

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2018

**ONDŘEJ
HLINKA**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hlinka** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **459538**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrhu a ověřování těsnění přírubových spojů jaderných elektráren

Název bakalářské práce anglicky:

Design and Verification of Seals for Flanges in Nuclear Power Plants

Pokyny pro vypracování:

Práce bude obsahovat rešerši těsnění pro jaderné elektrárny, se zvláštním zaměřením na těsnění z expandovaného grafitu. Návrh zařízení pro testování přírubových spojů. Pevnostní a termohydraulické výpočty testovacího zařízení. Metody sběru dat a řízení testovacího zařízení.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D., ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **17.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **04.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**

doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Návrh a ověřování těsnění přírubových spojů jaderných elektráren“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Václava Dostála, Ph.D. a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 31. 5. 2018

.....

Ondřej Hlinka

Anotační list

Jméno autora:	Ondřej Hlinka
Název BP:	Návrh a ověřování těsnění přírubových spojů jaderných elektráren
Anglický název:	Design and Verification of Seals for Flanges in Nuclear Power Plants
Akademický rok:	2017/2018
Ústav:	Ústav energetiky
Vedoucí BP:	doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Lukáš Turza, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 55 Počet obrázků: 10 Počet tabulek: 17 Počet příloh: 5
Klíčová slova:	těsnění, jaderná elektrárna, expandovaný grafit, tlakové zařízení, ČSN EN 13480, T-kus
Keywords:	seals, power plant, expanded graphite, pressure device, ČSN EN 13480, tee
Anotace:	Bakalářská práce se zaměřuje na těsnění pro jaderné elektrárny, především pak na těsnění z expandovaného grafitu. Obsahuje základní legislativní požadavky pro návrh tlakového zařízení, které umožňuje těsnění testovat. Práce popisuje výpočty rovinných i zahnutých částí potrubí a odboček. Dále obsahuje návrh a pevnostní výpočty testovacího zařízení spolu s principy testování a jeho parametry.
Abstract:	This thesis is focused on the seals in nuclear power plants, especially on the seals from expanded graphite. It contains the basic legislative requirements for the design of the pressure device, which enables testing of the seals. The thesis describes the calculation of straight and bended piping parts and tees. It deals with the design and strength calculation of the testing device, testing methodology and its parameters.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Václavu Dostálovi, Ph.D. za vstřícný přístup, za čas, který mi věnoval a za odbornou pomoc při vypracování této práce.

Obsah

Seznam použitých veličin a jednotek.....	8
0. Úvod.....	9
1. Těsnění v jaderných elektrárnách.....	10
1.1. Základní princip výroby elektrické energie v jaderných elektrárnách.....	10
1.2. Základní způsoby utěsnění spoje.....	11
1.2.1. Těsnění v hlavním silovém toku.....	12
1.2.2. Těsnění ve vedlejším silovém toku.....	12
1.3. Původní provedení těsnění jaderných elektráren.....	13
1.4. Nová technologie.....	14
1.5. Typy těsnění s expandovaným grafitem.....	14
1.5.1. Hřebenové těsnění.....	14
1.5.2. Hřebenové těsnění s předepjatou grafitovou vložkou.....	15
1.5.3. Těsnící kroužky z expandovaného grafitu.....	16
1.6. Potřeba testování.....	17
2. Právní předpisy pro návrh zařízení.....	18
2.1. Klasifikace tlakových zařízení.....	18
2.2. Základní bezpečnostní požadavky.....	20
2.3. Metody návrhu.....	21
2.3.1. Výpočtová metoda.....	21
2.3.2. Experimentální metoda.....	22
2.4. Tlaková zkouška.....	23
3. Materiál pro navrhované potrubí.....	24
3.1. Základní vlastnosti.....	24
3.2. Mechanické vlastnosti (při 20 °C).....	24
3.3. Chemické složení.....	25
3.4. Vlastnosti za vyšších teplot.....	26
4. Základní vztahy pro výpočet tloušťky stěny.....	24
4.1. Přímá část potrubí.....	27
4.2. Dovolené namáhání.....	28
4.3. Součinitel hodnoty svarového spoje.....	29
4.4. Přídavek na korozi a erozi.....	29
4.5. Záporná tolerance tloušťky stěny a přídavek na nepřesnost výroby.....	30
4.6. Tloušťka stěny s přídavky a tolerancemi.....	31

4.7.	Zahnuté části potrubí.....	32
4.7.1.	Normální postup.....	32
4.7.2.	Zpřesněný postup.....	33
4.7.2.1.	Výpočet napětí.....	35
5.	Výpočet tloušťky stěny trubky.....	37
5.1.	Výpočet přímé části potrubí.....	37
5.2.	Výpočet pro kontrolu ohybu trubky.....	38
5.2.1.	Výpočet dle normální metody.....	38
5.2.2.	Výpočet dle zpřesněné metody.....	39
5.2.2.1.	Výpočet na základě vnitřního průměru.....	39
5.2.2.2.	Výpočet na základě vnějšího průměru.....	40
5.2.3.	Pevnostní výpočet namáhání potrubí v ohybu.....	42
5.2.3.1.	Výpočet pomocí vnitřního průměru.....	42
5.2.3.2.	Výpočet pomocí vnějšího průměru.....	43
6.	Připojení odboček.....	44
6.1.	Vzorce pro stanovení minimální tloušťky stěny odbočky.....	44
6.2.	Stanovení minimální tloušťky odbočky pro zatížení způsobená tlakem.....	45
6.3.	Model testovací větve a ověření pomocí výpočtového softwaru.....	46
7.	Způsob měření a sběru dat.....	47
7.1.	Schéma testovací větve.....	47
7.2.	Měření veličin.....	47
7.3.	Testovací parametry těsnění.....	48
8.	Závěr.....	50
9.	Zdroje.....	51
10.	Seznam příloh.....	52
11.	Přílohy.....	53

Seznam použitých veličin a jednotek

Symbol	Význam	Jednotka
T	teplota	°C
p	tlak	MPa
p _c	výpočtový přetlak	MPa
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu 0,2 %	MPa nebo N/mm ²
R _{p1,0}	smluvní mez kluzu 1,0 %	MPa nebo N/mm ²
R _{eH}	mez kluzu	MPa nebo N/mm ²
R _m	mez pevnosti	MPa nebo N/mm ²
R _{p0,2t}	smluvní mez kluzu 0,2 % při výpočtové teplotě	MPa nebo N/mm ²
R _{p1,0t}	smluvní mez kluzu 1,0 % při výpočtové teplotě	MPa nebo N/mm ²
R _{eHt}	mez kluzu při výpočtové teplotě	MPa nebo N/mm ²
R _{mt}	mez pevnosti v tahu při výpočtové teplotě	MPa nebo N/mm ²
D ₀	vnější průměr	mm
D _i	vnitřní průměr	mm
D _m	střední průměr	mm
A	tažnost	-
e	požadovaná tloušťka stěny přímé trubky bez přídavků a tolerancí	mm
e _{int}	požadovaná tloušťka stěny na vnitřní straně ohybu	mm
e _{ext}	požadovaná tloušťka stěny na vnější straně ohybu	mm
e _r	požadovaná tloušťka stěny s přídavky a tolerancemi	mm
ε	přídavná tloušťka	mm
e _{ord}	objednaná tloušťka stěny	mm
e _n	nominální tloušťka	mm
e _a	analyzovaná tloušťka	mm
f	dovolené namáhání	MPa nebo N/mm ²
z	součinitel hodnoty svarového spoje	-
c ₀	korozní a erozní přídavek	mm
c ₁	absolutní hodnota negativní tolerance tloušťky stěny	mm
c ₂	přídavek na ztenčení při výrobě	mm
B	konstrukční součinitel	-
c	součinitel zeslabení	-
R	poloměr zaoblení vztažený ke střední hodnotě trubky	mm
r	poloměr zaoblení pro rozdílné tloušťky stěny	mm
e _{ab}	analyzovaná tloušťka připojené trubky	mm
e _{as}	analyzovaná tloušťka průběžné trubky	mm
φ _b	úhel mezi osami trubek	°
e _s	minimální tloušťka stěny průběžné trubky	mm
e _b	minimální tloušťka stěny připojené trubky	mm

0. Úvod

V současné době jsou v provozu stovky jaderných elektráren, v České Republice vyrábí Jaderné elektrárny Temelín a Dukovany přibližně 40 % celkové elektrické energie. Přestože se jedná o velmi moderní způsob výroby, stále můžeme proces zdokonalovat. Jednou z možností, která výrobu energie v jaderných elektrárnách zdokonaluje, je využití těsnění s expandovaným grafitem. Využívá se hlavně v nejvíce namáhaných zařízeních, které se podílí na bezpečnosti celé elektrárny. Těsnění z expandovaného grafitu umožňuje především bezpečnější, ale také levnější provoz, navíc prodlužuje životnost jednotlivých zařízení.

Tato práce poskytuje základní legislativní požadavky pro návrh tlakového zařízení, na základě kterých můžeme vyrobit testovací větev pro testování těsnění. Provádění testů je nezbytné právě kvůli následnému zavedení do reálného provozu.

Při návrhu konkrétních částí tlakového potrubí i jednotlivých ohybů a odboček je nutné postupovat podle platných norem, které jsou v této práci také shrnuty. Řeší se zde především minimální tloušťky stěn a jednotlivé přídatky pro zajištění bezpečného provozu testovacího zařízení.

Práce také zachycuje princip získávání natlakovaného, ohřátého média pro testování těsnění a požadavky na parametry během testování. Uvádí též metody a způsob získávání dat během ověřování daného těsnění.

Výstupem by měl být bezpečný návrh nových částí testovací větve, které budou odpovídat současným platným normám a požadavkům, popřípadě vyhotovení počítačových modelů, které je možné ověřit pomocí výpočtových softwarů.

1. Těsnění v jaderných elektrárnách

1.1. Základní princip výroby elektrické energie v jaderných elektrárnách

V dnešní době se ve světě používá více typů jaderných elektráren. Nejčastěji se setkáme s reaktorem typu VVER (PWR), jde o tlakovodní reaktor chlazený a moderovaný vodou. V České republice máme dvě jaderné elektrárny, obě používají právě tlakovodní reaktor. Jaderná elektrárna Temelín vyrábí elektrickou energii ve dvou blocích VVER 1000, druhá jaderná elektrárna Dukovany disponuje 4 reaktory typu VVER 440. Jako palivo se používá oxid uraničitý ve formě palivových tablet umístěných v palivovém prutu.

Proces výroby elektřiny v jaderné elektrárně se odehrává v několika krocích. Nejdříve se v reaktoru uvolní teplo při štěpné reakci. Tato energie je dále předávána pomocí parogenerátorů do sekundárního okruhu a následně přivedena na turbínu, kterou pohání. Turbína je spojena s rotorem generátoru, pomocí kterého se ve statoru indukují elektrické napětí a vzniká tak elektrický proud.

V primárním okruhu cirkuluje voda, která prochází aktivní zónou reaktoru. Zde přijímá teplo vzniklé štěpnou reakcí. Na výstupu z reaktoru dosahuje teplota vody okolo 300 °C (ETE 324 °C, EDU 297 °C)¹. Pro správný odvod tepla z aktivní zóny je potřeba zajistit, aby protékající voda zůstala v kapalně fázi. Toho docílíme pomocí vysokého tlaku v primárním okruhu (ETE 15,7 MPa, EDU 12,25 MPa). Voda v primárním okruhu musí být chemicky upravena.

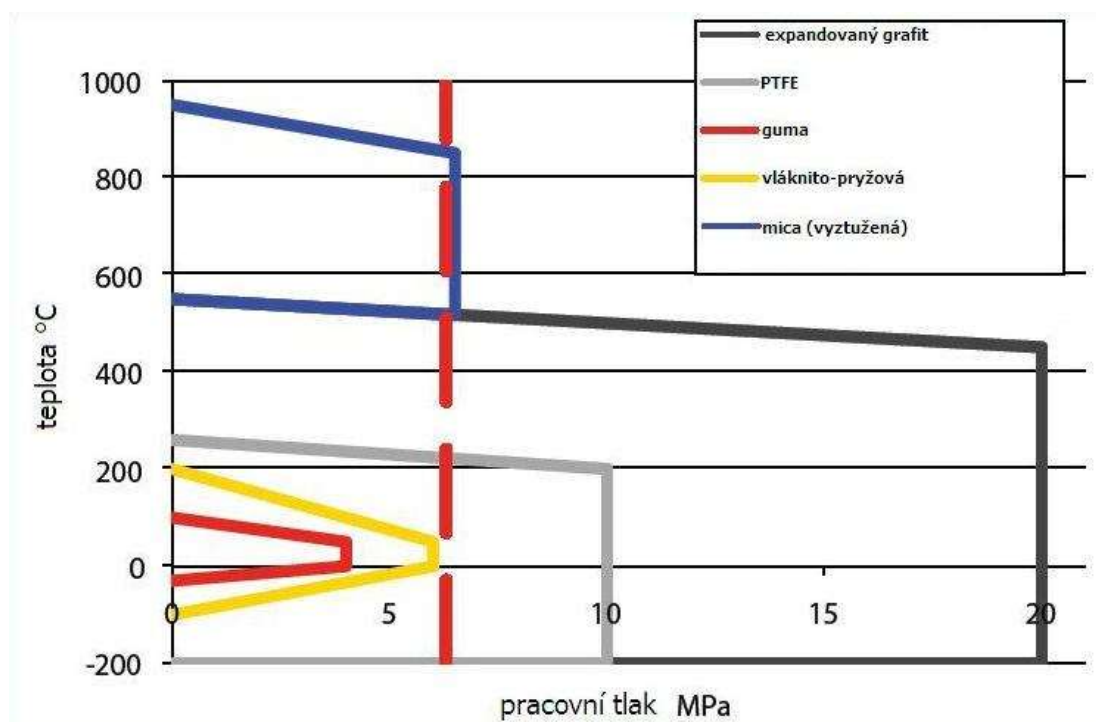
Ohřátá voda je dopravována pomocí cirkulačních čerpadel do parogenerátoru. Jde o tepelný výměník, který předá teplo z primárního okruhu do sekundárního tím, že ohřívá vodu v sekundárním okruhu, a ta se mění v páru. I tato voda, která cirkuluje v sekundárním okruhu, musí být chemicky upravena. Pára se následně přivádí na vysokotlaký díl turbíny a díky rozpínání roztáčí lopatky turbíny. Voda primárního okruhu vystupuje z parogenerátoru při teplotě 256 °C (EDU), 297 °C (ETE) a tlaku 4,6 (EDU) nebo 6,3 MPa (ETE).

¹ EDU znamená Jaderná elektrárna Dukovany
ETE znamená Jaderná elektrárna Temelín

Z výše uvedených údajů plyne, že je nezbytné zajistit kvalitní těsnění především v primárním okruhu. Jedná se zejména o důležitá zařízení – parogenerátor, hlavní cirkulační čerpadlo, kompenzátor objemu či víko reaktoru. Bez těchto zařízení se proces výroby energie neobejde. Obzvláště v jaderné elektrárně má kvalita těsnění zásadní roli, protože je zde nutné zabránit úniku radioaktivních látek. Nesmíme zapomínat i na další možné následky poruchy těsnění. V podstatě každá porucha na těchto důležitých zařízeních téměř jistě znamená odstavení bloku, přerušení výroby elektřiny a s tím spojené peněžní ztráty.

1.2. Základní způsoby utěsnění spoje

Rozlišujeme těsnění kov na kov, zde se používá jako těsnicí materiál nejčastěji hliník, měď, nikl nebo ocel. Další skupinou jsou měkká těsnění, sem řadíme pryž, PTFE = polytetrafluorethylen (teflon) či grafit. Mezi měkká těsnění řadíme také azbest, který byl v minulosti často využíván. Díky jeho karcinogenním vlastnostem je od 80. let minulého století zakázán. Další velká skupina, která se často využívá jsou těsnění kombinovaná (spirálová, hřebenová, sendviče). Ne každé těsnění lze použít na všechny aplikace, rozhodujeme se především podle provozních parametrů, nejdůležitější jsou teplota, tlak a druh dopravované tekutiny. Obrázek č. 1.1 ukazuje možnosti použití měkkých těsnění pro aplikace, ve kterých se dopravuje voda.



Obr. 1.1: Použitelnost měkkých těsnění [4]

Spoj je během provozu zatížen tlakem média a také jednotlivými komponenty potrubí. Musíme uvažovat tíhu potrubí či změny délky způsobené teplotní roztažností. Nezanedbatelný vliv mohou mít i dynamické účinky proudící kapaliny, radiální posuv nebo vibrace. V případě jaderných elektráren se musí řešit i účinky seismicity. Je nutné důkladně prozkoumat možné kombinace těchto namáhání, které mohou při provozu zařízení nastat. Na základě toho se provádí výběr těsnícího materiálu.

1.2.1. Těsnění v hlavním silovém toku

Rozlišujeme dvě základní provedení, jak spoj utěsnit. Přírubový spoj v hlavním silovém toku (HST) spočívá v umístění těsnícího materiálu mezi rovné plochy přírub a přenáší tak veškeré zatížení vyvolané předepnutím šroubů. Působící tlak musí být dostatečně velký, aby vyvolal odpovídající deformace těsnění a uzavřel tak netěsnosti. Na druhou stranu je potřeba zajistit, aby nedošlo k příliš velkým deformacím. Při překročení mezních hodnot dojde k trvalému poškození a takové těsnění není dále schopné správně plnit svou funkci.

Důvodem, proč se těsnění umístí do HST, je především použití normovaných přírub a těsnění v závislosti na vnitřním přetlaku a průměru spoje. Existují normované výpočty pro dimenzování, tím pádem je návrh konstrukce relativně bezproblémový a rychlý. Vlastnosti těsněného spoje přímo závisí na velikosti montážního předpětí šroubů. Z toho plyne další výhoda, možnost ovlivnit chování těsnění za provozu pomocí předpětí ve šroubech.

Každé technické řešení pochopitelně přináší i nevýhody. Mezi ty nejzásadnější patří nepřípustná netěsnost při selhání těsnění. Velký vliv plastických deformací jednotlivých částí spoje (příruby, šrouby i těsnění) na snížení napětí působící na těsnění. Nezanedbatelné změny napětí v závislosti na vnějším namáhání. Velké změny tlaku vyvolávají teplotní změny, při kterých se jednotlivé části nerovnoměrně ohřívají. K tomu dochází především při najíždění a odstavování zařízení. Spoj s těsněním v HST vykazuje menší odolnost při dynamickém namáhání. Určit axiální rozměry spoje po montáži lze jen s menší přesností, těsnění nezanedbatelně změní svoji tloušťku.

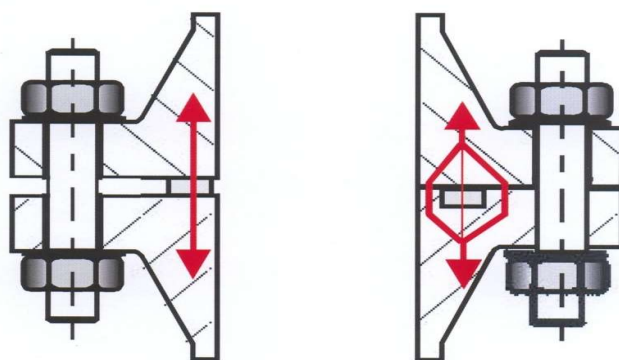
1.2.2. Těsnění ve vedlejší silovém toku

Druhou možností přírubového spoje je umístit těsnění do vedlejšího silového toku (VST). V tomto případě je těsnění umístěné v drážce, která je většinou pouze v jedné z přírub. Druhá příruba má tedy rovnou těsnící plochu. Při montáži je nutné zajistit, aby

došlo ke kontaktu těsnících ploch a aby byl kontakt zachován i za provozu. Napětí potřebné právě pro dosažení kontaktu mezi plochami je charakteristickou hodnotou těsnění ve VST. Další zvyšování předpětí je přenášeno pouze přes kontaktní plochy, tedy kov na kov. Z tohoto důvodu musí být příruby dostatečně tuhé, aby nedocházelo k jejich ohybu, což by mohlo vést ke ztrátě kontaktu.

Spoje provedené pomocí VST jsou mnohem tužší než spoje v HST. Tím pádem umožňují přenos vyššího namáhání. Další výhodou je, že lze přesně stanovit osový rozměr spoje po montáži. Při správném návrhu se nemění tlak na těsnění za provozu. Výhodné pro spoje s požadavkem seismické odolnosti.

Nevýhodou je, že neexistuje norma pro návrh přírub s VST, ani pro určení charakteristických hodnot těsnění. Vlastnosti jsou dány pouze jednoduchými charakteristickými hodnotami, které popisují těsnost spoje při určitém vnitřním přetlaku. Nutnost vyžádat údaje od výrobce.



Obr. 1.2: Těsnění v hlavním (vlevo) a vedlejším silovém toku (vpravo) [4]

1.3. Původní provedení těsnění jaderných elektráren

Dříve se v důležitých zařízeních a jejich exponovaných spojích běžně používalo azbestové těsnění nebo niklový drát kruhového průřezu, který je vložen do dvou klínových drážek a následně deformován při utažení plochého víka. Deformace vzniká utahováním šroubů, při kterém vneseme předpětí. Opakující se závady na závitech parogenerátoru vedly k požadavku vývoje náhradního řešení. Oprava takové závady znamená odstavení bloku, což vede k finančním ztrátám a zároveň vystavuje pracovníky, kteří opravu provádějí, vyššímu radioaktivnímu záření.

1.4. Nová technologie

Jako velice efektivní náhrada klasických těsnění se ukázalo těsnění pomocí expandovaného grafitu. Tato technologie přináší řadu výhod, především snadné umístění do již fungujících zařízení, snadná výměna, ekologická nezávadnost, použitelnost při vysokých teplotách či odolnost proti většině chemikálií. Velice důležitou výhodou je snížení potřebného předpětí v daném spoji (až o 50 %) díky dobrým elastickým vlastnostem grafitu. Tento fakt by měl eliminovat vznik poruch. Výhodou jsou také výborné samomazné vlastnosti.

Velmi výhodné je použití expandovaného grafitu do ucpávek armatur, kde docílíme nejen zvýšení těsnosti, ale také výrazného zvýšení životnosti vřeten a ucpávek. Také lze dosáhnout menších přestavných sil a klesají též nároky na údržbu.

1.5. Typy těsnění s expandovaným grafitem

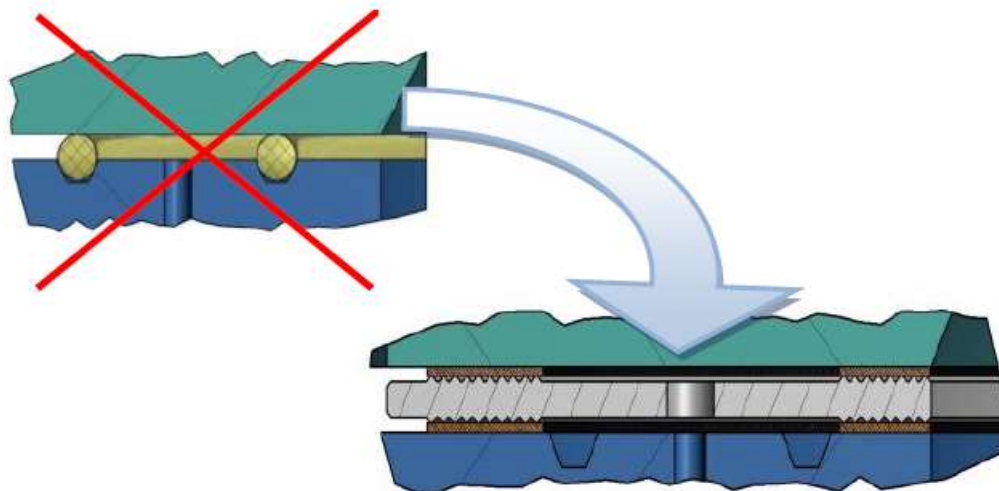
1.5.1. Hřebenové těsnění

Skládá se z nosné kostry s hřebenovým profilem, který je vyroben z nerezové oceli a obložený vyrobeného z expandovaného grafitu. Tloušťka grafitové fólie a profil hřebene jsou navrženy tak, aby nedošlo k prořezání fólie. Díky tomu nedochází k otlacení těsnících ploch přírub a zároveň ani kovového hřebene. Vzájemná vazba těchto parametrů umožňuje variabilní nastavení předpokládané hodnoty těsnosti a intervalu zpětného odpružení. Velkou výhodou této technologie je prakticky neomezený počet výměn grafitových fólií, neboli příložek, a to bez nutnosti měnit ocelový hřeben. To vede k úspoře finančních nákladů při pravidelné výměně těsnění. Tuto technologii lze použít do nových i stávajících spojů.

Nízká hodnota minimálního tlaku a vysoká pevnost včetně vysoké tepelné a chemické odolnosti umožňuje univerzální použití na místa, kde dříve byla klasická měkká těsnění, stejně tak lze použít jako náhradu kovových těsnění. Náhradou starých typů za tyto hřebenová těsnění s expandovaným grafitem běžně dosáhneme snížení utahovacích sil o deset až třicet procent.

Spoje těsněné tímto způsobem najdeme na většině důležitých míst jaderné elektrárny Temelín i Dukovany – parogenerátor, kompenzátor objemu, hlavní cirkulační čerpadlo (viz příloha 11.1).

Dvuhřebenová konstrukce umožňuje monitorování meziprostoru, který je propojen se systémem monitorování úniku. Tato konstrukce zajišťuje bezpečný provoz i v případě netěsnosti na vnitřním hřebenu. V takovém případě by se voda z primárního okruhu dostala pouze do meziprostoru mezi hřebeny, ale zabránilo by se kontaminaci vody v sekundárním okruhu elektrárny, či úniku mimo potrubí.



Obr. 1.3: Hřebenové těsnění s expandovaným grafitem [3]

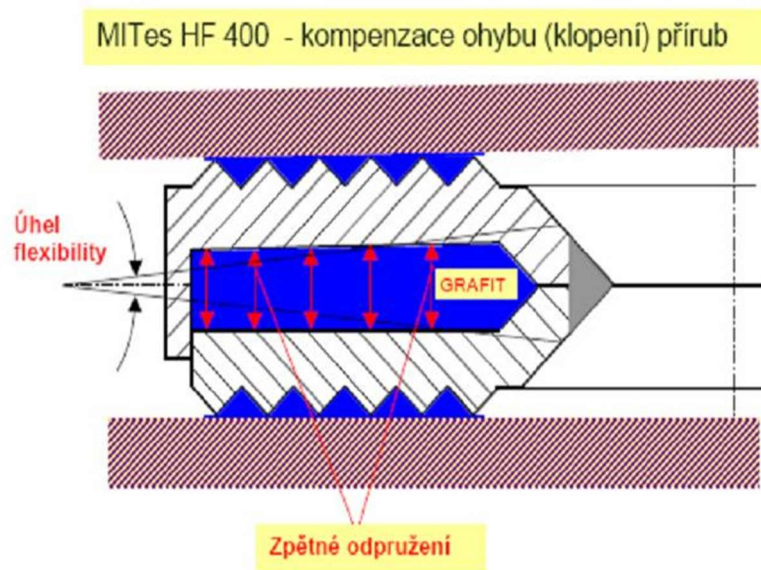
1.5.2. Hřebenové těsnění s předepnutou grafitovou vložkou

Jde o inovované řešení běžného hřebenového těsnění. Kovový hřeben je rozdělený na dvě části, které se mohou vůči sobě pohybovat. Mezi těmito částmi se nachází vložka z expandovaného grafitu, která výrazně zvyšuje hodnotu zpětného odpružení. Stejně jako u běžného provedení je hřeben obklopen z obou stran fólií z expandovaného grafitu, která je navržena tak, aby nedocházelo k prořezání a tím pádem se nepoškozuje povrch přírub ani samotného hřebene. Toto řešení umožňuje snadnou renovaci těsnění pouhou výměnou částí z expandovaného grafitu, což dlouhodobě vede k úspoře peněz.

Toto provedení přináší řadu výhod. Jednou z nich je vysoká flexibilita zajištěna předepnutou grafitovou vložkou. Výrazně se zde snižují těsnící síly, což vede k prodloužení životnosti celého zařízení. Zpětné odpružení přináší stabilní těsnost i při razantním uvolnění předpětí ve šroubech za všech provozních režimů i v nejdelších časových intervalech.

Hřeben dělený na dvě části přináší další velkou výhodu, protože umožňuje natočení. Díky tomu se hřebenové těsnění s předepnutou grafitovou vložkou hodí na použití především pro normalizované příruby. S vysokou přesností kompenzuje jejich

ohyb a umožňuje dosáhnout vysoké přesnosti, minimálně o řád vyšší než v případě běžného hřebenového těsnění.



Obr. 1.4: Hřebenové těsnění s předepnutou grafitovou vložkou [3]

1.5.3. Těsnící kroužky z expandovaného grafitu

Jedná se o flexibilní těsnění s velkou těsností pro aplikace do vedlejšího silového toku. Těsnící kroužky z expandovaného grafitu umožňují velmi přesné nastavení požadovaných těsnících charakteristik. To se odehrává v závislosti na provozních parametrech a na skutečných geometrických rozměrech místa, u kterého potřebujeme zajistit vysokou těsnost a provozní spolehlivost po dlouhou dobu provozu.

Těsnící kroužky mají neměnné vlastnosti. Vynikají především v hodnotě nastaveného předpětí a mají výborné hodnoty zpětného odpružení. To zaručuje stálost nastavené těsnosti i při velmi vysokých tlacích těsněného media.

Jedno z možných provedení jsou dělené závitové kroužky z expandovaného grafitu. Ty slouží pro utěsnění závitových částí šroubů nebo svorníků. Lze je použít ve velmi stísněných místech a zároveň i pro vysoké tlaky.

I toto provedení nabízí řadu výhod. Jednou z předností je jejich jednoduchost. Pro samotné utěsnění úplně postačí prakticky sražená hrana výběhu závitů. Dělené kroužky mají velké zpětné odpružení, které je zajištěno vysokou hustotou grafitu.



Obr. 1.5: Těsnící kroužky z expandovaného grafitu (vlevo) a dělené závitové kroužky (vpravo) [3]

1.6. Potřeba testování

Kvalitní utěsnění spojů je základním požadavkem nejen u tlakovodních typů elektráren. Obzvláště v primárním okruhu je nezbytné zajistit funkční těsnění, které je základní podmínkou pro bezpečný a bezproblémový chod celé elektrárny. V případě stávajících elektráren je nutné nahrazovat starší typy těsnění novými a lepšími metodami. Potřebujeme takové technické řešení, které umožní menší utahovací síly, což zvýší nejen bezpečnost, ale také životnost daného zařízení.

Jako vhodná náhrada se jeví těsnění obsahující expandovaný grafit. Umožňuje snížit nutné předpětí ve šroubech, navíc je navrženo tak, že je poměrně snadno použitelné do již vybudovaných zařízení. V dnešní době se už těsnění s expandovaným grafitem v jaderných elektrárnách používá. Pro některé aplikace je však nutnost jeho vlastností experimentálně ověřit. Z tohoto důvodu se tato bakalářská práce zaměřuje na návrh testovací sekce pro ověřování těsnění.

2. Právní předpisy pro návrh zařízení

Pro ověřování těsnění je potřeba navrhnout novou část testovací větve, která se připojí ke stávajícímu zařízení. Toto zařízení umožní zkoumat těsnění pomocí protékající vody, kterou lze ohřát až na 300 stupňů Celsia, zároveň lze dosáhnout vnitřního přetlaku až 20 MPa. Stávající testovací větev odpovídá vyhlášce č. 18/1979 Sb. Českého úřadu bezpečnosti práce a Českého báňského úřadu. Tato vyhláška dnes již není platná.

Nová část zařízení, která má být navržena, by měla odpovídat současným platným normám a předpisům. Návrh testovací větve pracující s vnitřním přtlakem podléhá Směrnici Evropského parlamentu a Rady 2014/68/EU ze dne 15. května 2014 o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se dodávání tlakových zařízení na trh. Z této směrnice vychází i české Nařízení vlády ze dne 7. července 2016 o posuzování shody tlakových zařízení při jejich dodávání na trh.

V tomto dokumentu najdeme základní technické požadavky právě pro návrh tlakového zařízení. „Toto nařízení se vztahuje na návrh, výrobu a posuzování shody tlakových zařízení a sestav s nejvyšším dovoleným tlakem PS větším než 0,5 bar.“ [5] Hodnota tlaku 0,5 bar odpovídá hodnotě 0,05 MPa. Ostatní zařízení, která jsou zatěžována tlakem menším než 0,5 bar, podle těchto dokumentů nepředstavují významné riziko kvůli působení tlaku. Proto se na ně tyto předpisy nevztahují.

2.1. Klasifikace tlakových zařízení

Směrnice definuje tlakové zařízení jako „nádoby, potrubí, bezpečnostní výstroj a tlaková výstroj, případně včetně prvků připojených k součástem vystaveným tlaku, jako jsou přírubby, hrdla, spojky, podpory, závěsná oka“ [6].

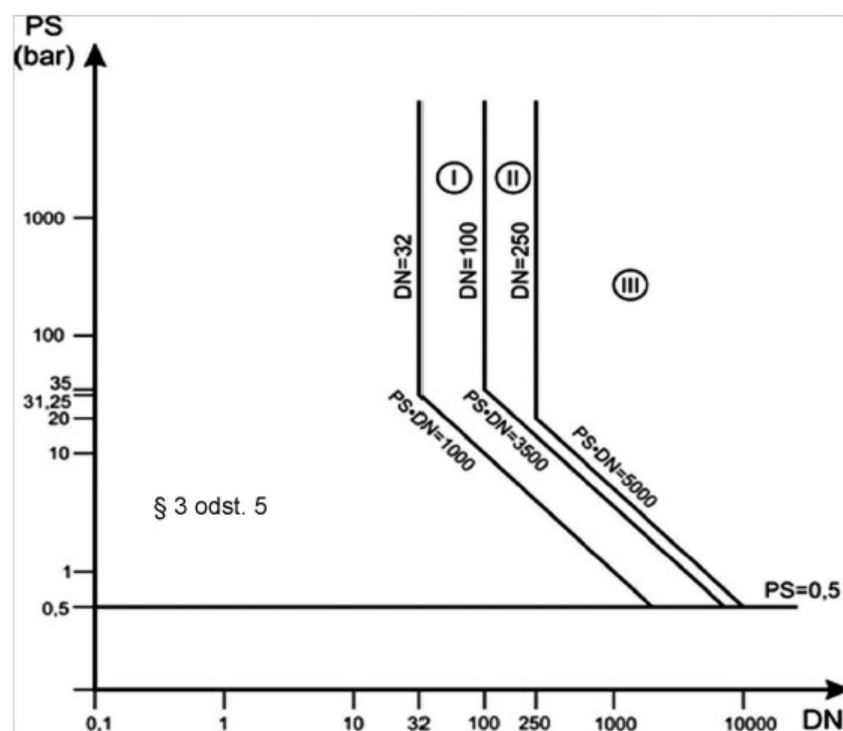
Tlaková zařízení se v příslušných dokumentech rozdělují do 4 kategorií v závislosti na stoupající nebezpečnosti. Rozhodující parametry pro správný výběr kategorie jsou typ tekutiny, její objem, nejvyšší dovolený tlak PS a jmenovitá světlost DN. Kategorii, do které zařízení spadá, určíme z příslušného grafu. Navíc dokument rozlišuje dvě skupiny tekutin, a to právě pro účely tohoto rozdělení na kategorie.

Skupina 1 obsahuje především látky a směsi, které jsou nějakým způsobem nebezpečné – jejich bod vzplanutí je nižší než nejvyšší dovolená teplota v zařízení. Patří sem například výbušniny a toxické látky, hořlavé, oxidující nebo samozápalné kapaliny a plyny. Skupina 2 pak obsahuje všechny látky, které nejsou zahrnuty do první skupiny.

Každé tlakové zařízení je nutné podrobit jednomu z postupů posuzování shody. Vhodný postup se vybere právě podle dané kategorie a skupiny. Konkrétní postup v podstatě udává výrobci, jak řídit výrobu a jak provádět kontrolu výroby. Výrobce má právo zvolit si některý z postupů určených pro danou kategorii, do které je zařízení zařazeno. Další možností je použití některý z postupů určených pro vyšší kategorii.

V případě nižších kategorií postačuje interní řízení výroby a kontrola v náhodně zvolených intervalech. Pro vyšší kategorie platí přísnější pravidla. Výrobce je povinen nechat zařízení přezkoušet u tzv. oznámeného subjektu, který technický návrh tlakového zařízení ověří. Následně potvrdí, že zařízení splňuje požadované body této směrnice.

Tlaková zařízení, která mají nízké hodnoty parametrů a tím pádem nespádají ani do první kategorie „musí být navrženy a vyrobeny v souladu se správnou technickou praxí používanou v některém z členských států Evropské unie, aby bylo zajištěno jejich bezpečné používání“ [5]. Speciální výjimku pak mohou mít zařízení, která jsou určena k experimentálním účelům.



Obr. 6: Graf pro určení kategorie tlakového potrubí [5]

Evropské prohlášení o shodě je pak dokument, který potvrzuje splnění všech základních bezpečnostní požadavků stanovených evropskou směrnicí. Tímto výrobce potvrzuje, že je zařízení schopno provozu a zároveň je v souladu s požadavky. Přebírá

tím odpovědnost za dané zařízení. Další povinností výrobce je uchovávaní technické dokumentace k zařízení, stejně tak prohlášení o shodě, a to po dobu 10 let od uvedení na trh.

2.2. Základní bezpečnostní požadavky

Základní bezpečnostní požadavky najdeme v příloze jedna evropské směrnice nebo nařízení vlády. Zde se blíže specifikují informace o návrhu, výpočtových metodách, prostředcích kontroly a o provozu zařízení. Splnění požadavků je nutné prokázat posuzováním shody.

Hlavním cílem těchto požadavků je zajistit vysokou bezpečnost zařízení a s tím související ochrany zdraví. „Tlakové zařízení musí být navrženo, vyrobeno a zkontrolováno, případně vybaveno a instalováno takovým způsobem, aby byla po jeho uvedení do provozu v souladu s návodem výrobce nebo za rozumně předvídatelných podmínek zajištěna jeho bezpečnost.“ [6] Výrobce je povinen analyzovat možná rizika, která mohou nastat v důsledku působení tlaku v zařízení. Tyto rizika musí být zohledněna při návrhu zařízení.

Výrobce by měl především v přiměřeně dosažitelné míře vyloučit či omezit možná nebezpečí. Pokud to není možné, musí použít vhodná ochranná opatření. V případě, že i přesto zůstanou možná rizika, měl by upozornit uživatele na nutnost přijmout vhodná opatření, která by zbylá rizika snížila.

Při návrhu je nutné zohlednit všechny důležité činitele. V první řadě se snažíme zajistit bezpečnost daného zařízení po celou dobu předpokládané životnosti. Mezi nejdůležitější činitele patří: vnitřní a vnější tlak, teplota okolí a pracovní teplota, statický tlak a hmotnost obsahu za provozních podmínek, reakční síly a momenty vyvozované upevněním, korozi, erozi a únavu materiálu.

S ohledem na dobu předpokládané životnosti se volí i materiály použité k výrobě tlakového zařízení. Ty musí být schopné vydržet po celou plánovanou dobu, pokud se nepředpokládá jejich výměna v průběhu životnosti celého zařízení. Materiál musí být dostatečně chemicky odolný vůči proudící tekutině. Nesmí docházet k významným změnám fyzikálních a chemických vlastností během provozu, pokud by mohli mít vliv na bezpečnost provozu.

Zvolený materiál nesmí být významně ovlivnitelný stárnutím. Při jeho výběru je třeba zohlednit vzájemné spojení s okolními materiály, aby se předešlo nežádoucím účinkům. Důležité je zvolit vhodný materiál vzhledem k zamýšleným technologickým postupům, například svařování.

Ocel lze považovat za vhodný materiál, pokud splňuje základní požadavky. Mezi hlavní požadavky patří dostatečná tažnost materiálu. Mezní hodnotou, pod kterou nesmí tažnost klesnout, je 14 %. Další zásadní parametr je nárazová práce zjišťovaná při zkoušce rázem v ohybu. Měření probíhá na zkušební tyči s V vrubem podle ISO. Hodnota nárazové práce musí být vyšší než 27 J při teplotě nepřekračující 20 °C. Zároveň teplota nesmí být vyšší než nejnižší předpokládaná pracovní teplota.

Směrnice dále předepisuje, že krátkodobí navýšení tlaku nesmí přesáhnout 10 % hodnoty nejvyššího dovoleného tlaku. K tomu je potřeba použít zařízení omezující tlak.

2.3. Metody návrhu

Rozlišujeme dvě základní metody pro návrh – výpočtovou a experimentální. Většinou se návrh zakládá na výpočtové metodě, která může být v případě potřeby doplněna o experimentální část. Samotné experimentální metody se využívá v případě, že je „součin nejvyššího dovoleného tlaku PS a objemu V menší než 6 000 bar/l nebo je-li součin PS a DN menší než 3 000 bar“ [6]. Tato hodnota odpovídá tlaku 300 MPa.

Při výpočtech se musí použít vhodné součinitele bezpečnosti. K tomu se využijí komplexní metody, u kterých je zaručena přiměřená míra bezpečnosti. Ta by měla zahrnovat veškeré možné poruchy, které přicházejí v úvahu.

2.3.1. Výpočtová metoda

Výpočtová metoda se zabývá dovoleným namáháním, to musí být omezeno tak, aby zohledňovalo případné poruchy zařízení, které lze rozumně předvídat. Existují tři metody návrhu, které lze i kombinovat:

- návrh na základě vzorců
- návrh na základě analýzy
- návrh na základě lomové mechaniky

Z hlediska pevnosti je nutné použít vhodné konstrukční výpočty. Výpočtové parametry se musí řídit především následujícími pravidly:

- výpočtový tlak nesmí být menší než nejvyšší dovolený tlak
- výpočtová teplota musí poskytovat vhodnou bezpečnost
- návrh musí zohlednit všechny rozumné kombinace teploty a tlaku, které mohou za provozu nastat

Dále je potřeba zabývat se vlastnostmi materiálu, které zjistíme z materiálových listů. Mezi hlavní materiálové vlastnosti, který musí návrh zohledňovat, patří:

- mez kluzu, případně smluvní mez kluzu při 0,2 %, resp. 1,0 %, při výpočtové teplotě
- pevnost v tahu
- časově závislá pevnost, tj. pevnost při tečení
- únavové hodnoty
- Youngův modul (modul pružnosti)
- vhodný rozsah plastické deformace
- hodnota tažnosti
- lomová houževnatost

Pokud jde o část potrubí, která obsahuje svarový spoj, musíme aplikovat na materiálové vlastnosti vhodné součinitele hodnoty spoje. Dalším jevem, který je nezbytné do výpočtu zahrnout, je koroze. Pokud je potrubí vyrobeno z méně ušlechtilé oceli a hrozí, že bude podléhat korozi, přidává se konstrukční přírůstek na korozi.

2.3.2. Experimentální metoda

Druhou možností ověření návrhu tlakového zařízení je experimentální metoda. Ta se skládá z řady zkoušek uskutečněných na reprezentativním vzorku zařízení. Ještě před začátkem testování se stanoví kritéria, podle kterých se následně zařízení schválí či odmítne uznat za způsobilé. Změří se skutečné hodnoty základních rozměrů a vlastností materiálů, ze kterých se dané zařízení skládá.

V průběhu experimentů se sleduje stav kritických částí v místech, kde to připadá v úvahu. Program zkoušek musí obsahovat tlakovou zkoušku. Jejím účelem je zkontrolovat, jestli zařízení nevykazuje významné netěsnosti nebo deformace, které překračují stanovenou mez. Dále musí obsahovat vhodné zkoušky, které vyloučí riziko

tečení nebo únavy, pokud předpokládáme, že takové riziko hrozí. Mezi takové zkoušky patří např. doba provozu při předepsané teplotě nebo počet cyklů při předepsaných úrovních napětí.

2.4. Tlaková zkouška

Zkouška odolnosti vůči tlaku je součástí konečného posudku funkčnosti tlakového zařízení. Tlaková zkouška má obvykle podobu zkoušky hydrostatickým tlakem. Pro správné stanovení hydrostatického zkušební tlaku platí následující pravidla, ze kterých plynou nutné součinitele bezpečnosti. Tlak nesmí být menší než některá z těchto hodnot:

- „tlak odpovídající maximálnímu zatížení, kterému smí být tlakové zařízení vystaveno za provozu se zřetelem k nejvyššímu dovolenému tlaku a nejvyšší dovolené teplotě tlakového zařízení, vynásobený koeficientem 1,25“ [6]
- nejvyšší dovolený tlak vynásobený koeficientem 1,43

3. Materiál pro navrhované potrubí

Nově navržená část testovací větve musí umožňovat testy při vysokých teplotách až do 300 stupňů Celsia, zároveň při pracovním přetlaku až 20 MPa a také musí být odolná vůči proudící tekutině, v tomto případě vodě.

Zvolený materiál, ze kterého bude potrubí vyrobeno, nese označení 1.4541 dle ČSN 10 088-1. Jde o korozi-vzdornou chrom-niklovou austenitickou ocel, která se právě kvůli svým vlastnostem často používá v chemickém průmyslu a stavebnictví. Odolává korozi a kyselinám. Dle starého českého značení ji můžeme najít jako ocel 17 246, podle platného evropského značení jako X6CrNiTi18-10.

3.1. Základní vlastnosti

Vybraná ocel má vynikající odolnost vůči korozi, a to i v prostředích se slabšími kyselinami. Navíc se vyznačuje korozi odolností až do teplot okolo 650 °C [13]. Umožňuje bezproblémové svařování i bez přídavného materiálu. Hustota je 7900 kg/m³ a tvrdost se pohybuje v rozmezí 130 až 190 HB.

Běžně se používá v chemickém průmyslu pro výrobu potrubí, armatur a přírub. Vyrábí se z ní také zásobníky na skladování kyselin a rozpouštědel. Používá se zejména pro aplikace při 300 °C a více. Vyšší obsah niklu může být na hranici použitelnosti pro pitnou vodu.

3.2. Mechanické vlastnosti (při 20 °C)

Pevnost v tahu dosahuje hodnot R_m 500 až 700 N/mm², smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ minimálně 200 N/mm² a tažnost A minimálně 40 %. Tepelná vodivost je 20 W/mK, elektrický odpor 0,73 μΩ/cm a měrná tepelná kapacita 500 J/kgK. Minimální hodnota nárazové práce při pokojové teplotě 20 °C KV_2 se rovná 60 J. [7]

Výchozím vztahem pro použití austenitických ocelí je operace žíhání. Provádí se v rozmezí teplot 1000 až 1100 °C, následné chlazení se provádí vodou, popřípadě intenzivním vzduchem. Jde o rozpouštěcí žíhání a následné ochlazování na okolní teplotu by mělo být provedeno rychle. Tato skupina ocelí není kalitelná a za běžných podmínek nemá magnetické vlastnosti. Zpracovává se technologií stříhání, ohýbaní nebo tažení. Lze ji třískově obrábět. Ocel má sklon ke zpevňování za studena. K tomu dochází právě při tažení materiálu, nebo při třískovém obrábění, které je provedeno nevhodnými řeznými

podmínkami. Během procesu zpevňování dochází ke vzniku martenzitu, ten způsobí zvýšení pevnosti, sníží tažnost a může způsobit vznik magnetických vlastností.

3.3. Chemické složení

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti
≤ 0,08	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 0,040	≤ 0,015	17 až 19	9 až 12	-	5x C až 0,70

Obsahy jsou uvedeny v procentech.

Tabulka 3.1: Chemické složení oceli 1.4541 [8]

Strukturu této oceli tvoří převážně austenit, který vzniká při dostatečném obsahu austenitotvorných látek, mezi které patří zejména nikl, mangan a dusík. Abychom docílili požadované korozní odolnosti a dobrých mechanických vlastností, je nezbytné přidat další legující prvky. Z příložené tabulky je jasně vidět, že tato ocel obsahuje vysoký podíl legujících prvků. Především chrom, nikl, mangan a titan.

Chrom způsobuje tvorbu karbidů a zvyšuje tak tvrdost a pevnost materiálu, zároveň dochází k jen nepatrnému snížení tažnosti. Pokud ocel obsahuje více jak 12 % chromu, je odolná vůči korozi. Vysoký podíl v oceli 1.4541 má také nikl. Ten umožňuje také zvýšení pevnosti při malé ztrátě tažnosti. Nikl zvyšuje houževnatost (zejména při nízkých teplotách), zároveň nijak negativně neovlivňuje svařitelnost materiálu. Chrom-niklové oceli jsou nejen odolné vůči korozi, ale také proti okujení a jsou také žárovečné.

Další významná legura obsažená v této oceli je titan. Tento prvek se přidává především kvůli stabilizaci mezikrystalové koroze. Zabraňuje vzniku karbidů chromu CrC až do teplot okolo 650 °C. K mezikrystalové korozi může dojít při tepelném zpracování nebo při svařování, pokud je následně materiál pomalu ochlazován. V kritické oblasti teplot přibližně mezi 600 až 800 °C se vylučují karbidy po hranicích zrn. Tento proces způsobuje vznik mezikrystalové koroze vlivem ochuzení zmíněných oblastí o chrom.

Tomuto nežádoucímu jevu lze zabránit vhodnou konfigurací obsažených prvků. Podmínkou je velmi nízký obsah uhlíku, a právě legující prvek titan (popřípadě může být nahrazen niobem).

Oceli legované titanem jsou odolné po svaření i bez dodatečné tepelné úpravy. Tato vlastnost se nemění ani při větších rozměrech výrobku.

3.4. Vlastnosti za vyšších teplot

Jelikož bude materiál zatěžován a používán i za vysokých teplot je potřeba znát charakteristiky materiálu právě i při těchto vysokých teplotách. Pro pevnostní výpočty jsou rozhodující hlavně smluvní meze kluzu: $R_{p0,2}$ značí smluvní mez kluzu pro 0,2 %. Jde o napětí, které způsobí trvalou deformaci o velikosti 0,2 % z původní délky. Obdobně $R_{p1,0}$ označuje napětí, které způsobí deformaci o jedno procento původní délky.

Teplota T (°C)	$R_{p0,2}$ (N/mm ²)	$R_{p1,0}$ (N/mm ²)	Modul pružnosti (kN/mm ²)
100	176	208	200
200	157	185	186
300	136	167	179
400	125	156	172
500	119	149	165

Tabulka 3.2: Mechanické vlastnosti oceli 1.4541 za vyšších teplot [7], [8]

4. Základní vztahy pro výpočet tloušťky stěny

Na základě směrnice popsané v předchozí kapitole vznikly normy, které detailnějším způsobem popisují požadavky na tlaková zařízení. Přesná výpočtová pravidla pro kovová potrubí poskytuje evropská norma ČSN EN 13480-3. Konstrukce a výpočet tlakových částí netopených tlakových nádob vyrobených z ocelí je blíže popsána v evropské normě ČSN EN 13445-3.

Odtud pochází základní výpočtové vztahy tloušťky stěny kovové trubky zatížené vnitřním přetlakem. Výpočet však nezahrnuje další silové účinky, které mohou na potrubí působit. Vlastní tíhu potrubí nebo izolace, účinky tepelné roztažnosti musíme případně uvažovat zvlášť.

4.1. Přímá část potrubí

Minimální požadovaná tloušťka stěny přímé trubky bez tolerancí a přídavků, která je zatížena vnitřním přetlakem, se vypočítá podle následujících vztahů v závislosti na rozměrech zvolené trubky:

- když $\frac{D_0}{D_i} \leq 1,7$

$$e = \frac{p_c \cdot D_0}{2 \cdot f \cdot z + p_c} \quad (4.1)$$

nebo

$$e = \frac{p_c \cdot D_i}{2 \cdot f \cdot z - p_c} \quad (4.2)$$

- když $\frac{D_0}{D_i} > 1,7$

$$e = \frac{D_0}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{f \cdot z - p_c}{f \cdot z + p_c}} \right) \quad (4.3)$$

nebo

$$e = \frac{D_i}{2} \cdot \left(\sqrt{\frac{f \cdot z + p_c}{f \cdot z - p_c}} - 1 \right) \quad (4.4)$$

Symboły ve vzorcích mají následující význam: p_c označuje výpočtový přetlak, ten nesmí být menší než příslušný maximální pracovní přetlak, D_0 značí vnější průměr

trubky, D_i značí vnitřní průměr trubky, f značí dovolené namáhání materiálu a z značí součinitel hodnoty podélného svarového spoje.

Výpočet tloušťky stěny válcové nádoby zatížené vnitřním přetlakem se počítá obdobně. Použité značky a zkratky by pak musely odpovídat značení v normě ČSN EN 13445-3.

4.2. Dovolené namáhání

Nezbytným parametrem pro výpočet stěny trubky je dovolené namáhání f . To je také dáno normou ČSN EN 13480-3 v kapitole 6. Zde jsou specifikovány vzorce pro jeho výpočet v závislosti na zvoleném typu materiálu. Vždy je popsáno namáhání za provozu a také namáhání při testování.

Návrhové provozní podmínky pro jiné než austenitické oceli:

$$f = \min \left\{ \frac{R_{eHt}}{1,5}; \frac{R_{p0,2t}}{1,5}; \frac{R_m}{2,4} \right\} \quad (4.5)$$

Pro potřeby testování, by měl projektant zajistit, aby jmenovité návrhové namáhání při testu nepřesahovalo 95 % R_{eH} při testovací teplotě.

Pro austenitické oceli:

- pro případ, že tažnost $A \geq 35$ %

$$f = \frac{R_{p1,0t}}{1,5} \quad (4.6)$$

nebo pokud je hodnota R_{mt} dostupná

$$f = \min \left\{ \frac{R_{mt}}{3}; \frac{R_{p1,0t}}{1,2} \right\} \quad (4.7)$$

- pro případ 35 % $> A \geq 30$ %

$$f = \min \left\{ \frac{R_{p1,0t}}{1,5}; \frac{R_m}{2,4} \right\} \quad (4.8)$$

- pro případ A menší než 30 % se výpočet provádí stejně jako pro neaustenitické oceli

$$f = \min \left\{ \frac{R_{eHt}}{1,5}; \frac{R_{p0,2t}}{1,5}; \frac{R_m}{2,4} \right\} \quad (4.9)$$

Dále jsou zde uvedeny podmínky pro testování také v závislosti na tažnosti austenitického materiálu. Pro $A \geq 35 \%$ by měl projektant zajistit, aby jmenovité návrhové namáhání při testu nepřesahovalo $95 \% R_{eH}$ a $45 \% R_m$ při testovací teplotě.

Pro případ $35 \% > A \geq 30 \%$ nesmí hodnoty přesáhnout $95 \% R_{p1,0t}$. Pro situaci, kdy je A menší než 30% nesmí hodnoty dosáhnout $95 \% R_{eH}$ nebo $95 \% R_{p0,2}$ při testovací teplotě.

4.3. Součinitel hodnoty svarového spoje

Další veličina užívaná ve vzorci je součinitel hodnoty svarového spoje z . Udává kvalitu svaru trubky, zohledňuje rozsah kontroly po svařování. Jeho hodnota vyplývá z mechanických a plastických vlastností svaru. Musí být použit ve výpočtu tloušťky stěny, pokud daná součást obsahuje jeden nebo více tupých svarů jiných než obvodových.

V případě zařízení, která byla podrobena „destruktivním a nedestruktivním zkouškám, které potvrzují, že celá skupina svarů nevykazuje žádné významné vady“ [11], použijeme součinitel 1. Pro zařízení, která byla podrobena pouze namátkovým nedestruktivním zkouškám, volíme součinitel nejvýše 0,85. Pokud nedošlo k žádným nedestruktivním zkouškám, ale pouze k vizuální kontrole, můžeme použít součinitel maximálně 0,7. U potrubí vyrobených z bezešvých trubek se použije součinitel 1.

4.4. Přídavek na korozi a erozi

Pokud očekáváme snížení tloušťky stěny v důsledku koroze, tj. potrubí je vyrobeno z materiálu podléhajícího korozi na vnitřním nebo vnějším povrchu, je nutné uvažovat přídavek na korozi c_0 . Ten musí být tak velký, aby zajistil vyhovující tloušťku stěny po celou dobu životnosti.

Množství přidaného materiálu musí odpovídat celkovému koroznímu úbytku na jednom nebo obou površích potrubí. Tento přídavek není vyžadován v případech, kdy použijeme korozivzdorný materiál nebo přiměřenou ochranu povrchu.

Doporučené hodnoty přídávku na korozi pro nejčastěji využívané pracovní látky a běžné druhy uhlíkových ocelí je uveden v následující tabulce č. 4.1:

Pracovní látka	Přídavek na korozi a erozi c_0 [mm]
přehřátá pára	0,5
sytá pára	1
voda málo agresivní	1
vlhký vzduch	2
voda agresivní	3

Tabulka 4.1: Velikost přídávku na korozi pro často používané látky [10]

4.5. Záporná tolerance tloušťky stěny a přídavek na nepřesnost výroby

K minimální tloušťce stěny vypočítané pomocí vzorců v předchozích odstavcích je nezbytné přičíst také přídavek, který kompenzuje případné zmenšení stěny, které může vzniknout během výroby.

Záporná tolerance tloušťky stěny c_1 značí absolutní hodnotu záporné tolerance. Získáme ji z materiálových norem nebo ji poskytne výrobce. Přídavek na nepřesnost výroby c_2 zohledňuje případné ztenčení tloušťky stěny během výrobního procesu, například při obrábění, lisování nebo ohýbání.

Mezní úchytky tloušťky stěny pro bezešvé ocelové trubky pro tlakové nádoby a zařízení vyrobené z nelegovaných a legovaných ocelí se zaručenými vlastnostmi při zvýšených teplotách najdeme v normě ČSN EN 10216-2. Mezní úchytky závisí na největším průměru a tloušťce trubky.

Vnější průměr D [mm]	Mezní úchylka D	Mezní úchytky stěny T pro poměr T/D			
		$\leq 0,025$	$> 0,025$ $\leq 0,050$	$> 0,050$ $\leq 0,10$	$> 0,10$
$D \leq 219,1$	$\pm 1 \%$ nebo $\pm 0,5 \text{ mm}$	$\pm 12,5 \%$ nebo $\pm 0,4 \text{ mm}$, platí větší hodnota			
$D > 219,1$	platí větší hodnota	$\pm 20 \%$	$\pm 15 \%$	$\pm 12,5 \%$	$\pm 10 \%$ ^a

^a U vnějších průměrů $D \geq 355,6 \text{ mm}$ je povoleno místně překročit horní mezní úchylku tloušťky stěny T o dalších 5 %.

Tabulka 4.2: Mezní úchytky největšího průměru a tloušťky stěny [9]

Pro bezešvé ocelové trubky pro tlakové nádoby a zařízení, které jsou vyrobeny z korozivzdorných ocelí platí norma ČSN EN 10216-5. Zde jsou specifikovány mezní úchytky právě pro korozivzdorné oceli.

Vnější průměr D	Mezní úchytky k D		Mezní úchytky k T	
	Toleranční třída	Dovolená odchylka	Toleranční třída	Mezní úchytky
mm				
30 ≤ D ≤ 219,1	D 2	±1 % nebo ±0,5 mm větší z nich	T1	±15 % nebo ±0,6 mm větší z nich
			T2	±12,5 % nebo ±0,4 mm větší z nich
219,1 < D ≤ 219,1	D 1	±1,5 % nebo ±0,75 mm větší z nich ^a		+ 22,5 % - 15 % ^c
			T 1	±15 % nebo ±0,6 mm větší z nich ^d
			T 2	±12,5 % nebo ±0,4 mm větší z nich ^e

^a Volitelný přídavek 19: Trubky musí být objednané s tříděnými konci. T tomto případě je dovolená odchylka vnějšího průměru ±0,6 % v délce až 100 mm od konce trubky.

^b Platí pro tloušťky stěny trubek T ≤ 0,01 D a T ≤ 4 mm.

^c Platí pro tloušťky stěny trubek T ≤ 0,05 D.

^d Platí pro tloušťky stěny trubek T: 0,05 D < T ≤ 0,09 D.

^e Platí pro tloušťky stěny trubek T > 0,09 D.

Tabulka 4.3: Mezní úchytky vnějšího průměru D a tloušťky stěny T trubek objednaných v dokončeném stavu za tepla [8]

Mezní úchytky k D ≤ 219,1 mm		Mezní úchytky k T	
Toleranční třída	Dovolená úchytky	Toleranční třída	Mezní úchytky
D 3	±0,75 % nebo ±0,3 mm větší z nich	T 3	±10 % nebo ±0,2 mm větší z nich
D 4 ^a	±0,5 % nebo ±0,1 mm větší z nich	T 4 ^a	±7,5 % nebo ±0,15 mm větší z nich

^a Volitelný přídavek 20: Toleranční třídy D4 a T4 jsou předepsané pro trubky objednané ve stavu dohotovené za studena.

Tabulka 4.4: Mezní úchytky vnějšího průměru D a tloušťky stěny T trubek objednaných v dokončeném stavu za studena [8]

Svařovanými ocelovými trubkami pro tlakové účely se zabývá norma ČSN EN 10217-7, která platí pro trubky z korozivzdorných ocelí. Další část téže normy ČSN EN 10217-1 řeší Trubky z nelegovaných ocelí se zaručenými vlastnostmi při okolní teplotě.

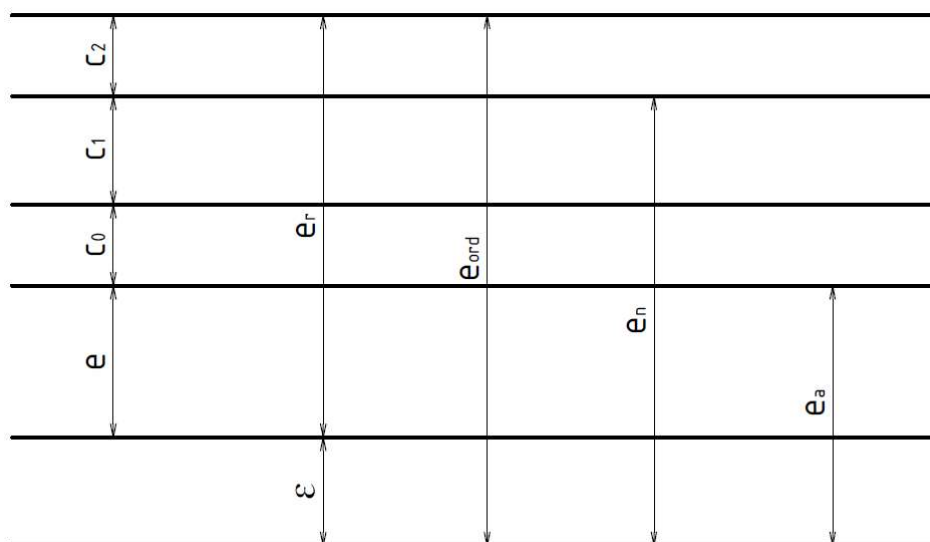
4.6. Tloušťka stěny s přídávky a tolerancemi

Výsledná tloušťka stěny včetně všech nutných přídavek se počítá:

$$e_r = e + c_0 + c_1 + c_2 \quad (4.10)$$

Kde e je minimální tloušťka stěny trubky a c_x jsou jednotlivé přídávky.

V případech, kdy jsou trubky navzájem pospojovány svary, určíme minimální požadovanou tloušťku stěny trubky ve svaru jako součet minimální tloušťky stěny přímé trubky e plus přídavek na korozi c_0 .



Obr. 4.1: Definice tloušťky stěny potrubí [11]

Obrázek č. 4.1 zachycuje, jak norma definuje jednotlivé označení tloušťky stěny. Hodnota e značí minimální požadovanou tloušťku stěny bez přídavků a tolerancí pro odolání působícího tlaku. Počítá se pomocí odpovídajících rovnic daných touto normou 13480-3. Symbol e_r značí minimální požadovanou tloušťku stěny s přídavky a tolerancemi. ε (epsilon) je přídavná tloušťka - dána výběrem katalogového rozměru trubky, tj, plyne z hodnoty e_{ord} . Ta značí objednanou tloušťku stěny. U ní je obvykle $c_2 = 0$. Nominální tloušťka (na výkresech) se značí e_n . Symbol e_a označuje analyzovanou tloušťku, používá se pro kontrolu silového zatížení.

4.7. Zahnuté části potrubí

Dále je potřeba vyřešit tloušťku stěny u zahnutých částí potrubí. Této problematice se též dotýká norma ČSN EN 13480-3. U ohybů a kolen, je třeba zohlednit fakt, že nejvíce je namáhaná vnitřní strana ohnuté trubky, zatímco na vnější straně ohybu působí menší namáhání než u přímé trubky.

Norma specifikuje dvě metody výpočtu tloušťky stěny v ohybech a dvě metody pro kolena. Zvolená metoda se pak použije v celém rozsahu, metody by se tedy neměly kombinovat. Tato výpočtová pravidla zohledňují, vyšší napětí na vnitřní stěně ohybu.

4.7.1. Normální postup

Základní metodu pro výpočet tloušťky stěny v případě ohybů i kolen norma 13480-3 označuje jako normální postup. Pro jeho vypracování je nutné nejdříve provést výpočet pro přímé potrubí a získat tak tloušťku stěny přímého potrubí.

Minimální požadovaná tloušťka stěny bez tolerancí a přídaveků se vypočítá následovně:

- na vnitřní straně ohybu

$$e_{int} = e \cdot \frac{\left(\frac{R}{D_0}\right) - 0,25}{\left(\frac{R}{D_0}\right) - 0,5} \quad (4.11)$$

- na vnější straně ohybu

$$e_{ext} = e \cdot \frac{\left(\frac{R}{D_0}\right) + 0,25}{\left(\frac{R}{D_0}\right) + 0,5} \quad (4.12)$$

kde e značí tloušťku stěny přímého potrubí.

Z tabulky č. 4.5 můžeme v následujícím kroku zpětně dopočítat, jaké rozměry musí mít trubka před procesem ohýbání.

rádus ohybu	minimální tloušťka stěny před ohybem
$10 \cdot D_0$	$1,02 \cdot e$
$8 \cdot D_0$	$1,03 \cdot e$
$6 \cdot D_0$	$1,04 \cdot e$
$5 \cdot D_0$	$1,04 \cdot e$
$4 \cdot D_0$	$1,05 \cdot e$
$3 \cdot D_0$	$1,06 \cdot e$
$2,5 \cdot D_0$	$1,08 \cdot e$
$2 \cdot D_0$	$1,10 \cdot e$
$1,5 \cdot D_0$	$1,15 \cdot e$

Tabulka 4.5: Minimální tloušťka stěny před ohýbáním pomocí indukce pro normální postup [11]

4.7.2. Zpřesněný postup

Druhou možností výpočtu minimální tloušťky stěny najdeme v příloze B normy ČSN EN 13480-3. Jedná se o méně konzervativní metodu výpočtu pro ohýbané části a kolena oproti metodě popsané v předchozí kapitole.

Minimální požadovaná tloušťka stěny s přídavky a tolerancemi:

- na vnitřní straně

$$e_{r int} = e_{int} + c_0 + c_1 + c_2 \quad (4.13)$$

- na vnější straně

$$e_{r\ ext} = e_{ext} + c_0 + c_1 + c_2 \quad (4.14)$$

Pro výpočet napětí v případě ohybů provedených na koupených trubkách, které mají danou tloušťku stěny $e_{ord\ int}$ nebo $e_{ord\ ext}$, použijeme následující rovnice pro analýzu tloušťky stěny:

- na vnitřní straně ohybu

$$e_{a\ int} = e_{ord\ int} - c_0 - c_1 - c_2 \quad (4.15)$$

- na vnější straně ohybu

$$e_{a\ ext} = e_{ord\ ext} - c_0 - c_1 - c_2 \quad (4.16)$$

Tloušťka stěny na vnitřní straně ohybu:

$$e_{int} = e \cdot B_{int} \quad (4.17)$$

Výpočtový koeficient B lze počítat pro vnitřní i vnější část ohybu. Protože z předchozí kapitoly víme, že větší namáhání vzniká vždy na vnitřní straně, stačí řešit pouze koeficient B_{int} . Pro jeho stanovení existují rovnice nebo lze koeficient odečítat z grafu, který je také součástí normy. Koeficient B závisí na poloměru ohybu a na vnitřním, či vnějším průměru potrubí.

- pro ohyby se specifikovaným vnitřním průměrem

$$B_{int} = \frac{r}{e} - \frac{D_i}{2 \cdot e} - \sqrt{\left(\frac{r}{e} - \frac{D_i}{2 \cdot e}\right)^2 - 2 \cdot \frac{r}{e} + \frac{D_i}{2 \cdot e}} \quad (4.18)$$

Koeficient B_{int} jako funkce $\frac{r}{D_i}$ může být odečtený z grafu B.4.1-1.

- pro ohyby se specifikovaným vnějším průměrem

$$B_{int} = \frac{D_0}{2 \cdot e} + \frac{r}{e} - \left(\frac{D_0}{2 \cdot e} + \frac{r}{e} - 1\right) \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{r}{e}\right)^2 - \left(\frac{D_0}{2e}\right)^2}{\left(\frac{r}{e}\right)^2 - \frac{D_0}{2 \cdot e} \cdot \left(\frac{D_0}{2 \cdot e} - 1\right)}} \quad (4.19)$$

Koeficient B_{int} jako funkce $\frac{R}{D_0}$ může být odečtený z grafu B.4.1-2.

$$\frac{r}{e} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{D_0}{2e} \right)^2 + \left(\frac{R}{e} \right)^2 \right\}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\left(\frac{D_0}{2e} \right)^2 + \left(\frac{R}{e} \right)^2 \right)^2 - \frac{D_0}{2e} \left(\frac{D_0}{2e} - 1 \right) \left(\frac{R}{e} \right)^2} \quad (4.20)$$

Rovnice dávají stejné výsledky pouze pokud platí:

$$D_0 = D_i + e_{int} + e_{ext} \quad \text{a} \quad R = r - \frac{e_{int} - e_{ext}}{2} \quad (4.21), (4.22)$$

V případě jednotné tloušťky stěny na vnitřním i vnějším povrchu se výpočet minimální požadované tloušťky stěny provede následovně:

$$e_{int} = e_{ext} = e \cdot B \quad (4.23)$$

- pro kolena s daným vnitřním průměrem $B = B_{int}$

$$B_{int} = \frac{r}{e} - \frac{D_i}{2 \cdot e} - \sqrt{\left(\frac{r}{e} - \frac{D_i}{2 \cdot e} \right)^2 - 2 \cdot \frac{r}{e} + \frac{D_i}{2 \cdot e}} \quad (4.24)$$

nebo z grafu B.4.1-1. B je funkce $\frac{r}{D_i}$

- pro kolena s daným vnějším průměrem

$$B = \frac{D_0}{2 \cdot e} - \frac{R}{e} + \sqrt{\left(\frac{D_0}{2 \cdot e} - \frac{R}{e} \right)^2 + 2 \cdot \frac{R}{e} - \frac{D_0}{2 \cdot e}} \quad (4.25)$$

nebo z grafu B.4.1-3. B je funkce $\frac{R}{D_0}$

Rovnice dávají stejné výsledky pouze pokud

$$D_0 = D_i + 2e_{int} \quad \text{a} \quad R = r \quad (4.26), (4.27)$$

4.7.2.1. Výpočet napětí

Součástí tohoto zpřesněného výpočtu je také pevnostní výpočet, který kontroluje velikost namáhání ohýbané části potrubí. Počítá střední hodnotu napětí pro vnitřní stranu ohybu:

- pro ohyby s daným vnitřním průměrem

$$f_{m \text{ int}} = \left(\frac{D_i \cdot p_c}{2 \cdot z \cdot e_{a \text{ int}}} \frac{2 \cdot r - 0,5 \cdot D_i}{2 \cdot r - D_i - e_{a \text{ int}}} \right) + \frac{p_c}{2} \leq f \quad (4.28)$$

- pro ohyby s daným vnějším průměrem

$$f_{m \text{ int}} = \left\{ \frac{p_c \cdot (D_0 - e_{a \text{ int}} - e_{a \text{ ext}})}{2 \cdot z \cdot e_{a \text{ int}}} \cdot \frac{2 \cdot R - 0,5 \cdot D_0 + 1,5 \cdot e_{a \text{ int}} - 0,5 \cdot e_{a \text{ ext}}}{2 \cdot R - D_0 - e_{a \text{ int}}} \right\} + \frac{p_c}{2} \leq f \quad (4.29)$$

V normě se používá pro značení poloměru zaoblení r i R . Velké R značí rádius vztažený ke střední hodnotě trubky, která je dána místem $\frac{D_0}{2}$. Malé r značí rádius zaoblení, který zohledňuje rozdílné tloušťky stěny na vnitřním a vnějším povrchu. Malé r je tedy dáno středem vnitřní části potrubí.

5. Výpočet tloušťky stěny trubky

Smyslem následujících výpočtů je stanovit minimální tloušťku stěny, respektive zjistit, jestli zadaná trubka vyhovuje pevnostním výpočtům. Zvolená trubka je vyrobena z materiálu 1.4541 a má tyto základní rozměry: vnější průměr $D_0 = 40$ mm, vnitřní průměr $D_i = 30$ mm a tloušťka stěny $e_{ord} = 5$ mm. Jde o běžně dodávaný rozměr, který je na trhu běžně dostupný a tím pádem i cenově přijatelný.

Tato trubka musí zároveň navazovat na původní část potrubí, které je vyrobeno z trubky o rozměrech 44,5 x 7. To odpovídá staršímu značení dle ČSN 425715 (D x t). Vnější průměr původní trubky je tedy $D_0 = 44,5$ mm a vnitřní průměr $D_i = 30,5$ mm. Proto musí mít nová část potrubí vnitřní průměr 30 až 35 mm.

5.1. Výpočet přímé části potrubí

Základním rozhodujícím kritériem je poměr $\frac{D_0}{D_i}$:

$$\frac{D_0}{D_i} = \frac{40}{30} \cong 1,33 \leq 1,7 \quad (5.1)$$

Použijeme tedy vzorec (4.1), do kterého dosadíme následující hodnoty. Výpočtový přetlak je $p_c = 20$ MPa, součinitel svaru $z = 1$, protože jde o bezešvou trubku. Nyní stanovíme dovolené namáhání. Na základě znalosti materiálu, kdy víme jeho tažnost $A = 40$ %, spočítáme pomocí příslušného vzorce (5.6) dovolené namáhání:

$$f = \frac{R_{p1,0t}}{1,5} = \frac{R_{p1,0\ 300}}{1,5} = \frac{167}{1,5} \text{ MPa} \quad (5.2)$$

$$e = \frac{p_c \cdot D_0}{2 \cdot f \cdot z + p_c} = \frac{20 \cdot 40}{2 \cdot \frac{167}{1,5} \cdot 1 + 20} = 3,3 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Pro kontrolu můžeme provést ještě výpočet pomocí dalšího vzorce (4.2), který norma povoluje:

$$e = \frac{p_c \cdot D_i}{2 \cdot f \cdot z - p_c} = \frac{20 \cdot 30}{2 \cdot \frac{167}{1,5} \cdot 1 - 20} = 2,96 \text{ mm} \quad (5.4)$$

Minimální výpočtová tloušťka stěny trubky je tedy 3,3 mm. Potrubí je vyrobeno z korozivzdorné oceli, takže není nutné uvažovat přídavek na korozi. K této minimální výpočtové tloušťce je nutné přidat přídavek kvůli záporné toleranci tloušťky stěny. K tomu slouží příslušné tabulky mezních úchylek.

Dovolené úchytky pro korozivzdorné trubky dokončované za studena (viz tabulka 4.4), toleranční třída T3 (připouští větší nepřesnosti než třída T4) definuje mezní úchytky tloušťky: $\pm 10\%$ nebo $\pm 0,2\text{ mm}$ (větší z nich)

Z toho plyne výpočet přídatku c_1 :

$$c_1 = T \cdot 10\% = 5 \cdot 0,1 = 0,5\text{ mm} \quad (5.5)$$

nebo

$$c_1 = 0,2\text{ mm} \quad (5.6)$$

Výsledný přídatek je tedy větší z hodnot 0,5 mm a 0,2 mm. Přídatek c_1 jsem stanovil 0,5 mm. Z toho dostáváme výslednou minimální potřebnou tloušťku stěny trubky včetně přídatků a tolerancí podle rovnice (4.10):

$$e_r = e + c_0 + c_1 + c_2 = 3,3 + 0,5 = 3,8\text{ mm} \quad (5.7)$$

Z toho vyplývá, že námi zvolená trubka se stěnou 5 mm tomuto minimálnímu požadavku vyhovuje.

5.2. Výpočet pro kontrolu ohybu trubky

5.2.1. Výpočet dle normální metody

Minimální potřebná tloušťka stěny na vnitřní straně trubky vychází z rovnice (4.11). Hodnota je závislá na poloměru ohybu R .

Názorný výpočet pro $R = 100\text{ mm}$:

$$e_{int} = e \cdot \frac{\left(\frac{R}{D_0}\right) - 0,25}{\left(\frac{R}{D_0}\right) - 0,5} = 3,3 \cdot \frac{\left(\frac{100}{40}\right) - 0,25}{\left(\frac{100}{40}\right) - 0,5} = 3,71\text{ mm} \quad (5.8)$$

V následujícím kroku opět musíme přičíst přídatky, jediný nenulový $c_1 = 0,5\text{ mm}$.

$$e_r = e + c_0 + c_1 + c_2 = 3,71 + 0,5 = 4,21\text{ mm} \quad (5.9)$$

Pro $R = 100\text{ mm}$ potřebujeme minimální tloušťku stěny v ohybu 4,21 mm. Z tabulky č. 4.5 určíme, že $\text{radius } 100\text{ mm} = 2,5 \cdot D_0$, tomu odpovídá výpočet potřebné tloušťky stěny před ohybem:

$$1,08 \cdot e = 1,08 \cdot 4,21 = 4,55\text{ mm} \quad (5.10)$$

Trubka se stěnou tloušťky 5 mm pro tento rádius $R = 100$ mm vyhovuje.

Následující tabulka 5.1 zachycuje výpočet minimální tloušťky stěny před ohybem na základě výpočtu normálním postupem pro různé hodnoty R .

R [mm]	e_{int} [mm]	přídavek c_1 [mm]	R $= x \cdot D_0$	$e_{int} + c_1$ [mm]	e před ohybem [mm]
120	3,63	0,5	$3 \cdot D_0$	4,13	$1,06 \cdot e = 1,06 \cdot 4,13 = 4,38$
100	3,71	0,5	$2,5 \cdot D_0$	4,21	$1,08 \cdot e = 1,08 \cdot 4,21 = 4,55$
80	3,85	0,5	$2 \cdot D_0$	4,35	$1,10 \cdot e = 1,10 \cdot 4,35 = 4,79$
60	4,13	0,5	$1,5 \cdot D_0$	4,63	$1,15 \cdot e = 1,15 \cdot 4,63 = 5,32$

Tabulka 5.1: Výpočet minimální tloušťky stěny před ohýbáním pomocí normálního postupu

Z tabulky č. 5.1 vyplývá, že námi zvolená trubka o tloušťce stěny 5 mm může být ohýbána. Je však potřeba zvolit takový rádius ohybu, aby nedošlo k příliš velkému ztenčení na vnitřní straně trubky. V tomto případě by rádius měl být větší než přibližně 70 mm.

5.2.2. Výpočet dle zpřesněné metody

5.2.2.1. Výpočet na základě vnitřního průměru

Celá nová část navrženého potrubí bude vyrobena ze stejné polotovaru, tj. z trubky o stěně 5 milimetrů. Z toho můžeme usuzovat, že tloušťka stěny na vnitřní i vnější straně po ohybu bude přibližně shodná. Neboli je splněna rovnice (4.23) $e_{int} = e_{ext} = eB$.

Pokud toho zjednodušení neprovedeme, výpočet se odehraje dle rovnice (4.17) $e_{int} = e \cdot B_{int}$, která kontroluje vnitřní stranu ohybu.

Oba tyto kroky vedou k řešení pomocí stejné rovnice (4.24) a (4.18), tím pádem získáme i stejné výsledky:

$$\begin{aligned}
 B = B_{int} &= \frac{r}{e} - \frac{D_i}{2e} - \sqrt{\left(\frac{r}{e} - \frac{D_i}{2e}\right)^2 - 2\frac{r}{e} + \frac{D_i}{2e}} \\
 &= \frac{r}{3,3} - \frac{30}{2 \cdot 3,3} - \sqrt{\left(\frac{r}{3,3} - \frac{30}{2 \cdot 3,3}\right)^2 - 2\frac{r}{3,3} + \frac{30}{2 \cdot 3,3}}
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

V dalším kroku spočítáme e_{int} dle rovnice (4.17) a následně provedeme výpočet stejným způsobem jako v tabulce 5.1.

r [mm]	B	e_{int} [mm]	přídavek c_1 [mm]	R $= x \cdot D_0$	$e_{int} + c_1$ [mm]	e před ohybem [mm]
120	1,09	3,60	0,5	$3 \cdot D_0$	4,10	$1,06 \cdot e = 1,06 \cdot 4,10 = 4,35$
100	1,11	3,66	0,5	$2,5 \cdot D_0$	4,16	$1,08 \cdot e = 1,08 \cdot 4,16 = 4,49$
80	1,15	3,80	0,5	$2 \cdot D_0$	4,30	$1,10 \cdot e = 1,10 \cdot 4,30 = 4,73$
60	1,22	4,03	0,5	$1,5 \cdot D_0$	4,53	$1,15 \cdot e = 1,15 \cdot 4,53 = 5,21$

Tabulka 5.2: Výpočet minimální tloušťky stěny před ohýbáním pomocí zpřesněného postupu (varianta 1)

Norma 13480-3 připouští také odečtení koeficientu B z diagramu B.4.1-1. K tomu potřebujeme pomocný výpočet:

$$\frac{e}{D_i} = \frac{3,3}{30} = 0,11 \quad (5.12)$$

Následně z grafů lze odečíst hodnoty koeficientu B v závislosti na r a D_i :

r [mm]	D_i [mm]	$\frac{r}{D_i}$	B
120	30	$120/30=4$	1,09
100	30	$100/30=3,33$	1,105
80	30	$80/30=2,67$	1,125
60	30	$60/30=2$	1,21

Tabulka 5.3: Hodnoty B odečtené z diagramu B.4.1-1

Stejným výpočtem jako v předchozím případě dostaneme hodnoty e před ohýbáním:

r [mm]	B	e_{int} [mm]	přídavek c_1 [mm]	R $= x \cdot D_0$	$e_{int} + c_1$ [mm]	e před ohybem [mm]
120	1,09	3,60	0,5	$3 \cdot D_0$	4,10	$1,06 \cdot e = 1,06 \cdot 4,10 = 4,35$
100	1,105	3,65	0,5	$2,5 \cdot D_0$	4,15	$1,08 \cdot e = 1,08 \cdot 4,15 = 4,48$
80	1,125	3,71	0,5	$2 \cdot D_0$	4,21	$1,10 \cdot e = 1,10 \cdot 4,21 = 4,63$
60	1,21	3,99	0,5	$1,5 \cdot D_0$	4,49	$1,15 \cdot e = 1,15 \cdot 4,49 = 5,16$

Tabulka 5.4: Výpočet minimální tloušťky stěny před ohýbáním pomocí zpřesněného postupu (varianta 2)

5.2.2.2. Výpočet na základě vnějšího průměru

Pro porovnání norma povoluje další způsob ověření. Spočívá ve výpočtu či odečtení B_{int} pomocí průměru D_0 .

Výpočet pomocí vzorce (4.19):

$$\begin{aligned}
 B_{int} &= \frac{D_0}{2e} + \frac{r}{e} - \left(\frac{D_0}{2e} + \frac{r}{e} - 1 \right) \sqrt{\frac{\left(\frac{r}{e}\right)^2 - \left(\frac{D_0}{2e}\right)^2}{\left(\frac{r}{e}\right)^2 - \frac{D_0}{2e} \left(\frac{D_0}{2e} - 1\right)}} = \\
 &= \frac{40}{2 * 3,3} + \frac{r}{e} - \left(\frac{40}{2 * 3,3} + \frac{r}{e} - 1 \right) \sqrt{\frac{\left(\frac{r}{e}\right)^2 - \left(\frac{40}{2 * 3,3}\right)^2}{\left(\frac{r}{e}\right)^2 - \frac{40}{2 * 3,3} \left(\frac{40}{2 * 3,3} - 1\right)}}
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

Dále využijí rovnici (4.20), kterou pak dosadím do výpočtu (5.13):

$$\begin{aligned}
 \frac{r}{e} &= \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{D_0}{2e}\right)^2 + \left(\frac{R}{e}\right)^2 \right\}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\left(\frac{D_0}{2e}\right)^2 + \left(\frac{R}{e}\right)^2 \right)^2 - \frac{D_0}{2e} \left(\frac{D_0}{2e} - 1\right) \left(\frac{R}{e}\right)^2} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{40}{2 * 3,3}\right)^2 + \left(\frac{R}{3,3}\right)^2 \right\}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\left(\frac{40}{2 * 3,3}\right)^2 + \left(\frac{R}{3,3}\right)^2 \right)^2 - \frac{40}{2 * 3,3} \left(\frac{40}{2 * 3,3} - 1\right) \left(\frac{R}{3,3}\right)^2}
 \end{aligned} \tag{5.14}$$

R [mm]	B	e_{int} [mm]	přídavek c_1 [mm]	R $= x \cdot D_0$	$e_{int} + c_1$ [mm]	e před ohybem [mm]
120	1,10	3,63	0,5	$3 \cdot D_0$	4,13	$1,06 \cdot e = 1,06 \cdot 4,13 = 4,38$
100	1,12	3,70	0,5	$2,5 \cdot D_0$	4,20	$1,08 \cdot e = 1,08 \cdot 4,20 = 4,54$
80	1,16	3,83	0,5	$2 \cdot D_0$	4,33	$1,10 \cdot e = 1,10 \cdot 4,33 = 4,76$
60	1,23	4,06	0,5	$1,5 \cdot D_0$	4,56	$1,15 \cdot e = 1,15 \cdot 4,56 = 5,24$

Tabulka 5.5: Výpočet minimální tloušťky stěny před ohýbáním pomocí zpřesněného postupu (varianta 3)

Druhý způsob výpočtu se zakládá na odečtení B_{int} z grafu, v tomto případě odečítáme hodnoty z diagramu B.4.1-2 (součást normy 13480-3) jako funkci $\frac{R}{D_0}$.

Pomocný výpočet pro odečtení z grafu:

$$\frac{e}{D_0} = \frac{3,3}{40} = 0,08 \tag{5.15}$$

Následně z grafů lze odečíst hodnoty koeficientu B_{int} :

R [mm]	D_0 [mm]	$\frac{R}{D_0}$	B
120	40	120/40=3	1,09
100	40	100/40=2,5	1,11
80	40	80/40=2	1,15
60	40	60/40=1,5	1,23

Tabulka 5.6: Hodnoty B_{int} odečtené z diagramu B.4.1-2

Stejným výpočtem jako v předchozím případě dostaneme hodnoty e před ohýbáním:

R [mm]	B	e_{int} [mm]	přídavek c_1 [mm]	R $= x \cdot D_0$	$e_{int} + c_1$ [mm]	e před ohybem [mm]
120	1,09	3,60	0,5	$3 \cdot D_0$	4,10	$1,06 \cdot e = 1,06 \cdot 4,10 = 4,35$
100	1,11	3,66	0,5	$2,5 \cdot D_0$	4,16	$1,08 \cdot e = 1,08 \cdot 4,16 = 4,49$
80	1,15	3,80	0,5	$2 \cdot D_0$	4,30	$1,10 \cdot e = 1,10 \cdot 4,30 = 4,73$
60	1,23	4,06	0,5	$1,5 \cdot D_0$	4,56	$1,15 \cdot e = 1,15 \cdot 4,56 = 5,24$

Tabulka 5.7: Výpočet minimální tloušťky stěny před ohýbáním pomocí zpřesněného postupu (varianta 4)

Všechny čtyři výpočty dle zpřesněného postupu ukazují podobné výsledky jako v případě normálního postupu. Vyplyvá z nich, že minimální poloměr ohybu trubky o stěně 5 mm může být přibližně 70 mm.

5.2.3. Pevnostní výpočet namáhání potrubí v ohybu

5.2.3.1. Výpočet pomocí vnitřního průměru

$$f_{m\ int} = \left(\frac{D_i \cdot p_c}{2 \cdot z \cdot e_{a\ int}} \frac{2 \cdot r - 0,5 \cdot D_i}{2 \cdot r - D_i - e_{a\ int}} \right) + \frac{p_c}{2} \leq f \quad (5.16)$$

$$f_{m\ int} = \left(\frac{30 \cdot 20}{2 \cdot 1 \cdot 4,5} \frac{2 \cdot r - 0,5 \cdot 30}{2 \cdot r - 30 - 4,5} \right) + \frac{20}{2} \leq \frac{167}{1,5} \cong 111,33$$

$$e_{a\ int} = e_{ord\ int} - c_0 - c_1 - c_2 = 5 - 0,5 = 4,5\ mm \quad (5.17)$$

r [mm]	$f_{m\ int}$ [MPa]
120	82,99
100	84,52
80	87,03
60	91,87

Tabulka 5.8: Pevnostní výpočet namáhání potrubí v ohybu specifikovaného pomocí vnitřního průměru

5.2.3.2. Výpočet pomocí vnějšího průměru

$$f_{m \text{ int}} = \left\{ \frac{p_c(D_0 - e_{a \text{ int}} - e_{a \text{ ext}})}{2ze_{a \text{ int}}} \frac{2R - 0,5D_0 + 1,5e_{a \text{ int}} - 0,5e_{a \text{ ext}}}{2R - D_0 - e_{a \text{ int}}} \right\} + \frac{p_c}{2} \leq f$$

$$f_{m \text{ int}} = \left\{ \frac{20(40 - 4,5 - 4,5)}{2 \cdot 1 \cdot 4,5} \frac{2 \cdot R - 0,5 \cdot 40 + 1,5 \cdot 4,5 - 0,5 \cdot 4,5}{2R - 40 - 4,5} \right\} + \frac{20}{2} \leq f \quad (5.17)$$

R [mm]	$f_{m \text{ int}}$ [MPa]
120	89,01
100	91,74
80	96,19
60	105,35

Tabulka 5.9: Pevnostní výpočet namáhání potrubí v ohybu specifikovaného pomocí vnějšího průměru

Obě varianty pevnostního výpočtu pro kontrolu namáhání potrubí v ohybu jasně ukazují, že ohyb z pevnosti hlediska vyhovuje. Dokonce i pro malé hodnoty poloměrů ohybu ($R = 60$ mm) existuje rezerva v dosažení příslušné meze. Výpočet však počítá střední hodnotu napětí na vnitřní straně ohybu, takže skutečné maximum může být vyšší.

6. Připojení odboček

Návrh potrubí obsahuje také výpočty zaměřené na připojení odboček. V mém návrhu testovací větve se uvažuje spojení pomocí T-kusů. První variantou je T-kus vyrobený svařením ze stejného typu trubek, respektive trubek se stejnými rozměry. Jedná se o trubku navrženou a ověřenou na provoz v přímých úsecích a ohybech. Pokud navržená trubka pro tuto aplikaci nevyhoví, je nutné najít jiné řešení.

Odbočky jsou nezbytné, aby byla zajištěna správná funkce zařízení. Především umožňují změnu trendů sledovaných veličin tím, že se přepouští natlakované médium mimo sledované zařízení, nebo dochází k mísení se studenější vodou.

Návrhem a výpočtem odboček, kam spadá i naše kolmá odbočka, které se jinak říká T-kus, se zabývá kapitola 8 normy 13480-3. V její příloze O najdeme vhodné výpočtové vzorce a diagramy nezbytné k ověření navržené odbočky.

6.1. Vzorce pro stanovení minimální tloušťky stěny odbočky

Základní podmínka stanovená v normě udává maximální poměr mezi tloušťkou stěny průběžné trubky a připojené odbočky:

$$\frac{e_{ab}}{e_{as}} \leq 1,5 \quad (6.1)$$

kde e_{ab} značí analyzovanou tloušťku připojené trubky a e_{as} značí analyzovanou tloušťku průběžné trubky.

Pokud je tato podmínka splněna, můžeme podle následujících vzorců určit minimální tloušťku stěny průběžné trubky e_s a připojené odbočky e_b :

$$e_s = \frac{1}{c} \frac{p_c D_i}{2fz - p_c} (\sin\varphi_b)^{-(3/2)} \quad (6.2)$$

$$e_s = \frac{1}{c} \frac{p_c D_m}{2fz} (\sin\varphi_b)^{-(3/2)} \quad (6.3)$$

$$e_s = \frac{1}{c} \frac{p_c D_e}{2fz + p_c} (\sin\varphi_b)^{-(3/2)} \quad (6.4)$$

$$e_b = \frac{1}{c} \frac{p_c d_i}{2fz - p_c} (\sin\varphi_b)^{-(3/2)} \quad (6.5)$$

$$e_b = \frac{1}{c} \frac{p_c d_m}{2fz} (\sin\varphi_b)^{-(3/2)} \quad (6.6)$$

$$e_b = \frac{1}{c} \frac{p_c d_e}{2fz + p_c} (\sin \varphi_b)^{-(3/2)} \quad (6.7)$$

D značí rozměry průběžné trubky a d značí rozměry připojené trubky. Další dvě nové veličiny značí úhel mezi osami trubek φ_b a součinitel zeslabení c . Ten získáme odečtením z diagramů v normě na základě rozměrů konkrétního technického řešení.

6.2. Stanovení minimální tloušťky odbočky pro zatížení způsobená tlakem

Norma nabízí kontrolní výpočet pro různé kombinace zařízení potrubí. V našem případě uvažují pouze zatížení způsobené vnitřním přetlakem. Pro stanovení součinitele zeslabení c musíme určit potřebné rozměry a poměry veličin. Střední průměr $D_m = d_m = 35 \text{ mm}$, výpočtová tloušťka $e_s = e_b = 4,5 \text{ mm}$. Úhel mezi osami trubek $\varphi_b = 90^\circ$. Trubky jsou na sebe kolmé.

Součinitel zeslabení c odečteme z diagramů v závislosti na $\frac{e_b}{e_s} = 1$, $\frac{d_m}{D_m} = 1$.

Pomocný výpočet pro odečtení z diagramu:

$$\frac{D_m}{e_s} = \frac{35}{4,5} = 7,78 \quad (6.8)$$

Odečtená hodnota z diagramu O.3.2-4: $c = 0,65$.

Minimální tloušťky pak spočítáme pomocí vztahu (6.2):

$$e_s = \frac{1}{c} \frac{p_c D_i}{2fz - p_c} (\sin \varphi_b)^{-(3/2)} = \frac{1}{0,65} \cdot \frac{20 \cdot 30}{2 \cdot 167/1,5 - 20} (\sin 90^\circ)^{-(3/2)} = 4,55 \quad (6.9)$$

Pro kontrolu výpočet na základě středního průměru:

$$e_s = \frac{1}{c} \frac{p_c D_m}{2fz} (\sin \varphi_b)^{-(3/2)} = \frac{1}{0,65} \cdot \frac{20 \cdot 35}{2 \cdot 167/1,5} (\sin 90^\circ)^{-(3/2)} = 4,84 \quad (6.10)$$

Pro kontrolu výpočet na základě vnějšího průměru:

$$e_s = \frac{1}{c} \frac{p_c D_e}{2fz + 20} (\sin \varphi_b)^{-(3/2)} = \frac{1}{0,65} \cdot \frac{20 \cdot 40}{2 \cdot \frac{167}{1,5} + 20} (\sin 90^\circ)^{-(3/2)} = 5,07 \quad (6.11)$$

K výsledné hodnotě je potřeba ještě přičíst hodnotu tolerance $+0,5$:

$$e_r = e_s + c_1 = 4,55 + 0,5 = 5,05 \geq 5 \text{ mm} \quad (6.12)$$

Výpočet e_b nemá smysl provádět, protože jeho rozměry jsou stejné jako v případě e_s , tím pádem vyjdou shodné výsledky.

Zvolená trubka s tloušťkou stěny 5 mm nevyhovuje ani podle nejvíce optimistického výpočtu. Nelze tedy použít stejnou trubku pro rovinné části potrubí a zároveň ji využít na výrobu T-kusu svařováním. Řešením může být použití trubky vyrobené s vyšší přesností, neboť výpočet přídavku c_1 vychází z materiálu s toleranční třídou T 3. Pokud bychom nechali vyrobit trubku v toleranční třídě T 4, dostaneme menší hodnotu $c_1 = 0,375$. Ta však vyhoví jen nevíce optimistickému výpočtu dle rovnice (6.9).

Další možností je výroba T-kusu jako výkovku. Jelikož není hodnota vnitřního průměru z řady normalizovaných rozměrů, nelze ji v normách pro tvarovky najít. Z tohoto důvodu jsem navrhl rozměry T-kusu na základě součásti, která je nyní v testovací větvi používána.

6.3. Model testovací větve a ověření pomocí výpočtového softwaru

Na základě rozměrů původní testovací větve jsem vytvořil model potrubí, který zachycuje odbočku včetně připojovacích přírub a otvorů, které slouží pro měření pomocí termočlánků a manometrů. Dále jsem zkonstruoval návrh inovované podoby T-kusu testovací větve, který již bude napojen na nově používanou trubku s vnějším průměrem 40 mm. Oproti původnímu řešení došlo i k úpravě vnitřního otvoru příruby, který je navržen tak, aby navazoval na nové rozměry potrubí.

Rozměry a tvar příruby také vychází ze současného tvaru příruby, která se v testovací smyčce vyskytuje. Její rozměry neodpovídají dnes platným normám. Aby nedošlo k problémům při spojování nových a starých částí testovací větve, rozhodli jsme se připojovací rozměry příruby zachovat.

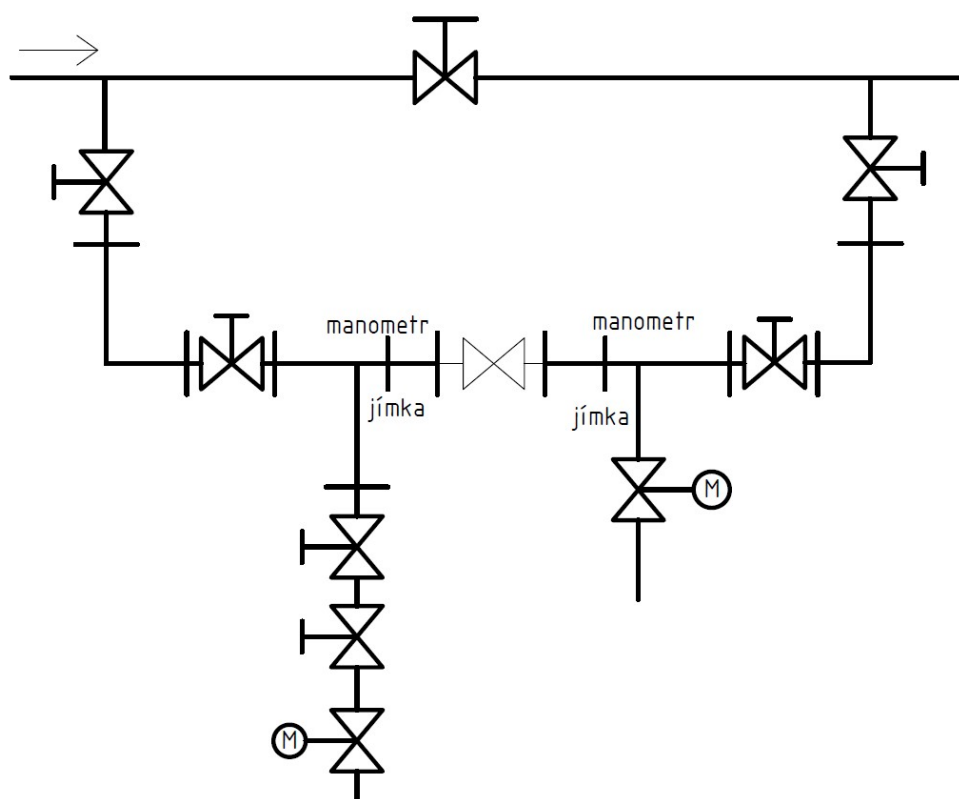
Právě pro ověření navržené příruby i T-kusů jsem vymodeloval části testovací větve, které budou následně podrobeny ověření pomocí výpočtového softwaru (viz přílohy 11.2 až 11.5). Pokud vyhoví, nechají se vyrobit na zakázku, protože jde o atypické součásti.

Obě ověřované odbočky zachycuje schéma na obr. 7.1 – odbočky se nachází vlevo a vpravo od prostoru pro testované zařízení. Ze schématu plyne, že ověření je nezbytné také kvůli výstupům pro manometry a termočlánky.

7. Způsob měření a sběru dat

7.1. Schéma testovací větve

Celá stávající větev se skládá nejen z potrubí, ale také z řady ventilů, odboček a otvorů, které slouží k měření. Uprostřed testovací větve se nachází místo pro umístění testované součásti (na obrázku 7.1 slabou čarou). Ve schématu najdeme dva typy ventilů, mohou být ovládány buď ručně, nebo pomocí motoru. Za provozu se z bezpečnostních důvodů smí manipulovat pouze s motoricky ovládanými ventily.



Obr. 7.1: Schéma testovací větve

7.2. Měření veličin

Během testu se přivádí ohřátá voda z hlavní větve. V případě potřeby může být ze spodních větví přiváděna studená voda. Tímto se dosahuje střídání trendů, které namáhají ověřované těsnění.

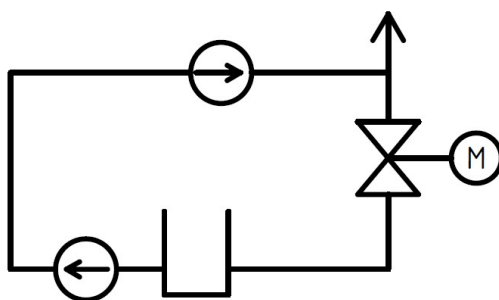
Při testu potřebujeme sledovat především teplotu a tlak vody, které prochází testovanou přírubou a namáhá její těsnění. Měření příslušných veličin probíhá přímo v médiu, před i za testovaným zařízením. Pro měření teploty jsou v potrubí umístěny jímky pro termočlánky a manometry pro měření tlaku. Termočlánek je zajištěn převlečnou maticí. Ta roztemuje komolý kužel z mosazi, který pak slouží jako těsnění.

Trendy jsou následně řízeny ručně. Na základě zkušeností z předchozích měření na zařízení lze ponechat stávající způsob, který je dostačující.

Tlak teplé vody v testovací větvi zajišťuje plunžrové čerpadlo. Jde v podstatě o pístové čerpadlo, které však má pístní tyč pevně spojenou s pístem. Pístní tyč a píst splývají v jednu součást o stejném průměru, které se říká plunžr. Používá se, protože umožňuje i při nízkých otáčkách čerpat médium o stálém a velmi vysokém tlaku.

V testovací větvi se používá plunžrové čerpadlo v kombinaci s ventilem, který je poháněn motorem, a druhým čerpadlem, které vrací vodu z vyrovnávací nádrže zpět do potrubí s plunžrovým čerpadlem. Zjednodušený princip zachycuje obrázek č. 7.2. Pokud je ventil zavřený putuje veškerá natlakovaná voda do testovací části zařízení. V tu chvíli prochází pod maximálním možným tlakem. Jestliže se ventil z části otevře, odteče část média do vyrovnávací nádrže a tím dojde ke snížení tlaku v testovací větvi.

Celý princip tedy spočívá v ovládní regulačního ventilu s motorem, který následně způsobuje pokles tlaku. Z toho vyplývá, že plunžrové čerpadlo dodává stále konstantní tlak a k regulaci dochází až pomocí ventilu.



Obr. 7.2: Zjednodušené schéma funkce plunžrového čerpadla

7.3. Testovací parametry těsnění

Pro úspěšné otestování těsnění je nutné splnit předepsaný postup. Ten spočívá ve změně trendů sledovaných veličin a výdrži na daných hodnotách. Následně se vyhodnocuje sledovaný únik média skrze těsnění. Dělicí rovina ventilu, ve kterém se nachází ověřované těsnění, může být pro potřeby zkoušky upravena umělými defekty, abychom mohli simulovat případnou závadu. Defekt může mít například podobu drážky, která zajistí, že se tlakové médium dostane až k testovanému těsnění.

Zkušební podmínky pro testování ventilu obsahující těsnění z expandovaného grafitu ukazuje následující tabulka 7.1:

Etapa	Krok	Podmínky
1	1.1	Tlaková zkouška při teplotě 20 °C tlakem 13,7 MPa s výdrží 1 hod. Následný pokles tlaku na 12,25 MPa.
2	2.1	Náhřev armatury trendem 60 °C /hod na teplotu 300 °C při tlaku 12,25 MPa.
	2.2	Zkouška tlakem 13,7 MPa při teplotě 300 °C s výdrží 1 hod.
	2.3	Zkouška tlakem 16,34 MPa při teplotě 300 °C po dobu 20 min. Následný pokles tlaku na 12,25 MPa.
	2.4	Výdrž na teplotě 300 °C – 12,25 MPa po dobu 8 hod, kontrola těsnosti dělicí roviny.
3	3.1	Vychlazení armatury trendem 60 °C /hod na teplotu cca 20 °C při tlaku 12,25 MPa.
	3.2	Tlaková zkouška při teplotě cca 20 °C tlakem 13,7 MPa s výdrží 1 hod. Následný pokles tlaku na 12,25 MPa.
4	4.1	Náhřev armatury trendem 20 °C /hod na teplotu 300 °C při tlaku 12,25 MPa.
	4.2	Zkouška tlakem 13,7 MPa při teplotě 300 °C s výdrží 1 hod. Následný pokles tlaku na 12,25 MPa.
5	5.1	Vychlazení armatury trendem 30 °C /hod na teplotu cca 20 °C při tlaku 12,25 MPa
	5.2	Tlaková zkouška při teplotě cca 20 °C tlakem 13,7 MPa s výdrží 1 hod.

Tabulka 7.1: Zkušební podmínky pro test ventilu s grafitovým těsněním

8. Závěr

Tato bakalářská práce přiblížila nové způsoby těsnění součástí primárních okruhů jaderných elektráren, které jsou založeny na expandovaném grafitu. Jsou zde vyzdvihnuty hlavní výhody tohoto druhu těsnění, především prodloužení životnosti zařízení a zvýšení bezpečnosti v důsledku nižších utahovacích sil. Zároveň práce zdůraznila nutnost nová těsnění otestovat.

Proto následovaly výpočty minimální tloušťky stěny potrubí pro přímé i zahrnuté části testovací větve. Z výpočtů vyplývá, že lze použít běžně dostupnou trubku o vnějším průměru 40 mm a vnitřním průměru 30 mm. Pomocí několika metod jsem stanovil parametry ohýbaných částí potrubí. Vyplývá z nich minimální rádius ohybu 70 mm.

Dále jsem se zabýval návrhem odbočky. Na základě výpočtů jsem vyloučil T-kus vyrobený svařováním a navrhl vyrobít ho jako výkovek. K tomu jsem vytvořil model, který bude sloužit pro ověření pomocí výpočtového programu a na jeho základě může být součást vyrobena.

Práce také shrnuje požadavky na návrh tlakového potrubí a poskytuje příslušné vzorce, které jsou pro návrh klíčové. Jelikož jde o zařízení k experimentálním účelům, není nutné bezpečnost návrhu prokazovat posuzováním shody.

Jsou zde popsány způsoby měření požadovaných veličin a princip funkce celé testovací větve. Najdete zde detailní postupy testování těsnění z expandovaného grafitu, které zachycují trendy změn teploty a tlaku.

Moje bakalářská práce slouží jako podklad pro inovování současné testovací větve, která v tuto chvíli neodpovídá platným normám. Lze ji využít i v budoucnosti při návrhu jiného tlakového potrubí, neboť zachycuje nejen výpočty, ale také jejich postupy pro různé materiály.

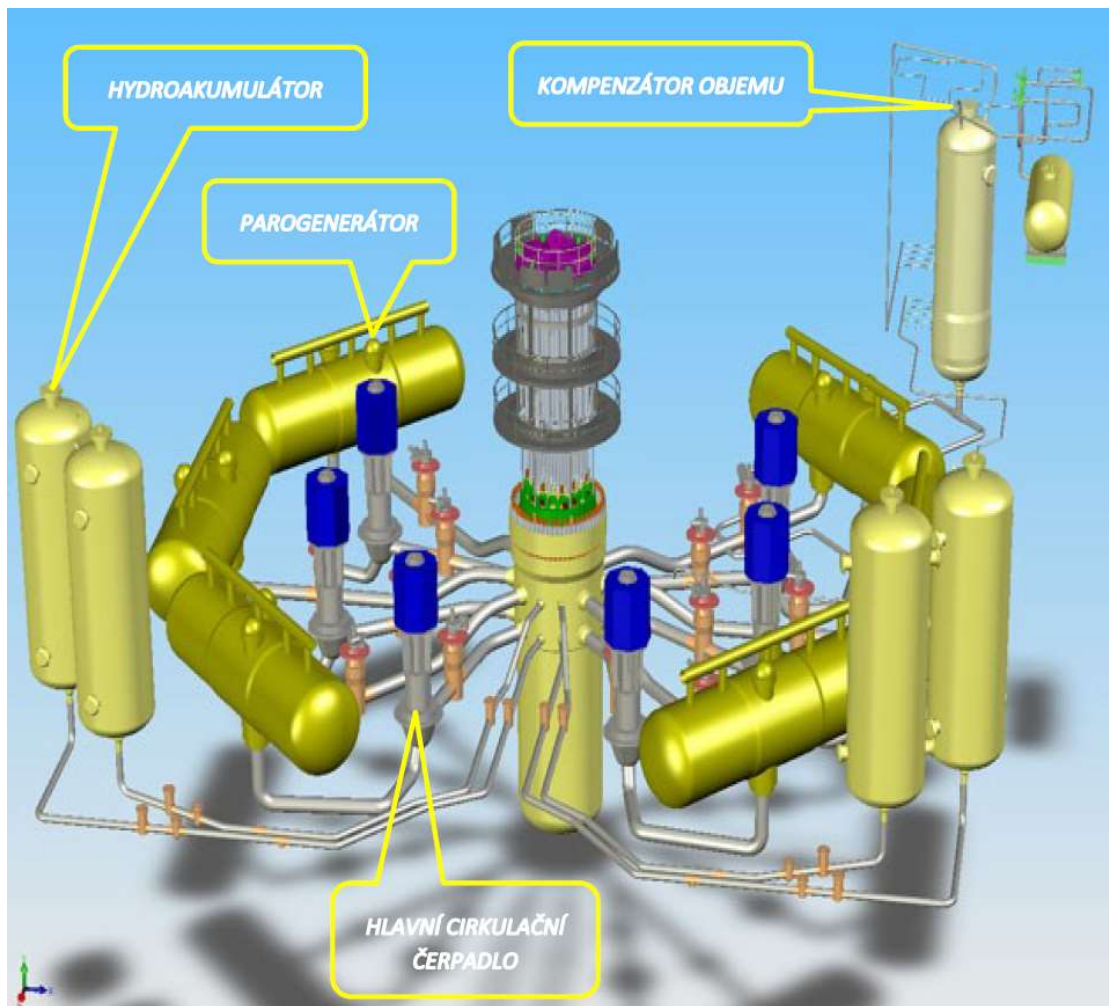
9. Zdroje

- [1] MICO S.R.O. *Katalog těsnění primárního okruhu VVER 1000*. Třebíč, 2015.
- [2] MICO S.R.O. *Katalog těsnění primárního okruhu VVER 440*. Třebíč, 2015.
- [3] MICO S.R.O. *Těsnící program společnosti MICO, spol. s.r.o., Třebíč*. Třebíč, 2012.
- [4] Ing. Pavel SVOBODA a Ing. Petr TOMAN. *Těsnění v jaderných elektrárnách*. Třebíč.
- [5] *Nářízení vlády ze dne 7. července 2016 o posuzování shody tlakových zařízení při jejich dodávání na trh*. In: Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, p. o., 2016, ročník 2016, číslo 219. ISSN 1211-1244.
- [6] *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2014/68/EU ze dne 15. května 2014 o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se dodávání tlakových zařízení na trh*. In: 2014, číslo 68.
- [7] Material 1.4541. *M. Woite GmbH* [online]. 2012 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.woite-edelstahl.com/14541en.html>
- [8] ČSN EN 10216-5. *Bezešvé ocelové trubky pro tlakové nádoby a zařízení - Technické dodací podmínky - Část 5: Trubky z korozivzdorných ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [9] ČSN EN 10216-2. *Bezešvé ocelové trubky pro tlakové nádoby a zařízení - Technické dodací podmínky - Část 2: Trubky z nelegovaných a legovaných ocelí se zaručenými vlastnostmi při zvýšených teplotách*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [10] ING. BEDNÁŘ, Jindřich. *ZÁSADY PŘI NAVRHOVÁNÍ A VYPOČTU TLAKOVÝCH ZAŘÍZENÍ. Oborový portál pro vyhrazená tlaková zařízení* [online]. DEKRA CZ, 2018, 20.4.2007 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1411>
- [11] EN 13480-3. *Metallic industrial piping - Part 3: Design and calculation*. Brussels: CEN-CENELEC Management Centre, 2017.
- [12] TOMAN, Petr. *Těsnění víka I.O. kolektoru PG elektráren typu VVER* [online]. Zlín, 2008 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/7292/toman_2008_bp.pdf?sequence=1. Bakalářské práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [13] Nerezová ocel 1.4541. *Inox* [online]. 2018 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14541.html>

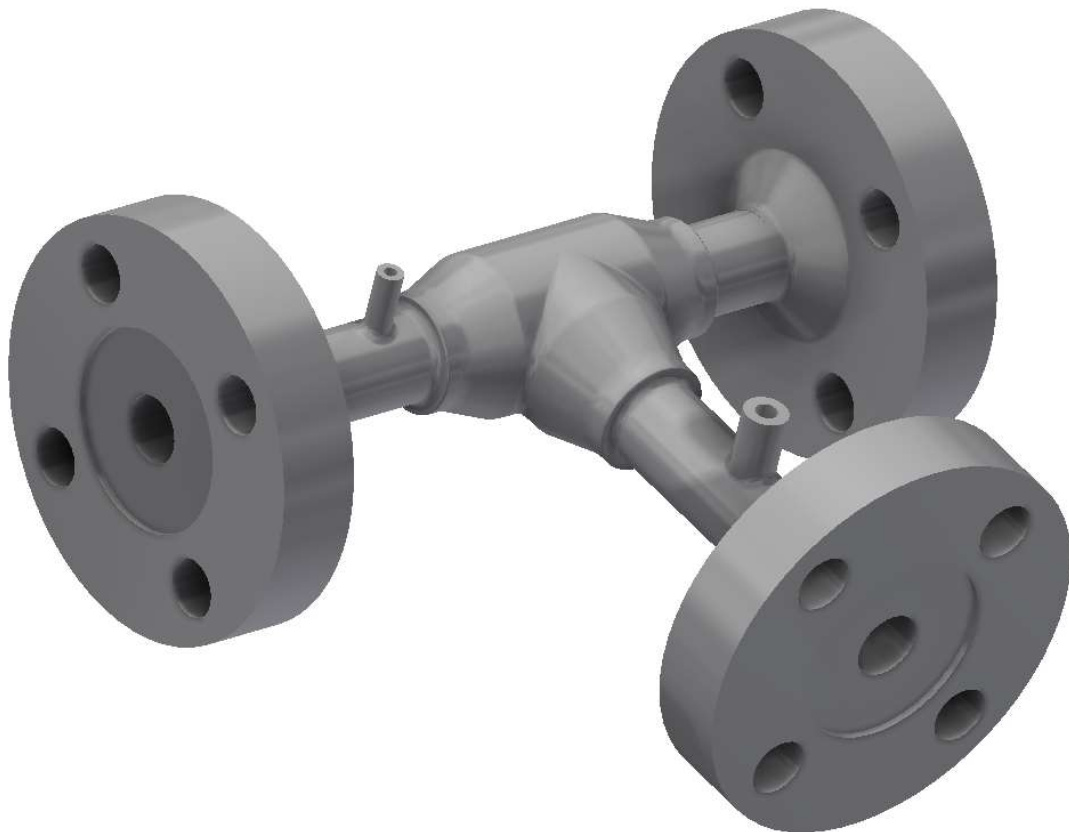
10. Seznam příloh

11.1: Schéma primárního okruhu elektrárny typu VVER 440 [2]	53
11.2: Inovovaný model levé části testovací větve	54
11.3: Model původní levé části testovací větve	54
11.4: Inovovaný model pravé části testovací větve	55
11.5: Model původní pravé části testovací větve	55

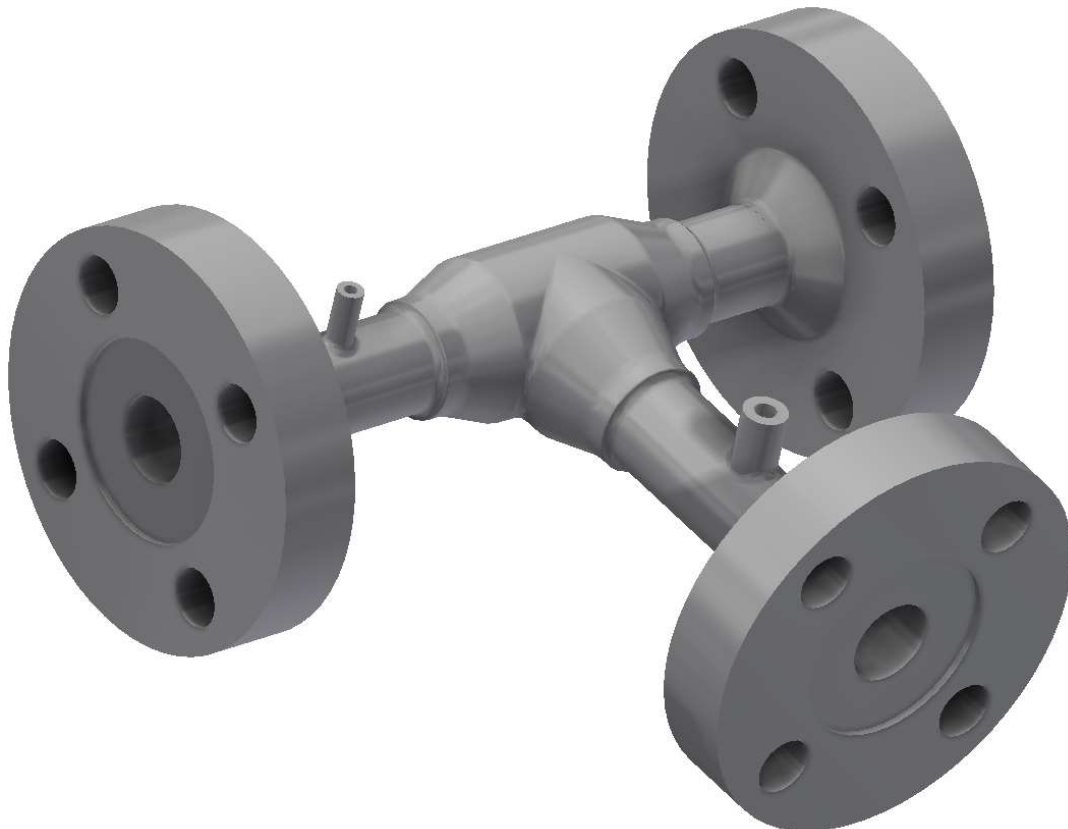
11. Přílohy



11.1: Schéma primárního okruhu elektrárny typu VVER 440 [2]



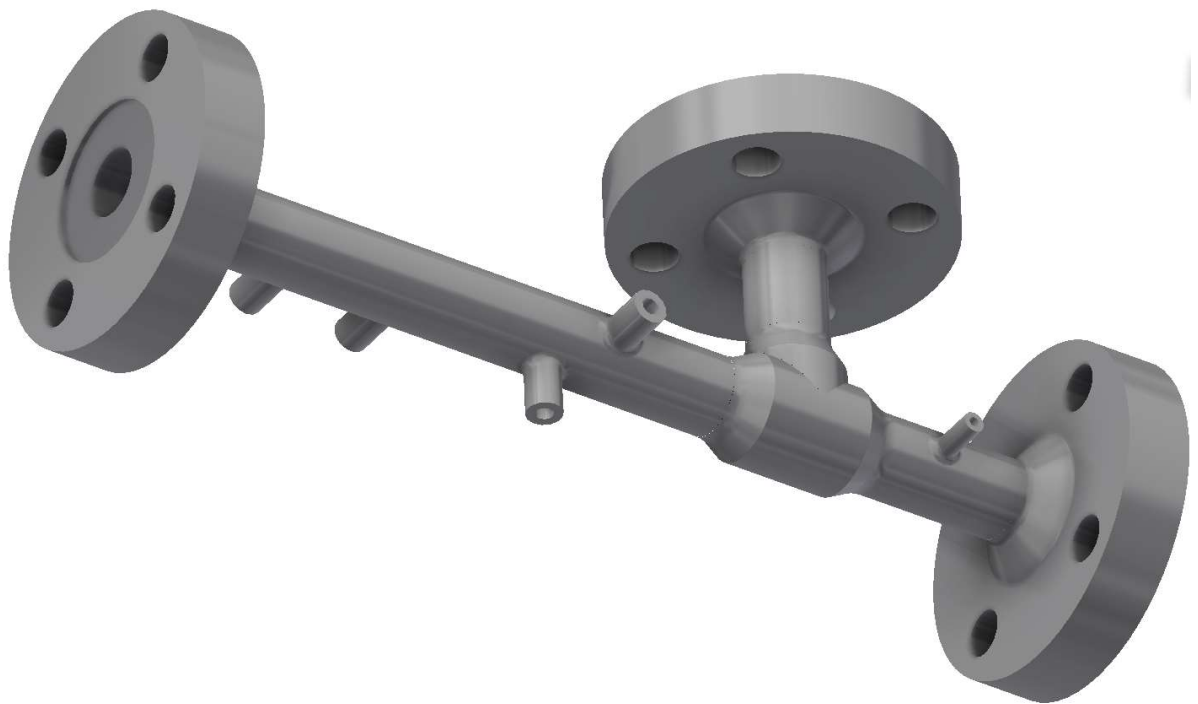
11.2: Inovovaný model levé části testovací větve



11.3: Model původní levé části testovací větve



11.4: Inovovaný model pravé části testovací větve



11.5: Model původní pravé části testovací větve