

Návrh netopené tlakové nádoby

Jakub Jurka

Bakalářská práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Jurka**
Osobní číslo: **T130018**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Návrh netopené tlakové nádoby**

Zásady pro vypracování:

1. Sestavte literární studii na dané téma
2. Navrhněte konstrukční alternativy ocelové tlakové nádoby o objemu 1000 litrů
3. Sestavte statický výpočet zvolené alternativy
4. Diskutujte dosažené výsledky

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **8. ledna 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**

Ve Zlíně dne 3. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: JURKA JAKUB

Obor: TECHNOLOGICKÁ ZÁŘÍZENÍ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 20.5.2016



.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výtisky, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem netopené tlakové nádoby.

Teoretická část je zaměřena na popis jednotlivých částí tlakové nádoby a její výstroje. Je zde uvedena metodika spojování jednotlivých částí nádoby, konstrukční návrhy a teorie výpočtu tlakové nádoby.

V praktické části je proveden statický výpočet zvolené alternativy tlakové nádoby.

Klíčová slova: tlaková nádoba, operační tlak, skořepina, tloušťka stěny, dno, hrdlo

ABSTRACT

This bachelor thesis describes the design of the unfired pressure vessels.

The theoretical part focuses on the description of the individual parts of the pressure vessel and its equipment. There are methodology for welding of the individual vessel parts, the design and theory of calculation of the pressure vessel.

The static analysis of the selected alternative pressure vessel is performed in the practical part of thesis.

Keywords: pressure vessel, operating pressure, shell, wall thickness, end cap, pipe

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a čas věnovaný vzniku mé bakalářské práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 ČÁSTI TLAKOVÉ NÁDOBY	12
1.1 DNA, VÍKA.....	12
1.2 PLÁŠŤ.....	13
1.3 NOSNÉ PATKY	13
1.4 PRACOVNÍ OTVORY	14
1.5 HRDLA A PŘÍRUBOVÉ SPOJE.....	14
2 VÝSTROJ TLAKOVÝCH NÁDOB.....	16
2.1 ARMATURY	16
2.2 TLAKOMĚRY	17
2.3 TEPLOMĚRY	17
2.4 STAVOZNAKY.....	18
3 SVAŘOVÁNÍ TLAKOVÝCH NÁDOB	19
3.1 HLAVNÍ SVARY TLAKOVÝCH NÁDOB	19
3.1.1 Podélné svary	19
3.1.2 Obvodové svary	19
3.1.3 Uzavírací svary.....	20
3.2 HLAVNÍ SVAŘOVACÍ METODY.....	20
3.2.1 Obloukové svařování tavící se elektrodou	20
3.2.2 Obloukové svařování netavící se elektrodou	21
3.2.3 Svařování laserem	22
3.2.4 Svařování plazmou.....	22
4 DIMENZOVÁNÍ TLAKOVÝCH NÁDOB.....	23
4.1 DRUHY NÁVRHU TLAKOVÉ NÁDOBY	23
4.1.1 Návrh na základě analýz	23
4.1.2 Návrh na základě experimentu.....	23
4.1.3 Návrh na základě vzorců	23
4.2 TEORIE DIMENZOVÁNÍ TLOUŠŤKY STĚNY SKOŘEPINY	24
5 KONSTRUKČNÍ NÁVRHY NÁDOBY O OBJEMU 1000 LITRŮ.....	26
5.1 STOJNÁ NÁDOBA	26
5.2 LEŽATÁ NÁDOBA.....	27
II PRAKTICKÁ ČÁST	28
6 ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	29
7 VÁLCOVÁ SKOŘEPINA	30

7.1	MINIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÁ TLOUŠŤKA STĚNY VÁLCOVÉ SKOŘEPINY.....	30
7.2	DOVOLENÝ VNITŘNÍ PŘETLAK PŮSOBÍCÍ NA SKOŘEPINU.....	30
7.3	MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÝ VNITŘNÍ PŘETLAK PŮSOBÍCÍ NA SKOŘEPINU PŘI OTVORU S NASAZENÝM HRDLEM	31
7.4	KONTROLA MŮSTKŮ HRDEL	33
7.5	VZDÁLENOST OTVORU OD HRANY DNA	36
8	DNA NÁDOBY	37
8.1	TLOUŠŤKA STĚNY DNA	37
8.1.1	Výpočet minimální tloušťky stěny pro omezení membránového napětí ve střední části dna	37
8.1.2	Výpočet minimální tloušťky stěny anuloidového přechodu pro zabránění axiálně symetrické deformaci	38
8.1.3	Výpočet minimální tloušťky stěny anuloidového přechodu pro zabránění plastického boulení	38
8.2	PODMÍNKY PLATNOSTI VZORCŮ.....	39
8.3	DOVOLENÝ VNITŘNÍ PŘETLAK PŮSOBÍCÍ NA DNO.....	39
8.4	MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÝ VNITŘNÍ PŘETLAK PŮSOBÍCÍ NA DNO PŘI OTVORU S NASAZENÝM HRDLEM	40
9	OPĚRNÉ NOHY NÁDOBY	43
9.1	KONTROLA NA PROTLAČENÍ DNA	43
9.2	KONTROLA NOH NA VZPĚR	45
10	PŘEPRAVNÍ OKA	47
10.1	KONTROLA NAVRHNUTÉHO PŘEPRAVNÍHO OKA	47
	ZÁVĚR	51
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	52
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	53
	SEZNAM OBRÁZKŮ	57
	SEZNAM PŘÍLOH.....	59

ÚVOD

Historie:

Počátky vzniku tlakových nádob jsou spjaty s vynalezením parních kotlů na konci 18. století. V tomto období se používaly plechy pouze kované, které neměly stejnou tloušťku a velikost plátů plechů se vyráběly jen v malých formátech (1 x 1 m). Vzhledem k faktu, že svařování se začalo rozvíjet až ke konci 19. století, byly ke spojování jednotlivých dílů tlakových nádob používány nýty. To sebou neslo problémy s netěsností spojů, proto se do mezer ve spojích muselo natlačovat olovo nebo fermentované koudele.

Za úplně první tlakovou nádobu tak bývá považována nádoba vyrobená až na počátku 19. století ve Velké Británii. Tato nádoba odolala tlaku cca 65 MPa. [1]

Popis:

Za tlakovou nádobu považujeme uzavřené zařízení, na jejíž vnitřní stěny působí nejvyšší dovolený tlak vyšší než 0,5 bar. Tlaková nádoba slouží např. k akumulaci tekutiny, ohřevu, k vyrovnání tlaku tekutiny v oběhovém systému apod. Tyto nádoby se vyrábějí dle tvaru v provedení válcovém, kuželovém nebo kulovém, podle polohy osy v provedení stojném, ležatém nebo závěsném.

Tekutina, kterou je nádoba naplněna, se dle stavu dělí na kapalnou nebo plynnou a dle klasifikace nebezpečnosti dané tekutiny na nebezpečnou a všechny ostatní. [2]

Základní kritéria pro provoz tlakové nádoby:

Tlaková nádoba musí být zkonstruována, vyrobena a odzkoušena na nejvyšší dovolený přetlak, nejvyšší nebo nejnižší dovolenou teplotu a musí být zajištěno jejich nepřekročení. Následně musí být nádoba v provozu udržována tak, aby byla zajištěna bezpečnost obsluhy nádoby a jeho bezprostředního okolí. [1]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ČÁSTI TLAKOVÉ NÁDOBY

Tlakové

Části, na které působí tlak pracovní tekutiny (plášť, dno, přírubové spoje, atd.)

Netlakové

Na tyto části nádoby tlak pracovní tekutiny nepůsobí a jsou umístěny na vnější straně nádoby (přepravní oka, nosné patky, izolace, atd.)

1.1 Dna, víka

Dna dělíme na rovná nebo klenutá. Rovná se používají výhradně pro malé tlaky. Tato dna jsou pevnostně nevhodná, a proto se musí vyztužovat. Používanějším typem jsou klenutá dna, která dále dělíme na kulová, eliptická nebo torosférická.

Konstrukci torosférického dna tvoří kulový vrchlík, anuloidový přechod a válcová skořepina, přičemž tyto části mají v místě svého přechodu tečny. Klenutost dna určujeme dle pracovního přetlaku, který způsobuje v místech přechodu částí dna koncentrátoři ohybových napětí. Tudíž lze říct, že čím větší tlak, tím větší klenutí. Nejvhodnější by bylo půlkulové dno, ale vzhledem k náročnosti výroby se používá jen na velmi vysoké tlaky a jen v určitých rozměrech. [1]



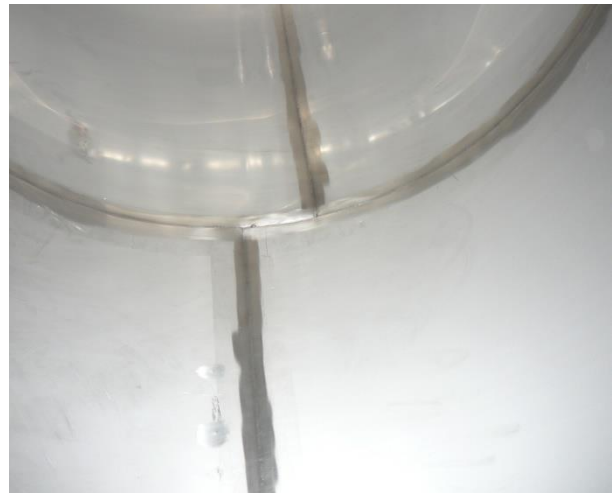
Obr. 1 Klenutá dna.

1.2 Plášť

Rozlišujeme tři druhy plášťů: válcové, kuželové a kulové. Ve většině případů se používají válcové pláště. Základním dílem pláště jsou takzvané luby. Jedná se o skružený plech na tříválcové zakružovačce. Kulové luby se lisují v zápustkách. Počet lubů určuje délka válcové části a velikost pásů plechů, jenž se použijí. Cílem je dosažení co nejmenšího počtu lubů, kvůli počtu svarových spojů, který by měl být co nejmenší. [1]



Obr. 2 Zakružování lubu



Obr. 3 Spojení dvou lubů

1.3 Nosné patky

Slouží k ustavení nádoby na její pracovní místo. Mohou být kruhového, čtvercového nebo obdélníkového průřezu. Pro velká zatížení se přivařují k plášti nádoby a podkládají se zesilujícím plechem. Pro malá zatížení se patky mohou přivařit ke dnu nádoby. Případně se také mohou podložit zesilujícím plechem. Optimální počet nosných patek u stojaté nádoby je tři. Mohou být i čtyři, ale to jen ve výjimečných případech. U ležatých nádob se počet nosných konzolí odvíjí od délky nádoby.

1.4 Pracovní otvory

Na nádoby jsou umísťovány z důvodu montáže, revize, výměny vnitřních součástí nádoby, čištění nebo opravy nádob. Jejich umístění je převážně na válcové části nádoby, ale jsou umísťovány i na dna nádob. Rozmístěny jsou tak, aby byly přístupné obsluze a pokud možno mimo sváry, jinak je nutno provést kontrolu svarů. Počet pracovních otvorů závisí na průměru nádoby. Na nádoby o průměru 800 mm a výše, jsou-li průlezné, umísťujeme 2x otvor o průměru 450 mm a uzavřeme vhodným víkem. Nádoby o menším průměru než 800 mm musí mít 1x otvor o průměru minimálně 80 mm. Pro nádoby s odnímatelným víkem tyto podmínky neplatí. [1]



Obr. 4 Pracovní vlez

1.5 Hrdla a přírubové spoje

Hrdla slouží k propojování nádob, spojování potrubí s nádobou a ustavení armatur jako pojistný ventil, teploměr atd. [1]



Obr. 5 Hrdla

Příruby tvoří rozebíratelný spoj většinou kruhového tvaru. Slouží k propojování nádob, spojování potrubí s nádobou nebo jsou používány jako pracovní otvory. Přírubový spoj je tvořen dvěma přírubami, mezi které se vkládá těsnění. Po utažení šroubů, jejichž počet se liší od daného pracovního přetlaku se vyplní nerovnosti na těsnících plochách přírub. K nádobě jsou přivařovány nebo upevněny pomocí závitového spoje. Příruby mohou být krkové, ploché, závitové, atd. [1]



Obr. 6 Krková příruba



Obr. 7 Příruby s fazetou

2 VÝSTROJ TLAKOVÝCH NÁDOB

Jsou to zařízení, které zajišťují plynulý a bezpečný provoz tlakové nádoby. Umístěny jsou tak, aby během provozu byly snadno přístupné obsluze. Jsou to zejména armatury, ovládací, řídicí a kontrolní prvky. [1]

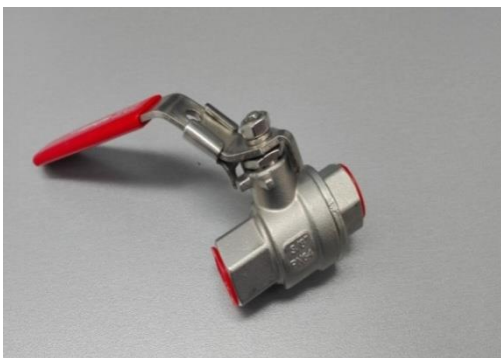
Nádoba musí být vybavena těmito základními prvky: [1]

- a) Vypouštěcí a uzavírací armatury
- b) Tlakoměry
- c) Pojistné zařízení
- d) Odvětrávací zařízení

Topené nádoby musí být vybaveny teploměry

2.1 Armatury

Používají se k regulaci průtoku kapaliny z nádrže nebo do nádrže, zabezpečení a kontrole tlakové nádoby. Základními typy jsou uzavírací armatury (kohouty, šoupátka, ventily), regulační armatury (regulační ventily, redukční ventily), zpětné armatury (zpětné ventily, zpětné klapky), pojistné armatury (pojistný ventil). [1]



Obr. 8 Kulový kohout



Obr. 9 Pojistný ventil

2.2 Tlakoměry

Tlakoměry slouží ke kontrole tlaku uvnitř nádoby. Platí pro ně norma ČSN 25 7201. Musí mít svou vlastní armaturu ke kontrole tlaku za provozu. Umísťují se buď přímo na nádobu, nebo i na jiné části nádoby. Mezi tlakoměrem a nádobou nesmí být uzavírací armatura. Rozsah tlakoměru je nastaven tak, aby se pohyboval ve druhé třetině stupnice. [1]



Obr. 10 Tlakoměr

2.3 Teploměry

Je-li nádoba topená nebo je potřeba kontrolovat teplotu média, umísťují se na nádobu teploměry. Teploměry se umísťují na dobře viditelné místo. Teplotní rozsah musí být viditelně označen. [1]



Obr. 11 Teploměr

2.4 Stavoznaky

Stavoznak pracuje na principu spojených nádob a pomocí něj kontrolujeme výšku hladiny tekutiny v nádobě. Stavoznak se skládá ze tří částí: trubice, horní a spodní díl stavoznaku.

Trubice stavoznaku může být skleněná nebo plastová.

Plastová trubice se používá při teplotě nižší než 60 °C a pro neagresivní tekutiny.

Skleněná trubice se používá při teplotě vyšší než 60 °C a pro agresivní i neagresivní tekutiny.

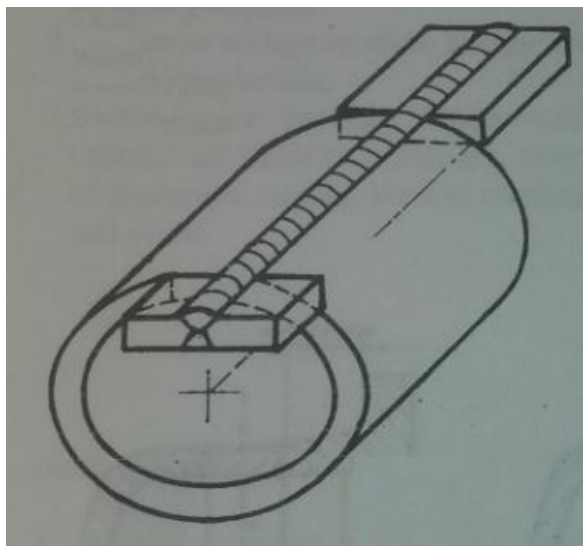
Horní a spodní díl stavoznaku je kovový a bývá zpravidla opatřen uzavíracími ventily.

3 SVAŘOVÁNÍ TLAKOVÝCH NÁDOB

3.1 Hlavní svary tlakových nádob

3.1.1 Podélné svary

V dnešní době se většinou svary provádějí na svařovacích automatech, ale u malých nádob nebo tam, kde není možno provádět svar pomocí svařovacího automatu se nádoby svařují ručně. Na začátku a konci svaru nedosahujeme požadované hloubky svaru. Proto na začátek a konec svaru umístíme tzv. nájezdové desky, pomocí kterých dosáhneme kvalitního svaru po celé jeho délce. Desky následně odstraníme. Jejich tloušťka je shodná s tloušťkou lubu. [1]



Obr. 12 Provedení podélného svaru [1]

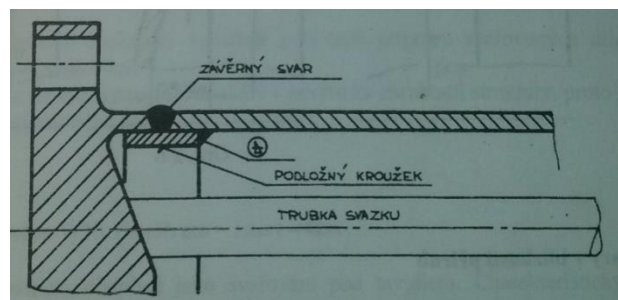
3.1.2 Obvodové svary

Svařují se pomocí svařovacích automatů nebo i ručně. Svařování se provádí z obou stran. Vnitřní svary provádíme ručně do průměru 400 mm a od průměru 400 mm až do 3000 mm na automatech. Záleží však na rozměrové kapacitě automatu. [1]

3.1.3 Uzavírací svary

Tento svar spojuje dvě samostatné části nádoby v jeden celek. Tento svar může být proveden různými způsoby: [1]

- Pomocí svařovacího automatu oboustranně pokud to konstrukce nádoby dovolí a plášť nádoby bude opatřen průlezem o minimálním průměru 400 mm.
- Kombinací ručního a automatového svařování. Tento způsob používáme, není – li v nádobě dostatek místa pro automat.
- Svar na podložku. To znamená, že je znemožněno provést vnitřní svar jak pomocí svařovacího automatu, tak ručního svařování z důsledku např. použití trubkového výměníku, malého průměru nádoby atd. Tento problém vyřešíme pomocí podložného pásku, který je z poloviny vsazen do jedné části nádoby a druhá část nádoby se na něj nasune. Následně se provede obvodový svar buď ručně, nebo na svařovacím automatu.



Obr. 13 Provedení uzavíracího svaru [1]

3.2 Hlavní svařovací metody

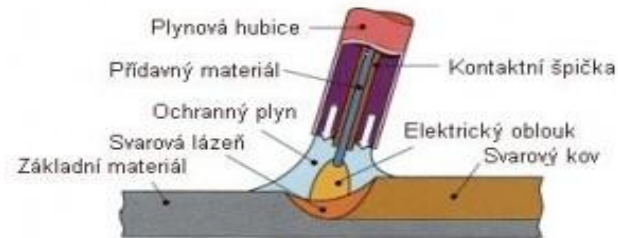
3.2.1 Obloukové svařování tavící se elektrodou

Oblouk hoří mezi svařovaným materiálem a přídavným materiálem, což je drát přiváděný do svařovací hubice. Svařování se provádí v ochranné atmosféře, kterou zajišťují ochranné plyny jako argon, helium, oxid uhličitý atd. [3]

Toto svařování dělíme na dvě metody: [3]

- Metoda MIG (Metal Inert Gas), což je svařování tavnou kovovou elektrodou v netečném plynu. Značí to, že plyn metalurgicky neovlivňuje svar.
- Metoda MAG (Metal Active Gas), což je svařování tavnou kovovou elektrodou v aktivním plynu. U této metody plyn metalurgicky ovlivňuje svar.

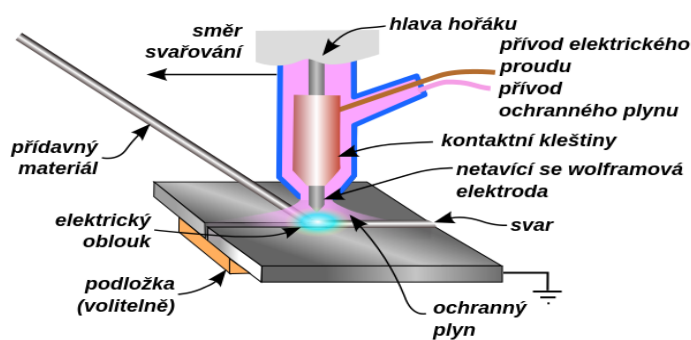
Tyto metody svařování jsou v praxi velice využívány. Výhodou těchto metod je rychlost svařování, nemusíme svar dodatečně čistit, stačí méně kvalifikovaný svářeč. Mezi nevýhody patří vysoké pořizovací a provozní náklady a malá mobilita zařízení. U tlakových nádob se používají ke svařování hlavních částí nádoby (luby a dna), dále pak u velkých kontrolních otvorů a průřezů, stojných noh atd. [3]



Obr. 14 Svařování tavící se elektrodou [4]

3.2.2 Obloukové svařování netavící se elektrodou

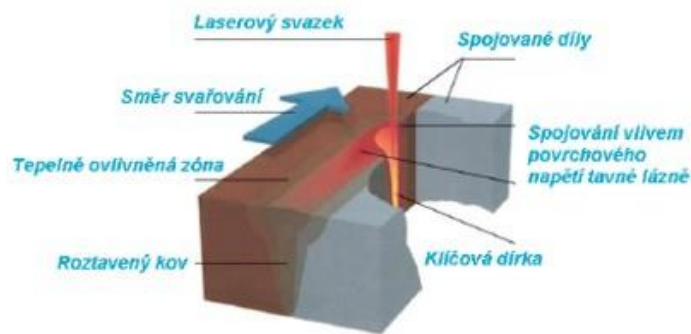
Tato metoda má označení WIG (Wolfram Inert Gas), což označuje svařování wolframovou elektrodou v netečném plynu. Stejně jako u metody MIG plyn metalurgicky neovlivňuje svar. Oblouk hoří mezi netavenou wolframovou elektrodou a svařovaným materiálem. Svařování se provádí buď bez přídavného materiálu (lemové spoje) nebo s přídavným materiálem ve formě drátu, který je přidáván do svaru. Jako ochranný plyn se používá Argon, Helium atd. Tato metoda se u tlakových nádob využívá pro přivaření hrdel, malých kontrolních otvorů a pro pohledové svary např. při svařování pivních tanků. [3]



Obr. 15 Svařování netavící se elektrodou [5]

3.2.3 Svařování laserem

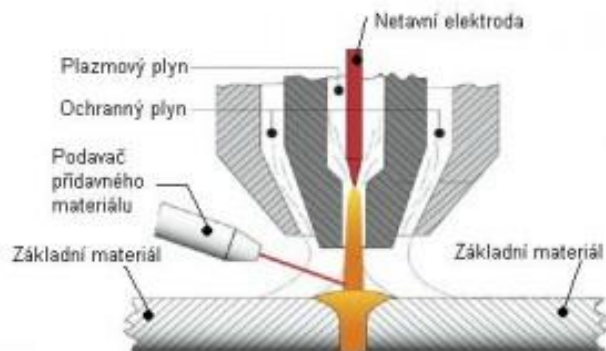
Zdrojem tepla je souvislé spojité záření světelných paprsků usměrněných na velmi malou plochu pomocí optiky. Při dopadu paprsku na svařovaný materiál se mění jeho kinetická energie na energii tepelnou. Teplota v místě svaru může dosahovat až 15 000 °C. Tento typ svařování se používá hlavně na obvodové a podélné svary. [6]



Obr. 16 Svařování laserem [7]

3.2.4 Svařování plazmou

Zdrojem tepla je plazmový paprsek, který hoří po zapálení elektrického oblouku mezi wolframovou elektrodou a svařovaným materiálem. Plazma vzniká disociací molekul, což je štěpení molekul na atomy pomocí vysoké teploty. Dále pak ionizací, což je rozštěpení atomu na základní elektron a kladný iont. Teplota v místě svaru dosahuje až 16 000 °C. Jako plyny se používají Argon a Helium. Tento typ svařování používáme stejně jako svařování laserem na obvodové a podélné svary. [6]



Obr. 17 Svařování plazmou [8]

4 DIMENZOVÁNÍ TLAKOVÝCH NÁDOB

Návrh a výpočet tlakové nádoby musí být vypracován podle norem (např. ČSN 69 0010, EN 13445 – 3 atd.), podle kterých se následně vypracuje návrh základních rozměrů a posouzení odolnosti proti porušení tlakové nádoby. [9]

4.1 Druhy návrhu tlakové nádoby

Norma EN 13445 – 3 rozlišuje tři základní postupy řešení návrhu tlakové nádoby. DBA (Návrh na základě analýz), DBE (Návrh na základě experimentu) a DBF (Návrh na základě vzorců). [10]

4.1.1 Návrh na základě analýz

Používá se jako alternativa k návrhu podle vzorců nebo jako jeho doplněk. Tento návrh se dále dělí na přímý způsob, který se zabývá selháním a udává příslušný mezní stav (únosnost a způsobilost). Provádí se různé kontroly nádoby jako kontrola plastické deformace, únavy, lomu v oblasti tečení atd. Druhým způsobem je metoda založená na kategorizaci napětí. Tento způsob návrhu je založen na pseudo-elastické analýze napětí, kde se vyhodnocuje napětí na základě rozdělení podle původu a druhu do jednotlivých kategorií a následně se posuzuje podle příslušných kritérií. Kategoriemi napětí jsou: [10]

- Primární napětí zde spadá globální membránové napětí, lokální membránové napětí a globální ohybové napětí.
- Sekundární napětí což je membránové plus ohybové napětí.
- Poslední kategorií je špičkové napětí.

4.1.2 Návrh na základě experimentu

Tato metoda je založena na ověřování pevnosti nádob experimentálními metodami. Pevnost nádob nebo jejich součástí je ověřována zkouškou roztržením a v případě nutnosti je doplněná o jiné zkoušky. Tato metoda je upozadřována návrhem pomocí vzorců a návrh na základě analýz. [10]

4.1.3 Návrh na základě vzorců

Při základním návrhu pláště nádoby se vychází z mezních stavů. Základním mezním stavem je stav plastické únosnosti, kdy při působení mezního tlaku v nádobě dosáhne materiál meze kluzu. Tento stav nastává u přechodu klenutých den, přechodu

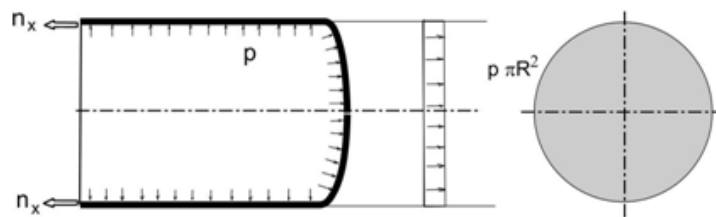
hrdel atd. Toto kritérium ovšem platí pouze v rozsahu teplot do výrazného tečení materiálu (380 – 500 °C). Jinak musíme brát v úvahu mezní stav při tečení. Kromě nádob, které pracují za zvýšených teplot, jsou i nádoby, které bývají vystaveny nízkým teplotám. Zde se musí brát na zřetel mezní stav křehkého porušení. Dalším stavem je mez stabilního zhroucení, kdy je plášť nádoby zatěžován vnějším tlakem. K tomuto zhroucení může dojít při působení záporného napětí ve stěně nádoby. [10]

4.2 Teorie dimenzování tloušťky stěny skořepiny

Pro výpočet tloušťky stěny válcové skořepiny využijeme znalosti membránové napjatosti skořepin.

Při řešení tohoto problému porovnáváme vzniklá napětí v osovém a obvodovém směru. [11]

Osový směr



Obr. 18 Zatížení v osovém směru [11]

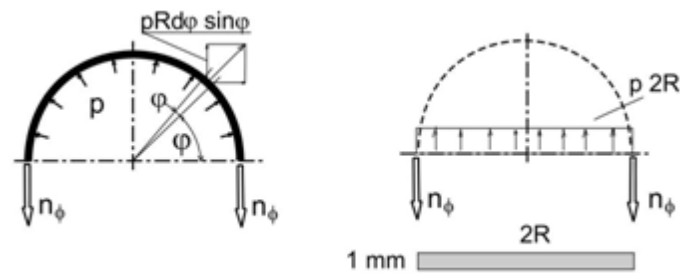
Uvolněním části nádoby řezem kolmým k ose, bude rovnice rovnováhy vyjádřena vztahem:

$$p \cdot \pi \cdot r^2 = \sigma_x \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot s \quad (1)$$

Osově membránové napětí tedy bude

$$\sigma_x = \frac{p \cdot r}{2 \cdot s} \quad (2)$$

Obvodový směr



Obr. 19 Zatížení v obvodovém směru [11]

Oddělíme - li myšleně dvěma řezy kolnými k ose válce z pláště prstenc jednotkové šířky, platí pro jeho polovinu rovnice rovnováhy [11]

$$2 \cdot \sigma_{\varphi} \cdot s = \int_0^{\pi} p \cdot r \cdot \sin \varphi d\varphi = 2 \cdot r \cdot p \quad (3)$$

Osové membránové napětí tedy bude

$$\sigma_{\varphi} = \frac{p \cdot r}{s} \quad (4)$$

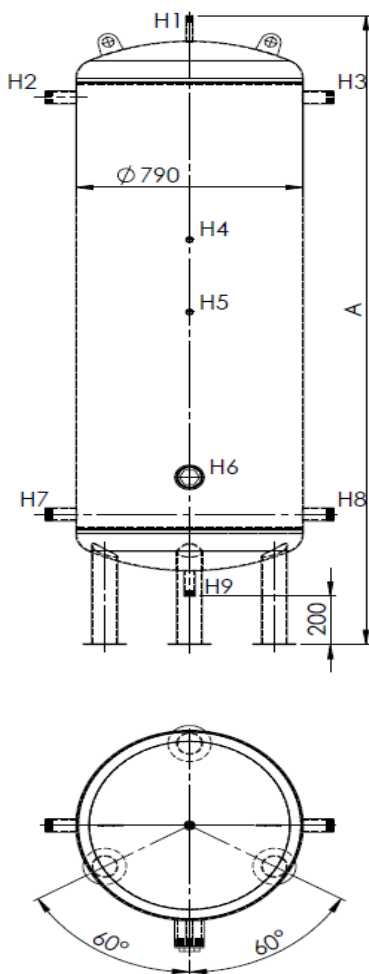
Když porovnáme tato dvě napětí, zjistíme, že obvodové napětí je dvakrát větší než osové napětí. Proto tloušťku stěny válcové skořepiny vypočteme z odvodového napětí. [8]

$$s = \frac{p \cdot r}{\sigma_{\varphi}} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\varphi}} \quad (5)$$

5 KONSTRUKČNÍ NÁVRHY NÁDOBY O OBJEMU 1000 LITRŮ

5.1 Stojná nádoba

Tato nádoba je konstrukčně řešena vzhledem k poloze osy jako stojná nádoba. Průměr nádoby je 790 mm. Přívod nebo odvod provozního média je zajištěn hrdlem H2, H3, H7, H8 umístěných na plášti. Vypouštění zajišťuje hrdlo H9 umístěné ve spodním dnu. Odvzdušnění je řešeno hrdlem H1, ve kterém bude nainstalován pojistný ventil. Hrdlo je umístěno v nejvyšším místě nádoby, tedy na horním dnu. Hrdlo H4 bude použito k nainstalování teploměru. Hrdlo H5 bude využito pro tlakoměr. Jako kontrolní otvor použijeme hrdlo H6, které je zaslepeno šroubovací zátkou. Celá nádoba je postavena na třech nosných patkách kruhového průřezu. Pro přepravu nádoby budou používány přepravní oka přivařená k hornímu dnu.



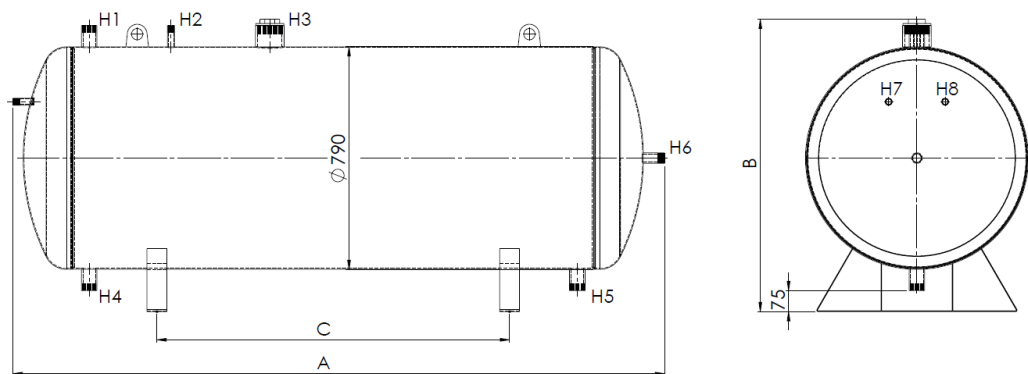
Obr. 20 Nákres stojné nádoby



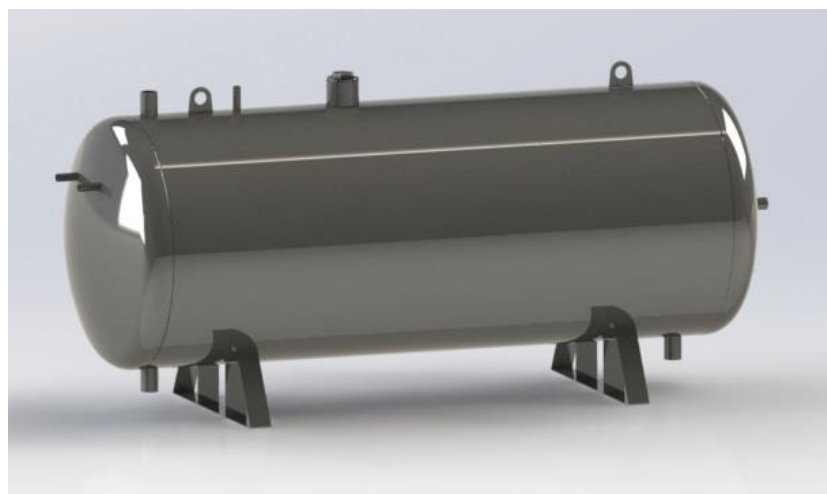
Obr. 21 3D model stojné nádoby

5.2 Ležatá nádoba

Tato nádoba je konstrukčně řešena vzhledem k poloze osy jako ležatá nádoba. Průměr nádoby je 790 mm. Přívod provozního média je zajištěn hrdlem H5. Odvod média zajišťuje hrdlo H1. Pro vypouštění média budeme používat hrdlo H4 umístěné v nejnižším místě nádoby a 75 mm od země. Odvzdušnění je řešeno hrdlem H2 umístěné v nejvyšším místě nádoby, ve kterém bude nainstalován pojistný ventil. Hrdlo H7 bude použito k nainstalování teploměru. Hrdlo H8 použijeme pro tlakoměr. Hrdlo H6 bude použito k cirkulaci média v nádobě. Jako kontrolní otvor použijeme hrdlo H3, které je zaslepeno šroubovací zátkou. Nádoba je posazena na dvou nosných konzolích. Pro přepravu nádoby budou používány přepravní oka přivařená k plášti nádoby.



Obr. 22 Náskres ležaté nádoby



Obr. 23 3D model ležaté nádoby

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI

Teoretická část bakalářské práce byla zaměřena na literární popis a návrh konstrukčních řešení netopených tlakových nádob.

Praktická část je zaměřena na statický výpočet zvolené alternativy netopené tlakové nádoby.

Pro statický výpočet jsem si zvolil nádobu v provedení stojné o průměru 790 mm, objemu 1000 litrů a s pracovním 1 MPa. Nádobu bude vyrobena z materiálu P265GH, jehož dovolené namáhání při teplotě 20 °C je 171 MPa.

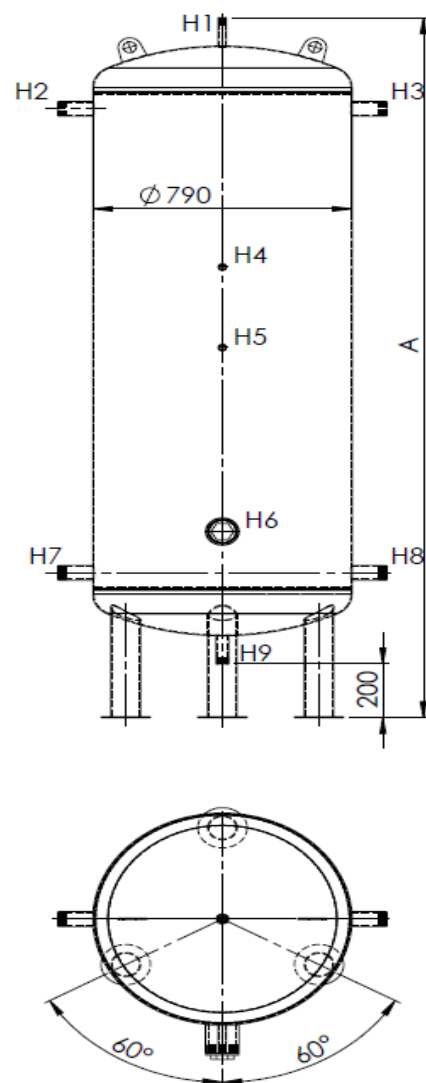
Rozměry hrdel dle obr.

H1, H4, H5 – TR Ø 25x3mm

H2, H3, H7, H8 – TR Ø 48x5mm

H6 – TR Ø 95x5mm

H9 – TR Ø 55x5mm



Obr. 24 Nákres stojné nádoby

7 VÁLCOVÁ SKOŘEPINA

7.1 Minimální přípustná tloušťka stěny válcové skořepiny

$$e_s = \frac{P \cdot D_{es}}{2 \cdot f \cdot z + P} = \frac{1 \cdot 790}{2 \cdot 171 \cdot 1 + 1} = 2,3 \text{ mm} \quad (6)$$

Kde: P – pracovní tlak [MPa]

D_{es} – vnější průměr skořepiny [mm]

f – dovolené namáhání [MPa]

z – součinitel hodnoty spoje [-]

K této minimální tloušťce je nutno ještě připočítat přídavek na možné zeslabení materiálu při výrobě δ_m , přídavek na korozi c (platí jen u nádrží, kde hrozí koroze nebo jiná degradace materiálu) a přídavek na doplnění jmenovité tloušťky e_{exs} . Výrobní tloušťku stěny skořepiny vypočteme ze vzorce:

$$e_{vs} = e_s + \delta_m + c + e_{exs} = 2,3 + 1 + 1 + 0,7 = 5 \text{ mm} \quad (7)$$

7.2 Dovolený vnitřní přetlak působící na skořepinu

Navrženou tloušťku pláště nyní zkontrolujeme na požadovaný tlak $P = 1 \text{ MPa}$.

Dovolený tlak vypočítáme ze vzorce:

$$P_D = \frac{2 \cdot f \cdot z \cdot e_{as}}{D_{ms}} = \frac{2 \cdot 171 \cdot 1 \cdot 3}{785} = 1,3 \text{ MPa} \quad (8)$$

$$P_D \geq P \quad (9)$$

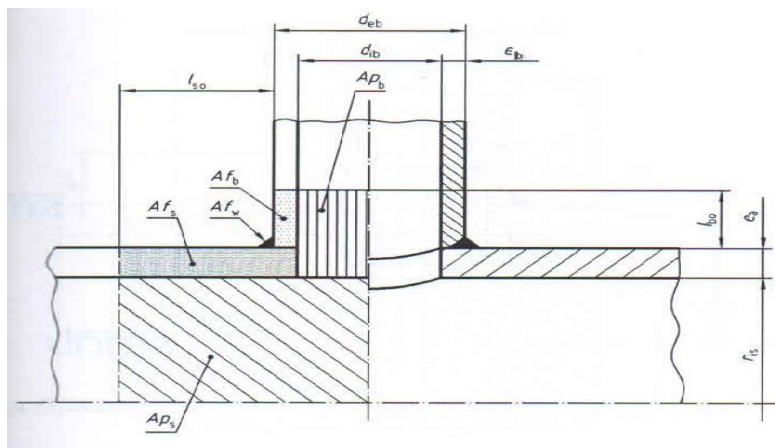
Kde: D_{ms} – střední průměr skořepiny [mm]

e_{as} – analyzovaná tloušťka skořepiny ($e_{as} = e_s + e_{exs}$) [mm]

Navržená tloušťka pláště skořepiny vyhovuje podmínce pro dovolený vnitřní přetlak.

7.3 Maximální přípustný vnitřní přetlak působící na skořepinu při otvoru s nasazeným hrdlem

V předchozím bodu byl spočítán dovolený vnitřní přetlak, pro válcovou skořepinu bez otvorů pro hrdla. Nyní je nutno zkontrolovat, zda navržená tloušťka pláště skořepiny vydrží požadovaný přetlak, i když v něm budou vytvořeny otvory pro hrdla. Abychom nemuseli počítat každý otvor zvlášť, vybereme otvor s hrdlem o největším průměru, které se na nádobě nachází. V tomto případě to je otvor s hrdlem H6.



Obr. 25 Válcová skořepina s osamoceným otvorem a nasazeným hrdlem [2]

Maximální přípustný vnitřní přetlak je dán vztahem:

$$P_{\max} = \frac{(A_{fs} + A_{fw} + A_{fb}) \cdot f}{(A_{ps} + A_{pb}) + 0,5 \cdot (A_{fs} + A_{fw} + A_{fb})} \quad (10)$$

Nosná plocha příčného průřezu hrdla účinná pro vyztužení A_{fb} :

$$A_{fb} = e_b \cdot l_{bo} = 5 \cdot 21,2 = 106 \text{ mm}^2 \quad (11)$$

Maximální vyztužující délka vnější části hrdla:

$$l_{bo} = \sqrt{(d_{eb} - e_b) \cdot e_b} = \sqrt{(95 - 5) \cdot 5} = 21,2 \text{ mm} \quad (12)$$

Kde: d_{eb} – vnější průměr hrdla [mm]

e_b – tloušťka stěny hrdla [mm]

Nosná plocha příčného průřezu nádoby účinná pro vyztužení A_{fs} :

$$A_{fs} = (e_b + l_{so}) \cdot e_{as} = (5 + 49) \cdot 3 = 162 \text{mm}^2 \quad (13)$$

Maximální vyztužující délka skořepiny:

$$l_{so} = \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_{as}) \cdot e_{as}} = \sqrt{(2 \cdot 392 + 3) \cdot 3} = 49 \text{mm} \quad (14)$$

Vnitřní poloměr křivosti skořepiny:

$$r_{is} = \frac{D_{es}}{2} - e_{as} = \frac{790}{2} - 3 = 392 \text{mm} \quad (15)$$

Kde: e_{as} – analyzovaná tloušťka stěny skořepiny [mm]

D_{es} – vnější průměr skořepiny [mm]

Plocha nádoby zatížená tlakem A_{ps} :

Plocha nádoby zatížená tlakem se určí jako největší hodnota z A_{psL} a A_{psT}

$$A_{ps} = \max(A_{psL}; A_{psT}) \quad (16)$$

$$A_{ps} = \max(37828; 9619)$$

$$A_{ps} = 37828 \text{mm}^2$$

a) Podélný řez:

$$A_{psL} = r_{is} \cdot (l_{so} + \frac{d_{eb}}{2}) = 392 \cdot (49 + \frac{95}{2}) = 37828 \text{mm}^2 \quad (17)$$

b) Příčný řez:

$$A_{psT} = \frac{0,5 \cdot r_{is}^2 \cdot (l_{so} + a)}{0,5 \cdot e_{as} + r_{is}} = \frac{0,5 \cdot 392^2 \cdot (49 + 0,8290)}{0,5 \cdot 3 + 392} = 9619 \text{mm}^2 \quad (18)$$

$$r_{ms} = (r_{is} + 0,5 \cdot e_{as}) = (392 + 0,5 \cdot 3) = 393,5 \text{mm} \quad (19)$$

$$a = r_{ms} + \arcsin \delta = 393,5 + \arcsin 0,1207 = 0,8290 \text{ mm} \quad (20)$$

$$\delta = \frac{d_{eb}}{2 \cdot r_{ms}} = \frac{95}{2 \cdot 393,5} = 0,1207 \quad (21)$$

Plocha hrdla zatížená tlakem A_{pb} :

$$A_{pb} = 0,5 \cdot d_{ib} \cdot (l_{bo} + e_{as}) = 0,5 \cdot 85 \cdot (21,2 + 3) = 1029 \text{ mm}^2 \quad (22)$$

Kde: d_{ib} – vnitřní průměr hrdla [mm]

Maximální přípustný vnitřní přetlak:

Dosažením do rovnice (10) dostáváme:

$$P_{\max} = \frac{(162 + 5 + 106) \cdot 171}{(37828 + 1029) + 0,5 \cdot (162 + 5 + 106)}$$

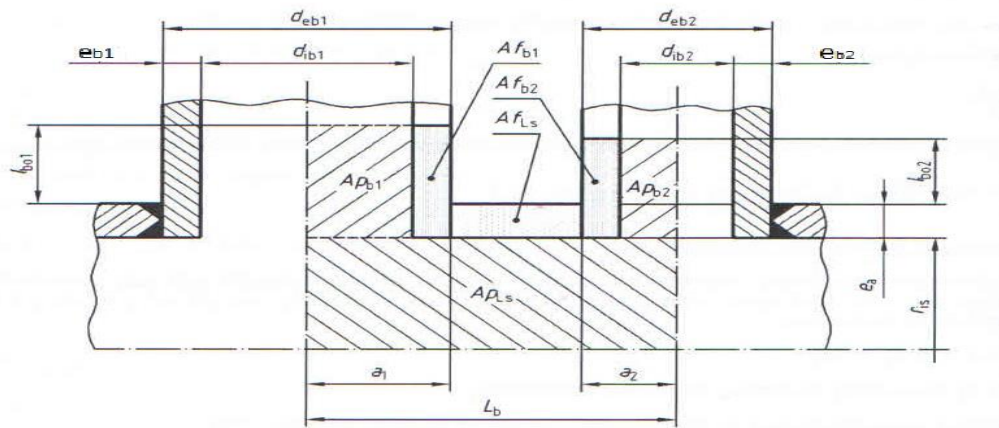
$$P_{\max} = 1,2 \text{ MPa}$$

$$P_{\max} \geq P \quad (23)$$

Navržená tloušťka skořepiny vyhovuje i této podmínce pro maximální přípustný vnitřní přetlak.

7.4 Kontrola můstků hrdel

Nyní se provede kontrola rozteče otvorů pro hrdla, zda jejich vzdálenost neovlivní tlakovou odolnost válcové skořepiny. Jedná se o hrdla H4 a H5, které mají nejmenší rozteč.



Obr. 26 Můstky přilehlých kolmých hrdel na válcové skořepině [2]

Rozteč hrdel je dána podmínkou:

$$(Af_{Ls} + Af_w) \cdot (f - 0,5 \cdot P) + Af_{b1} \cdot (f - 0,5 \cdot P) + Af_{b2} \cdot (f - 0,5 \cdot P) \geq P \cdot (Ap_{Ls} + Ap_{b1} + Ap_{b2}) \quad (24)$$

Nosná plocha příčného průřezu skořepiny účinná pro vyztužení Af_{Ls} :

$$Af_{Ls} = (L_b - a_1 - a_2) \cdot e_{as} = (300 - 12,5 - 12,5) \cdot 3 = 825 \text{ mm}^2 \quad (25)$$

Kde: L_b – rozteč mezi hrdly [mm]

$a_{1,2}$ – vzdálenost středu otvoru a vnějšího kraje hrdla [mm]

e_{as} – analyzovaná tloušťka skořepiny [mm]

Plocha skořepiny zatížená tlakem Ap_{Ls} :

$$Ap_{Ls} = \frac{0,5 \cdot r_{is}^2 \cdot L_b \cdot (1 + \cos \Psi)}{r_{is} + 0,5 \cdot e_{as} \cdot \sin \Psi} = \frac{0,5 \cdot 392^2 \cdot 300 \cdot (1 + \cos 0)}{392 + 0,5 \cdot 3 \cdot \sin 0} = 117600 \text{ mm}^2 \quad (26)$$

Kde: r_{is} – vnitřní poloměr křivosti skořepiny [mm]

e_{as} – analyzovaná tloušťka skořepiny [mm]

Ψ – vyosení otvorů mezi sebou [°]

Nosná plocha příčného průřezu účinná pro vyztužení hrdla A_{fb1} a A_{fb2} :

$$A_{fb1} = e_{b1} \cdot l_{bo1} = 3 \cdot 8,1 = 24,3 \text{ mm}^2 \quad (27)$$

$$A_{fb2} = e_{b2} \cdot l_{bo2} = 3 \cdot 8,1 = 24,3 \text{ mm}^2 \quad (28)$$

Maximální vyztužující délka vnější části hrdla:

$$l_{bo1} = \sqrt{(d_{eb1} - e_{b1}) \cdot e_{b1}} = \sqrt{(25 - 3) \cdot 3} = 8,1 \text{ mm} \quad (29)$$

$$l_{bo2} = \sqrt{(d_{eb2} - e_{b2}) \cdot e_{b2}} = \sqrt{(25 - 3) \cdot 3} = 8,1 \text{ mm} \quad (30)$$

Kde: $e_{b1,2}$ – tloušťka stěny hrdla [mm]

$d_{eb1,2}$ – vnější průměr hrdla [mm]

Plocha hrdla zatížená tlakem A_{pb1} a A_{pb2} :

$$A_{pb1} = 0,5 \cdot d_{ib1} \cdot (l_{bo1} + e_{as}) = 0,5 \cdot 19 \cdot (8,3 + 3) = 106 \text{ mm}^2 \quad (31)$$

$$A_{pb2} = 0,5 \cdot d_{ib2} \cdot (l_{bo2} + e_{as}) = 0,5 \cdot 19 \cdot (8,3 + 3) = 106 \text{ mm}^2 \quad (32)$$

Kde: $d_{ib1,2}$ – vnitřní průměr hrdla [mm]

Podmínka pro rozteč hrdel:

Dosazení do rovnice (24) dostáváme:

$$(825 + 2,25) \cdot (171 - 0,5 \cdot 1) + 24,3 \cdot (171 - 0,5 \cdot 1) + 24,3 \cdot (171 - 0,5 \cdot 1) \geq 1 \cdot (117600 + 106 + 106)$$

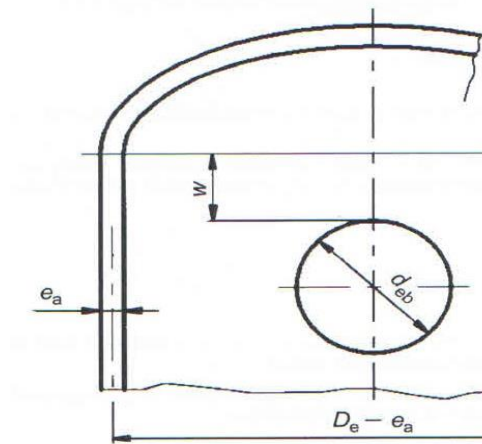
$$149332 \geq 117812$$

Kde: f – dovolené namáhání [MPa]

Rozteč hrdel vyhovuje podmínce pro vzdálenost mezi dvěma hrdly

7.5 Vzdálenost otvoru od hrany dna

Dalším rozměrem pro kontrolu je vzdálenost W mezi hrdlem a klenutým dnem jak je uvedeno na obrázku 27.



Obr. 27 Otvor ve válcové skořepině v blízkosti spoje s klenutým dnem [2]

Minimální vzdálenost mezi hrdlem a dnem nádoby W_{\min} :

$$W_{\min} = 0,2 \cdot \sqrt{2 \cdot r_{is} + e_{as}} \cdot e_{as} = 0,2 \cdot \sqrt{2 \cdot 392 + 3} \cdot 3 = 9,7 \text{ mm} \quad (33)$$

$$W \geq W_{\min}$$

$$76 \geq 9,7$$

Kde: W – vzdálenost mezi hrdlem a dnem nádoby [mm]

W_{\min} – minimální vzdálenost mezi hrdlem a dnem nádoby [mm]

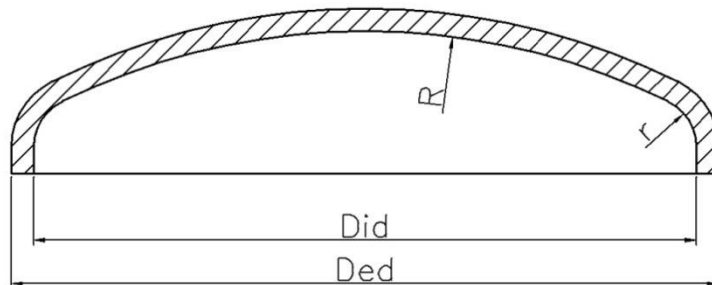
r_{is} – vnitřní poloměr křivosti skořepiny [mm]

e_{as} – analyzovaná tloušťka skořepiny [mm]

Vzdálenost W mezi hrdlem a dnem nádoby je dostatečná.

8 DNA NÁDOBY

8.1 Tloušťka stěny dna



Obr. 28 Základní rozměry klenutého dna

Jelikož jsou obě dna stejná, liší se pouze velikostí hrdel, které jsou na dnech přivařena, ale s tímto výpočtem nijak nesouvisí, výpočet bude platit pro obě dna. Minimální přípustnou tloušťku dna určíme jako největší hodnotu z e_z , e_y , e_b .

8.1.1 Výpočet minimální tloušťky stěny pro omezení membránového napětí ve střední části dna

$$e_s = \frac{P \cdot R}{2 \cdot f \cdot z - 0,5 \cdot P} = \frac{1 \cdot 790}{2 \cdot 171 \cdot 1 - 0,5 \cdot 1} = 2,3 \text{ mm} \quad (34)$$

Kde: P – požadovaný tlak [MPa]

R – vnitřní poloměr střední kulové části dna [mm]

f – dovolené namáhání [MPa]

z – součinitel hodnoty spoje [-]

8.1.2 Výpočet minimální tloušťky stěny anuloidového přechodu pro zabránění axiálně symetrické deformaci

U tohoto vzorce je hodnota D_{id} neznámá. Tato hodnota vychází z tloušťky stěny dna. Proto se, určí pomocná tloušťka stěny dna. Z praxe je známo, že tloušťka stěny dna je ve většině případů větší nebo stejná jako tloušťka stěny válcové skořepiny. Volím tedy pomocnou tloušťku stěny dna $e_p = 8\text{mm}$.

$$e_y = \frac{\beta \cdot P \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_{id})}{f} = \frac{0,8 \cdot 1 \cdot (0,75 \cdot 790 + 0,2 \cdot 774)}{171} = 3,5\text{mm} \quad (35)$$

Kde: β – součinitel dle ČSN EN 13445-3 [-]

D_{id} – vnitřní průmět dna ($D_{id} = D_{ed} - 2 \cdot e_p$) [mm]

8.1.3 Výpočet minimální tloušťky stěny anuloidového přechodu pro zabránění plastického boulení

V tomto vzorci se také nachází hodnota D_{id} . Použijeme stejnou hodnotu jako u rovnice 36.

$$e_b = (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_{id}) \cdot \left[\frac{P}{111 \cdot f} \cdot \left(\frac{D_{id}}{r} \right)^{0,825} \right]^{\left(\frac{1}{1,5} \right)} \quad (36)$$

$$e_b = (0,75 \cdot 790 + 0,2 \cdot 774) \cdot \left[\frac{1}{111 \cdot 171} \cdot \left(\frac{774}{79} \right)^{0,825} \right]^{\left(\frac{1}{1,5} \right)} = 3,7\text{mm}$$

Minimální přípustná tloušťka stěny dna je $e_d = 3,7\text{ mm}$. Stejně, jako u válcové části nádoby je nutno připočíst přídavek na možné zeslabení materiálu při výrobě δ_m , přídavek na korozi c a přídavek na doplnění jmenovité tloušťky e_{exd} . Výrobní tloušťka klenutého dna tedy bude:

$$e_{vd} = e_d + \delta_m + c + e_{exd} = 3,7 + 1 + 1 + 0,3 = 6\text{mm} \quad (37)$$

8.2 Podmínky platnosti vzorců

Nyní, když známe velikost tloušťky stěny dna, je nutné ověřit, zda navržené dno splňuje podmínky platnosti vzorců, podle kterých se počítalo.

$$r \geq 0,2 \cdot D_{id} \Rightarrow 79 \geq 155,6 \quad (38)$$

$$r \geq 0,06 \cdot D_{id} \Rightarrow 79 \geq 46,68 \quad (39)$$

$$r \geq 2 \cdot e_v \Rightarrow 79 \geq 12 \quad (40)$$

$$e_v \leq 0,08 \cdot D_{ed} \Rightarrow 6 \leq 63,2 \quad (41)$$

$$e_{ad} \geq 0,001 \cdot D_{ed} \Rightarrow 4 \geq 0,79 \quad (42)$$

$$R \geq D_{ed} \Rightarrow 790 \geq 790 \quad (43)$$

Kde: D_{id} – vnitřní průmět dna [mm]

D_{ed} – vnější průmět dna [mm]

r – vnitřní poloměr křivosti anuloidového přechodu [mm]

e_v – výrobní tloušťka stěny dna [mm]

e_{ad} – analyzovaná tloušťka dna ($e_{ad}=e_d+e_{exd}$) [mm]

R – vnitřní poloměr střední kulové části dna [mm]

Všechny podmínky platnosti vzorců jsou splněny, dno tudíž může být použito pro tuto tlakovou nádobu.

8.3 Dovolený vnitřní přetlak působící na dno

Nyní stejně jako u válcové části nádoby je nutno zkontrolovat, zda navržené dno vydrží požadovaný vnitřní přetlak $P = 1$ MPa. Dovolený vnitřní přetlak určíme jako nejmenší hodnotu z P_s , P_y , P_b .

$$P_s = \frac{2 \cdot f \cdot z \cdot e_{ad}}{R + 0,5 \cdot e_{ad}} = \frac{2 \cdot 171 \cdot 1 \cdot 4}{790 + 0,5 \cdot 4} = 1,7 \text{ MPa} \quad (44)$$

(45)

$$P_y = \frac{f \cdot e_{ad}}{\beta \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_{id})} = \frac{174 \cdot 4}{0,8 \cdot (0,75 \cdot 790 + 0,2 \cdot 778)} = 1,1 \text{ MPa}$$

$$P_b = 111 \cdot f \cdot \left(\frac{e_{ad}}{0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_{id}} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{r}{D_{id}} \right)^{0,825} \quad (46)$$

$$P_b = 111 \cdot 171 \cdot \left(\frac{4}{0,75 \cdot 790 + 0,2 \cdot 778} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{79}{778} \right)^{0,825} = 1,2 \text{ MPa}$$

Maximální dovolený vnitřní přetlak působící na dno $P_D = 1,1 \text{ MPa}$

$$P_D \geq P \quad (47)$$

Kde: f – dovolené namáhání [MPa]

z – součinitel hodnoty spoje [-]

e_{ad} – analyzovaná tloušťka dna [mm]

R – vnitřní poloměr střední kulové části dna [mm]

β – součinitel dle ČSN EN 13445-3 [-]

D_{id} – vnitřní průmět dna [mm]

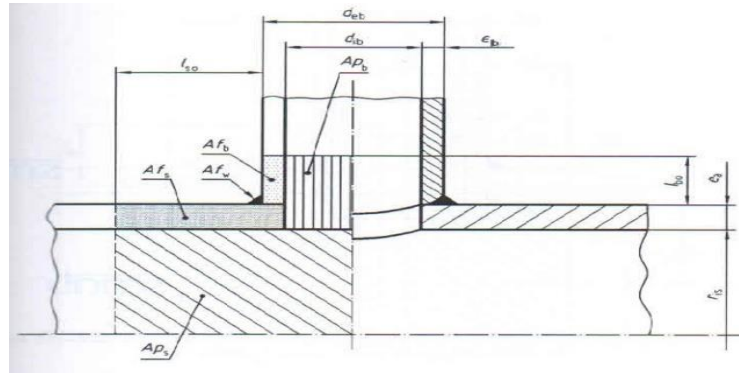
r – vnitřní poloměr křivosti anuloidového přechodu dna [mm]

Navržená tloušťka stěny dna vyhovuje podmínce pro dovolený vnitřní přetlak.

8.4 Maximální přípustný vnitřní přetlak působící na dno při otvoru s nasazeným hrdlem

Stejně jako u válcové skořepiny je nutno zkontrolovat zda navržená tloušťka stěny dna vydrží požadovaný vnitřní přetlak $P = 1 \text{ MPa}$, i když v něm bude zhotoven otvor pro

hrdlo. Jelikož jsou obě dna stejná, budeme počítat se dnem, na němž je umístěno větší hrdlo. V tomto případě se jedná o hrdlo H9.



Obr. 29 Válcová skořepina s osamoceným otvorem a nasazeným hrdlem [2]

Maximální přípustný vnitřní přetlak je dán vzorcem:

$$P_{\max} = \frac{(A_{fs} + A_{fw} + A_{fb}) \cdot f}{(A_{ps} + A_{pb}) + 0,5 \cdot (A_{fs} + A_{fw} + A_{fb})} \quad (48)$$

Nosná plocha příčného průřezu hrdla A_{fb} :

$$A_{fb} = e_b \cdot l_{bo} = 5 \cdot 15,8 = 79 \text{ mm}^2 \quad (49)$$

Maximální vyztužující délka vnější části hrdla:

$$l_{bo} = \sqrt{(d_{eb} - e_b) \cdot e_b} = \sqrt{(55 - 5) \cdot 5} = 15,8 \text{ mm} \quad (50)$$

Kde: d_{eb} – vnější průměr hrdla [mm]

e_b – tloušťka stěny hrdla [mm]

Nosná plocha příčného průřezu nádoby A_{fs} :

$$A_{fs} = (e_b + l_{so}) \cdot e_{ad} = (5 + 76,9) \cdot 4 = 327,6 \text{ mm}^2 \quad (51)$$

Maximální vyztužující délka skořepiny:

$$l_{so} = \sqrt{(2 \cdot R + e_{ad}) \cdot e_{ad}} = \sqrt{(2 \cdot 790 + 4) \cdot 4} = 79,6 \text{ mm} \quad (52)$$

Kde: e_{ad} – analyzovaná tloušťka stěny dna [mm]

R – vnitřní poloměr střední kulové části dna [mm]

Plocha nádoby zatížená tlakem A_{ps} :

$$A_{ps} = \frac{0,5 \cdot R^2 \cdot (l_{so} + a)}{0,5 \cdot e_{ad} + R} = \frac{0,5 \cdot 790^2 \cdot (79,6 + 55)}{0,5 \cdot 4 + 790} = 53033 \text{ mm}^2 \quad (53)$$

$$a = r_{ms} + \arcsin \delta = 792 + \arcsin 0,07 = 55 \text{ mm} \quad (54)$$

$$r_{ms} = R + 0,5 \cdot e_{ad} = 790 + 0,5 \cdot 4 = 792 \text{ mm} \quad (55)$$

$$\delta = \frac{d_{eb}}{r_{ms}} = \frac{55}{792} = 0,07 \quad (56)$$

Plocha hrdla zatížená tlakem A_{pb} :

$$A_{pb} = 0,5 \cdot d_{ib} \cdot (l_{bo} + e_{ad}) = 0,5 \cdot 45 \cdot (15,8 + 4) = 445,5 \text{ mm}^2 \quad (57)$$

Kde: d_{ib} – vnitřní průměr hrdla [mm]

Maximální přípustný vnitřní přetlak:

Dosazením do rovnice (48) dostáváme:

$$P_{\max} = \frac{(327,6 + 5 + 79) \cdot 171}{(53033 + 455,5) + 0,5 \cdot (327,6 + 5 + 79)}$$

$$P_{\max} = 1,2 \text{ MPa}$$

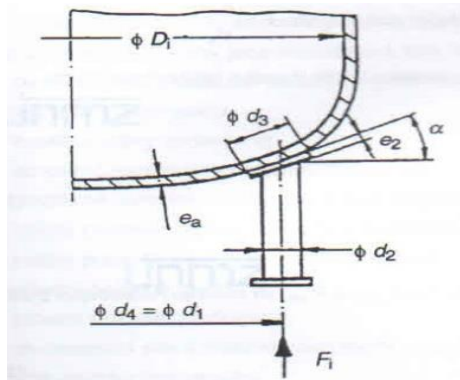
$$P_{\max} \geq P \quad (58)$$

Kde: f – dovolené namáhání [MPa]

Navržená tloušťka stěny dna vyhovuje podmínce pro maximální přípustný vnitřní přetlak.

9 OPĚRNÉ NOHY NÁDOBY

9.1 Kontrola na protlačení dna



Obr. 30 Opěrná noha svislé nádoby [2]

Aby nohy dno neprotlačily, musí být splněny dvě podmínky:

$$\frac{F_i}{F_{i\max}} \leq 1 \quad (59)$$

Podmínka 1:

$$\frac{F_i - P \cdot \pi \cdot d_{\text{eff}}^2 / 4}{F_{i\max}} + \frac{P}{P_{\max}} \leq 1 \quad (60)$$

Podmínka 2:

Síla působící na jednu nohu:

$$F_i = \frac{F}{n} = \frac{m \cdot g}{n} = \frac{1315 \cdot 9,81}{3} = 4300N \quad (61)$$

Kde: F – zatížení plné nádrže [N]

m – hmotnost plné nádrže [kg]

g – tíhové zrychlení [m/s²]

n – počet noh [-]

Maximální působící síla na jednu nohu:

$$F_{i\max} = f \cdot e_{ad}^2 \cdot \frac{1}{\cos\alpha} \cdot (1,82 + 3,6 \cdot \lambda + 0,91 \cdot \lambda^2) \quad (62)$$

$$F_{i\max} = 171 \cdot 4^2 \cdot \frac{1}{\cos 26^\circ} \cdot (1,82 + 3,6 \cdot 1,6 + 0,91 \cdot 1,6^2)$$

$$F_{i\max} = 30165N$$

Geometrický parametr:

$$\lambda = \frac{d_{eff}}{\sqrt{D_{ed} \cdot e_{ad}}} = \frac{90}{\sqrt{790 \cdot 4}} = 1,6 \quad (63)$$

Kde: f – dovolené namáhání [MPa]

e_{ad} – analyzovaná tloušťka stěny dna [mm]

α – úhel sklonu tečny klenutého dna v místě spoje s nohou [°]

D_{ed} – vnější průměr dna [mm]

d_{eff} – efektivní průměr opěrné nohy [mm]

Podmínka 1:

Dosažením do rovnice (59) dostáváme:

$$\frac{F_i}{F_{i\max}} \leq 1 \quad \frac{4300}{30165} \leq 1 \quad 0,145 \leq 1$$

Kde: F_i – síla působící na jednu nohu [N]

$F_{i\max}$ – maximální působící síla na jednu nohu [N]

Podmínka 2:

Dosažením do rovnice (60) dostáváme:

$$\frac{F_i - P \cdot \pi \cdot d_{eff}^2 / 4}{F_{i\max}} + \frac{P}{P_{\max}} \leq 1$$

$$\frac{4300 - 1 \cdot \pi \cdot 90^2 / 4}{30165} + \frac{1}{1,2} \leq 1$$

$$0,768 \leq 1$$

Kde: d_{eff} – efektivní průměr opěrné nohy [mm]

P – požadovaný tlak [MPa]

P_{\max} – maximální přípustný tlak dna [MPa]

Obě kontrolní podmínky jsou splněny. Pokud by nastal případ, že jedna z podmínek nebude splněna, byli bychom nuceni buď zvětšit rozměry nohou nebo použít podložný plech.

9.2 Kontrola noh na vzpěr

Polární moment nohy:

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} (90^4 - 84^4) = 776703 \text{ mm}^4 \quad (64)$$

Obsahu plochy nohy:

$$S = \frac{\pi}{4} (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = 820 \text{ mm}^2 \quad (65)$$

Poloměr setrvačnosti:

$$i = \sqrt{\frac{I}{S}} = \sqrt{\frac{776703}{820}} = 30,8 \quad (66)$$

Štíhlost opěrné nohy:

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{415}{30,8} = 13,5 \quad (67)$$

Nyní určíme, zda se nacházíme v oblasti pružného nebo nepružného vzpěru.

$$\lambda \leq \lambda_m \quad (68)$$

$$13,5 \leq 93$$

Nacházíme se, v oblasti nepružného vzpěru, nohu budeme kontrolovat podle Tetmajera.

Kritické napětí:

$$\sigma_{krit} = a - b \cdot \lambda = 335 - 0,65 \cdot 13,5 = 326 \text{MPa} \quad (69)$$

Napětí na opěrné noze:

$$\sigma = \frac{F_i \cdot k}{S} = \frac{4300 \cdot 2}{820} = 11 \text{MPa} \quad (70)$$

Kde: D – vnější průměr nohy [mm]

d – vnitřní průměr nohy [mm]

l – délka nohy [mm]

k – koeficient bezpečnosti [-]

a, b – materiálové konstanty [-]

Při kontrole dle Tetmajera musí být splněna podmínka:

$$\sigma_{krit} \geq \sigma \quad (71)$$

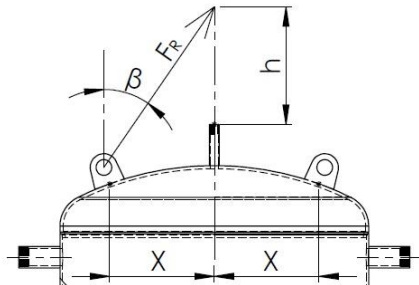
$$334 \geq 11$$

Opěrná noha vyhovuje kontrole na vzpěr.

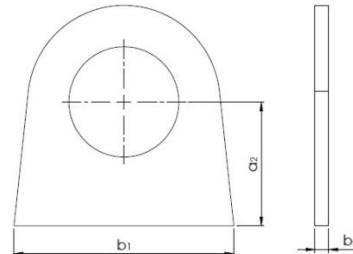
Navržená nohy splňují všechny požadované kontrolní výpočty, mohou se tedy použít pro tuto tlakovou nádobu.

10 PŘEPRAVNÍ OKA

10.1 Kontrola navrhnutého přepravního oka



Obr. 31 Síla působící na oko



Obr. 32 Rozměry oka

Abychom mohli navržené přepravní oko použít, musí být splněna podmínka:

$$F_{R\max} \geq F_R \quad (72)$$

Síla působící na jedno oko:

$$F_R = \frac{W_n}{2 \cdot \cos \beta} = \frac{3150}{2 \cdot \cos 35^\circ} = 1923 \text{ N} \quad (73)$$

Kde: W_n – tíha prázdné nádoby [N]

β – úhel směru působící síly F_R [°]

Maximální přípustná síla působící na jedno oko:

$$F_{R\max} = \frac{\sigma_{b,a} \cdot e_{ad}^2}{K_{13} \cdot |\cos \beta| + K_{14} \cdot |(a_2 \cdot \sin \beta)| / b_1} \quad (74)$$

Geometrický parametr:

$$\lambda = \frac{b_1}{\sqrt{D_{ed} \cdot e_{ad}}} = \frac{80}{\sqrt{790 \cdot 4}} = 1,4 \quad (75)$$

Kde: b_1 – délka nosného oka spojená se dnem [mm]

e_{ad} – analyzovaná tloušťka dna [mm]

D_{ed} – vnější průměr dna [mm]

Koeficient K_{13} :

$$K_{13} = \frac{1}{1,2 \cdot \sqrt{1 + 0,06 \cdot \lambda^2}} = \frac{1}{1,2 \cdot \sqrt{1 + 0,06 \cdot 1,4^2}} = 0,78 \quad (76)$$

Koeficient K_{14} :

$$K_{14} = \frac{1}{0,6 \cdot \sqrt{1 + 0,06 \cdot \lambda^2}} = \frac{1}{0,6 \cdot \sqrt{1 + 0,06 \cdot 1,4^2}} = 1,6 \quad (77)$$

Poměr mezi lokálním membránovým a lokálním ohybovým napětím:

$$\nu_1 = \min(0,08 \cdot \lambda; 0,30) \quad (78)$$

$$\nu_1 = \min(0,08 \cdot 1,4; 0,30)$$

$$\nu_1 = 0,112$$

Poměr mezi dovoleným a globálním membránovým napětím:

$$\nu_2 = \frac{\sigma_m}{k_2 \cdot f} = \frac{P \cdot D_{ed}}{k_2 \cdot f \cdot 2 \cdot e_{ad}} = \frac{1 \cdot 790}{1,25 \cdot 171 \cdot 2 \cdot 4} = 0,46 \quad (79)$$

Kde: P – požadovaný tlak [MPa]

f – dovolené namáhání [MPa]

k_2 – součinitel [-]

Součinitel k_1 :

$$k_1 = \frac{1 - \nu_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \nu_1 \cdot \nu_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \nu_1 \cdot \nu_2\right)^2 + (1 - \nu_2^2) \cdot \nu_1^2}} \quad (80)$$

$$k_1 = \frac{1 - 0,46^2}{\left(\frac{1}{3} + 0,112 \cdot 0,46\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + 0,112 \cdot 0,46\right)^2 + (1 - 0,46^2) \cdot 0,112^2}}$$

$$k_1 = 0,99$$

Mezní ohybové napětí skořepiny:

$$\sigma_{b,dl} = k_1 \cdot k_2 \cdot f = 0,99 \cdot 1,25 \cdot 171 = 212 \text{MPa} \quad (81)$$

Maximální přípustná síla působící na jedno oko:

Dosažením do rovnice (74) dostáváme:

$$F_{R_{\max}} = \frac{212 \cdot 4^2}{0,78 \cdot |\cos 35^\circ| + 1,6 \cdot |(45 \cdot \sin 35^\circ)| / 80}$$

$$F_{R_{\max}} = 7438 \text{N}$$

Kde: a_2 – vzdálenost působíště zatížení od dna [mm]

b_1 – délka nosného oka spojená se dnem [mm]

e_{ad} – analyzovaná tloušťka dna [mm]

Podmínka použitelnosti navrhnutého přepravního oka:

Dosažením do rovnice (72) dostáváme:

$$7438 \geq 1923$$

Přepravní oko splňuje podmínku použitelnosti. Kdyby nastal případ, že podmínka použitelnosti bude **nesplněna**, musela by se zmenšit hodnota X nebo přidat podložný plech.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byl návrh netopené tlakové nádoby, která se využívá k akumulaci tekutin, vyrovnávání tlaků v oběhovém systému apod.

V první části bakalářské práce jsou popsány jednotlivé části a výstroj tlakové nádoby. Dále je zde zmíněna problematika spojování jednotlivých částí nádoby dohromady a následně jsou popsány různé svařovací metody používané pro spojování částí tlakových nádob. Dalším bodem teoretické části, byly popsány různé druhy návrhu tlakových nádob s následným popisem výpočtu tloušťky stěny pláště tlakové nádoby.

Druhá část bakalářské práce byla zaměřena na výpočet tlakové nádoby. Pro výpočet byla zvolena nádoba o objemu 1000 litrů a s pracovním tlakem 1 MPa. Na základě objemu nádoby byly vypracovány dva konstrukční návrhy a to v provedení stojném a ležatém. Pro výpočet byla zvolena nádoba v provedení stojné. Jako první byla stanovena minimální tloušťka pláště nádoby a klenutého dna. Následně byla provedena kontrola nepřekročení vnitřního pracovního přetlaku, maximálního přípustného vnitřního přetlaku s ohledem na otvory pro hrdla v plášti a klenutém dnu. Byla zjištěna minimální vzdálenost mezi hranou klenutého dna a nejbližším otvorem. Kontrolou rozměrů opěrných noh bylo zjištěno, že klenuté dno nebude protlačeno opěrnou nohou, dále pak kontrola nohy na vzpěr potvrdila zachování stability nohy při zatížení plné nádoby. Posledním bodem práce bylo zjištěno, že navrhnuté přepravní oka mohou být bezpečně použita k přepravování prázdné nádoby.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SCHNEIDER, P., *Základy konstruování procesních zařízení*, PC – DIR Real, s.r.o., Brno 1999. ISBN 80- 214- 1483- 9
- [2] ČSN EN 13445 – *Netopené tlakové nádoby*, ÚNMZ, Praha 2010.
- [3] NOVOTNÝ, Jiljí. *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02351-6.
- [4] www.schinkmann.cz [online]
Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/mig-mag-co2>
- [5] www.svarecky-elektrody.cz [online]
Dostupné z: <http://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-356/>
- [6] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2000. ISBN 80-7082-697-5.
- [7] www.konstrukce.cz [online]. [cit. 2006 – 16 – 5]
Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita/>
- [8] www.schinkmann.cz [online].
Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/plazma-1>
- [9] VEJVODA, S., *Stavba procesních zařízení - hodnocení odolnosti materiálů tlakových nádob proti jejich poškozování v provozních podmínkách*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002. ISBN 80-214-23021
- [10] BABINSKÝ M., *Dimenzování tlakových zařízení podle mezních stavů* [online]. [cit. 2011 – 25 – 8]
Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1818>
- [11] ŠUBA, Oldřich. *Mechanické chování těles*. 5. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN 978-80-7318-907-5.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MIG	Svařování tavnou kovovou elektrodou v netečném plynu
MAG	Svařování tavnou kovovou elektrodou v aktivním plynu
WIG	Svařování wolframovou elektrodou v netečném plynu
DBA	Návrh na základě analýz
DBE	Návrh na základě experimentu
DBF	Návrh na základě vzorců
TR	Trubka
°C	Stupně celsia
MPa	Mega pascal
H1-H9	Označení hrdel nádob
e_s	Minimální přípustná tloušťka stěny válcové skořepiny [mm]
P	Pracovní tlak [MPa]
D_{es}	Vnější průměr skořepiny [mm]
f	Dovolené namáhání [MPa]
z	Součinitel hodnoty spoje [-]
δ_m	Přídavek na možné zeslabení materiálu při výrobě [mm]
c	Přídavek na korozi [mm]
e_{exs}	Přídavek na doplnění jmenovité tloušťky [mm]
e_{vs}	Výrobní tloušťka skořepiny [mm]
P_D	Dovolený tlak [MPa]
e_{as}	Analyzovaná tloušťka skořepiny [mm]
D_{ms}	Střední průměr skořepiny [mm]
P_{max}	Maximální přípustný vnitřní přetlak [MPa]
A_{fs}	Nosná plocha příčného průřezu nádoby účinná pro vyztužení [mm ²]

A_{fb}	Nosná plocha příčného průřezu hrdla účinná pro vyztužení [mm^2]
A_{fw}	Plocha příčného průřezu koutového svaru mezi hrdlem a skořepinou [mm^2]
A_{ps}	Plocha nádoby zatížená tlakem [mm^2]
A_{pb}	Plocha hrdla zatížená tlakem [mm^2]
e_b	Tloušťka stěny hrdla [mm]
l_{bo}	Maximální vyztužující délka vnější části hrdla [mm]
d_{eb}	Vnější průměr hrdla [mm]
l_{so}	Maximální vyztužující délka skořepiny [mm]
e_{as}	Analyzovaná tloušťka stěny skořepiny [mm]
r_{is}	Vnitřní poloměr křivosti skořepiny [mm]
A_{psL}	Plocha nádoby zatížená tlakem v podélném řezu [mm^2]
A_{psT}	Plocha nádoby zatížená tlakem v příčném řezu [mm^2]
d_{ib}	Vnitřní průměr hrdla [mm]
A_{fLs}	Nosná plocha příčného průřezu účinná pro vyztužení skořepiny podél vnější části hrdla [mm^2]
A_{pLs}	Plocha skořepiny zatížená tlakem po délce vnější části hrdla [mm^2]
L_b	Rozteč mezi hrdly [mm]
$a_{1,2}$	Vzdálenost středu otvoru a vnějšího kraje hrdla [mm]
ψ	vyosení otvorů mezi sebou [$^\circ$]
W	Vzdálenost mezi hrdlem a dnem nádoby [mm]
W_{min}	Minimální vzdálenost mezi hrdlem a dnem nádoby [mm]
R	Vnitřní poloměr střední kulové části dna [mm]
r	Vnitřní poloměr křivosti anuloidového přechodu [mm]
D_{id}	Vnitřní průmět dna [mm]
D_{ed}	Vnější průmět dna [mm]
β	Součinitel dle ČSN EN 13445-3 [-]

e_s	Požadovaná tloušťka stěny anuloidového přechodu pro zabránění plastickému boulení [mm]
e_y	Požadovaná tloušťka stěny dna pro omezení membránového napětí ve střední části dna [mm]
e_b	Požadovaná tloušťka stěny anuloidového přechodu pro zabránění axiálně symetrické deformaci [mm]
e_{vd}	Výrobní tloušťka klenutého dna [mm]
e_{exs}	Přídavek na doplnění jmenovité tloušťky dna [mm]
e_{ad}	Analyzovaná tloušťka dna [mm]
F	Zátížení plné nádrže [N]
F_i	Síla působící na jednu nohu [N]
F_{imax}	Maximální přípustná síla působící na jednu nohu [N]
π	Konstanta [-]
m	Hmotnost plné nádoby [kg]
g	Tíhové zrychlení [m/s^2]
n	Počet noh [-]
d_{eff}	Efektivní průměr opěrné nohy [mm]
α	Úhel sklonu tečny klenutého dna v místě spoje s nohou [$^\circ$]
D	Vnější průměr opěrné nohy [mm]
d	Vnitřní průměr opěrné nohy [mm]
i	Poloměr setrvačnosti [-]
I	Polární moment [mm^2]
S	Obsah plochy nohy [mm^2]
l	Délka nohy [mm]
λ	Štíhlostní poměr [-]
σ_{krit}	Kritické napětí [MPa]

σ	Napětí na opěrné noze [MPa]
k	Koeficient bezpečnosti [-]
a, b	Materiálové konstanty [-]
F_R	Síla působící na jedno přepravní oko [N]
F_{Rmax}	Maximální přípustná síla působící na jedno oko [N]
W_n	Tíha prázdné nádoby [N]
$\sigma_{a,b}$	Mezní ohybové napětí skořepiny [MPa]
K_{13}	Koeficient [-]
K_{14}	Koeficient [-]
b_1	Délka nosného oka spojená se dnem [mm]
ν_1	Poměr mezi lokálním membránovým a lokálním ohybovým napětím [-]
ν_2	Poměr mezi dovoleným a globálním membránovým napětím [-]
k1	Součinitel [-]
k2	Součinitel [-]
a_2	Vzdálenost působíště zatížení od dna [mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ**Nenalezena položka seznamu obrázků.**

Obr. 1 Klenutá dna.....	12
Obr. 2. Zakružování lubů.....	13
Obr. 3. Spojení dvou lubů.....	13
Obr. 4. Pracovní vlez	14
Obr. 5 Hrdla	14
Obr. 6 Krková příruba.....	15
Obr. 7 Příruby fazetou	15
Obr. 8 Kulový kohout	16
Obr. 9 Pojistný ventil.....	16
Obr. 10 Tlakoměr.....	17
Obr. 11 Teploměr.....	17
Obr. 12 Provedení podélného svaru [1]	19
Obr. 13 Provedení uzavíracího svaru [1]	20
Obr. 14 Svařování tavící se elektrodou [4]	21
Obr. 15 Svařování netavící se elektrodou [5]	21
Obr. 16 Svařování laserem [7].....	22
Obr. 17 Svařování plazmou [8].....	22
Obr. 18 Zatížení v osovém směru [11]	24
Obr. 19 Zatížení v obvodovém směru [11].....	25
Obr. 20 Nákres stojné nádoby.....	26
Obr. 21 3D model stojné nádoby	26
Obr. 22 Nákres ležaté nádoby.....	27
Obr. 23 3D model ležaté nádoby	27
Obr. 24 Nákres stojné nádoby.....	29

Obr. 25 Válcová skořepina s osamoceným otvorem a nasazeným hrdlem [2].....	31
Obr. 26 Můstky přilehlých kolmých hrdel na válcové skořepině [2]	34
Obr. 27 Otvor ve válcové skořepině v blízkosti spoje s klenutým dnem [2].....	36
Obr. 28 Základní rozměry klenutého dna	37
Obr. 29 Válcová skořepina s osamoceným otvorem a nasazeným hrdlem [2].....	41
Obr. 30 Opěrná noha svislé nádoby [2]	43
Obr. 31 Síla působící na oko.....	47
Obr. 32 Rozměry oka.....	47

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI CD disk obsahující:

- Bakalářskou práci
- 3D model nádoby