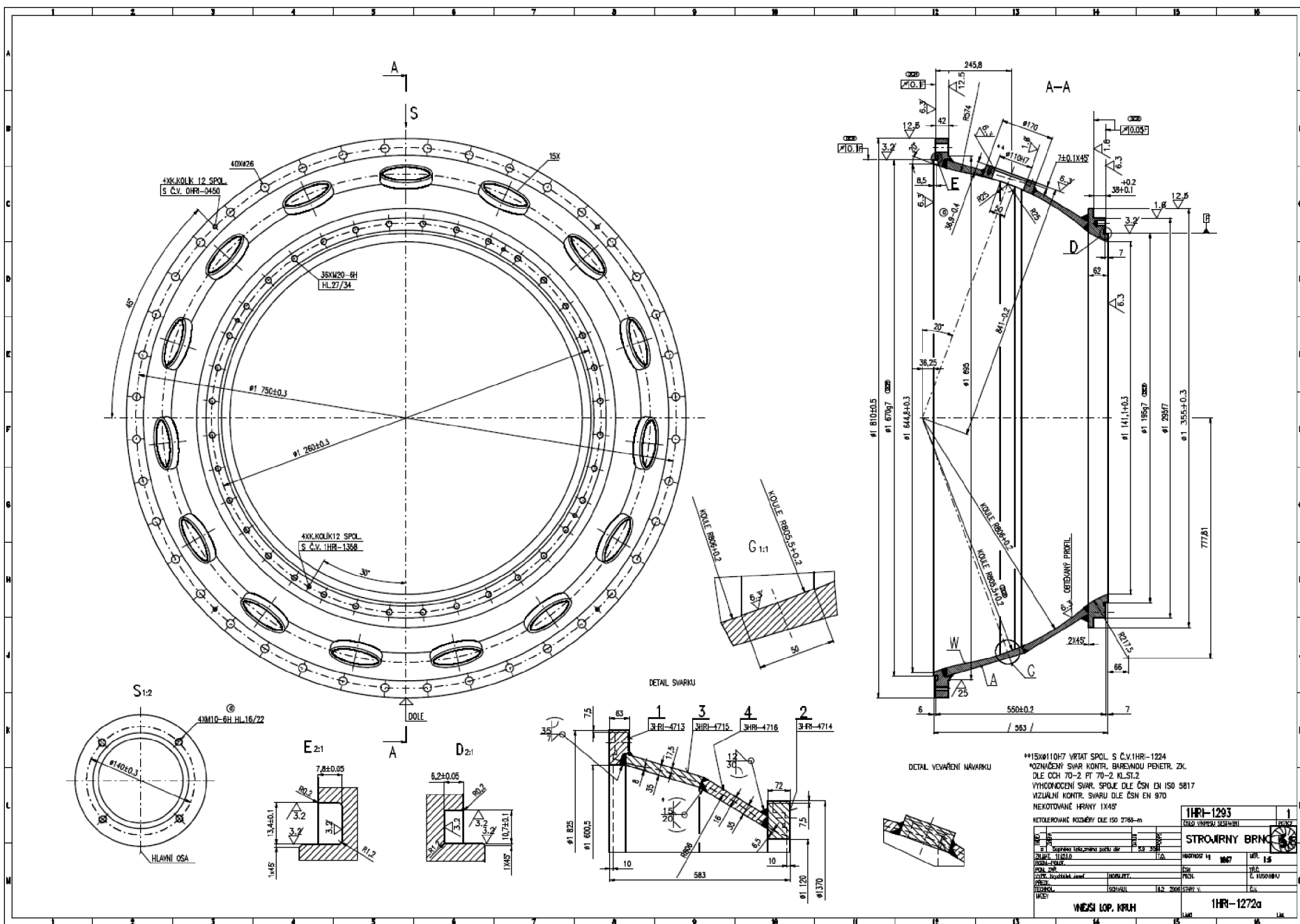
PŘÍLOHA 3: Rozdělení plynů dle chemického charakteru – ČSN EN ISO 14 175

Tab 6.1 Rozdělení plynů dle chemického charakteru – norma ČSN EN ISO 14 175  
Prvky v objemových procentech

Označení		Prvky v objemových procentech					Poznámka	
Skupina	Podskupina	Oxidační		Inertní		Redukční		Malá reakt. N <sub>2</sub>
		CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	He	H <sub>2</sub>		
I	1			100				Inertní
	2				100			
	3			zbytek	0,5 ≤ He ≤ 95			Mírně oxidační
M 1	1	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 5		zbytek		0,5 ≤ H <sub>2</sub> ≤ 5		
	2	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 5		zbytek				
	3		0,5 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 3	zbytek				
	4	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 5	0,5 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 3	zbytek				
M 2	0	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 15		zbytek				Středně oxidační
	1	15 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 25		zbytek				
	2		3 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 10	zbytek				
	3	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 5	3 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 10	zbytek				
	4	5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 15	0,5 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 3	zbytek				
	5	5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 15	3 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 10	zbytek				
	6	15 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 25	0,5 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 3	zbytek				
7	15 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 25	3 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 10	zbytek					
M 3	1	25 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 50		zbytek				Silně oxidační
	2		10 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 15	zbytek				
	3	25 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 50	2 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 10	zbytek				
	4	5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 25	10 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 15	zbytek				
	5	25 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 50	10 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 15	zbytek				
C	1	100						
	2	zbytek	0,5 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 30					
R	1			zbytek		0,5 ≤ H <sub>2</sub> ≤ 15 15 ≤ H <sub>2</sub> ≤ 50		Redukční
	2			zbytek				
N	1					0,5 ≤ H <sub>2</sub> ≤ 10 0,5 ≤ H <sub>2</sub> ≤ 50	100 0,5 ≤ N <sub>2</sub> ≤ 5 0,5 ≤ N <sub>2</sub> ≤ 50 0,5 ≤ N <sub>2</sub> ≤ 5 zbytek	Redukční
	2			zbytek				
	3			zbytek				
	4			zbytek				
	5			zbytek				
O	1		100					Silně oxidační
Z	Směsi plynů obsahující neuvedené složky nebo směsi se složením mimo uvedený rozsah							

Tato směs má nejmenší index oxidačního účinku 1 resp. 2 a nemá nauhličující charakter. Bez nauhličujícího účinku se zvýšeným oxidačním účinkem (index 3 – 5) se pro svařování feritických ocelí používá směs Ar + 3 až 5 % O<sub>2</sub>.  
 Ve skupině směsných plynů „M2“ jsou nejpoužívanější plyny pro MAG svařování. Často používaná dvojsložková směs plynů typ Ar + 20 % CO<sub>2</sub>, má oxidační účinek podobný jako u směsi Ar + O<sub>2</sub> (index 2). Argon s oxidem uhličitým má však nauhličující účinek. Používá se pro uhlíkové a nízkolegované oceli.  
 Trojsložková směs na svařování tenkých plechů je Ar + 5% O<sub>2</sub> + 15%CO<sub>2</sub> a má výrazný oxidační účinek – index 6,5.  
 Nejvyšší oxidační účinek (index 10) má čistý CO<sub>2</sub> označený skupinou „C“. Má i výrazný nauhličující účinek a jeho využití má klesající tendenci.  
 V ochranném plynu CO<sub>2</sub> probíhají chemické reakce v širokém rozmezí podmínek svařování tak, že rovnovážný stav uhlíku ve svarovém kovu se ustálí v rozmezí 0,10 – 0,15 % bez

PŘÍLOHA 4: Výkres vnějšího lopatkového kruhu



\*\*15X110±7 VRÁTAT SPOL. S Č.V. IHR-1224  
 \*OZNACENÝ SVAR KONTR. BAREVNĚU PENETR. ZK.  
 DLE ČCH 70-2 PT 70-2 KL. SL. 2  
 VYHODNOCENÍ SVAR. SPOL. DLE ČSN EN ISO 5817  
 VIZUÁLNÍ KONTR. SVARU DLE ČSN EN 870  
 NEKOTOVANÉ HRANY 1X45°

OBJEDVATEL	STROMYRNÝ BRNO	BRNO	15
PROJEKTANT			
VERZE			
STAV			
DOKUMENT			
POZ. ČÍSLO			
SKLAD			
PROJEKT			
DOKUMENT			
PROJEKT			
VERZE			

1IHR-1293		1
5250 VÝRBNÍ KRESLENÍ		
STROMYRNÝ BRNO		
STAV		15
BRNO		
DOKUMENT		
PROJEKT		
VERZE		
DOKUMENT		
PROJEKT		
VERZE		
DOKUMENT		
PROJEKT		
VERZE		

WZKSI LOP. KRUH

IHR-1272a

PŘÍLOHA 5: WPS-2726-3-PT-1

<b>VUT BRNO</b> FSI	<b>WPS</b>	<b>Welding Procedure Specification</b> specifikace svařovacího postupu	<b>WPS No./č.:</b> WPS-2726-3-PT-1	<b>Rev.:</b> 0
			<b>Date/Datum:</b> 22.5.2017	<b>Pg./Str.:</b> 1/1

<b>Welding Process/Metoda:</b> 1. 135 2.	<b>Supporting/Související</b>
Type of Weld/Typ svař: BW - symetrický oboustranný U	
Backing/Podoška: N.A.	
Other/Ostatní: Welder Svářeč	

<b>Base metal / Základní materiál:</b>			
Material 1: S 355 J2 G3 EN10025-2	Group: 1.2	Outside Dia./Vnější:	Thickness/TLoušťka: 80 mm
Matk. Material 2: S 355 J2 G3 EN10025-2	Group/Sk.: 1.2	Outside Dia./Vnější:	Thickness/TLoušťka: 80 mm
Remark/Poznámka:			

<b>Filler Material / Svařovací materiál:</b>			
Classification: 1. EN ISO 14 341A, G 42 3 M21 3Si1	Gas / Plyn: 12-15	V/min	%
Klasifikace: EN ISO 14 341A, G 42 3 M21 3Si1	Shielding/O. svař: 1. Ar+18%CO2	M21	2.
Designation: 1. OK Autrod 12.51	Backing/O. kolena: 1. N.A.		2.
Označení: 1. OK Autrod 12.51	Tweing/Dodatečná: 1. N.A.		2.
Size/Průměr: 1. 1,2 mm 2.	Remark/Poznámka: EN ISO 14175		
Name-Type of Flux/Jméno-tyt tavidla:			
Drying of F.M./Sušení svař. mat.: 1. °C   2.			
Replace/Náhrada: 1. 2.			
Remark/Poznámka:			

<b>Position / Pozice: PA</b>	
Groove/Do díky: 1. 2.	
Filet/Koutový: 1. 2.	

<b>Joint Design / Tvar spoje:</b>	<b>Welding Sequences / Postup svařování:</b>

<b>Preheat / Předehřev:</b>					
Preheat Temp./Teplota předehřevu: 199,5 °C	Interpass: 300 °C	Post Heating/Dohřev: Ano °C h	Cooling After W./Ochlazení po s: still air klidný vzduch	Temp. Control/Kontrola teploty: 170 °C	Remark/Poznámka:
Prekrytím termoizolačním mat.					

<b>Post Weld Heat Treatment / Tepelné zpracování po svařování:</b>					
Type/Typ: Žhání pro snížení zbytkových napětí	Temperature/Teplota: 580 °C	Time/Čas: 110 min.	Heating Rate/Rychlost ohřevu: 70 °C/h	Cooling Rate/Rychlost ochlazení: 70 °C/h	Remark/Poznámka:

<b>Technique / Technika svařování:</b>					
Tungsten El./Wolframová elektroda: φ mm Type -	Type of Bead/Tvar housenky: 1. string - rovná		2.		
Edge Preparation/Připrava úkosu: machined / obráběný	Weaving / Rozkyv: 1. N.A.		2.		
Method of Cleaning/Metoda čištění: mechanical / mechanicky	Pulsing/Pulzace: 1. N.A.		2.		
Method of Back Gouging/Drátkování kolena: mechanical / mechanicky	Oscillation/Osílance: 1. N.A.		2.		
Remark/Poznámka:					

<b>Welding Parameters / Svařovací parametry:</b>							
Layer(s) Vrstva	Process Metoda	Filler Material/Svařovací materiál φ (mm) Klasifikace/Klasifikace	Type/Polarity Typ/Polárity	Amperage/Prúd (A)	Voltage/Nápní (V)	Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)	Heat Input (kJ/mm) Tepelný příkon (kJ/mm)
1-3	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98
4-6	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98
7-m	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89
n-k	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89
l-x	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	280-340	28-30	20	2,0-2,6
y-z	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	280-340	28-30	20	2,0-2,6

**Remarks / Poznámky:**

Tack welding shall be performed accordance with WPS.  
Not Peening during and after welding.

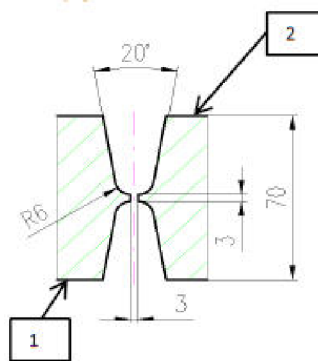
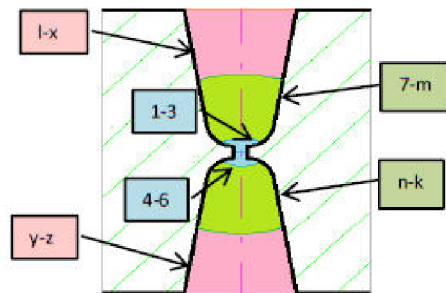
Prepared (Name, Date, Signature): 22.5.2017  
Připravil (jméno, datum, podpis): Michal Keprt

Approved (Name, Date, Signature):  
Schválil (jméno, datum, podpis): Ing. Jaroslav Kubiček

PŘÍLOHA 6: WPS-2726-3-PT-2

<b>VUT BRNO</b> FSI	<b>WPS</b>	Welding Procedure Specification specifikace svařovacího postupu	WPS No./č.: WPS-2726-3-PT-2	Rev.: 0
			Date/Datum: 22.5.2017	Pa./Str.: 1/1

<b>Welding Process/Metoda:</b> 1. 135 2. Type of Weld/Typ svař.: BW - symetrický oboustranný U Backing/Podložka: N.A. Other/Ostatní: Welder Svářeč	<b>Supporting/Související</b>																																																																																								
<b>Base metal / Základní materiál:</b> Material 1: S 355 J2 G3 EN10025-2 Group: 1.2 Outside Dia./Vnější: Thickness/Tloušťka: 70 mm Material 2: S 355 J2 G3 EN10025-2 Group/SK: 1.2 Outside Dia./Vnější: Thickness/Tloušťka: 70 mm Remark/Poznámka:																																																																																									
<b>Filler Material / Svařovací materiál:</b> Classification: 1. EN ISO 14 341A, G 42 3 M21 3Si1 Klasifikace: EN ISO 14 341A, G 42 3 M21 3Si1 Designation: 1. OK Autrod 12.51 Označení: OK Autrod 12.51 Size/Průměr: 1. 1,2 mm 2. Name-Type of Flux/Jméno-typ tavidla: Drying of F.M./Sušení svař. mat.: 1. °C 2. Replaces/Náhrada: 1. 2. Remark/Poznámka:																																																																																									
<b>Gas / Plyn:</b> 12-15 l/min % l/min Shielding/O. svař.: 1. Ar+18%CO2 M21 2. Backing/O. kolene: 1. N.A. 2. Trailings/Dodatečná: 1. N.A. 2. Remark/Poznámka: EN ISO 14175																																																																																									
<b>Position / Pozice: PA</b> Groove/Úkos: 1. 2. Fillet/Koutový: 1. 2. Remark/Poznámka:																																																																																									
<b>Joint Design / Tvar spoje:</b> 	<b>Welding Sequences / Postup svařování:</b> 																																																																																								
<b>Preheat / Předehřev:</b> Preheat Temp./Teplota předehřevu: 197 °C Intervals: 297 °C Post Heating/Dohřev: Ano °C h Cooling After W./Ochlazení po s: stíl air / klidný vzduch Temp. Control/Kontrola teploty: 170 °C Remark/Poznámka: Překrytí term. izolací mat.																																																																																									
<b>Post Weld Heat Treatment / Tepelné zpracování po svařování:</b> Type/Typ: Žhání pro snížení zbytkových napětí Temperature/Teplota: 580 °C Time/Čas: 110 min Heating Rate/Rychlost ohřevu: 70 °C/h Cooling Rate/Rychlost ochlazení: 70 °C/h Remark/Poznámka:																																																																																									
<b>Technique / Technika svařování:</b> Tungsten El./Wolframová elektroda: φ mm Type - Type of Bead/Tvar housenky: 1. string - rovná 2. Edge Preparation/Připrava úkosu: machined / obráběný Weaving / Rozkyv: 1. N.A. 2. Method of Cleaning/Metoda čistění: mechanical / mechanicky Polishing/Pulzace: 1. N.A. 2. Method of Back Gauging/Drátkování kolene: mechanical / mechanicky Oscillation/Oscilace: 1. N.A. 2. Remark/Poznámka:																																																																																									
<b>Welding Parameters / Svařovací parametry:</b> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Layer(s) Vrstva</th> <th>Process Metoda</th> <th>Filler Material/Svařovací materiál φ (mm) Classification/Klasifikace</th> <th>Type/Polarity Typ/Polarita</th> <th>Amperage/Prud (A)</th> <th>Voltage/Nápatí (V)</th> <th>Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)</th> <th>Heat Input (kJ/mm) Tepelný příkon(kJ/mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1-3</td> <td>135</td> <td>1,2 OK Autrod 12.51</td> <td>DC/+</td> <td>220-240</td> <td>23-24</td> <td>30</td> <td>0,86-0,98</td> </tr> <tr> <td>4-6</td> <td>135</td> <td>1,2 OK Autrod 12.51</td> <td>DC/+</td> <td>220-240</td> <td>23-24</td> <td>30</td> <td>0,86-0,98</td> </tr> <tr> <td>7-m</td> <td>135</td> <td>1,2 OK Autrod 12.51</td> <td>DC/+</td> <td>260-320</td> <td>27-29</td> <td>25</td> <td>1,43-1,89</td> </tr> <tr> <td>n-k</td> <td>135</td> <td>1,2 OK Autrod 12.51</td> <td>DC/+</td> <td>260-320</td> <td>27-29</td> <td>25</td> <td>1,43-1,89</td> </tr> <tr> <td>l-x</td> <td>135</td> <td>1,2 OK Autrod 12.51</td> <td>DC/+</td> <td>280-340</td> <td>28-30</td> <td>20</td> <td>2,0-2,6</td> </tr> <tr> <td>y-z</td> <td>135</td> <td>1,2 OK Autrod 12.51</td> <td>DC/+</td> <td>280-340</td> <td>28-30</td> <td>20</td> <td>2,0-2,6</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Layer(s) Vrstva	Process Metoda	Filler Material/Svařovací materiál φ (mm) Classification/Klasifikace	Type/Polarity Typ/Polarita	Amperage/Prud (A)	Voltage/Nápatí (V)	Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)	Heat Input (kJ/mm) Tepelný příkon(kJ/mm)	1-3	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98	4-6	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98	7-m	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89	n-k	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89	l-x	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	280-340	28-30	20	2,0-2,6	y-z	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	280-340	28-30	20	2,0-2,6																																
Layer(s) Vrstva	Process Metoda	Filler Material/Svařovací materiál φ (mm) Classification/Klasifikace	Type/Polarity Typ/Polarita	Amperage/Prud (A)	Voltage/Nápatí (V)	Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)	Heat Input (kJ/mm) Tepelný příkon(kJ/mm)																																																																																		
1-3	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98																																																																																		
4-6	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98																																																																																		
7-m	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89																																																																																		
n-k	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89																																																																																		
l-x	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	280-340	28-30	20	2,0-2,6																																																																																		
y-z	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	280-340	28-30	20	2,0-2,6																																																																																		
<b>Remarks / Poznámky:</b> Tack welding shall be performed accordance with WPS. Not Peening during and after welding.																																																																																									

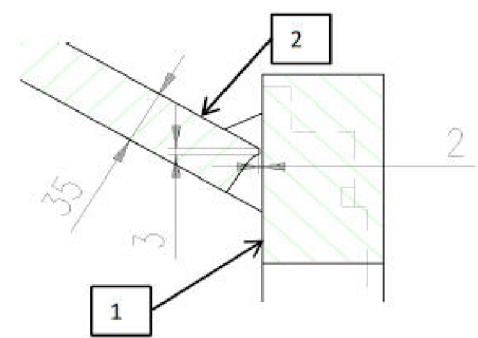
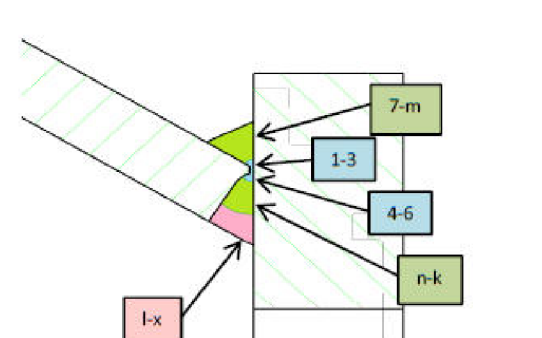
Prepared (Name, Date, Signature): 22.5.2017  
 Připravil (jméno, datum, podpis): Michal Keprt

Approved (Name, Date, Signature):  
 Schválil (jméno, datum, podpis): Ing. Jaroslav Kubiček

PŘÍLOHA 7 : WPS-2726-3-PT-3

<b>VUT BRNO</b> FSI	<b>WPS</b>	Welding Procedure Specification specifikace svařovacího postupu	WPS No./č.: WPS-2726-3-PT-3	Rev.: 0
			Date/Datum: 22.5.2017	Pg./Str.: 1/1

<b>Welding Process/Metoda:</b> 1. 135 2. Type of Weld/Typ svař.: BW - 1/2 U svar překrytý koutovým svarem Backing/Podoška: N.A. Other/Ostatní: Welder Svářeč	<b>Supporting/Související</b>																																																
<b>Base metal / Základní materiál:</b> Material 1: S 355 J2 G3 EN10025-2 Group: 1.2 Outside Dia./Vnější Thkness/Tloušťka: 80 mm Material 2: S 355 J2 G3 EN10025-2 Group/Sk.: 1.2 Outside Dia./Vnější Thkness/Tloušťka: 35 mm Remark/Poznámka:																																																	
<b>Filler Material / Svařovací materiál:</b> Classification: 1. EN ISO 14 341A, G 42 3 M21 3Si1 Klasifikace: EN ISO 14 341A, G 42 3 M21 3Si1 Designation: 1. OK Autrod 12.51 Označení: OK Autrod 12.51 Size/Průměr: 1. 1,2 mm 2. mm Name-Type of Flux/Jméno-typ tavidla: Drying of F.M./Sušení svař. mat.: 1. °C 2. Replace/Náhradní: 1. 2. Remark/Poznámka:																																																	
<b>Gas / Plyn: 12-15</b> Shielding/O. svař: 1. Ar+18%CO2 M21 2. Backing/O. kolene: 1. N.A. 2. Trailng/Dodatečná: 1. N.A. 2. Remark/Poznámka: EN ISO 14175																																																	
<b>Position / Pozice: PA</b> Groove/Úkos: 1. 2. Fillet/Koutový: 1. 2. Remark/Poznámka:																																																	
<b>Joint Design / Tvar spoje:</b> 	<b>Welding Sequences / Postup svařování:</b> 																																																
<b>Preheat / Předehřev:</b> Preheat Temp./Teplota předehřevu: 199,5 °C Interpass: 300 °C Post Heating/Dohřev: Ano °C h Cooling After W./Ochlazení po s: still air kldný vzduch Temp. Control/Kontrola teploty: 170 °C Remark/Poznámka:																																																	
<b>Post Weld Heat Treatment / Tepelné zpracování po svařování:</b> Type/Typ: Žihání pro snížení zbytkových napětí Temperature/Teplota: 580 °C Time/Čas: 110 min Heating Rate/Rychlost ohřevu: 70 °C/h Cooling Rate/Rychlost ochlazení: 70 °C/h Remark/Poznámka:																																																	
<b>Technique / Technika svařování:</b> Tungsten El./Wolframo vý elektroda: φ mm Type - Edge Preparation/Příprava úkosu: machined / obráběný Method of Cleaning/Metoda čistění: mechanical / mechanicky Method of Back Gouging/Drátkování kolene: mechanical / mechanicky Type of Bead/Tvar housanky: 1. string - rovná 2. Weaving / Rozkyv: 1. N.A. 2. Pulsing/Pulzace: 1. N.A. 2. Oscillation/Osdřace: 1. N.A. 2. Remark/Poznámka:																																																	
<b>Welding Parameters / Svařovací parametry:</b> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Layer(s) Vrstva</th> <th>Process Metoda</th> <th>Filler Material/Svařovací materiál</th> <th>Type/Polarity Typ./Polarita</th> <th>Amperage/Prúd (A)</th> <th>Voltage/Napětí (V)</th> <th>Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)</th> <th>Heat Input (kJ/mm) Tepelný nákon(kJ/mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1-3</td> <td>135</td> <td>OK Autrod 12.51</td> <td>DC/+</td> <td>220-240</td> <td>23-24</td> <td>30</td> <td>0,86-0,98</td> </tr> <tr> <td>4-6</td> <td>135</td> <td>OK Autrod 12.51</td> <td>DC/+</td> <td>220-240</td> <td>23-24</td> <td>30</td> <td>0,86-0,98</td> </tr> <tr> <td>7-m</td> <td>135</td> <td>OK Autrod 12.51</td> <td>DC/+</td> <td>260-320</td> <td>27-29</td> <td>25</td> <td>1,43-1,89</td> </tr> <tr> <td>n-k</td> <td>135</td> <td>OK Autrod 12.51</td> <td>DC/+</td> <td>260-320</td> <td>27-29</td> <td>25</td> <td>1,43-1,89</td> </tr> <tr> <td>l-x</td> <td>135</td> <td>OK Autrod 12.51</td> <td>DC/+</td> <td>280-340</td> <td>28-30</td> <td>20</td> <td>2,0-2,6</td> </tr> </tbody> </table>		Layer(s) Vrstva	Process Metoda	Filler Material/Svařovací materiál	Type/Polarity Typ./Polarita	Amperage/Prúd (A)	Voltage/Napětí (V)	Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)	Heat Input (kJ/mm) Tepelný nákon(kJ/mm)	1-3	135	OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98	4-6	135	OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98	7-m	135	OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89	n-k	135	OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89	l-x	135	OK Autrod 12.51	DC/+	280-340	28-30	20	2,0-2,6
Layer(s) Vrstva	Process Metoda	Filler Material/Svařovací materiál	Type/Polarity Typ./Polarita	Amperage/Prúd (A)	Voltage/Napětí (V)	Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)	Heat Input (kJ/mm) Tepelný nákon(kJ/mm)																																										
1-3	135	OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98																																										
4-6	135	OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98																																										
7-m	135	OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89																																										
n-k	135	OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89																																										
l-x	135	OK Autrod 12.51	DC/+	280-340	28-30	20	2,0-2,6																																										
<b>Remarks / Poznámky:</b> Tack welding shall be performed accordance with WPS. Not Peening during and after welding.																																																	

Prepared (Name, Date, Signature): 22.5.2017  
 Michal Keprt

Approved (Name, Date, Signature):  
 Schválil (jméno, datum, podpis): Ing. Jaroslav Kubiček

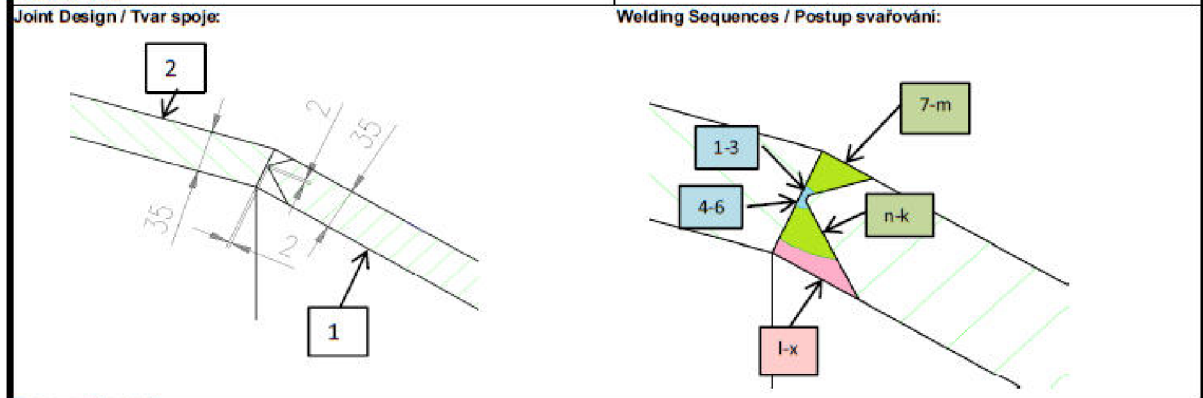
PŘÍLOHA 8 : WPS-2726-3-PT-4

<b>VUT BRNO</b> FSI	<b>WPS</b>	<b>Welding Procedure Specification</b> specifikace svařovacího postupu	<b>WPS No./č.:</b> WPS-2726-3-PT-4	<b>Rev.:</b> 0
			<b>Date/Datum:</b> 22.5.2017	<b>Pg./Str.:</b> 1/1

<b>Welding Process/Metoda:</b> 1. 135 2.	<b>Supporting/Souvěející</b>
Type of Weld/Typ svaru: BW - oboustranný nesymetrický 1/2 V svar	
Backing/Podložka: N.A.	
Other/Další: Welder Svářeč	

<b>Base metal / Základní materiál:</b>			
Material 1: S 355 J2 G3 EN10025-2	Group: 1.2	Outside Dia./Vnější: 35 mm	Thickness/Teoušťka: 35 mm
Material 2: S 355 J2 G3 EN10025-2	Group/Sk.: 1.2	Outside Dia./Vnější: 35 mm	Thickness/Teoušťka: 35 mm
Remark/Poznámka:			

<b>Filler Material / Svařovací materiál:</b>				<b>Gas / Plyn: 12-15</b>			
Classification: 1. EN ISO 14 341A, G 42 3 M21 3Si1	Shielding Gas: 1. Ar+18%CO2	M21	2.	Flow Rate: 1. 2	%	2.	Flow Rate: 1. 2
Classification: 2. EN ISO 14 341A, G 42 3 M21 3Si1	Shielding Gas: 2. N.A.			Flow Rate: 2. 2			Flow Rate: 2. 2
Designation: 1. OK Autrod 12.51	Trail/Dodatek: 1. N.A.			Flow Rate: 3. 2			Flow Rate: 3. 2
Designation: 2. OK Autrod 12.51	Trail/Dodatek: 2. N.A.			Flow Rate: 4. 2			Flow Rate: 4. 2
Size/Průměr: 1. 1,2 mm 2.	Remark/Poznámka: EN ISO 14175						
Name-Type of Flux/Uměno-yp taviva:	<b>Position / Pozice: PA</b>						
Drying of F.M./Sušení svař. maL: 1. °C 2.	Groove/Do úkosu: 1. 2.						
Replate/Měra: 1. 2.	Filler/Kautový: 1. 2.						
Remark/Poznámka:							



<b>Preheat / Předehřev:</b>					
Preheat Temp./Teplota předehřevu: 149,7 °C	Interpass: 250 °C	Post Heating/Dohřev: Ano °C h	Cooling After W./Ochlazení po s: still air / klidný vzduch	Temp. Control/Kontrola teploty: 170 °C	Remark/Poznámka:
Překrytím termooizolačním mat.					

<b>Post Weld Heat Treatment / Tepelné zpracování po svařování:</b>					
Type/Typ: Žihání pro snížení zbytkových napětí	Temperature/Teplota: 580 °C	Time/Čas: 110 min	Heating Rate/Rychlost ohřevu: 70 °C/h	Cooling Rate/Rychlost ochlazení: 70 °C/h	Remark/Poznámka:

<b>Technique / Technika svařování:</b>					
Tungsten El./Wolframová elektroda: φ mm Type -	Type of Bead/Tvar housenky: 1. string - rovná 2.				
Edge Preparation/Přprava úkosu: machined / obráběný	Weaving / Rozkyv: 1. N.A. 2.				
Method of Cleaning/Metoda čistění: mechanical / mechanicky	Pulsing/Pulzace: 1. N.A. 2.				
Method of Back Gouging/Drážkování kořene: mechanical / mechanicky	Oscillation/Oscilace: 1. N.A. 2.				
Remark/Poznámka:					

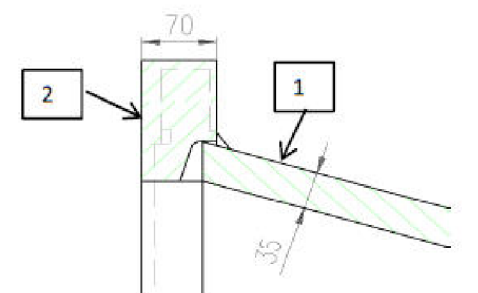
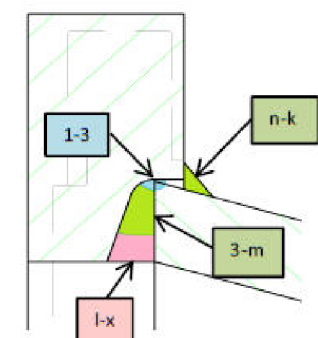
<b>Welding Parameters / Svařovací parametry:</b>								
Layer(s) Vrstva	Process Metoda	Filler Material/Svařovací materiál		Type/Polarita	Amperage/Prúd (A)	Voltage/Napětí (V)	Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)	Heat Input (kJ/mm) Teplotný p/řkon (kJ/mm)
		φ (mm)	Classification/Klasifikace					
1-3	135	1,2	OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98
4-6	135	1,2	OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98
7-m	135	1,2	OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89
n-k	135	1,2	OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89
l-x	135	1,2	OK Autrod 12.51	DC/+	280-340	28-30	20	2,0-2,6

**Remarks / Poznámky:**

Tack welding shall be performed accordance with WPS.  
Not Peening during and after welding.

Prepared (Name, Date, Signature): 22.5.2017	Approved (Name, Date, Signature):
Přpravi (jméno, datum, podpis): Michal Keprt	Schvál (jméno, datum, podpis): Ing. Jaroslav Kubíček

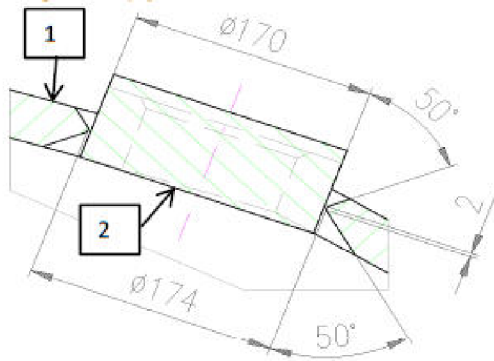
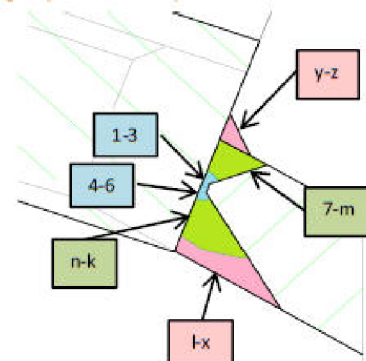
PŘÍLOHA 9 : WPS-2726-3-PT-5

<b>VUT BRNO</b> FSI		<b>WPS</b> Welding Procedure Specification specifikace svařovacího postupu		WPS No./č.: WPS-2726-3-PT-5		Rev.: 0		
				Date/Datum: 22.5.2017		Pg./Str.: 1/1		
<b>Welding Process/Metoda:</b> 1. 135 2. Type of Weld/Typ svař.: BW - 1/2 U svar překrytý koutovým svarem Backing/Podoška: N.A. Other/Ostatní: Welder Svářeč				Supporting/Související				
<b>Base metal / Základní materiál:</b> Material 1: S 355 J2 G3 EN10025-2 Group: 1.2 Outside Dia./Vnější: Thickness/Toušťka: 70 mm Material 2: S 355 J2 G3 EN10025-2 Group/Sk.: 1.2 Outside Dia./Vnější: Thickness/Toušťka: 35 mm Remark/Poznámka:								
<b>Filler Material / Svařovací materiál:</b> Classification: 1. EN ISO 14 341A, G 42 3 M21 3Si1 Classification: EN ISO 14 341A, G 42 3 M21 3Si1 Designation: 1. OK Autrod 12.51 Označení: OK Autrod 12.51 Size/Průměr: 1. 1,2 mm 2. Name-Type of Flux/Uměno-tyj taviva: Drying of P.M./Sušení svař. mat.: 1. °C 2. Replate/Náhrada: 1. 2.				<b>Gas / Plyn:</b> 12-15 l/min % l/min Shielding/O. svaz: 1. Ar+18%CO2 M21 2. Backing/O. kolena: 1. N.A. 2. Trailing/Dodatečná: 1. N.A. 2. Remark/Poznámka: EN ISO 14175				
Remark/Poznámka:				<b>Position / Pozice: PA</b> Groove/Do úkosu: 1. 2. Fillet/Koutový: 1. 2.				
<b>Joint Design / Tvar spoje:</b> 				<b>Welding Sequences / Postup svařování:</b> 				
<b>Preheat / Předehřev:</b>								
Preheat Temp./Teplota předehřevu: 197 °C		Interpass: 297 °C		Post Heating/Dohřev: Ano °C h Překrytím termoizolačním mat.		Cooling After W./Ochlazení po s: still air / klidný vzduch		
						Temp. Control/Kontrola teploty: 170 °C		
<b>Post Weld Heat Treatment / Tepelné zpracování po svařování:</b>								
Type/Typ: Žhání pro snížení zbytkových napětí		Temperature/Teplota: 580 °C		Time/Čas: 110 min		Heating Rate/Rychlost ohřevu: 70 °C/h		
						Cooling Rate/Rychlost ochlazení: 70 °C/h		
<b>Technique / Technika svařování:</b>								
Tungsten El./Wolframová elektroda: φ mm Type -		machined / obráběný		Type of Bead/Tvar housenky: 1. string - rovná 2.				
Edge Preparation/Připrava úkosu: mechanical / mechanicky		mechanical / mechanicky		Weaving / Rozkyv: 1. N.A. 2.				
Method of Cleaning/Metoda čistění: mechanical / mechanicky		mechanical / mechanicky		Pushing/Půlžace: 1. N.A. 2.				
Method of Back Gouging/Drážkování kolena: mechanical / mechanicky		mechanical / mechanicky		Oscilation/Osídlače: 1. N.A. 2.				
Remark/Poznámka:								
<b>Welding Parameters / Svařovací parametry:</b>								
Layer(s) Vrstva	Process Metoda	Filler Material/Svařovací materiál φ (mm)	Classification/Klasifikace	Type/Polarita	Amperage/ Proud (A)	Voltage/Napětí (V)	Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)	Heat input (kJ/mm) Tepelný příkon (kJ/mm)
1-3	135	1,2	OK Autrod 12.51	DC+	220-240	23-24	30	0,86-0,98
3-m	135	1,2	OK Autrod 12.51	DC+	260-320	27-29	25	1,43-1,89
n-k	135	1,2	OK Autrod 12.51	DC+	260-320	27-29	25	1,43-1,89
l-x	135	1,2	OK Autrod 12.51	DC+	280-340	28-30	20	2,0-2,6
<b>Remarks / Poznámky:</b>  Tack welding shall be performed accordance with WPS. Not Peening during and after welding.								

Prepared (Name, Date, Signature): 22.5.2017  
 Připravil (jméno, datum, podpis): Michal Kepř

Approved (Name, Date, Signature):  
 Schválil (jméno, datum, podpis): Ing. Jaroslav Kubíček

PŘÍLOHA 10 : WPS-2726-3-PT-6

<b>VUT BRNO</b> FSI	<b>WPS</b>	Welding Procedure Specification specifikace svařovacího postupu	WPS No./č.: WPS-2726-3-PT-6	Rev.: 0			
			Date/Datum: 22.5.2017	Pg./Str.: 1/1			
<b>Welding Process/Metoda:</b> 1. 135 2. Type of Weld/Typ svař.: BW - neasymetrický oboustranný 1/2 V svar překrytý koutovým svarem Backing/Podložka: N.A. Other/Ostatní: Welder Svářeč		<b>Supporting/Související</b>					
<b>Base metal / Základní materiál:</b> Material 1: S 355 J2 G3 EN10025-2 Group: 1.2 Outside Dia./Vnější Thickness/Thoušťka: 70 mm Material 2: S 355 J2 G3 EN10025-2 Group/Sk.: 1.2 Outside Dia./Vnější Thickness/Thoušťka: 35 mm Remark/Poznámka:							
<b>Filler Material / Svařovací materiál:</b> Classification: 1. EN ISO 14 341A, G 42 3 M21 3Si1 Klasifikace: EN ISO 14 341A, G 42 3 M21 3Si1 Designation: 1. OK Autrod 12.51 Označení: OK Autrod 12.51 Size/Průměr: 1. 1,2 mm 2. Name-Type of Flux/Jméno-typ tavidla: Drying of F.M./Sušení svař. mat.: 1. °C   2. Replaces/Náhrada: 1. 2.		<b>Gas / Plyn:</b> 12-15 l/min % l/min Shielding/O. svaz: 1. Ar+18%CO2 M21 2. Backing/O. kolena: 1. N.A. 2. Trail/ing/Dodatečná: 1. N.A. 2. Remark/Poznámka: EN ISO 14175					
<b>Joint Design / Tvar spoje:</b> 		<b>Welding Sequences / Postup svařování:</b> 					
<b>Preheat / Předehřev:</b> Preheat Temp./Teplota předehřevu: 197 °C Intergases: 297 °C Post Heating/Dohřev: Ano °C h Překrytí termoisolačním mat.		Cooling After W./Ochlazení po s: still air / klidný vzduch Temp. Control/Kontrola teploty: 170 °C Remark/Poznámka:					
<b>Post Weld Heat Treatment / Tepelné zpracování po svařování:</b> Type/Typ: Žhání pro snížení zbytkových napětí Temperature/Teplota: 580 °C Time/Čas: 110 min.		Heating Rate/Rychlost ohřevu: 70 °C/h Cooling Rate/Rychlost ochlazení: 70 °C/h Remark/Poznámka:					
<b>Technique / Technika svařování:</b> Tungsten El/Wolframová elektroda: φ mm Type - Edge Prep/Práha/Připrava úkosu: machined / obráběný Method of Cleaning/Metoda čištění: mechanical / mechanicky Method of Back Gauging/Drátkování kolena: mechanical / mechanicky Remark/Poznámka:		Type of Bead/Tvar housenky: 1. string - rovná 2. Weaving / Rozkyv: 1. N.A. 2. Pulsing/Pulzace: 1. N.A. 2. Oscillation/Osdlacení: 1. N.A. 2.					
<b>Welding Parameters / Svařovací parametry:</b>							
Layer(s) Vrstva	Process Metoda	Filler Material/Svařovací materiál φ (mm) Classification/Klasifikace	Type/Polarity Typ/Polarita	Amperage/Prud (A)	Voltage/Nápaní (V)	Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)	Heat Input (kJ/mm) Teplotní příkon(kJ/mm)
1-3	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98
4-6	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	220-240	23-24	30	0,86-0,98
7-m	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89
n-k	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	260-320	27-29	25	1,43-1,89
l-x	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	280-340	28-30	20	2,0-2,6
y-z	135	1,2 OK Autrod 12.51	DC/+	280-340	28-30	20	2,0-2,6
<b>Remarks / Poznámky:</b> Tack welding shall be performed accordance with WPS. Not Peening during and after welding.							

Prepared (Name, Date, Signature): 22.5.2017  
 Připravil (jméno, datum, podpis): Michal Keprt

Approved (Name, Date, Signature):  
 Schválil (jméno, datum, podpis): Ing. Jaroslav Kubiček