

Optimalizace návrhu ocelové nádoby zatížené vnějším přetlakem

Bc. Jakub Jurka

Diplomová práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Jurka**
Osobní číslo: **T16134**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Optimalizace návrhu ocelové nádoby zatížené vnějším přetlakem**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma
2. Navrhněte konstrukční řešení a vypracujte CAD modely nádob zatížených vnějším přetlakem.
3. Vypracujte FEM modely pro různé geometrické parametry nádoby a řešte úroveň stabilitní odolnosti při zatížení vnějším přetlakem.
4. Vyhodnoťte získané výsledky.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2018

Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2018

Ve Zlíně dne 5. února 2018



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




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

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 užít 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 7. 5. 2018



.....

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 nahlédnutí 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 výpisy, 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 jim 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 přihlíádne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá ztrátou stability ocelových nádob zatížených vnějším přetlakem.

Teoretická část je zaměřena na popis jednotlivých částí tlakových nádob, výstroje a metod spojování jednotlivých částí nádob. Dále se tato část zabývá problematikou nebezpečí zborcení nádob vnějším přetlakem a posouzení stability tenkostěnných konstrukcí.

V praktické části byly vytvořeny FEM modely nádob zatížených vnějším přetlakem. Tyto modely byly podrobeny analýze, ve které byla postupně zvětšována tloušťka stěny nádoby a postupně navyšován počet obvodových výztuh šesti různých typů. Na závěr byly dosažené výsledky vyhodnoceny a následně vybrány optimální řešení konstrukce nádoby.

Klíčová slova: vnější přetlak, ocelová nádoba, skořepina, ztráta stability

ABSTRACT

This thesis deals with a loss of stability of the pressure vessels made of steel, which are loaded by an external overpressure.

The theoretical part is focused on a description of each particular component of the pressure vessels, their equipment and the methods of a joining of these particular components. This part is also dedicated to the issue of the collapse's risk due to the external overpressure and the evaluation of the stability as far as thin-walled constructions are concerned.

There are created FEM models of the vessels, which were loaded by the external overpressure in the practical part. These models were subjected to the analysis, where the thickness of the wall of the vessel was enlarged gradually. There was the amount of six different kinds of circumferential stiffener increased correspondingly. The achieved results were delineated and evaluated consequently, in the end of this thesis.

Key words: external overpressure, steel pressure vessel, shell, loss of stability

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc. Za jeho čas, ochotu, odborné vedení, cenné rady a připomínky, které byly nápomocné ke vzniku mé diplomové práce.

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

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 ČÁSTI TLAKOVÝCH NÁDOB	11
1.1 DŇA	11
1.2 PLÁŠŤ.....	12
1.3 HRDLA, PŘÍRUBY A PRACOVNÍ OTVORY	12
1.4 PRŮLEZY A PRACOVNÍ OTVORY	13
2 VÝSTROJ TLAKOVÉ NÁDOBY	14
2.1 UZAVÍRACÍ A VYPOUŠŤECÍ ARMATURY	14
2.2 TLAKOMĚRY	14
2.3 POJISTNÁ ZAŘÍZENÍ	15
2.3.1 Pojistné ventily.....	15
2.3.2 Výfukové trubky a odvodnění.....	16
2.3.3 Teploměry	16
3 SVAŘOVÁNÍ TLAKOVÝCH NÁDOB	17
3.1 POŽADAVKY NA SVAROVÉ SPOJE.....	17
3.2 HLAVNÍ SVARY.....	17
3.2.1 Podélné svary	17
3.2.2 Obvodové svary	18
3.2.3 Uzavírací svary.....	18
3.3 METODY SVAŘOVÁNÍ TLAKOVÝCH NÁDOB.....	18
3.3.1 Obloukové svařování metodou MIG/MAG	18
3.3.2 Obloukové svařování WIG	19
3.3.3 Plazmové svařování	20
3.3.4 Laserové svařování.....	20
3.4 ZKOUŠKY SVAROVÝCH SPOJŮ.....	21
3.4.1 Nedestruktivní zkoušky.....	21
3.4.2 Destruktivní zkoušky	22
4 NEBEZPEČÍ ZBORCENÍ NÁDOB VNĚJŠÍM PŘETLAKEM	23
4.1 MEZNÍ STAV STABILNÍHO ZBORCENÍ.....	25
5 TEORIE POSOUZENÍ STABILITY TENKOSTĚNNÝCH KONSTRUKCÍ.....	28
5.1 ROZDÍL MEZI DESKOU A SKOŘEPINOU.....	28
5.2 JEDNOOSE TLAČENÁ DESKA S VOLNÝMI PODÉLNÝMI OKRAJI.....	29
5.3 STABILITA DLOUHÉ VÁLCOVÉ SKOŘEPINY ZATÍŽENÉ VNĚJŠÍM PŘETLAKEM.....	31
5.3.1 Vyztužení dlouhé válcové skořepiny	34
6 CÍL PRÁCE	38
7 POČÁTEČNÍ PARAMETRY NÁDOBY.....	39

7.1	VSTUPNÍ PARAMETRY:	39
7.2	NÁVRH NÁDOB	39
7.2.1	Nádoba průměru 400 mm.....	39
7.2.2	Nádoba průměru 600 mm.....	41
8	VÝSLEDKY ANALÝZ.....	44
8.1	ANALÝZY NÁDOB D400_K10, D400_K30 A D400_K50	44
8.1.1	Analýza nádoby D400_K10	44
8.1.2	Analýza nádoby D400_K30	45
8.1.3	Analýza nádoby D400_K50	47
8.1.4	Srovnání výsledku nádob D400_K10, D400_K30 a D400_K50	48
8.2	ANALÝZY NÁDOB D400_J15x15x1,5, D400_J30x30x1,5 A D400_J40x20x2.....	50
8.2.1	Analýza nádoby D400_J15x15x1,5	50
8.2.2	Analýza nádoby D400_J30x30x1,5	52
8.2.3	Analýza nádoby D400_J40x20x2	54
8.2.4	Srovnání výsledku nádob D400_J15x15x1,5, D400_J30x30x1,5 a D400_J40x20x2	56
8.3	ANALÝZY NÁDOB D600_K10, D600_K30 A D600_K50	57
8.3.1	Analýza nádoby D600_K10	57
8.3.2	Analýza nádoby D600_K30	59
8.3.3	Analýza nádoby D600_K50	60
8.3.4	Srovnání výsledku nádob D600_K10, D600_K30 a D600_K50	62
8.4	ANALÝZY NÁDOB D600_J15x15x1,5, D600_J30x30x1,5 A D600_J40x20x2.....	64
8.4.1	Analýza nádoby D600_J15x15x1,5	64
8.4.2	Analýza nádoby D600_J30x30x1,5	66
8.4.3	Analýza nádoby D600_J40x20x2	68
8.4.4	Srovnání výsledku nádob D600_J15x15x1,5, D600_J30x30x1,5 a D600_J40x20x2	70
8.5	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZ	71
	Nádoby průměru 400 mm:	71
	Nádoby průměru 600 mm:	72
	ZÁVĚR	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	76
	SEZNAM OBRÁZKŮ	77
	SEZNAM TABULEK.....	80
	SEZNAM PŘÍLOH.....	81

ÚVOD

Problematika ztráty stability nádoby zatížené vnějším přetlakem je velice sofistikovaná. Můžeme ji chápat tak, že nádoba již nemá schopnost držet svůj tvar a najednou se zbortí do tvaru s menším vnitřním objemem.

Jedním z případů, kdy se v praxi můžeme setkat se ztrátou stability nádoby zatížené vnějším přetlakem a kterým se bude zabývat i tato práce, je případ vícenásobné nádoby. Na vnitřní nádobu působí tlak vyvozený tekutinou ve vnější nádobě. Ve většině případů dochází ke ztrátě stability z důvodu zatížení nádoby „neočekávaným“ vnějším přetlakem. Tento případ může nastat při havarijním stavu, kdy je vnitřní nádoba zcela vyprázdněna a na její plášť působí pouze vnější přetlak.

V současné době, kdy je snaha snižovat náklady na výrobu nádob, záleží hlavně na konstruktérovi, aby zvolil optimální konfiguraci nádoby s co možná nejmenší tloušťkou stěny nádoby. Cílem této práce je navrhnout takové konstrukční řešení nádoby (tj. optimální tloušťku stěny nádoby s vhodným typem a počtem obvodových výztuh), vyhovující všem bezpečnostním parametrům daných normou ČSN EN 13445-3.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ČÁSTI TLAKOVÝCH NÁDOB

Tlakové části nádoby: Část nádoby, na jejíž stěny působí tlak pracovní látky (plášť, dna, příruby, hrdla atd.). [1]

Netlakové části nádoby: Část nádoby, na kterou tlak pracovní látky nepůsobí a je na nádobě umístěna z vnější strany (nosné patky, sedlová podpora, úchyty atd.). [1]

1.1 Dna

U tlakových nádob se používají rovná a klenutá dna. Rovná dna se v praxi používají jen pro nízké pracovní tlaky a to z důvodu malé pevnosti. Je nutné jejich vyztužení. Využívanějším typem jsou klenutá dna, jejichž rozměry jsou normovány.

Tyto dna se dělí na:

- a) Kulová
- b) Eliptická
- c) Torosférická

Nejpoužívanějším typem je torosférické dno vzhledem k jeho menší náročnosti na výrobu a tím i ekonomičnosti. Konstrukce torosférického dna je tvořena třemi částmi: kulový vrchlík, anuloidový přechod a válcová skořepina. Klenutost den se volí v závislosti na pracovním přetlaku, který zapříčiňuje v místech přechodů částí dna koncentrátoři napětí. Proto je vhodné pro vysoké tlaky používat větší klenutí a pro nízké tlaky menší klenutí.

Nejvhodnějším typem by byla polokulová dna, díky lepšímu rozložení působícího tlaku, ale vzhledem k náročnosti výroby jsou používány jen pro velice vysoké tlaky. [1]



Obr. 1. Klenutá dna

1.2 Plášť

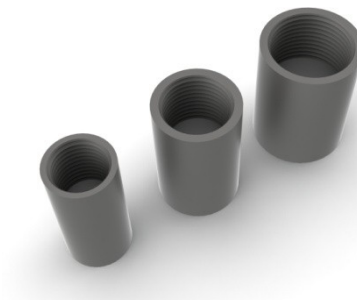
Dělí se na válcové, kulové a kuželové. Válcové a kuželové pláště se zakružují na tří-válcových zakružovačkách. Kuželové pláště se také mohou protlačovat. Kulové pláště jsou lisovány v zápustkách. Plášť nádoby může být tvořen jedním nebo více díly. Tyto díly se nazývají luby. Při konstruování pláště je snahou dosažení co nejmenšího počtu lubů a tím i co nejmenšího počtu svarových spojů. [1]



Obr. 2. Zkružování pláště [2]

1.3 Hrdla, příruby a pracovní otvory

Hrdla a příruby slouží k propojování nádob, spojování potrubí s nádobou, ustavení armatur (teploměr, tlakoměr, pojistný ventil atd.). Hrdla mohou mít vnější nebo vnitřní trubkový závit se stálým průměrem nebo kuželovým. Příruby tvoří rozebíratelný přírubový spoj, který je tvořen dvěma přírubami, mezi které se vkládá těsnění. Těsné spojení mezi přírubami zajišťují šrouby, jejichž rozměr a počet se odvíjí od pracovního přetlaku. Příruby mohou být ploché, krkové, závitové atd. [1]



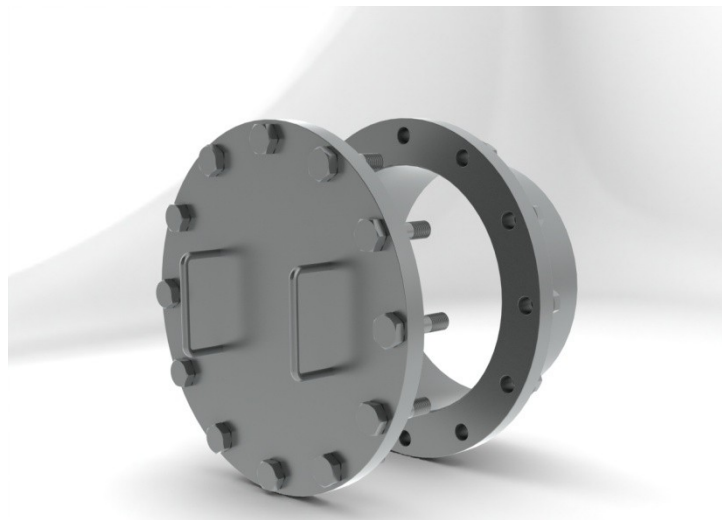
Obr. 3. Hrdla



Obr. 4. Příruba

1.4 Průlezy a pracovní otvory

Nádoby s vnitřním průměrem větším než 800 mm musí mít alespoň jeden průlez. Nádoby s vnitřním průměrem 800 mm a menším musí být opatřeny dvěma pracovními otvory kruhového nebo oválného tvaru s menší osou minimálně 80 mm. Pokud z konstrukčních důvodů není možná prohlídka nebo pokud mají nádoby snímatelná dna, víka nebo hrdla umožňující prohlídku a čištění nádob, nemusí mít pracovní otvory a průlezy. Pracovní otvory a průlezy se umísťují mimo podélné svary. Pokud to není možné a otvory jsou umístěny ve svarech, je nutné provést kontrolu prozařovací metodou nebo ultrazvukovou defektoskopií. [1]



Obr. 5. Kontrolní otvor

2 VÝSTROJ TLAKOVÉ NÁDOBY

Jedná se o různá zařízení zabezpečující plynulý a bezpečný provoz tlakové nádoby umístěná tak, aby byly dobře přístupné obsluze během provozu nádoby.

Tlaková nádoba musí být opatřena:

- a) Uzavírací a vypouštěcí armaturou
- b) Tlakoměrem
- c) Pojistným zařízením
- d) Odvětrávacím uzávěrem (odvzdušněním)

U nádob, jejichž nejvyšší pracovní přetlak je vyšší než přetlak dosažitelný zdrojem přetlaku a je-li vyloučeno zvýšení pracovního přetlaku v nádobě, není potřeba tlakoměr a pojistné zařízení umísťovat na nádobu. [1]

2.1 Uzavírací a vypouštěcí armatury

Slouží k regulaci průtoku pracovního média z nádoby nebo do nádoby. Pro tlakové nádoby lze používat jen armatury vyhovující normě ČSN 13 3060 a ČSN 13 3041. Jako uzavírací a vypouštěcí jsou označovány šoupátko, ventil, kulový kohout, klapka. [1]



Obr. 6. Kulový kohout

2.2 Tlakoměry

Tlakoměry slouží ke kontrole tlaku uvnitř nádoby. Měřící rozsah tlakoměru se volí tak, aby se pracovní přetlak pohyboval ve druhé třetině stupnice tlakoměru. Nejvyšší pracovní přetlak, který je přípustný z hlediska bezpečného provozu nádoby, musí být na tla-

koměru vyznačen červenou značkou. Tlakoměr se umísťuje přímo na nádobu, ve výjimečných případech je umožněno ho umístit na přívodní potrubí nádoby. Mezi tlakoměrem a nádobou nesmí být uzavírací armatura. Ukazatelé tlaku musí být dobře viditelné ze stanoviště obsluhy. [1]



Obr. 7. Tlakoměr

2.3 Pojistná zařízení

Pojistná zařízení musí spolehlivě zamezit překročení nejvyššího pracovního přetlaku nebo nejvyšší pracovní teploty v nádobě.

2.3.1 Pojistné ventily

Pojistné ventily musí splňovat požadavky normy ČSN 13 4309-2. Zpravidla se umísťují přímo na nádobu, obvykle na nejvyšší místo nádoby a zabezpečují se před ucpáním nebo vyřazením z činnosti pracovní látkou. Umístění pojistných ventilů přímo na nádobu je povinné v případě, kdy v nádobě může dojít ke zvýšení přetlaku i bez přívodu pracovní látky. Mezi pojistným ventilem a nádobou nesmí být uzavírací armatura. Ventily musí být umístěny a upraveny tak, aby obsluha nemohla být při jejich činnosti zdravotně ohrožena unikající pracovní látkou. Jejich nastavení musí být takové, aby se otevíraly při dosažení nejvyššího pracovního přetlaku v nádobě nebo pracovním prostoru. [1]



Obr. 8. Pojistný ventil

2.3.2 Výfukové trubky a odvodnění

Přivádí-li se do nádoby nebo se v ní mohou tvořit vznětlivé nebo jedovaté plyny a páry, musí být spolehlivě zabráněno jejich pronikání na pracoviště např. odváděcími trubkami, vedoucími od pojistných zařízení na místo, kde je možno je spolehlivě zneškodnit. Vyfukovaná trubka má být co nejkratší, pokud možno přímá a je-li nutný ohyb, umísťuje se co nejbližší k pojistnému ventilu. Odvodňovací potrubí musí být řešeno se spádem tak, aby pracovní látka nestékala na nádobu nebo neohrozila obsluhu. Konec odvodňovacího potrubí musí být dobře viditelný. [1]

2.3.3 Teploměry

Je-li pracovním médiem přehřátá pára nebo kapalina o teplotě vyšší než 50 °C musí mít nádoba teploměr. Teploměr musí být umístěn na viditelné místo. Nejvyšší ne nejnižší teplota musí být na teploměru vyznačena ryskou nebo jiným způsobem. [1]



Obr. 9. Teploměr

3 SVAŘOVÁNÍ TLAKOVÝCH NÁDOB

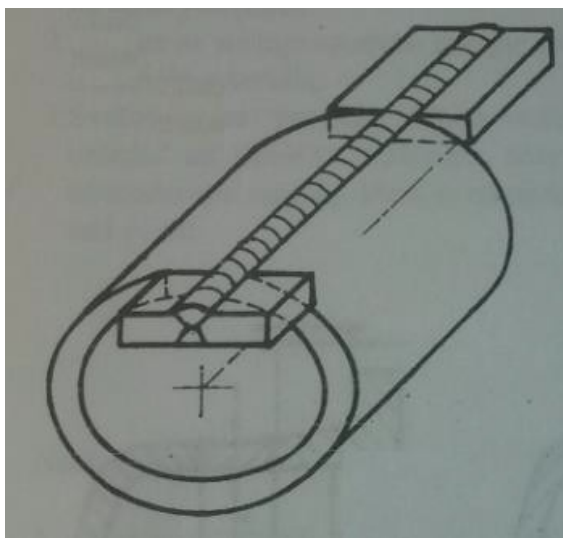
3.1 Požadavky na svarové spoje

Pro svarové spoje se musí především používat tupé svary s plným provařením. Přesazení os podélných svarových spojů sousedících lubů a svarů den musí činit alespoň trojnásobek tloušťky nejsilnější části, nejméně však 100 mm. U plášťů s vnitřním průměrem do 130 mm musí být podélné svary přesazeny nejméně na úhel 90° . Podélné svarové spoje ležatých nádob se nesmí umísťovat ve středovém úhlu 140° spodní části, pokud je tato část málo přístupná prohlídce. Svarové spoje nádob nesmějí být překryty podpěrami nebo podložnými plechy. Na vnějších a vnitřních površích pláště nádoby je nutné dodržet minimální vzdálenost od kraje svaru podpěr, trubek, průlezů atd, minimálně trojnásobkem tloušťky nejsilnější části. [1]

3.2 Hlavní svary

3.2.1 Podélné svary

Na začátku svarové housenky nedosahuje závar žádoucí hloubky, protože materiál není dostatečně prohřátý. Rovněž na konci svaru vzniká kráter. Aby bylo možné vytvořit kvalitní svar po celé délce, je třeba začít a skončit svar mimo lub. Proto u podélných svarů využíváme tzv. nájezdové desky (obr. 10), které se tloušťkou i jakostí shodují se svařovaným lubem. [1]



Obr. 10. Podélný svar [1]

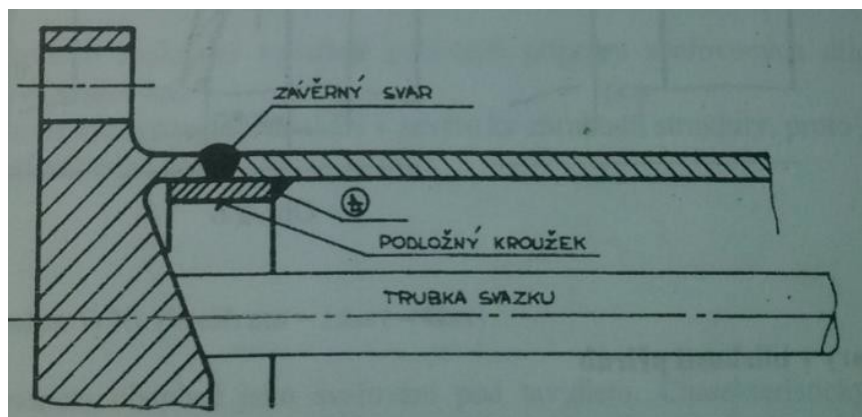
3.2.2 Obvodové svary

Obvodové svary se dají svařovat na svařovacích automatech z obou stran. Oboustranné automatové svařování se provádí běžně pro průměry 390 mm až 3100 mm. U menších průměrů se svary provádí z vnitřní strany ručně a z vnější strany automatem. [1]

3.2.3 Uzavírací svary

Uzavírací svar je posledním plášťovým svarem, kterým se spojí dvě části nádoby v jeden celek. Tyto svary se dají provést různými způsoby:

- a) Oboustranně automatem.
- b) Kombinovaně z vnější strany automatem a z vnitřní strany ručně.
- c) Na podložku Tento způsob je znázorněný na obrázku č. 11, kde je podložný pásek z jedné poloviny vsazený do jedné části nádoby a druhá část nádoby je na něj nasunutá. Svar je pak proveden z vnější strany automatem nebo ručně.
- d) Oboustranně ručně [1]



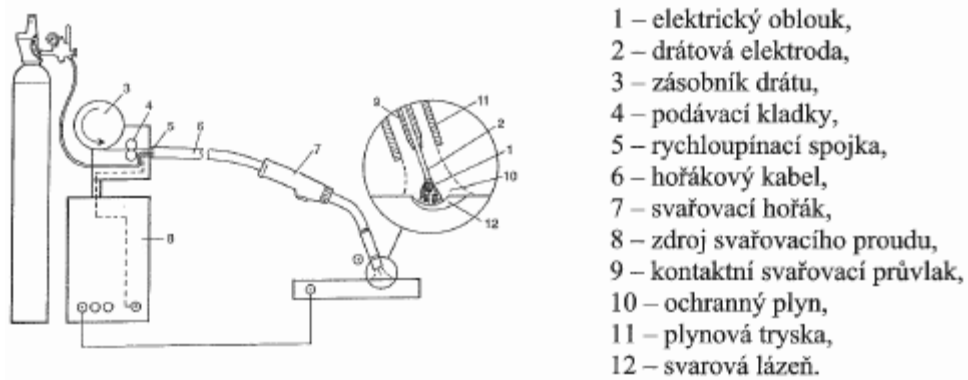
Obr. 11. Uzavírací svar [1]

3.3 Metody svařování tlakových nádob

3.3.1 Obloukové svařování metodou MIG/MAG

Zdrojem tepla pro svařování je elektrický oblouk, který hoří mezi základním materiálem a koncem tavicí se elektrody (drátu) v prostředí inertního plynu (argon, hélium, nebo jejich směs) – metoda MIG nebo aktivního plynu (oxid uhličitý, argon+oxid uhličitý, argon+oxid uhličitý+kyslík) – metoda MAG. Drát je do místa svaru podáván podávacími

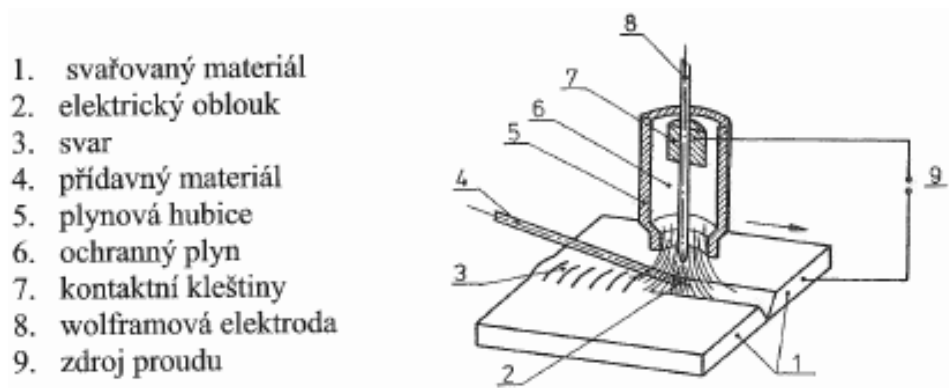
kladkami umístěnými v podavači. Tato metoda se používá ke svařování jednotlivých lubů, částí nádob, kontrolních otvorů a pláště atd. [3]



Obr. 12. Základní schéma svařování metodou MIG/MAG [3]

3.3.2 Obloukové svařování WIG

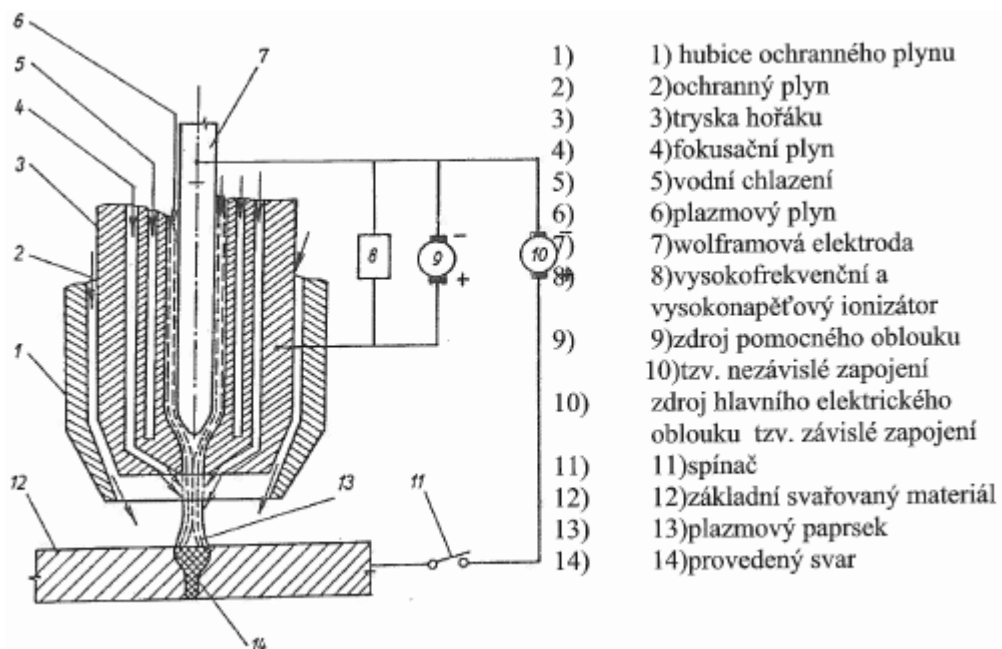
Oblouk hoří mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Ochranu elektrody i tavné lázně před okolní atmosférou zajišťuje inertní plyn o vysoké čistotě. Používá se argon, hélium nebo jejich směsi. Svařování lze realizovat s přídavným materiálem ve formě drátu ručním způsobem nebo automatickým svařováním s podavačem drátu. Tato metoda se používá hlavně pro přivařování hrdel, kontrolních otvorů k plášti tlakové nádoby, svařování tenkých plechů do 4 mm nebo tam kde je vyžadován pohledový svar. [3]



Obr. 13. Princip svařování netavící se elektrodou v inertním plynu – WIG [3]

3.3.3 Plazmové svařování

Ke vzniku plazmy je nutná ionizace plynu, při které dochází k vyražení nebo uvolnění elektronů z vnějších valenčních sfér atomů. Uvolněné elektrony mají záporný náboj a vedou v plazmě elektrický proud. Pro ionizaci plynu se často jako zdroj tepla používá elektrický oblouk, který je kontrahován průchodem malým průměrem výstupní trysky a zvýšením teploty se dosáhne vyššího stupně ionizace u dvouatomových plynů (dusík, vodík a kyslík). Musí nejprve proběhnout disociace plynu, při které dochází k rozložení molekul plynu na atomy. U tlakových nádob je tato metoda využívána při podélném a obvodovém svařování. [3]

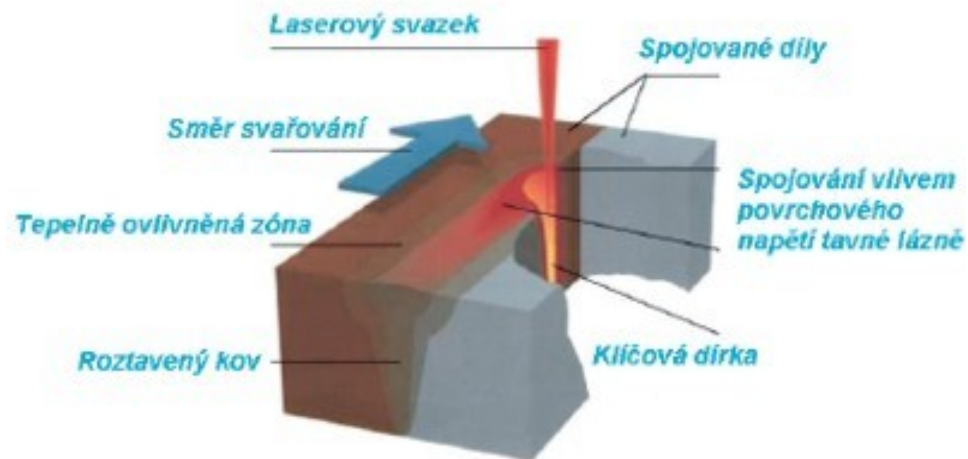


Obr. 14. Princip plazmového hořáku [3]

3.3.4 Laserové svařování

Při této technologii se využívá vysoké hustoty záření v ohnisku. Bodově přehřátý materiál se okamžitě odpaří a vzniklá dutina naplněná parami odpařeného materiálu, jejíž stěny jsou tvořeny roztaveným materiálem. Při pohybu laseru dochází ke kvazistacionárnímu procesu, kdy se dutina pohybuje stejnou rychlostí jako paprsek. Za dutinou pak vzniká oblast svaru. Do oblasti svaru se přivádí ochranná atmosféra ve formě plynu (argon,

hélium atd.). Tato metoda svařování se jako u plazmového svařování používá pro podélné a obvodové svary, svařování trubek, přírub atd. [3]



Obr. 15. Laserové svařování [4]

3.4 Zkoušky svarových spojů

Zkoušky jsou prováděny za účelem zjištění kvality a celistvosti svarového spoje. Tyto zkoušky jsou prováděny dle příslušných norem, kdy je zvolen nejvhodnější druh zkoušky. Na jednom svaru může být provedeno i více druhů zkoušek. [5]

Základní rozdělení zkoušek:

- a) Zkoušky nedestruktivní
- b) Zkoušky destruktivní

3.4.1 Nedestruktivní zkoušky

Při nedestruktivních zkouškách se zjišťují povrchové a vnitřní vady svarového spoje bez jeho poškození. [5]

Zjišťování povrchových vad:

- Vizuální
- Kapilární
- Magnetické

Zjišťování vnitřních vad:

- Zkoušky prozářením
- Ultrazvukové zkoušky
- Radiologické zkoušky

3.4.2 Destruktivní zkoušky

Tato zkouška je prováděna přímo na svařovaném vzorku nebo konstrukci, kdy dojde k jejich porušení a dále je nelze použít. [5]

Základní destruktivní zkoušky:

- Zkoušky tahem
- Zkoušky v ohybu
- Zkoušky tvrdosti
- Zkoušky rozlomením
- Zkoušky vrubové houževnatosti

Tento druh zkoušky se u tlakových nádob využívá jen ve výjimečných případech, častěji jsou prováděny zkoušky nedestruktivní. [5]

4 NEBEZPEČÍ ZBORCENÍ NÁDOB VNĚJŠÍM PŘETLAKEM

Úvodem je nutno říci, že problematika návrhu nádoby zatížené vnějším přetlakem je složitější než u nádob zatížených vnitřním přetlakem. Selhání vnitřním přetlakem může být chápáno jako selhání nádoby po namáhání převyšující z malé či velké části pevnost materiálu. Naproti tomu selhání vnějším přetlakem může být chápáno jako ztráta stability. Nádoba již nemá schopnost držet svůj tvar a najednou se zborťí do tvaru s menším vnitřním objemem. Dochází tedy k trvalé deformaci nádoby. Rozdíly při selhání vnitřním a vnějším tlakem je možné vidět na obrázcích 16 a 17. [6]



Obr. 16. Selhání nádoby vnitřním přetlakem [6]



Obr. 17. Selhání nádoby vnějším přetlakem [6]

Vnějšího přetlaku lze dosáhnout třemi způsoby:

- a) Podtlakem uvnitř nádoby a vnějším atmosférickým tlakem
- b) Tlakem mimo nádobu, který je větší než atmosférický tlak (dvouplášťové a více násobné nádoby)
- c) Kombinací prvních dvou způsobů [6]

Nejčastějším důvodem havárií nádob nebývá překročení zatížení vnějším přetlakem ale zatížení „neočekávaným“ vnějším přetlakem. K takovýmto haváriím většinou nedochází u nádob konstruovaných na vnější přetlak, ale u nádob, které nebyly na takové zatížení navrženy. Příčinou zborcení je vždy vnější přetlak, ke kterému při provozu nemělo dojít, a tudíž s ním konstruktér nepočítal. [7]

V praxi je známo spousta případů, kdy došlo ke zborcení nádoby vznikem vnějšího přetlaku. Jednou z příčin vzniku podtlaku je nedostatečné zavzdušňování nádoby při vypouštění kapalin. Takto bylo zničeno několik nádrží tzv. fekálních vozů, které byly montovány na vozech V3S. Dalším způsobem vzniku podtlaku je výrazný rozdíl teplot. Takovýmto příkladem může být čištění pivního tanku parou a následným hermetickým uzavřením. Jelikož pivo zraje přibližně při 4–8 °C je rozdíl teplot a pokles tlaku v tanku obrovský. Při poklesu teploty dojde ke kondenzaci par ze vzduchu a tím ke zmenšení objemu uvnitř tanku. Nebezpečí zborcení nádob nehrozí jen výrazně tenkostěnným nádobám, ale i nádobám, u kterých bychom to ani neočekávali. Takovým příkladem je zničení železniční cisterny (obr. 18), která může mít tloušťku pláště cca 8 mm, a tudíž není vyloženě tenkostěnná. [7]



Obr. 18. Zborcení železniční cisterny [6]

4.1 Mezní stav stabilního zborcení

Při návrhu tlakových nádob vycházejí výpočtové metodiky z mezních stavů konstrukce, ke kterým je přiřazena předepsaná bezpečnostní rezerva. Rozhodujícím stavem je evidentně pevnost uzlu nebo části, kdy se nejedná (u houževnatých materiálů) o pevnost ve vlastním slova smyslu, ale o mezní stav plastické únosnosti. Plastická únosnost je stav zařízení, u kterého se změní gradient závislosti zatížení deformace a původně elastická konstrukce se začne trvale plasticky deformovat. [7]

Mezní stavy popisující jednotlivé možné způsoby selhání konstrukce se dle normy dělí na:

a) Mezní stav únosnosti

- výraznou plastickou deformaci
- progresivní plastickou deformací
- ztrátou stability
- únavou
- ztrátou statické rovnováhy
- únikem tekutiny, který ovlivňuje bezpečnost nebo nepříjemné poškození prostředí. [7]

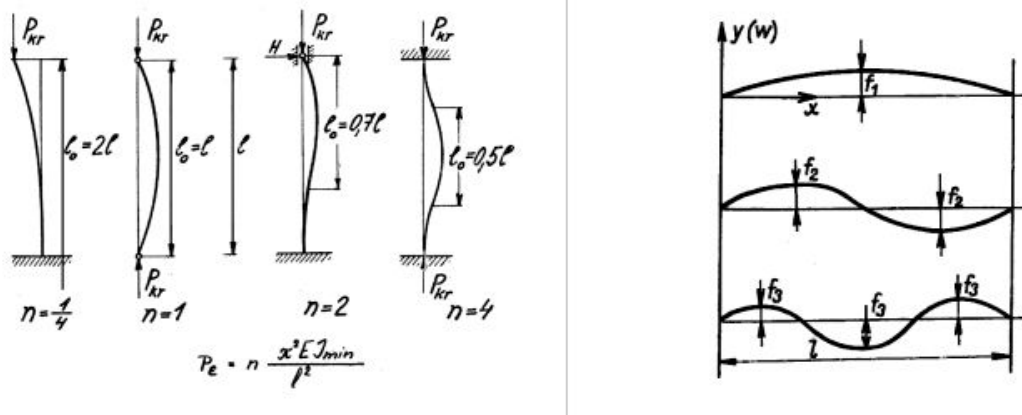
b) Mezní stav způsobilosti

- deformací nebo průhybem
- únikem tekutiny [7]

Je-li zařízení (nádob) zatíženo vnějším přetlakem je nezbytné provést ověření na stabilní zborcení skořepiny. Stabilním zborcením jsou ohroženy všechny části tlakových nádob, v jejichž stěně se při provozních podmínkách nachází globální tlakové napětí působící napříč celým průřezem. [7]

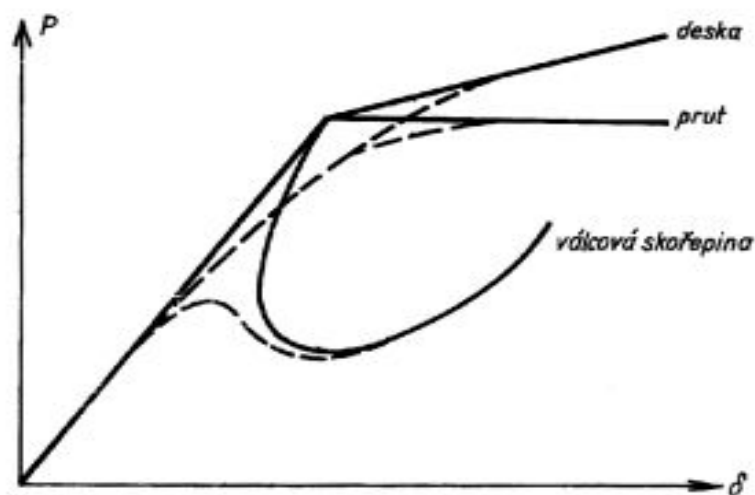
Základním elementem, který je takto ohrožen, je prut. U tlakových nádob si ho lze představit jako trubky výměníku tepla s pevnými trubkovicemi. Vzpěr prutů je jednou z hlavních úloh stability vyskytující se v konstrukcích. Základní vztah pro velikost kritické (Eulerovy) síly P_{ϵ} (obr. 19) platí pro kloubově uložené pruty deformující se ve tvaru jedné půlvlny ($n=1$). Vekneme-li oba konce, donutíme prut se deformovat do jedné celé půlvlny. Kritická síla se zvětší s kvadrátem délky půlvlny, tedy 4krát ($n=4$). Jestliže ale jeden konec prutu zcela uvolníme, bude se prut deformovat do jedné poloviny půlvlny. Kritická síla se sníží s kvadrátem délky tzn. 4krát ($n=1/4$). V Eulerově vztahu (obr. 19) můžeme pozoro-

vat, že jako vlastnost materiálu je modul pružnosti, a ne dovolené namáhání. Lze z toho vyvodit, že pro stabilitu je důležitá tuhost a ne pevnost. Pro zvýšení stabilní únosnosti je nutné zvýšit tuhost části. [7]



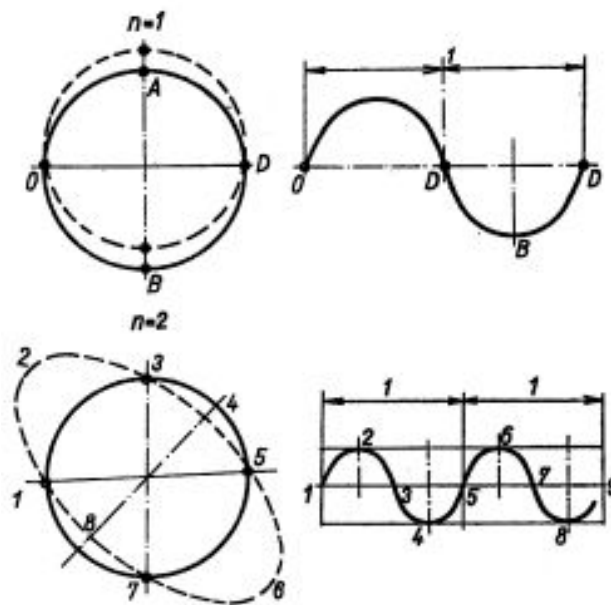
Obr. 19. Vzpěr přímých prutů [7]

Při stabilním zborcení elementu je rozhodující typ konstrukce. Jinak se chová prut, jinak se chová deska a jinak zakřivená skořepina. (obr. 20). Dosáhne-li prut kritického zatížení osovou silou, je schopen tuto sílu dále nést. Nejmenší síla, kterou je prut schopen unést při libovolné deformaci je síla kritická. Obdobně uvažujeme u smykově zatížené desky, kdy se mění gradient závislosti a při kritickém zatížení se dále zpevňují. Pro tělesa tlaková a netlaková je rozhodující komponentou skořepiny stěn a z těch následně válcová skořepina. [7]



Obr. 20. Schéma chování jednotlivých konstrukcí [7]

Je-li plášť válcové nádoby zatížen vnějším přetlakem, dojde při dosažení kritické hodnoty ke stabilnímu zborcení ve tvaru vln. U válcových plášťů dochází ke zborcení ve tvaru celého počtu vln po obvodu. V podélném směru mezi řezy vzniká jedna vlna. Tyto řezy zajišťují dodržení kruhovitosti skořepiny a vzdálenost těchto řezů potom určuje počet tvořících se obvodových vln. Z toho vyplývá, obdobně jako u prutu, čím větší počet obvodových vln, tím je kritický tlak při stabilním zborcení větší. Důležitou vlastností válcové skořepiny při jejím stabilním zhroucení je, že dochází ke „katastrofickému“ zborcení. Nádobu ztratí tvar, a únosnost nového tvaru je radikálně nižší, než u kruhové skořepiny. V praxi dochází ke zničení nádoby nebo její části. Další podstatnou vlastností válcového pláště při stabilním zhroucení je nutný vznik minimálně dvou vln (obr. 21). Pokud by vznikla jen jedna vlna, jednalo by se o posunutí celého průřezu, jak je názorně ukázáno na obrázku 21. [7]



Obr. 21. Zatížení válcové skořepiny [7]

5 TEORIE POSOUZENÍ STABILITY TENKOSTĚNNÝCH KONSTRUKCÍ

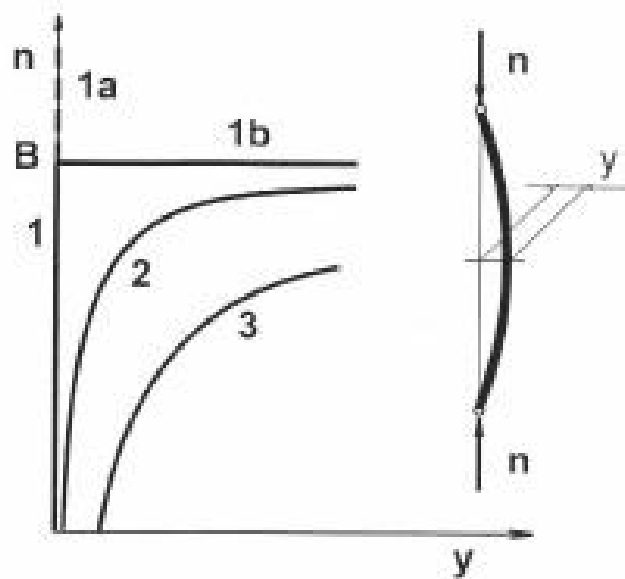
Problematiku ztráty stability tenkostěnných konstrukcí vlivem tlakových napětí je možné si přiblížit na dvou typech tenkostěnných konstrukcí:

- Deskových
- Skořepinových

5.1 Rozdíl mezi deskou a skořepinou

Deska

Dosáhne-li zatížení kritické hodnoty, deska ztrácí přímý tvar (křivka 1a) a náhle vybočí ohybem (křivka 1). Ovšem u reálných případů nemůžeme desky považovat za ideální. To má za následek, že od počátku působení zatížení, desky vybočují vlivem počátečních imperfekcí (křivky 2 a 3). Křivky pak neprocházejí bodem B, což je bod bifurkace (rozdělení), ale ohýbají se blíže či dále od tohoto bodu. [8]

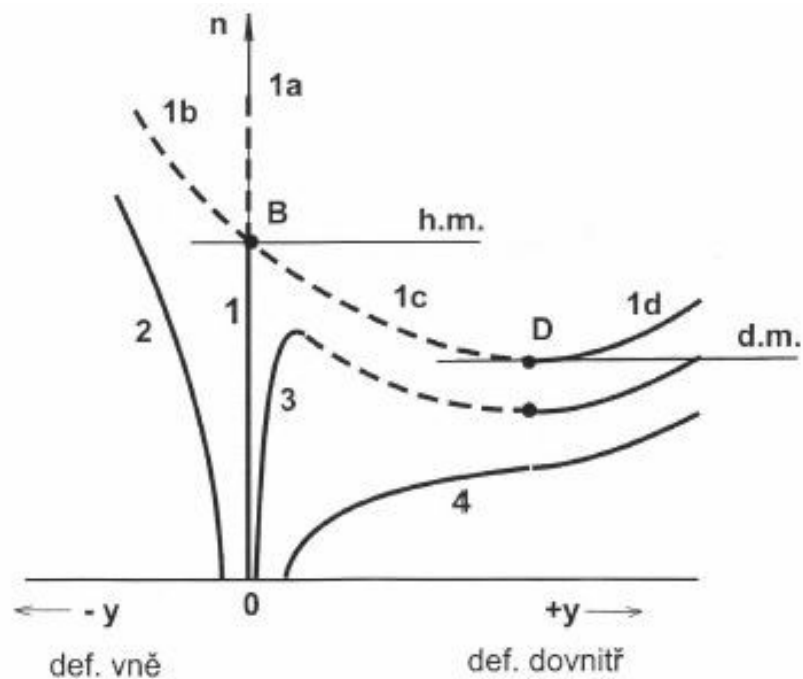


Obr. 22. Chování jednoose tlačené desky [8]

Skořepina

Na obrázku 23 je vidět chování válcové skořepiny zatížené osovým tlakem. Křivka 1 zobrazuje ideální válcový plášť ve stavu membránové tlakové napjatosti. V bodě B, který představuje tzv. horní kritickou mez se rovnováha rozdělí na tři možné stavy. Stav 1a – bez vybočení pláště, 1b – vybočení pláště směrem vně. Stav 1c – vybočení pláště směrem

dovnitř. Křivky 1a a 1b představují nestabilní rovnovážný stav, zatímco křivka 1c zobrazuje reálný stav. V bodě D se po ztrátě stability skořepina dostane do stabilního stavu. V porovnání s deskou je skořepina schopná přenášet tzv. pokritické zatížení, pokud nedojde k porušení jejího pláště. Křivka 3 zobrazuje chování skořepiny s malými počátečními imperfekcemi. Zatížení nejdříve roste v závislosti na průhybu a vybočení. Skořepina ztrácí stabilitu, křivka klesá na svou dolní mez, ještě než dosáhne bodu B a následně znovu stoupá. Křivka 4 znázorňuje skořepiny při velkých počátečních imperfekcích, kdy ohybové deformace v průběhu zatěžování narůstají bez prolomení pláště. Je-li počáteční deformace pláště směřována od středu – křivka 2, můžeme pozorovat strmější růst křivky, kdy ke ztrátě stability dojde až při zatížení přesahující horní kritickou mez. [8]



Obr. 23. Chování válcové skořepiny zatížené osovým tlakem [8]

5.2 Jednoose tlačená deska s volnými podélnými okraji

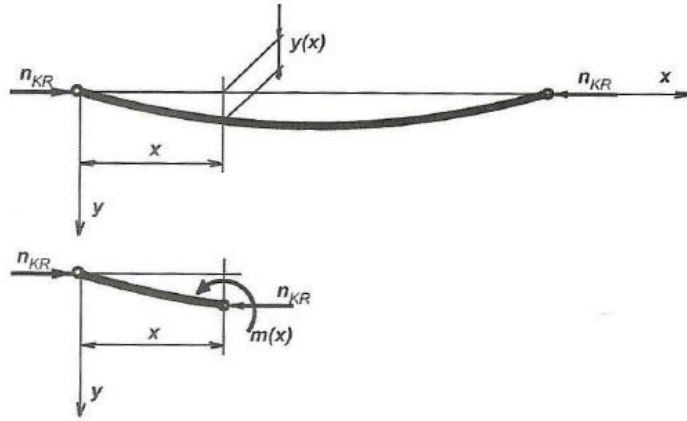
Tuto problematiku lze řešit dvěma způsoby:

- Eulerovo řešení
- Energetický přístup

Eulerovo řešení

Zatížíme-li desku ve střední rovině v podélném směru tlakovou membránovou silou, začne se deska chovat jako široký nosník namáhaný na vzpěr. Po dosažení kritické

hodnoty zatížení dojde k náhlému vybočení, tj. průhybu do válcové plochy (obr. 24). Dosáhne-li zatížení kritické hodnoty n_{KR} jsou průřezy myšleného proužku namáhány ohybovými momenty. Velikost těchto momentů závisí na průhybu desky. [8]



Obr. 24. Široký nosník namáhaný na vzpěr [8]

V místě x tak dosáhneme:

$$m(x) = n_{KR}y(x) \quad (1)$$

Při malých počátečních vybočeních je dán tvar průhybové křivky diferenciální rovnicí

$$y'''(x) = -\frac{m(x)}{D} \quad (2)$$

kde D je válcová tuhost desky.

S použitím rovnic

$$(\sigma)^* = \frac{1}{V} \int_V (\sigma) dV ; (\varepsilon)^* = \frac{1}{V} \int_V (\varepsilon) dV \quad (3)$$

dostáváme

$$y''(x) + k^2 y(x) = 0 \quad (4)$$

kde

$$k^2 = \frac{n_{KR}}{D} \quad (5)$$

S použitím rovnice rovnováhy elementu je všeobecné řešení této rovnice ve tvaru

$$y(x) = A \sin kx + B \cos kx \quad (6)$$

kde A, B jsou integrační konstanty

Pro $x=0$ je $y=0$ a tudíž $B=0$

Pro $x=l$ je $y=0$, z čehož plyne

$$0 = A \sin kl \quad (7)$$

Pozn. Tato rovnice platí pro:

$$kl=0, \pi, 2\pi\dots$$

První hodnota odpovídá nezatíženému stavu. Nejmenší a tudíž reálná hodnota kritického zatížení vyplývá z první vlastní hodnoty, kterou je. [8]

$$k^2 l^2 = \pi^2 \Rightarrow n_{KR} = \frac{\pi^2 D}{l^2} \quad (8,9)$$

Můžeme zde pozorovat, že výsledek je v podstatě Eulerův vztah pro kritickou vzpěrnou sílu, kdy je ohybová tuhost prutu EJ nahrazena válcovou tuhostí D. [8]

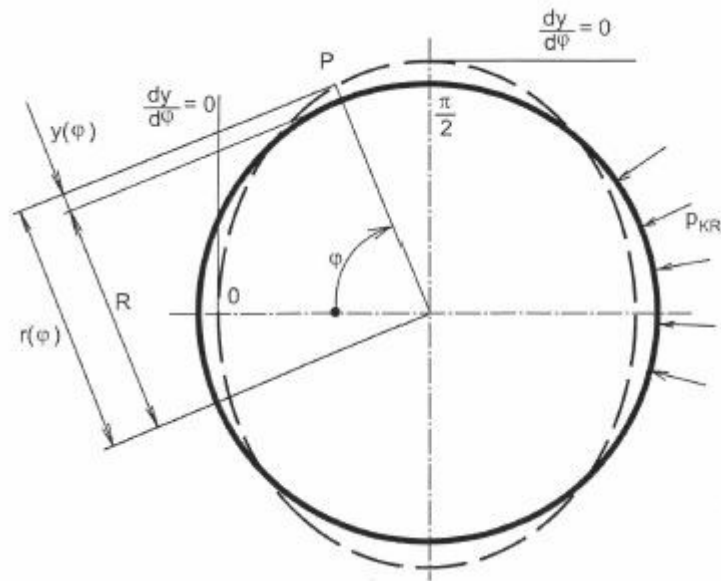
Energetický přístup

Při použití tohoto přístupu dojdeme ke stejnému výsledku pro n_{KR} jako při Eulerově řešení, a proto tento postup nebude dále rozváděn. Postačí jen vysvětlení, že tento postup je řešen z pohledu úbytku potenciální energie a deformační práce.

5.3 Stabilita dlouhé válcové skořepiny zatížené vnějším přetlakem

Začne-li na válcovou skořepinu působit vnější přetlak nebo podtlak, znaménka membránových, popř. osových napětí se obrátí a stávají se z nich tlaková napětí. Při dosažení kritické hodnoty přetlaku p_{KR} , plášť skořepiny ztrácí stabilitu, takže z kruhového průřezu se zploští do oválného tvaru (obr. 25). Stejně jako u případu desky se jedná o vzpěrný ohyb do válcové plochy. Místo pásku jednotné šířky uvažujeme o prstenci jednotkové šířky, po obvodu zatíženého membránovou silou ve tvaru [8]

$$n_\varphi = pR \quad (10)$$



Obr. 25. Ztráta stability válcové skořepiny [8]

Průřezy přetvořeného kruhového prstence do oválného tvaru jsou namáhány obvodovým ohybovým momentem [8]

$$m(\varphi) = n_{\varphi KR} y(\varphi) = p_{KR} R y(\varphi) \quad (11)$$

S analogickým použitím rovnice

$$y''(x) = -\frac{m(x)}{D}; \quad y''(x) = -\frac{1}{r(y)} \quad (12,13)$$

dostáváme změnu křivosti

$$\frac{1}{\rho(\varphi)} - \frac{1}{R} = \frac{m(\varphi)}{D} \quad (14)$$

kde R je poloměr střednice nezátížené skořepiny.

Křivost rovinné křivky v polárních souřadnicích lze pro nízké deformace $y(\varphi)$, představující počátek vybočení pláště interpretovat vztahem [8]

$$\frac{1}{\rho(\varphi)} = \frac{1}{r} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 r}{d\varphi^2} \quad (15)$$

kde radiální pořadnice je dle (obr. 25)

$$r = R + y(\varphi) \quad (16)$$

Dosadíme-li vztah (16) do rovnice (15) a uvážíme, že $y^2 \ll R^2$ a $y/r \ll 1$, dostaneme rovnici

$$\frac{1}{\rho(\varphi)} - \frac{1}{R} = \frac{1}{R^2} \left(\frac{d^2 y}{d\varphi^2} + y \right) \quad (17)$$

Srovnáme-li pravé strany rovnic (14) a (17), dostaneme

$$\frac{1}{R^2} \frac{d^2 y}{d\varphi^2} + \frac{y}{R^2} = \frac{m(\varphi)}{D} \quad (18)$$

poté za $m(\varphi)$ dosadíme

$$\frac{d^2 y}{d\varphi^2} + \beta^2 y = 0 \quad (19)$$

s označením

$$\beta^2 = 1 + \frac{p_{KR} R^3}{D} \quad (20)$$

Tvar rovnice (2) pro všeobecné řešení je

$$y(\varphi) = A \cos \beta \varphi + B \sin \beta \varphi \quad (21)$$

Podle obrázku 25 v místech $\varphi = 0$; $\varphi = \frac{\pi}{2}$ je $y'(\varphi) = 0$ [8]

Derivací rovnice (21) dostaneme

$$\frac{dy(\varphi)}{d\varphi} = -\beta A \sin \beta \varphi + \beta B \cos \beta \varphi \quad (22)$$

takže $B = 0$ a $A \sin \beta \frac{R}{2} = 0$

Posloupnost hodnot vyhovující rovnici (22) je $\beta \frac{R}{2} = i\pi$, $i = 1, 2, 3 \dots$ je tedy $\beta = 2i$ [8]

Následně hodna kritického tlaku

$$\beta^2 = 4i^2 = 1 + \frac{p_{KRi} R^3}{D} \quad (23)$$

Fyzikálně významná je nejmenší z hodnot p_{KRi} , tj. pro $i = 1$. Hodnota kritického tlaku pak bude [8]

$$p_{KR} = \frac{3D}{R^3} \quad (24)$$

Kritické zatížení je přímo úměrné ohybové tuhosti stěny D . Velikost tlaku podle rovnice (24) je pouze teoretickou horní hranicí danou bodem bifurkace B zobrazeném na obrázku 23. Ve skutečnosti je reálná hodnota kritického tlaku vždy vyšší, a to v závislosti na počátečních imperfekcích reálné skořepiny. [8]

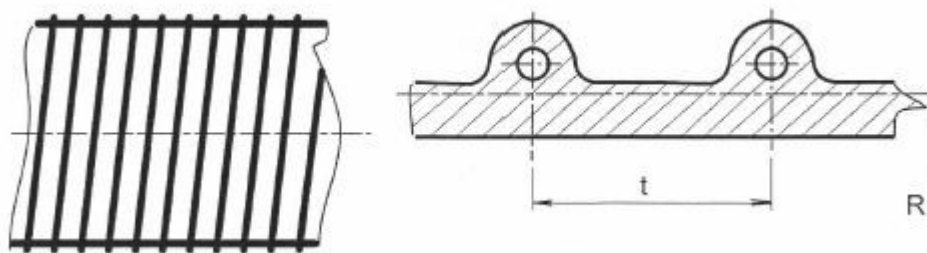
5.3.1 Vyztužení dlouhé válcové skořepiny

Navrhujeme-li v praxi válcovou skořepinu zatíženou vnějším přetlakem, nastávají nám dvě možnosti, jak lze navýšit odolnost skořepiny proti ztrátě stability.

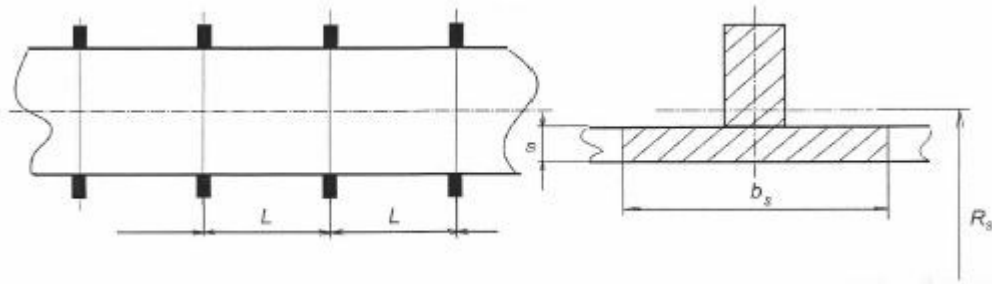
- a) Zvýšení tloušťky stěny skořepiny
- b) Přidání obvodové výztuhy

První varianta se v praxi ve většině případů nevyužívá, protože je toto řešení neekonomické.

Varianta přidání obvodové výztuhy je jednoduchá a ekonomicky výhodnější než varianta první. Jedním ze způsobů vyztužení jsou vinuté roury (obr. 26). Dalším způsobem je vyztužení skořepiny tzv. prstencovou výztuhou s roztečí L (obr. 27). [8]



Obr. 26. Vyztužení typu vinuté roury [8]



Obr. 27. Prstencová výztuha [8]

Dosadíme-li do rovnice (24) pro kritický tlak výraz pro obvodovou tuhost stěny,

$$D = \frac{E^{**} s^3}{12} \quad (25)$$

dostaneme

$$p_{KR} = \frac{E^{**}}{4} \left(\frac{s}{R} \right)^3 \quad (26)$$

Prstencová výztuha s částí stěny skořepiny tvořící prut s kruhovou střednicí, jehož zatížení připadají na jednotku obvodu je $q = pL$,

analogicky k rovnici (24) je hodnota kritického zatížení

$$q_{KR} = \frac{3EJ_P}{R_s^3} = p_{KR}L \quad (27)$$

Kde: J_P - kvadratický moment průřezu prstence s částí pláště k neutrální ose tohoto průřezu procházející jeho těžištěm. [8]

Na velikosti kritického a tedy i dovoleného přetlaku má vliv u válcové skořepiny délka. Vyztužíme-li dlouhou válcovou skořepinu výztuhami, zkrátíme tím délku jednotlivých polí a z dlouhé skořepiny se stává krátká. [8]

Analogicky z rovnice (26) dostaneme hodnotu kritického tlaku pro krátkou skořepinu

$$p_{KR} = \frac{E^{**}}{4} \left(\frac{s}{R} \right)^{2,5} \frac{R}{L} \quad (28)$$

Tento vztah udává pouze teoretickou hodnotu kritického tlaku pro ideální skořepinu. Kritické zatížení p_{KR} s rostoucí délkou roztečí L klesá.

Porovnáním vztahů (28) a (26)

$$\frac{E^{**}}{4} \left(\frac{s}{R}\right)^{2,5} \frac{R}{L^*} = \frac{E^{**}}{4} \left(\frac{s}{R}\right)^3 \quad (29)$$

dostaneme

$$L^* = R \sqrt{\frac{R}{s}} \quad (30)$$

kde L^* je rozteč při níž p_{KR} vyztužené skořepiny se sníží na hodnotu kritického tlaku p_{KR} pro dlouhou skořepinu [8]

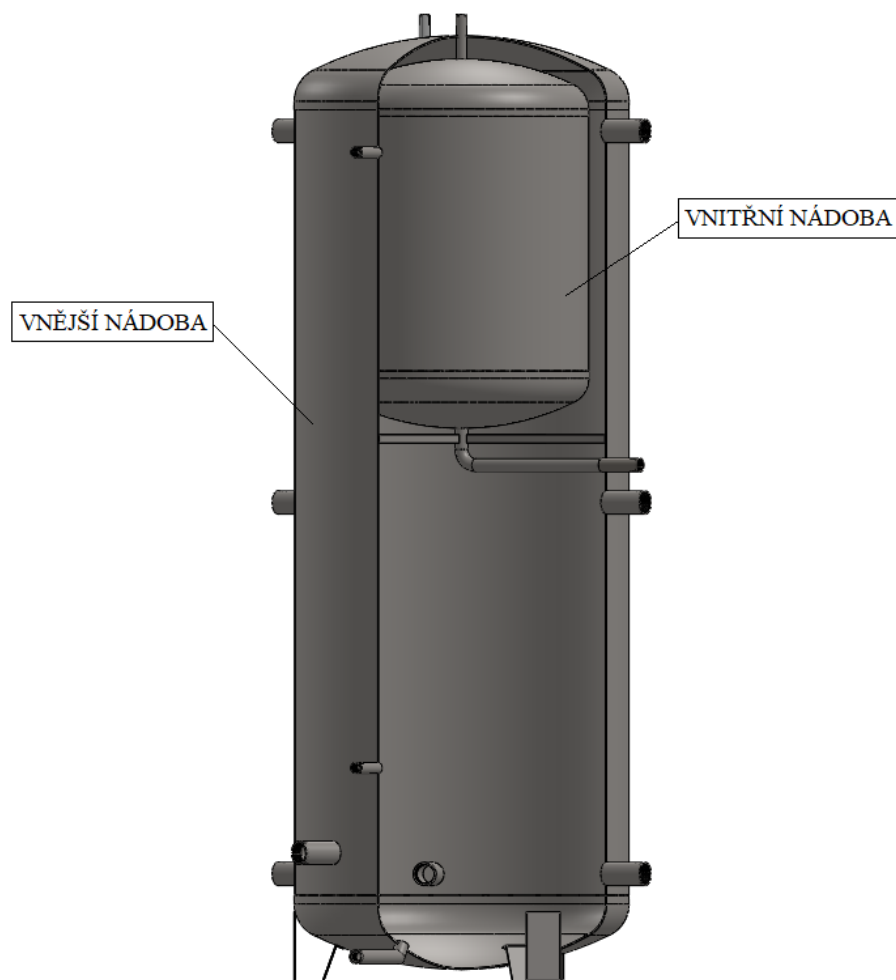
Z toho plyne, že vyztužení prstenci má smysl jestliže

$$L < L^* \quad (31)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je navrhnout konstrukční řešení vnitřní ocelové nádoby na topnou užitkovou vodu o objemu 200 litrů (obr. 28), zatížené vnějším přetlakem. Z navržených konstrukčních řešení sestavit FEM modely a zjistit stabilní odolnost nádoby při zatížení vnějším přetlakem vyvozeným topnou vodou ve vnější nádobě. Z dosažených výsledků vybrat vhodné konstrukční řešení nádoby (tj. optimální tloušťku stěny nádoby s vhodným typem a počtem obvodových výztuh) vyhovující všem bezpečnostním parametrům daných normou ČSN EN 13445-3.



Obr. 28. Sestava nádoby

7 POČÁTEČNÍ PARAMETRY NÁDOBY

7.1 Vstupní parametry:

- Objem nádoby: 200 litrů
- Provozní médium: topná voda
- Maximální zatížení vnějším přetlakem: 1MPa
- Maximální provozní teplota: 90 °C

Jediným omezením pro návrh vnitřní nádoby je její rozměr a objem. Nádoba se musí vejít do prostoru vnější nádoby, při zachování objemu 200 litrů.

Rozměry vnější nádoby:

- Průměr nádoby: 790 mm
- Výška nádoby: 2190 mm

7.2 Návrh nádob

Pro studii stabilní odolnosti byly navrženy dva průměry nádob - 400 a 600 mm. Obě nádoby jsou vyrobeny z nerezové oceli 1.4301. Ve studii budou posuzovány nádoby bez obvodových výztuh a s obvodovými výztuhami. Pro oba průměry nádoby je navrženo 6 typů výztuh, které jsou vyrobeny také z materiálu 1.4301.

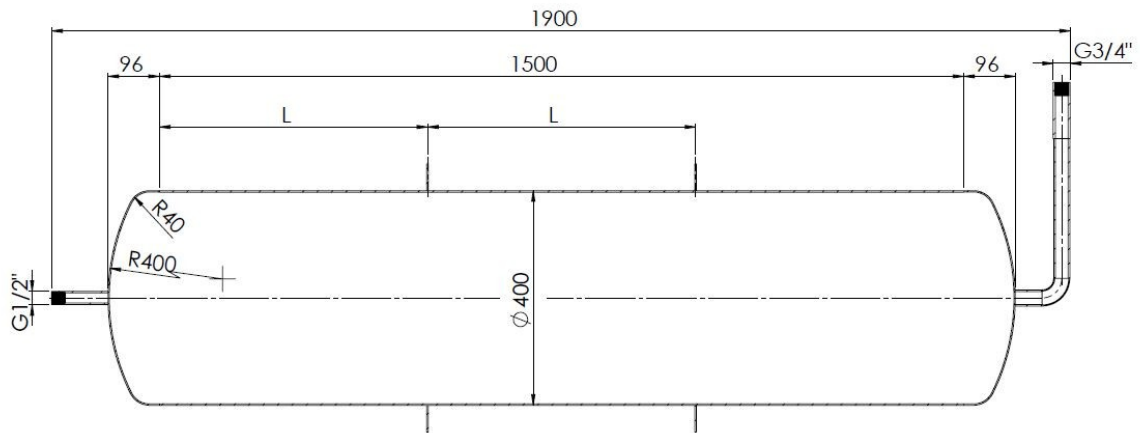
Materiálové parametry nerezové oceli 1.4301:

Modul pružnosti v tahu E	1,93.10 ⁵	MPa
Dovolená elastická mezní hodnota σ_e	131	MPa
Mez pevnosti v tlaku R_m	459	MPa

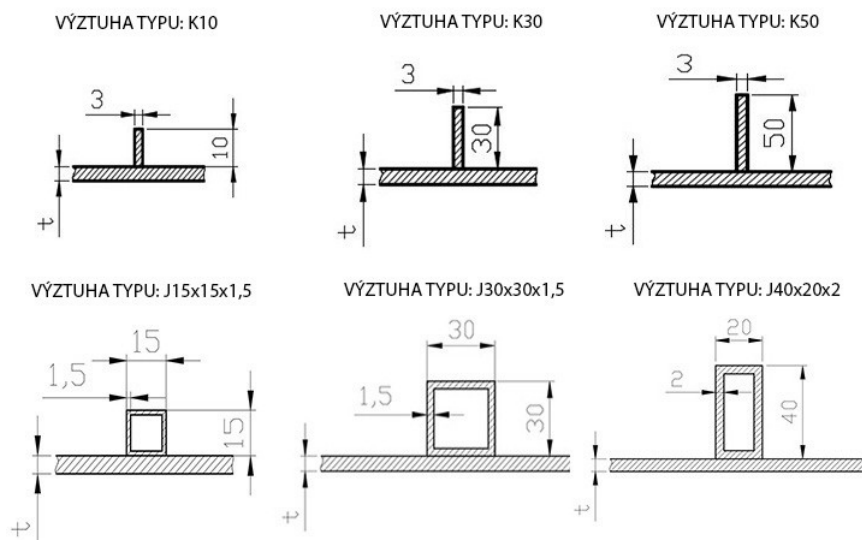
7.2.1 Nádoba průměru 400 mm

Základní rozměry nádoby lze vidět na obrázku 29. Nádoba je tvořena válcovým pláštěm průměru 400 mm a délkou 1500 mm. Dvěma klenutými dny splňující normu DIN 28 011. Jedním hrdlem G1/2" (TR 25x1,5) pro odvod ohřáté vody v horním dnu a jedním napouštěcím/vypouštěcím hrdlem G3/4" (TR 32x4) ve spodním dnu. Na nádobu budou postupně přidávány různé typy obvodových výztuh, jejichž rozměry jsou specifikovány

vány na obrázku 30. Maximální počet výztuh byl vzhledem k délce nádoby stanoven na $n=7$ kusů. Rozteče pro jednotlivý počet výztuh jsou uvedeny v tabulce 1.



Obr. 29. Počáteční parametry nádoby průměru 400 mm



Obr. 30. Rozměry obvodových výztuh nádoby průměru 400 mm

Tab. 1. Rozteče obvodových výztuh nádoby průměru 400 mm

Počet výztuh n [ks]	Rozteč L [mm]
1	750
2	500
3	375
4	300
5	250
6	214
7	187,5

Jednotlivé konfigurace nádob byly označeny takto:

- D400_K10
- D400_K30
- D400_K50
- D400_J15x15x1,5
- D400_J30x30x1,5
- D400_J40x20x2

Kde:

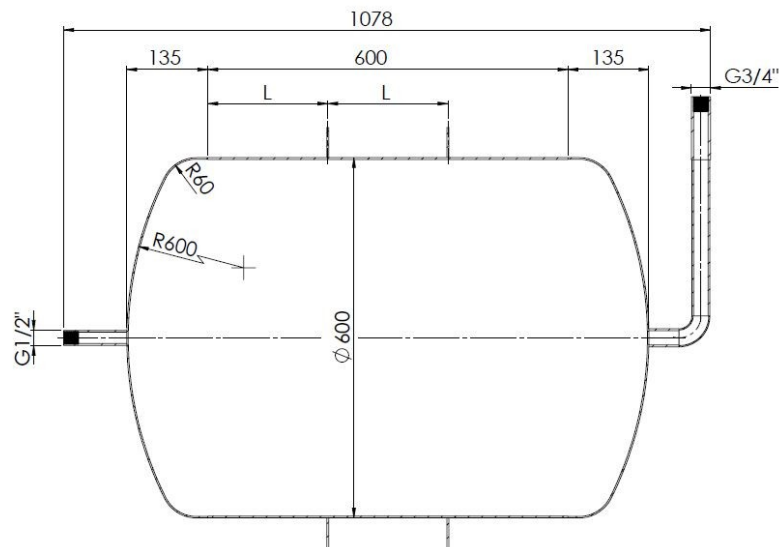
D400 – průměr nádoby 400 mm

K10 – typ obvodové výztuhy (obdobně K30 a K50)

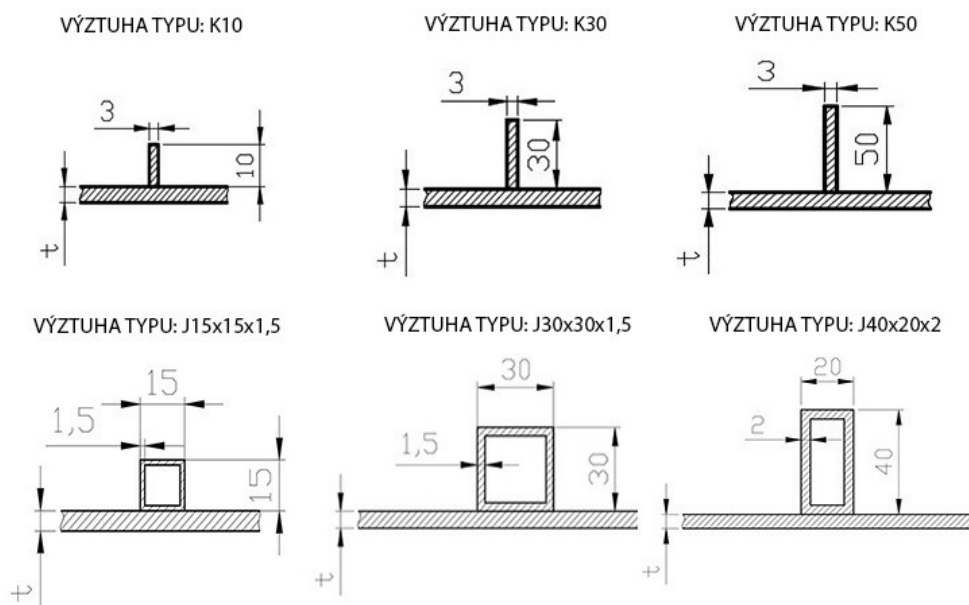
J15x15x1,5 – typ obvodové výztuhy (obdobně J30x30x1,5 a J40x20x2)

7.2.2 Nádoba průměru 600 mm

Základní rozměry nádoby lze vidět na obrázku 31. Nádoba je tvořena válcovým pláštěm průměru 600 mm a délkou 600 mm. Dvěma klenutými dny splňující normu DIN 28 011. Jedním hrdlem G1/2" (TR 25x1,5) pro odvod ohřáté vody v horním dnu a jedním napouštěcím/vypouštěcím hrdlem G3/4" (TR 32x4) ve spodním dnu. Na nádobu budou postupně přidávány různé typy obvodových výztuh, jejichž rozměry jsou specifikovány na obrázku 32. Maximální počet výztuh byl vzhledem k délce nádoby stanoven na 5 kusů. Rozteče pro jednotlivý počet výztuh jsou uvedeny v tabulce 2.



Obr. 31. Počáteční parametry nádoby průměru 600 mm



Obr. 32. Rozměry obvodových výztuh nádoby průměru 600 mm

Tab. 2. Rozteče obvodových výztuh nádoby průměru 600 mm

Počet výztuh n [ks]	Rozteč L [mm]
1	300
2	200
3	150
4	120
5	100

Jednotlivé konfigurace nádob byly označeny takto:

- D600_K10
- D600_K30
- D600_K50
- D600_J15x15x1,5
- D600_J30x30x1,5
- D600_J40x20x2

Kde:

D600 – průměr nádoby 600 mm

K10 – typ obvodové výztuhy (obdobně K30 a K50)

J15x15x1,5 – typ obvodové výztuhy (obdobně J30x30x1,5 a J40x20x2)

8 VÝSLEDKY ANALÝZ

Veškeré analýzy byly prováděny v programu SOLIDWORKS 2018.

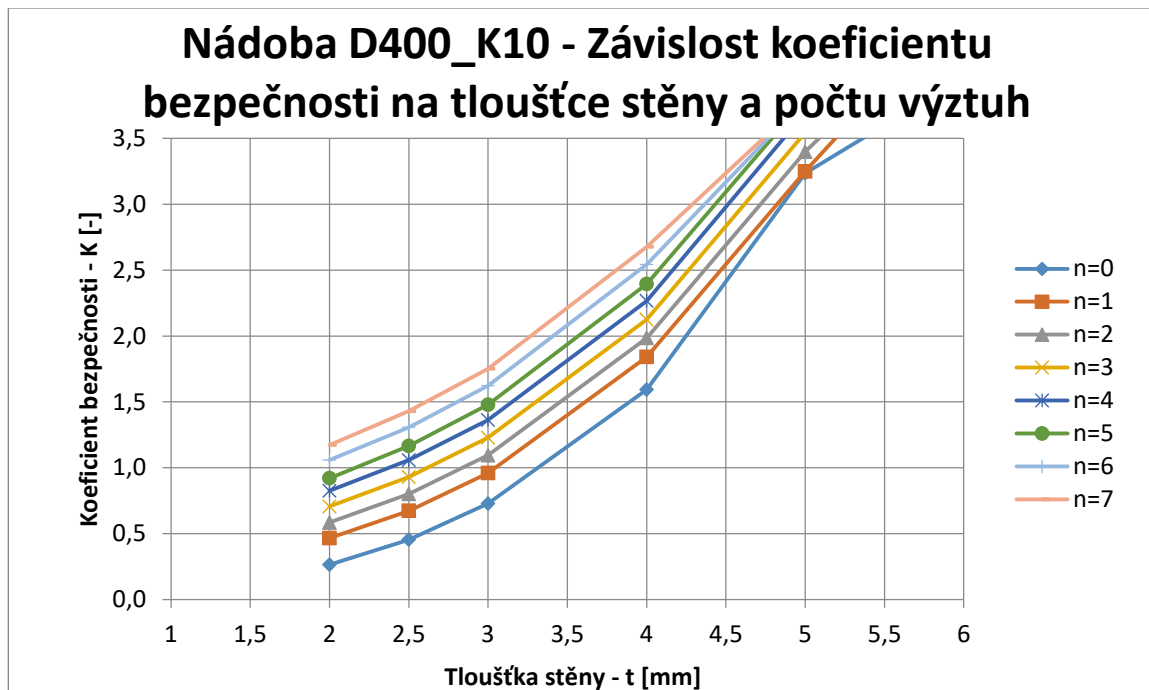
8.1 Analýzy nádob D400_K10, D400_K30 a D400_K50

8.1.1 Analýza nádoby D400_K10

Při této analýze byla postupně zvyšována tloušťka stěny nádoby a počet obvodových výztuh, jak je uvedeno v tabulce 3 tak, aby bylo dosaženo požadovaného koeficientu bezpečnosti. Dle normy ČSN EN 13445-3 je hodnota koeficientu bezpečnosti 1,5.

Tab. 3. Výsledky analýzy nádoby D400_K10

Tl. stěny	Koeficient bezpečnosti – K [-] pro počet výztuh n [ks]							
t [mm]	n = 0	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 6	n = 7
2	0,2638	0,4660	0,5837	0,7055	0,8247	0,9212	1,0582	1,1735
2,5	0,4543	0,6734	0,8008	0,9295	1,0576	1,1654	1,3068	1,4298
3	0,7278	0,9599	1,0945	1,2279	1,3623	1,4787	1,6227	1,7511
4	1,5930	1,8415	1,9856	2,1254	2,2676	2,3955	2,5429	2,6782
5	3,2362	3,2499	3,3993	3,5453	3,6953	3,7951	3,7962	3,7967
6	3,9661	4,5653	4,5658	4,5659	4,5677	4,5688	4,5696	4,5700
8	6,1151	6,1165	6,1167	6,1171	6,1177	6,1181	6,1186	6,1189



Obr. 33. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D400_K10

Z dosažených výsledků lze vyzorovat, že se vzrůstající tloušťkou stěny nádoby a počtem obvodových výztuh koeficient bezpečnosti roste. Ovšem je nutné podotknout, že u některých tloušťek stěny a od určitého počtu výztuh je růst koeficientu bezpečnosti zanedbatelný a tudíž je další přidání obvodové výztuhy zbytečné. Názorně to můžeme vidět u tloušťky stěny $t=5\text{mm}$. Koeficient bezpečnosti zřetelně stoupá až do počtu výztuh $n=5$ ks a poté je jeho růst zanedbatelný.

U nádob s tloušťkou stěny $t=2$ mm a $t=2,5$ mm koeficient bezpečnosti nesplňuje podmínku normy ani se sedmi výztuhami. Můžeme také vidět, že u nádob s tloušťkou stěny $t=4$ mm a výše, není potřeba přidávat obvodové výztuhy.

Konfigurace nádoby splňující podmínku normy jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab. 4. Konfigurace nádoby D400_K10 splňující podmínku normy

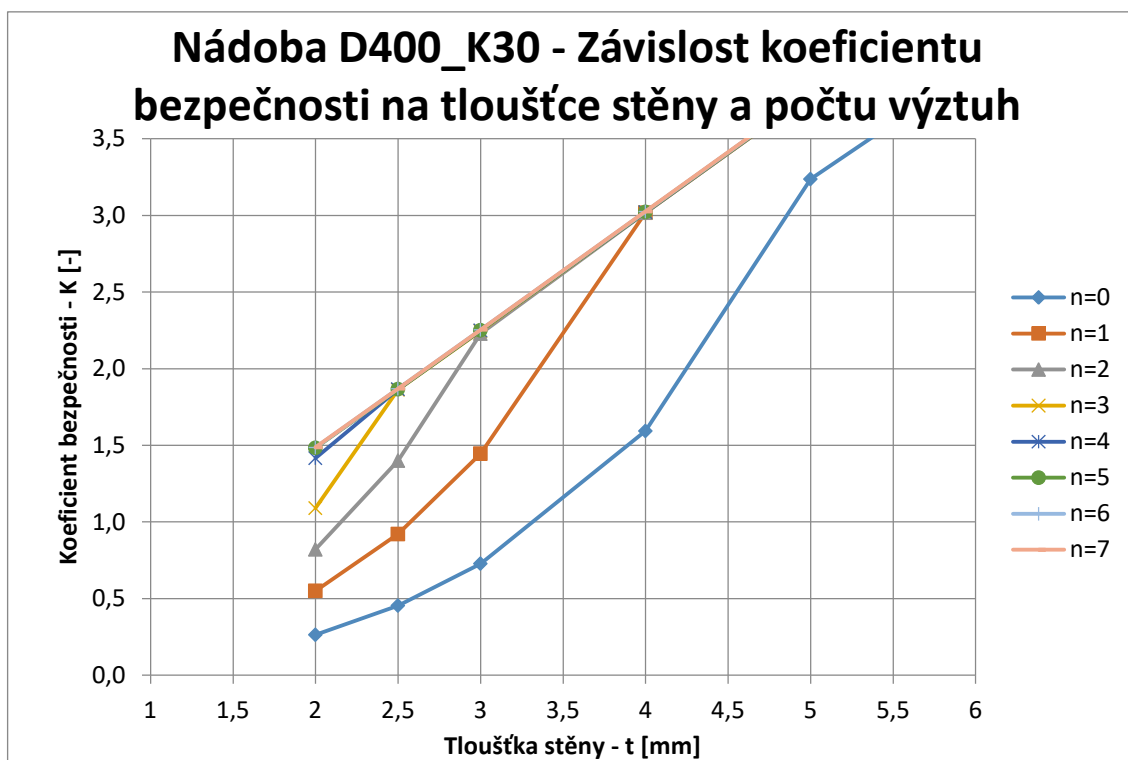
Tl. stěny t [mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. bezpečnosti K [-]
3	6	1,6227
4	0	1,5930
5	0	3,2362
6	0	3,9661
8	0	6,1151

8.1.2 Analýza nádoby D400_K30

Při této analýze byla postupně zvyšována tloušťka stěny nádoby a počet obvodových výztuh, jak je uvedeno v tabulce 5 tak, aby bylo dosaženo požadovaného koeficientu bezpečnosti. Dle normy ČSN EN 13445-3 je hodnota koeficientu bezpečnosti 1,5.

Tab. 5. Výsledky analýzy nádoby D400_K30

Tl. stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti – K [-] pro počet výztuh n [ks]							
	$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$	$n = 7$
2	0,2638	0,5505	0,8208	1,0899	1,4157	1,4831	1,4854	1,4868
2,5	0,4543	0,9210	1,3999	1,8623	1,8657	1,8661	1,8687	1,8696
3	0,7278	1,4456	2,2284	2,2461	2,2490	2,2502	2,2529	2,2542
4	1,5930	3,0169	3,0173	3,0200	3,0208	3,0221	3,0246	3,0253
5	3,2362	3,7901	3,7909	3,7926	3,7936	3,7948	3,7970	3,7982
6	3,9661	4,5647	4,5657	4,5665	4,5677	4,5695	4,5704	4,5720
8	6,1151	6,1165	6,1171	6,1178	6,1184	6,1189	6,1195	6,1212



Obr. 34. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D400_K30

Z dosažených výsledků lze vypočítat, že se vzrůstající tloušťkou stěny nádoby a počtem obvodových výztuh koeficient bezpečnosti roste. Ovšem je nutné podotknout, že od určitého počtu výztuh je růst koeficientu bezpečnosti zanedbatelný a tudíž je další přidání obvodové výztuhy zbytečné. Názorně to můžeme vidět u tloušťky stěny $t=2,5$ mm. Koeficient bezpečnosti zřetelně stoupá až do počtu výztuh $n=3$ ks a poté je jeho růst zanedbatelný.

U nádoby s tloušťkou stěny $t=2$ mm koeficient bezpečnosti nesplňuje podmínku normy ani se sedmi výztuhami. Můžeme také vidět, že u nádob s tloušťkou stěny 4 mm a výše, není potřeba přidávat obvodové výztuhy.

Konfigurace nádoby splňující podmínku normy jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. 6. Konfigurace nádoby D400_K30 splňující podmínku normy

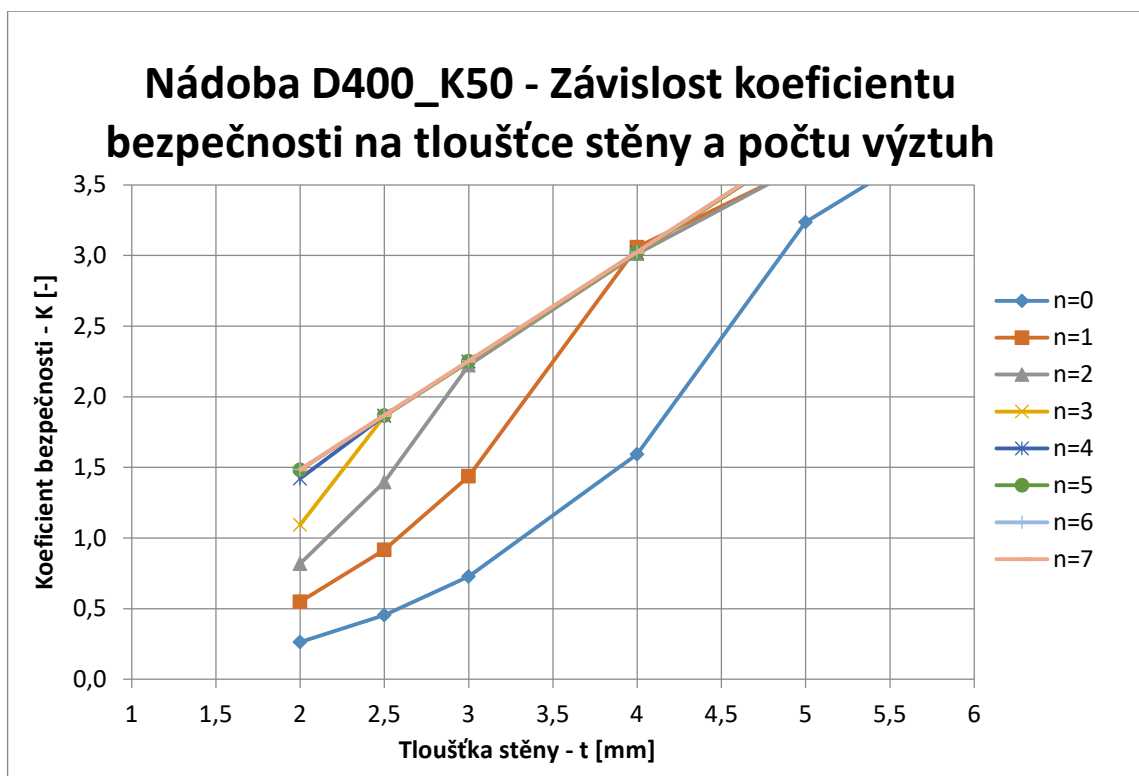
Tl. stěny t [mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. bezpečnosti K [-]
2,5	3	1,8623
3	2	2,2284
4	0	1,5930
5	0	3,2362
6	0	3,9661
8	0	6,1151

8.1.3 Analýza nádoby D400_K50

Při této analýze byla postupně zvyšována tloušťka stěny nádoby a počet obvodových výztuh, jak je uvedeno v tabulce 7 tak, aby bylo dosaženo požadovaného koeficientu bezpečnosti. Dle normy ČSN EN 13445-3 je hodnota koeficientu bezpečnosti 1,5.

Tab. 7. Výsledky analýzy nádoby D400_K50

Tl. stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti – K [-] pro počet výztuh n [ks]							
	n = 0	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 6	n = 7
2	0,2638	0,5489	0,8179	1,0937	1,4207	1,4831	1,4849	1,4854
2,5	0,4543	0,9165	1,3959	1,8624	1,8662	1,8668	1,8671	1,8696
3	0,7278	1,4377	2,2233	2,2462	2,2503	2,2517	2,2539	2,2541
4	1,5930	3,0587	3,0126	3,0169	3,0202	3,0213	3,0246	3,0253
5	3,2362	3,6375	3,6456	3,7902	3,7937	3,7949	3,7969	3,7982
6	3,9661	4,5277	4,5494	4,5647	4,5678	4,5691	4,5704	4,5710
8	6,1151	6,1172	6,1183	6,1191	6,1198	6,1203	6,1209	6,1212



Obr. 35. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D400_K50

Z dosažených výsledků lze vypožorovat, že se vzrůstající tloušťkou stěny nádoby a počtem obvodových výztuh koeficient bezpečnosti roste. Ovšem je nutné podotknout, že od určitého počtu výztuh je růst koeficientu bezpečnosti zanedbatelný a tudíž je další přidání obvodové výztuhy zbytečné. Názorně to můžeme vidět u tloušťky stěny $t=3\text{mm}$. Koeficient bezpečnosti zřetelně stoupá až do počtu výztuh $n=4$ ks a poté je jeho růst zanedbatelný.

U nádoby s tloušťkou stěny $t=2$ mm koeficient bezpečnosti nesplňuje podmínku normy ani se sedmi výztuhami. Můžeme také vidět, že u nádob s tloušťkou stěny 4 mm a výše, není potřeba přidávat obvodové výztuhy.

Konfigurace nádoby splňující podmínku normy jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8. Konfigurace nádoby D400_K50 splňující podmínku normy

Tl. stěny t [mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. bezpečnosti K [-]
2,5	3	1,8624
3	2	2,2233
4	0	1,5930
5	0	3,2362
6	0	3,9661
8	0	6,1151

8.1.4 Srovnání výsledku nádob D400_K10, D400_K30 a D400_K50

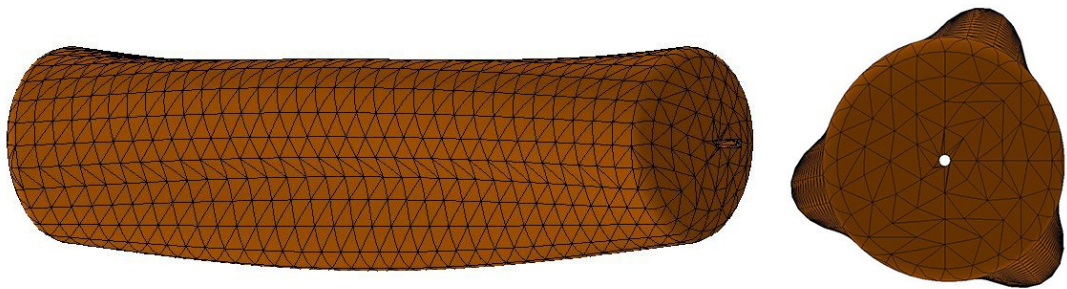
V tabulce 9 jsou zobrazeny všechny konfigurace nádob splňující podmínku normy pro koeficient bezpečnosti. Červeně označené hodnoty jsou vybrány jako optimální konfigurace nádob.

Tab. 9. Konfigurace nádob splňující podmínky normy

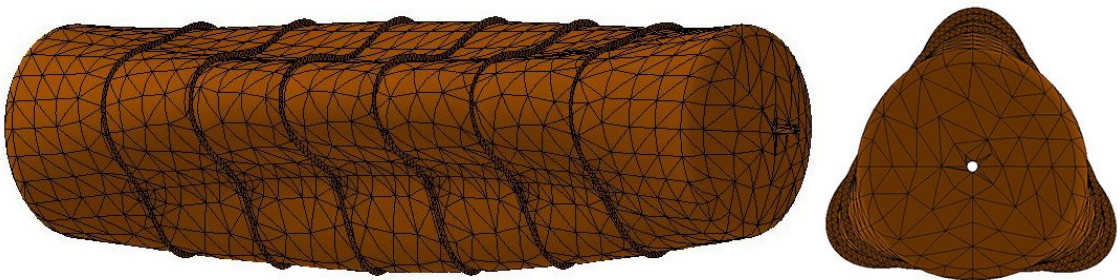
Tl. stěny t [mm]	D400_K10		D400_K30		D400_K50	
	n [ks]	K [-]	n [ks]	K [-]	n [ks]	K [-]
2,5	-	-	3	1,8623	3	1,8624
3	6	1,6627	2	2,2284	2	2,2233
4	0	1,5930	0	1,5930	0	1,5930
5	0	3,2362	0	3,2362	0	3,2362
6	0	3,9661	0	3,9661	0	3,9661
8	0	6,1151	0	6,1151	0	6,1151

Se stejným počtem výztuh, je rozdíl mezi koeficienty bezpečnosti u nádob typu D400_K30 a D400_K50 zanedbatelný, proto volím k dalšímu srovnání nádobu typu

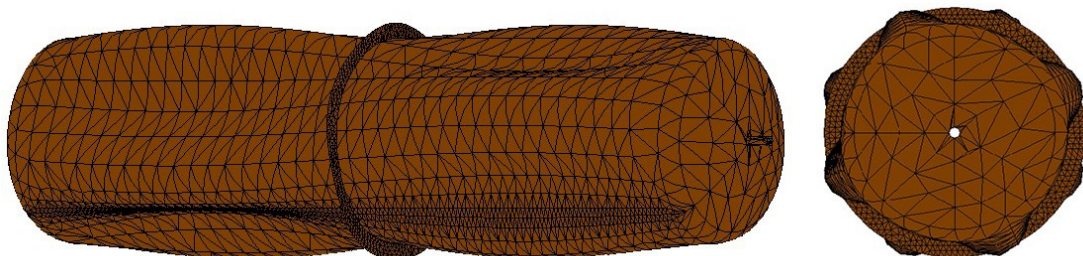
D400_K30 s menší a levnější výztuhou. U nádoby typu D400_K10 s tloušťkou stěny $t=3$ mm je potřeba ke splnění podmínky normy šest výztuh typu K10. Vzhledem k možnosti vzniku deformace nádoby vlivem přivařování velkého počtu výztuh k plášti nádoby a většímu tepelnému ovlivnění materiálu tuto variantu nedoporučuji. Raději volím nádobu typu D400_K30 se stejnou tloušťkou stěny, ale jen dvěma výztuhami typu K30. Nejmenší přípustná tloušťka stěny nádoby bez obvodových výztuh, splňující podmínky normy je tloušťka $t=4$ mm.



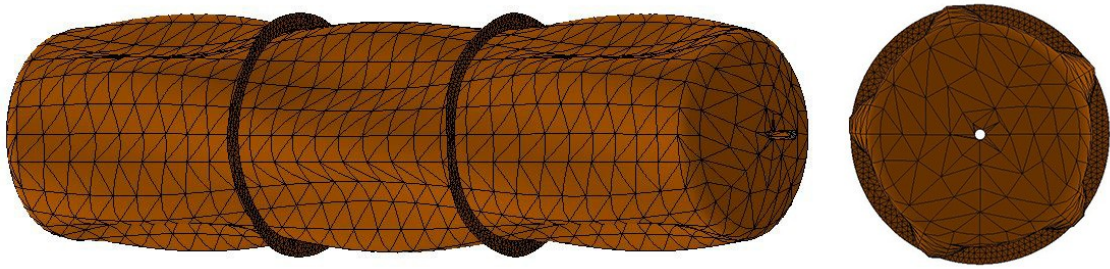
Obr. 36. Ukázka deformace nádoby D400 bez obvodových výztuh



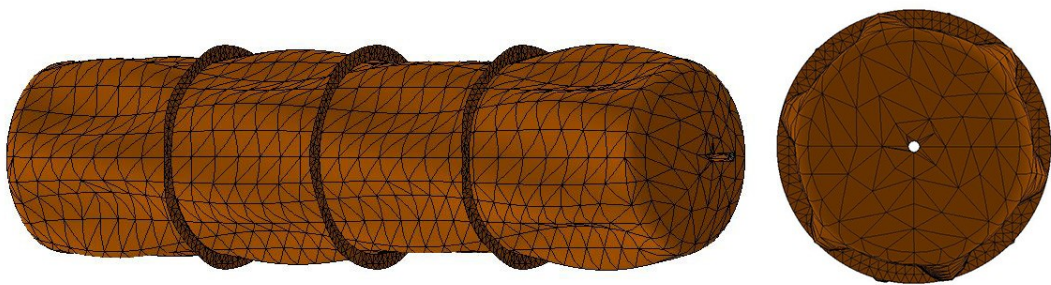
Obr. 37. Ukázka deformace nádoby D400_K10 se šesti výztuhami



Obr. 38. Ukázka deformace nádoby D400_K30 s jednou výztuhou



Obr. 39. Ukázka deformace nádoby D400_K30 se dvěma výztuhami



Obr. 40. Ukázka deformace nádoby D400_K30 se třemi výztuhami

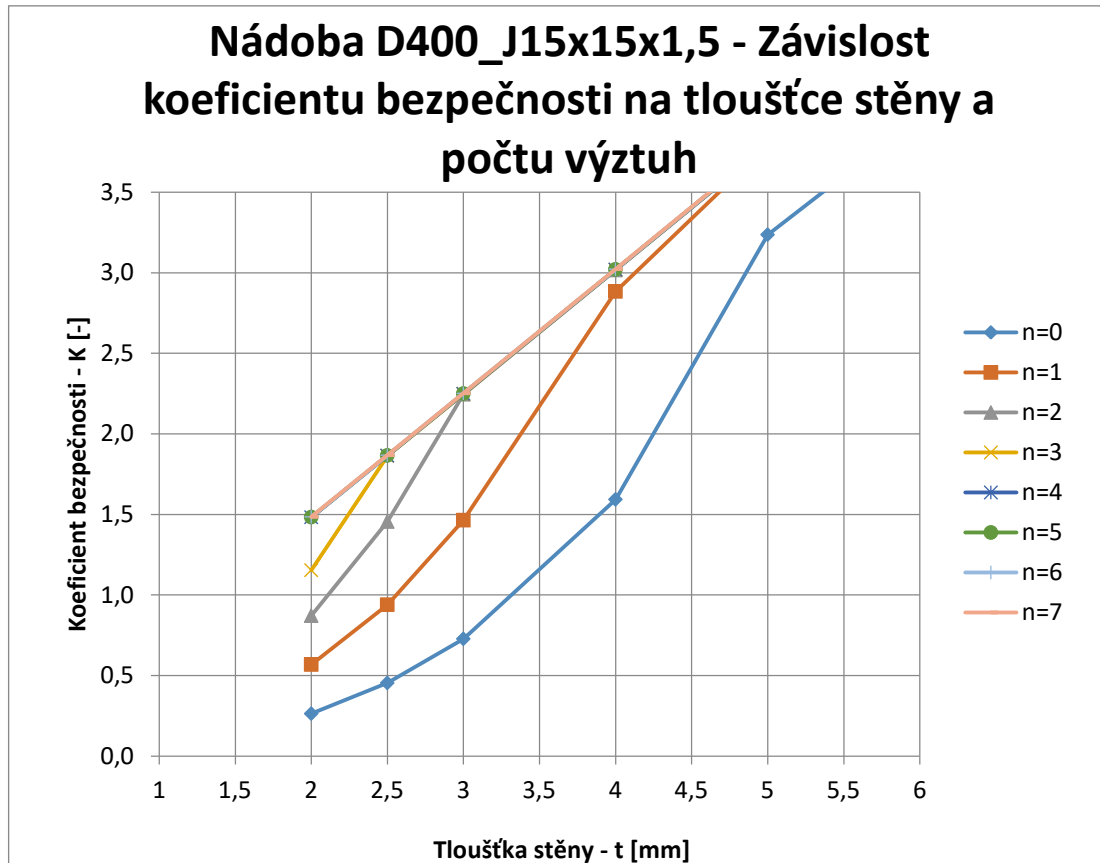
8.2 Analýzy nádob D400_J15x15x1,5, D400_J30x30x1,5 a D400_J40x20x2

8.2.1 Analýza nádoby D400_J15x15x1,5

Při této analýze byla postupně zvyšována tloušťka stěny nádoby a počet obvodových výztuh, jak je uvedeno v tabulce 10 tak, aby bylo dosaženo požadovaného koeficientu bezpečnosti. Dle normy ČSN EN 13445-3 je hodnota koeficientu bezpečnosti 1,5.

Tab. 10. Výsledky analýzy nádoby D400_J15x15x1,5

Tl. stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti – K [-] pro počet výztuh n [ks]							
	n = 0	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 6	n = 7
2	0,2638	0,5687	0,8717	1,1538	1,4823	1,4835	1,4845	1,4853
2,5	0,4543	0,9397	1,4559	1,8633	1,8649	1,8662	1,8673	1,8683
3	0,7278	1,4644	2,2454	2,2472	2,2488	2,2502	2,2514	2,2524
4	1,5930	2,8840	3,0166	3,0181	3,0194	3,0208	3,0218	3,0229
5	3,2362	3,7894	3,7904	3,7915	3,7926	3,7936	3,7945	3,7954
6	3,9661	4,5647	4,5654	4,5662	4,5670	4,5678	4,5685	4,5692
8	6,1151	6,1164	6,1168	6,1172	6,1176	6,1181	6,1185	6,1189



Obr. 41. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D400_J15x15x1,5

Z dosažených výsledků lze vypožorovat, že se vzrůstající tloušťkou stěny nádoby a počtem obvodových výztuh koeficient bezpečnosti roste. Ovšem je nutné podotknout, že od určitého počtu výztuh je růst koeficientu bezpečnosti zanedbatelný a tudíž je další přidání obvodové výztuhy zbytečné. Názorně to můžeme vidět u tloušťky stěny $t=2$ mm. Koeficient bezpečnosti zřetelně stoupá až do počtu výztuh $n=4$ ks a poté je jeho růst zanedbatelný.

U nádoby s tloušťkou stěny $t=2$ mm koeficient bezpečnosti nesplňuje podmínku normy ani se sedmi výztuhami. Můžeme také vidět, že u nádob s tloušťkou stěny 4 mm a výše, není potřeba přidávat obvodové výztuhy.

Konfigurace nádoby splňující podmínku normy jsou uvedeny v tabulce 11.

Tab. 11. Konfigurace nádoby D400_J15x15x1,5 splňující podmínku normy

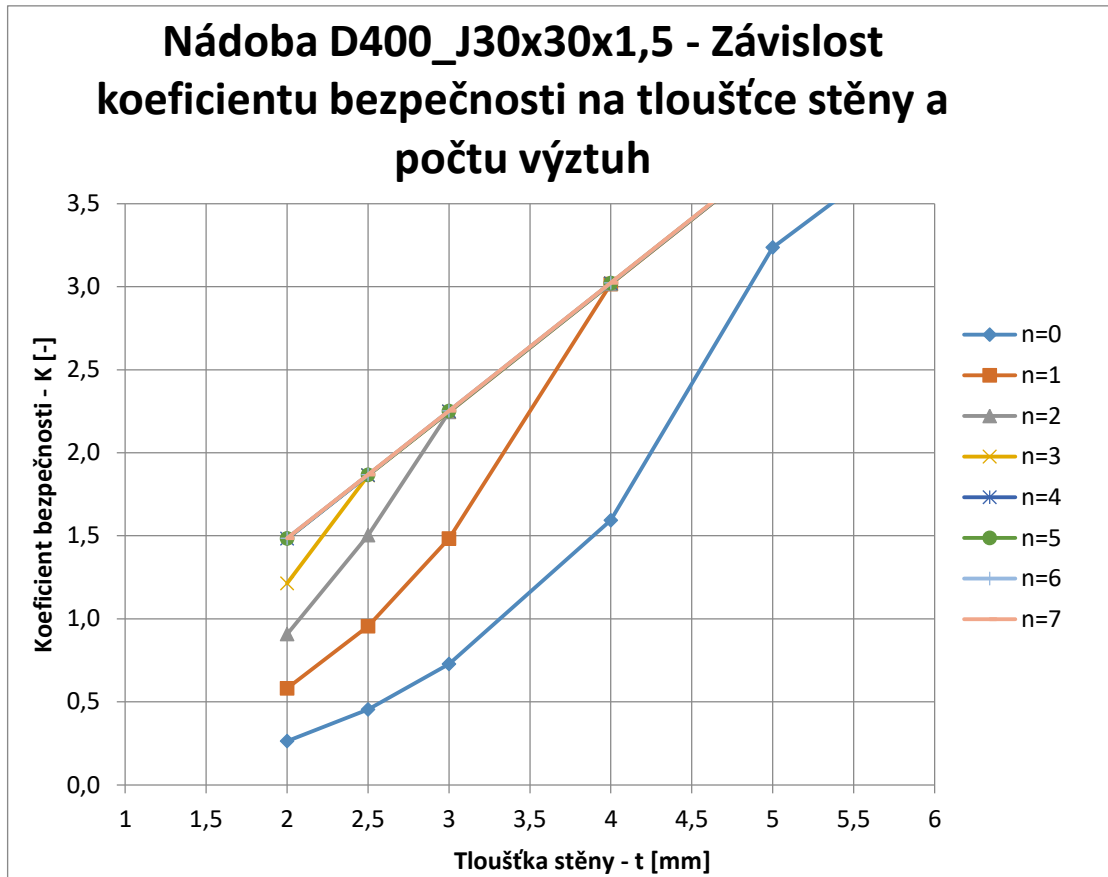
Tl. stěny t [mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. bezpečnosti K [-]
2,5	3	1,8633
3	2	2,2454
4	0	1,5930
5	0	3,2362
6	0	3,9661
8	0	6,1151

8.2.2 Analýza nádoby D400_J30x30x1,5

Při této analýze byla postupně zvyšována tloušťka stěny nádoby a počet obvodových výztuh, jak je uvedeno v tabulce 12 tak, aby bylo dosaženo požadovaného koeficientu bezpečnosti. Dle normy ČSN EN 13445-3 je hodnota koeficientu bezpečnosti 1,5.

Tab. 12. Výsledky analýzy nádoby D400_J30x30x1,5

Tl. stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti – K [-] pro počet výztuh n [ks]							
	n = 0	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 6	n = 7
2	0,2638	0,5812	0,9082	1,2133	1,4825	1,4838	1,4848	1,4856
2,5	0,4543	0,9553	1,5037	1,8635	1,8651	1,8665	1,8677	1,8687
3	0,7278	1,4831	2,2455	2,2474	2,2490	2,2505	2,2518	2,2529
4	1,5930	3,0153	3,0167	3,0182	3,0197	3,0211	3,0223	3,0234
5	3,2362	3,7894	3,7905	3,7916	3,7927	3,7939	3,7950	3,7959
6	3,9661	4,5648	4,5655	4,5663	4,5672	4,5681	4,5690	4,5697
8	6,1151	6,1165	6,1169	6,1173	6,1179	6,1184	6,1190	6,1195



Obr. 42. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D400_J30x30x1,5

Z dosažených výsledků lze vypožorovat, že se vzrůstající tloušťkou stěny nádoby a počtem obvodových výztuh koeficient bezpečnosti roste. Ovšem je nutné podotknout, že od určitého počtu výztuh je růst koeficientu bezpečnosti zanedbatelný a tudíž je další přidání obvodové výztuhy zbytečné. Názorně to můžeme vidět u tloušťky stěny $t=6$ mm. Koeficient bezpečnosti zřetelně stoupá až do počtu výztuh $n=1$ ks a poté je jeho růst zanedbatelný.

U nádoby s tloušťkou stěny $t=2$ mm koeficient bezpečnosti nespĺňuje podmínku normy ani se sedmi výztuhami. Můžeme také vidět, že u nádob s tloušťkou stěny $t=4$ mm a výše, není potřeba přidávat obvodové výztuhy.

Konfigurace nádoby splňující podmínku normy jsou uvedeny v tabulce 13.

Tab. 13. Konfigurace nádoby D400_J30x30x1,5 splňující podmínku normy

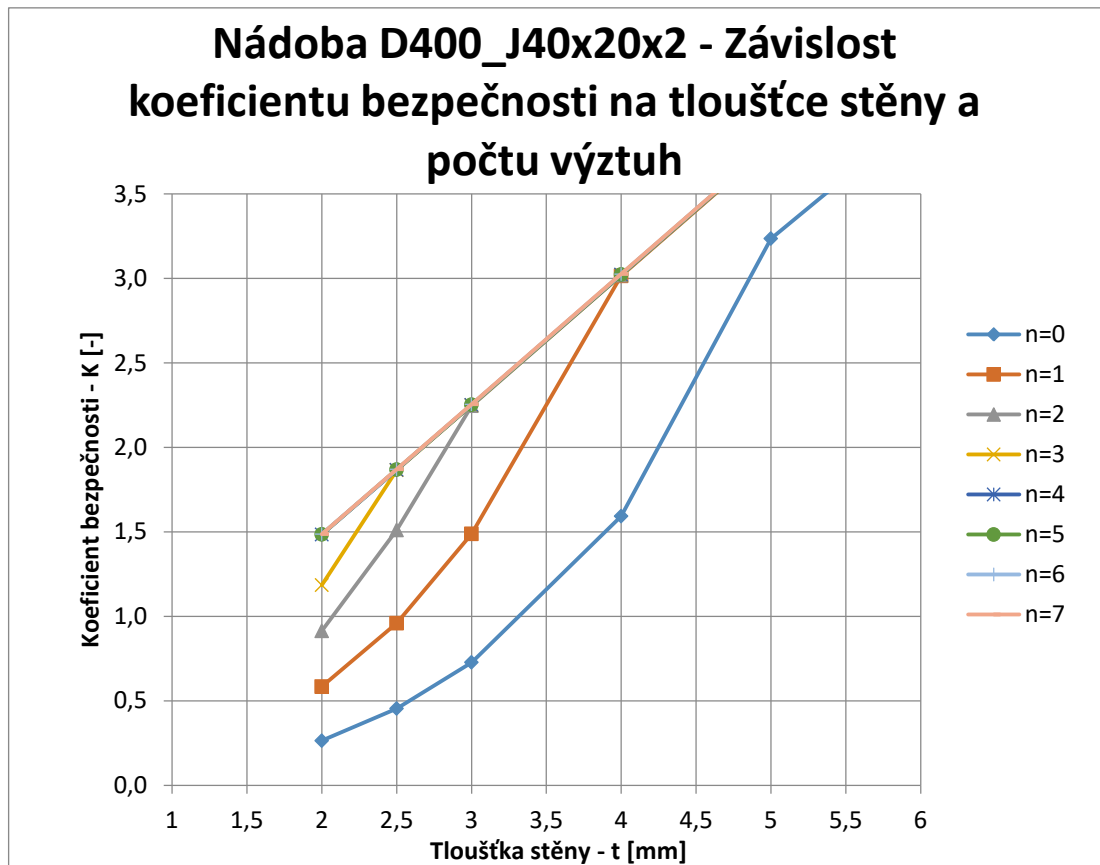
Tl. stěny t [mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. bezpečnosti K [-]
2,5	2	1,5037
3	2	2,2455
4	0	1,5930
5	0	3,2362
6	0	3,9661
8	0	6,1151

8.2.3 Analýza nádoby D400_J40x20x2

Při této analýze byla postupně zvyšována tloušťka stěny nádoby a počet obvodových výztuh, jak je uvedeno v tabulce 14 tak, aby bylo dosaženo požadovaného koeficientu bezpečnosti. Dle normy ČSN EN 13445-3 je hodnota koeficientu bezpečnosti 1,5.

Tab. 14. Výsledky analýzy nádoby D400_J40x20x2

Tl. stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti – K [-] pro počet výztuh n [ks]							
	n = 0	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 6	n = 7
2	0,2638	0,5842	0,9139	1,1850	1,4844	1,4855	1,4868	1,4876
2,5	0,4543	0,9595	1,5111	1,8653	1,8674	1,8688	1,8703	1,8714
3	0,7278	1,4884	2,2467	2,2494	2,2516	2,2531	2,2548	2,2560
4	1,5930	3,0154	3,0198	3,0202	3,0224	3,0239	3,0256	3,0269
5	3,2362	3,7896	3,7913	3,7932	3,7951	3,7964	3,7980	3,7992
6	3,9661	4,5649	4,5651	4,5675	4,5690	4,5701	4,5714	4,5725
8	6,1151	6,1165	6,1171	6,1179	6,1188	6,1194	6,1204	6,1211



Obr. 43. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D400_J40x20x2

Z dosažených výsledků lze vyzorovat, že se vzrůstající tloušťkou stěny nádoby a počtem obvodových výztuh koeficient bezpečnosti roste. Ovšem je nutné podotknout, že od určitého počtu výztuh je růst koeficientu bezpečnosti zanedbatelný a tudíž je další přidání obvodové výztuhy zbytečné. Názorně to můžeme vidět u tloušťky stěny $t=4$ mm. Koeficient bezpečnosti zřetelně stoupá až do počtu výztuh $n=2$ ks a poté je jeho růst zanedbatelný.

U nádoby s tloušťkou stěny $t=2$ mm koeficient bezpečnosti nespĺňuje podmínku normy ani se sedmi výztuhami. Můžeme také vidět, že u nádob s tloušťkou stěny $t=4$ mm a výše, není potřeba přidávat obvodové výztuhy.

Konfigurace nádoby splňující podmínku normy jsou uvedeny v tabulce 15.

Tab. 15. Konfigurace nádoby D400_J40x20x2 splňující podmínku normy

Tl. stěny t [mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. bezpečnosti K [-]
2,5	2	1,5111
3	2	2,2467
4	0	1,5930
5	0	3,2362
6	0	3,9661
8	0	6,1151

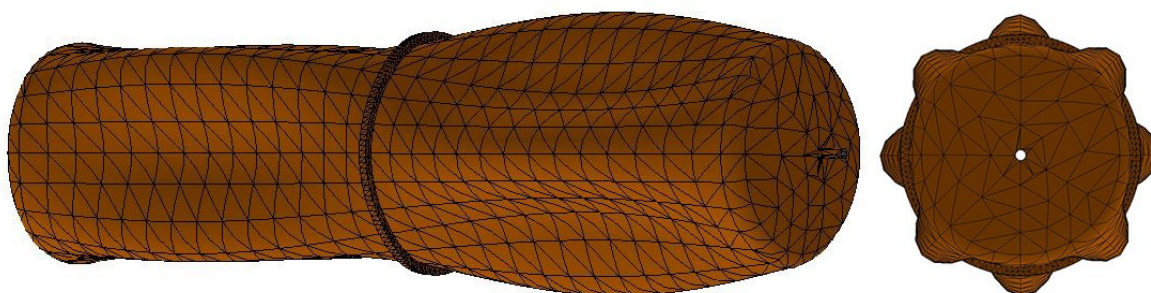
8.2.4 Srovnání výsledku nádob D400_J15x15x1,5, D400_J30x30x1,5 a D400_J40x20x2

V tabulce 16 jsou zobrazeny všechny konfigurace nádob splňující podmínku normy pro koeficient bezpečnosti. Červeně označené hodnoty jsou vybrány jako nejlepší konfigurace nádob.

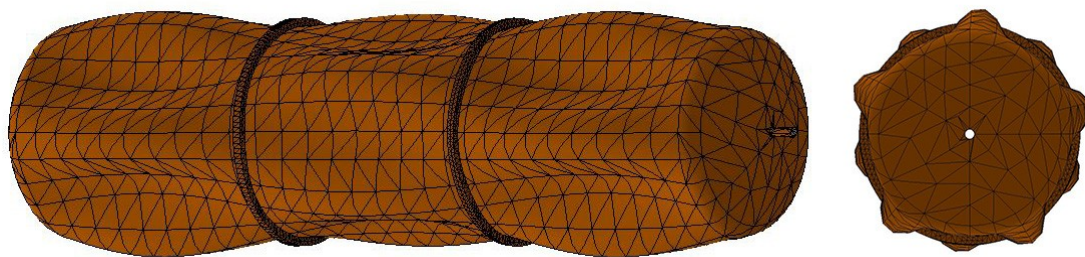
Tab. 16. Výsledky konfigurací nádob splňující podmínky normy

Tl. stěny t [mm]	D400_J15x15x1,5		D400_J30x30x1,5		D400_J40x20x2	
	n [ks]	K [-]	n [ks]	K [-]	n [ks]	K [-]
2,5	3	1,8633	2	1,5037	2	1,5111
3	2	2,2454	2	2,2455	2	2,2467
4	0	1,5930	0	1,5930	0	1,5930
5	0	3,2362	0	3,2362	0	3,2362
6	0	3,9661	0	3,9661	0	3,9661
8	0	6,1151	0	6,1751	0	6,1151

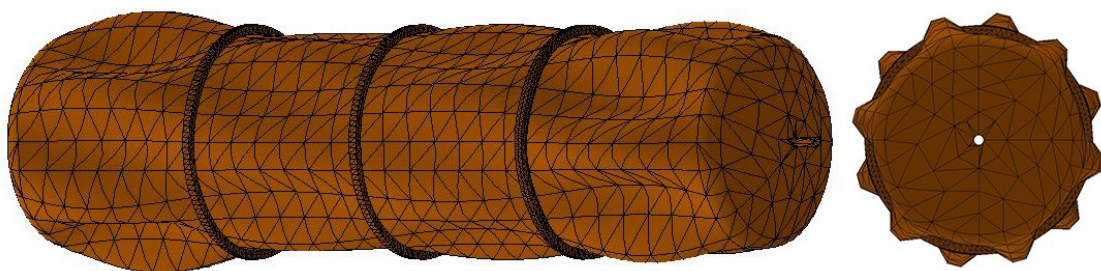
Se stejným počtem výztuh je rozdíl mezi koeficienty bezpečnosti u nádob typu D400_J30x30x1,5 a D400_J40x20x2 zanedbatelný, proto volím k dalšímu srovnání nádobu typu D400_J30x30x1,5 s menší a levnější výztuhou. Nejmenší přípustná tloušťka stěny nádoby bez obvodových výztuh, splňující podmínky normy je tloušťka $t=4$ mm.



Obr. 44. Ukázka deformace nádoby D400_J15x15x1,5 s jednou výztuhou



Obr. 45. Ukázka deformace nádoby D400_J15x15x1,5 se dvěma výztuhami



Obr. 46. Ukázka deformace nádoby D400_J15x15x1,5 se třemi výztuhami

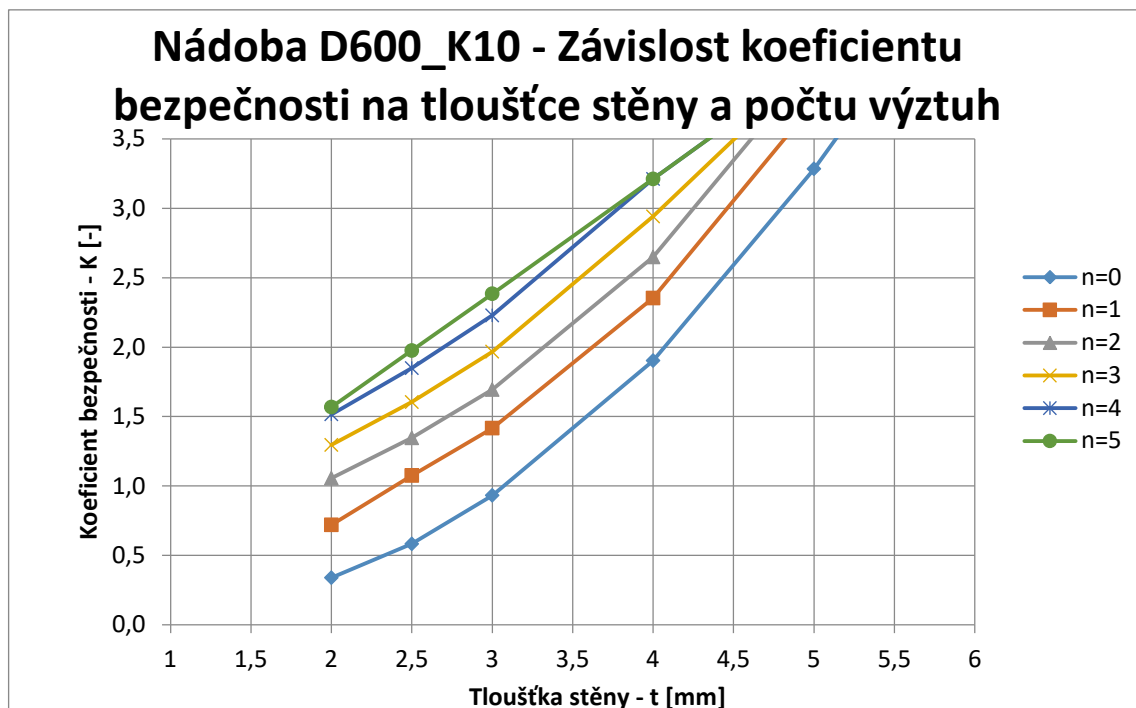
8.3 Analýzy nádob D600_K10, D600_K30 a D600_K50

8.3.1 Analýza nádoby D600_K10

Při této analýze byla postupně zvyšována tloušťka stěny nádoby a počet obvodových výztuh, jak je uvedeno v tabulce 17 tak, aby bylo dosaženo požadovaného koeficientu bezpečnosti. Dle normy ČSN EN 13445-3 je hodnota koeficientu bezpečnosti 1,5.

Tab. 17. Výsledky analýzy nádoby D600_K10

Tl. stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti – K [-] pro počet výztuh n [ks]					
	n = 0	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
2	0,3387	0,7196	1,0554	1,2953	1,5157	1,5682
2,5	0,5824	1,0750	1,3459	1,6042	1,8486	1,9753
3	0,9320	1,4164	1,6944	1,9673	2,2286	2,3848
4	1,9029	2,3536	2,6494	2,9415	3,2116	3,2118
5	3,2846	3,7590	4,0452	4,0460	4,0480	4,0483
6	4,8892	4,8894	4,8897	4,8903	4,8920	4,8924
8	6,5932	6,5937	6,5942	6,5947	6,5956	6,5961



Obr. 47. Graf závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D600_K10

Z dosažených výsledků lze vypožorovat, že se vzrůstající tloušťkou stěny nádoby a počtem obvodových výztuh koeficient bezpečnosti roste. Ovšem je nutné podotknout, že u některých tloušťek stěny a od určitého počtu výztuh je růst koeficientu bezpečnosti zanedbatelný a tudíž je další přidání obvodové výztuhy zbytečné. Názorně to můžeme vidět u tloušťky stěny $t=4$ mm. Koeficient bezpečnosti zřetelně stoupá až do počtu výztuh $n=4$ ks a poté je jeho růst zanedbatelný.

Koeficient bezpečnosti u všech analyzovaných tloušťek nádoby splňuje podmínku normy. Můžeme také vidět, že u nádob s tloušťkou stěny $t=4$ mm a výše, není potřeba přidávat obvodové výztuhy.

Konfigurace nádoby splňující podmínku normy jsou uvedeny v tabulce 18.

Tab. 18. Konfigurace nádoby D600_K10 splňující podmínku normy

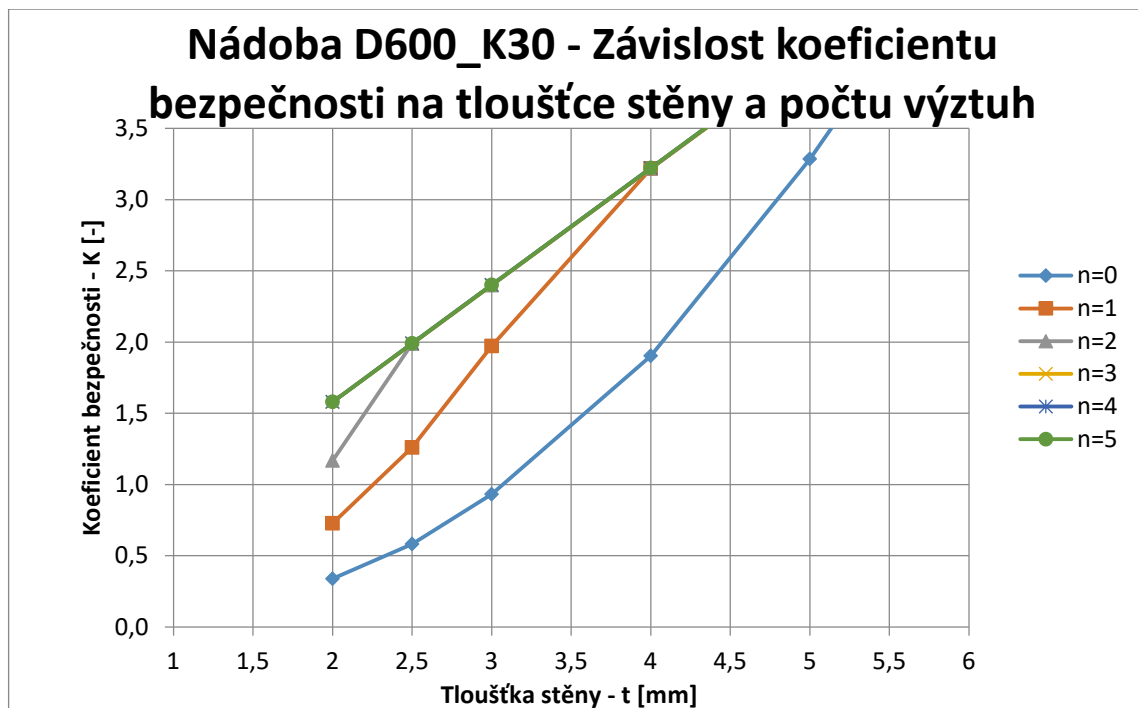
Tl. stěny t [mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. bezpečnosti K [-]
2	4	1,5157
2,5	3	1,6042
3	2	1,6944
4	0	1,9029
5	0	3,2846
6	0	4,8892
8	0	6,5932

8.3.2 Analýza nádoby D600_K30

Při této analýze byla postupně zvyšována tloušťka stěny nádoby a počet obvodových výztuh, jak je uvedeno v tabulce 19 tak, aby bylo dosaženo požadovaného koeficientu bezpečnosti. Dle normy ČSN EN 13445-3 je hodnota koeficientu bezpečnosti 1,5.

Tab. 19. Výsledky analýzy nádoby D600_K30

Tl. stěny	Koeficient bezpečnosti – K [-] pro počet výztuh n [ks]					
t [mm]	n = 0	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
2	0,3387	0,7279	1,1688	1,5791	1,5802	1,5804
2,5	0,5824	1,2599	1,9887	1,9891	1,9905	1,9906
3	0,9320	1,9720	2,3988	2,3992	2,4007	2,4009
4	1,9029	3,2172	3,2191	3,2195	3,2210	3,2212
5	3,2846	4,0377	4,0392	4,0396	4,0409	4,0411
6	4,8892	4,8896	4,8899	4,8902	4,8906	4,8909
8	6,5932	6,5942	6,5957	6,5964	6,5972	6,5978



Obr. 48. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D600_K30

Z dosažených výsledků lze vypožorovat, že se vzrůstající tloušťkou stěny nádoby a počtem obvodových výztuh koeficient bezpečnosti roste. Ovšem je nutné podotknout, že od určitého počtu výztuh je růst koeficientu bezpečnosti zanedbatelný a tudíž je další přidání obvodové výztuhy zbytečné. Názorně to můžeme vidět u tloušťky stěny $t=3$ mm.

Koeficient bezpečnosti zřetelně stoupá až do počtu výztuh $n=2$ ks a poté je jeho růst zanedbatelný.

Koeficient bezpečnosti u všech analyzovaných tloušťek nádoby splňuje podmínku normy. Můžeme také vidět, že u nádob s tloušťkou stěny $t=4$ mm a výše, není potřeba přidávat obvodové výztuhy.

Konfigurace nádoby splňující podmínku normy jsou uvedeny v tabulce 20.

Tab. 20. Konfigurace nádoby D600_K30 splňující podmínku normy

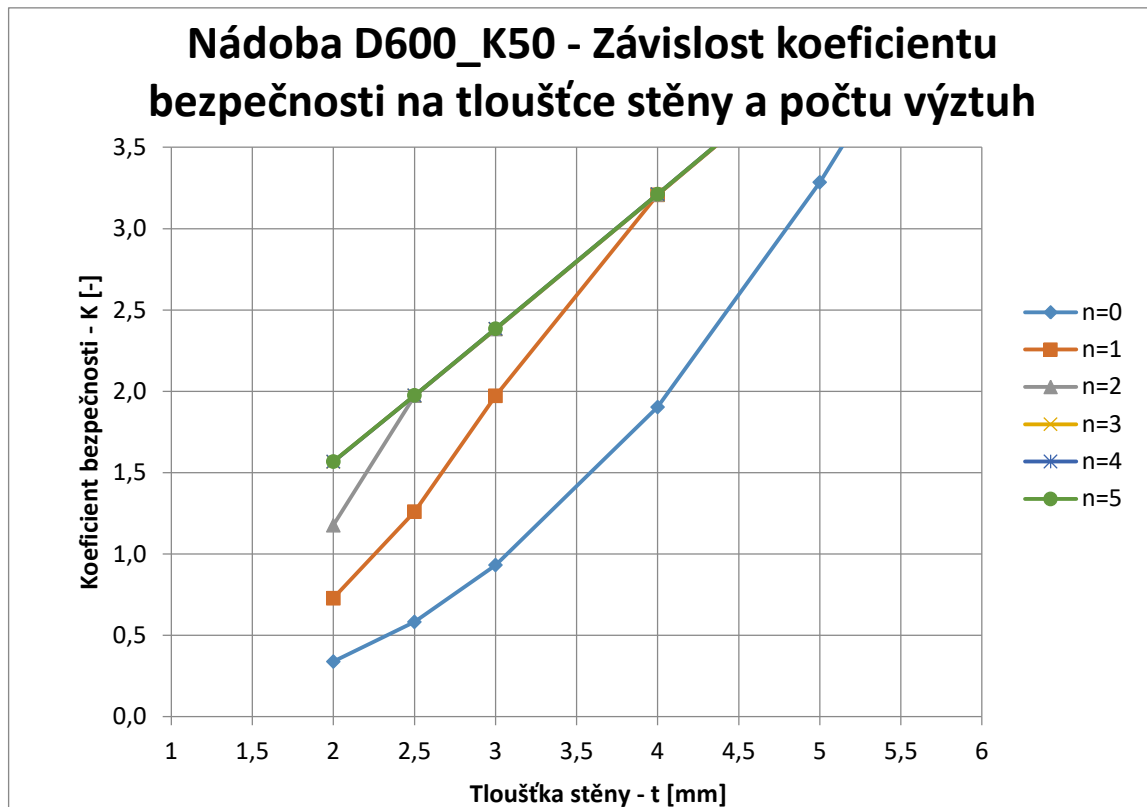
Tl. stěny t [mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. bezpečnosti K [-]
2	3	1,5791
2,5	2	1,9887
3	1	1,9720
4	0	1,9029
5	0	3,2846
6	0	4,8892
8	0	6,5932

8.3.3 Analýza nádoby D600_K50

Při této analýze byla postupně zvyšována tloušťka stěny nádoby a počet obvodových výztuh, jak je uvedeno v tabulce 21 tak, aby bylo dosaženo požadovaného koeficientu bezpečnosti. Dle normy ČSN EN 13445-3 je hodnota koeficientu bezpečnosti 1,5.

Tab. 21. Výsledky analýzy nádoby D600_K50

Tl. stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti – K [-] pro počet výztuh n [ks]					
	$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
2	0,3387	0,7280	1,1766	1,5665	1,5678	1,5680
2,5	0,5824	1,2600	1,9729	1,9733	1,9748	1,9751
3	0,9320	1,9722	2,3823	2,3827	2,3844	2,3846
4	1,9029	3,2073	3,2094	3,2098	3,2115	3,2117
5	3,2846	4,0447	4,0463	4,0467	4,0481	4,0484
6	4,8892	4,8897	4,8909	4,8913	4,8924	4,8927
8	6,5932	6,5944	6,5949	6,5954	6,5959	6,5963



Obr. 49. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D600_K50

Z dosažených výsledků lze vypožorovat, že se vzrůstající tloušťkou stěny nádoby a počtem obvodových výztuh koeficient bezpečnosti roste. Ovšem je nutné podotknout, že od určitého počtu výztuh je růst koeficientu bezpečnosti zanedbatelný a tudíž je další přidání obvodové výztuhy zbytečné. Názorně to můžeme vidět u tloušťky stěny $t=2$ mm. Koeficient bezpečnosti zřetelně stoupá až do počtu výztuh $n=3$ ks a poté je jeho růst zanedbatelný.

Koeficient bezpečnosti u všech analyzovaných tloušťek nádoby splňuje podmínku normy. Můžeme také vidět, že u nádob s tloušťkou stěny $t=4$ mm a výše, není potřeba přidávat obvodové výztuhy.

Konfigurace nádoby splňující podmínku normy jsou uvedeny v tabulce 22.

Tab. 22. Konfigurace nádoby D600_K50 splňující podmínku normy

Tl. stěny t [mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. bezpečnosti K [-]
2	3	1,5665
2,5	2	1,9729
3	1	1,9722
4	0	1,9029

5	0	3,2846
6	0	4,8892
8	0	6,5932

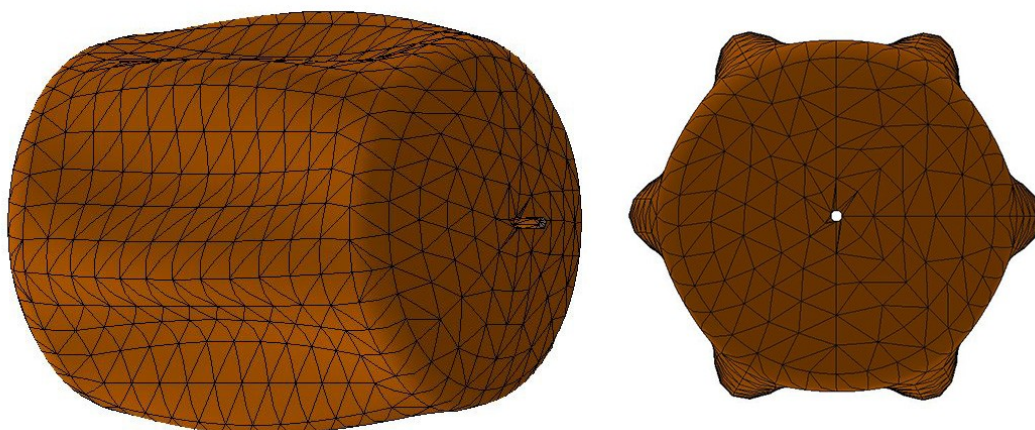
8.3.4 Srovnání výsledku nádob D600_K10, D600_K30 a D600_K50

V tabulce 23 jsou zobrazeny všechny konfigurace nádob splňující podmínku normy pro koeficient bezpečnosti Červeně označené hodnoty jsou vybrány jako nejlepší konfigurace nádob.

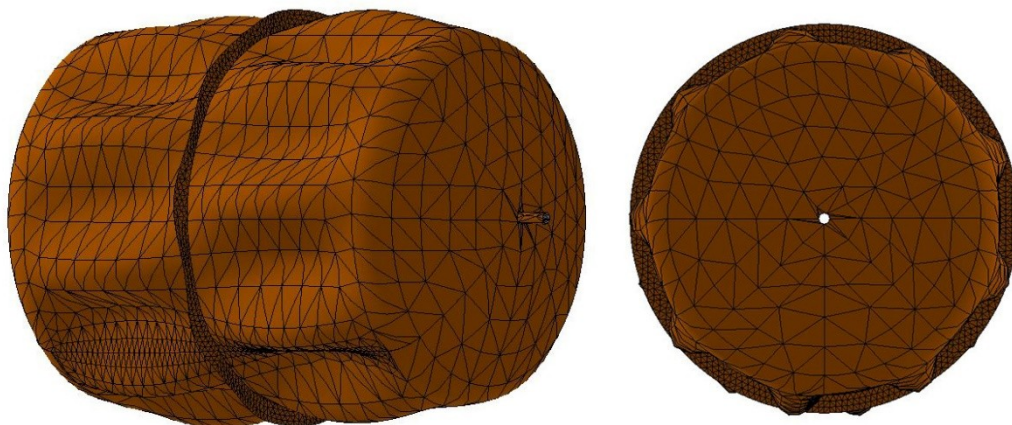
Tab. 23. Konfigurace nádob splňující podmínky normy

Tl. stěny t [mm]	D600_K10		D600_K30		D600_K50	
	n [ks]	K [-]	n [ks]	K [-]	n [ks]	K [-]
2	4	1,5157	3	1,5791	3	1,5665
2,5	3	1,6042	2	1,9887	2	1,9729
3	2	1,6944	1	1,9720	1	1,9722
4	0	1,9029	0	1,9029	0	1,9029
5	0	3,2846	0	3,2846	0	3,2846
6	0	4,8892	0	4,8892	0	4,8892
8	0	6,5932	0	6,5932	0	6,5932

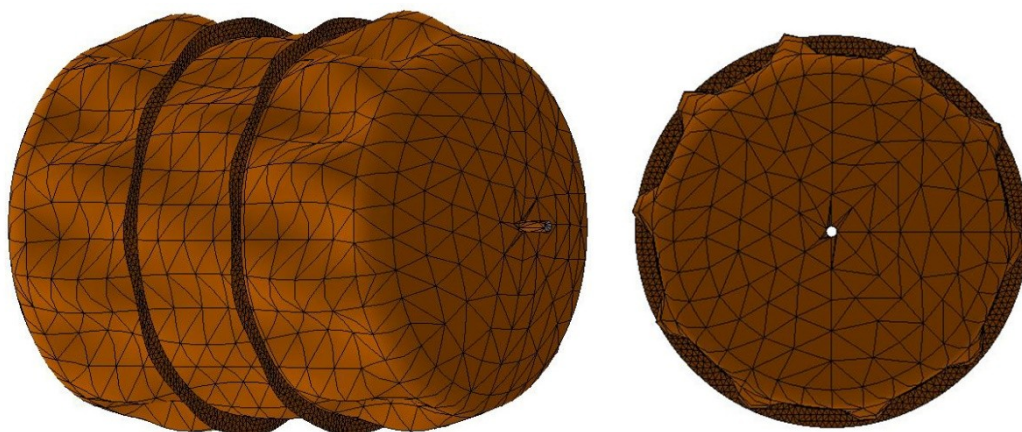
Se stejným počtem výztuh je rozdíl mezi koeficienty bezpečnosti u nádob typu D600_K30 a D600_K50 zanedbatelný, proto volím pro další srovnání nádobu typu D600_K30 s menší a levnější výztuhou. Nejmenší přípustná tloušťka stěny nádoby bez obvodových výztuh, splňující podmínky normy je tloušťka $t=4$ mm.



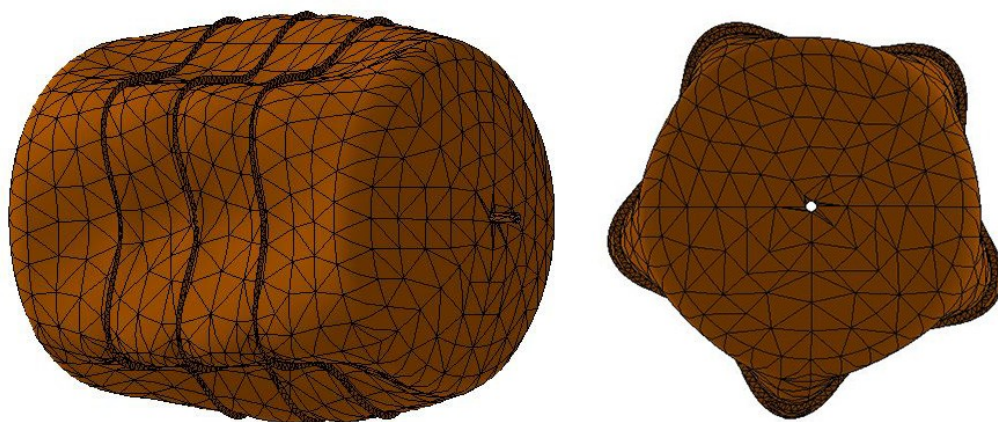
Obr. 50. Ukázka deformace nádoby D600 bez obvodových výztuh



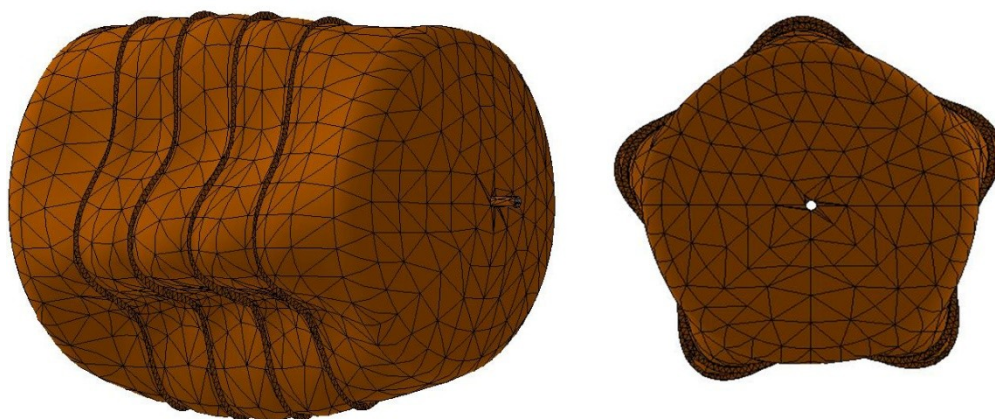
Obr. 51. Ukázka deformace nádoby D600_K30 s jednou výztuhou



Obr. 52. Ukázka deformace nádoby D600_K30 se dvěma výztuhami



Obr. 53. Ukázka deformace nádoby D600_K30 se třemi výztuhami



Obr. 54. Ukázka deformace nádoby D600_K10 se čtyřmi výztuhami

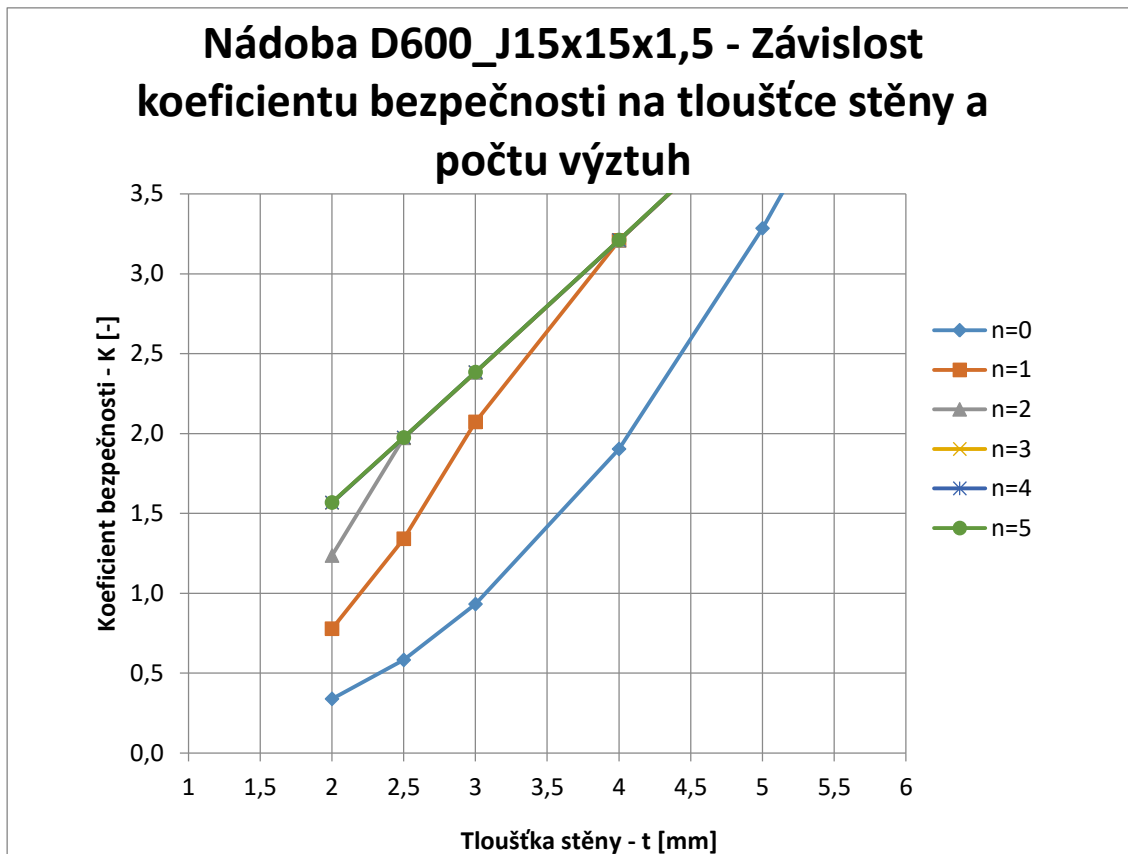
8.4 Analýzy nádob D600_J15x15x1,5, D600_J30x30x1,5 a D600_J40x20x2

8.4.1 Analýza nádoby D600_J15x15x1,5

Při této analýze byla postupně zvyšována tloušťka stěny nádoby a počet obvodových výztuh, jak je uvedeno v tabulce 24 tak, aby bylo dosaženo požadovaného koeficientu bezpečnosti. Dle normy ČSN EN 13445-3 je hodnota koeficientu bezpečnosti 1,5.

Tab. 24. Výsledky analýzy nádoby D600_J15x15x1,5

Tl. stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti – K [-] pro počet výztuh n [ks]					
	n = 0	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
2	0,3387	0,7778	1,2359	1,5665	1,5672	1,5678
2,5	0,5824	1,3410	1,9724	1,9733	1,9741	1,9747
3	0,9320	2,0724	2,3819	2,3827	2,3835	2,3842
4	1,9029	3,2081	3,2090	3,2097	3,2106	3,2111
5	3,2846	4,0452	4,0459	4,0466	4,0473	4,0478
6	4,8892	4,8900	4,8905	4,8912	4,8917	4,8921
8	6,5932	6,5943	6,5947	6,5951	6,5955	6,5958



Obr. 55. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D600_J15x15x1,5

Z dosažených výsledků lze vypožorovat, že se vzrůstající tloušťkou stěny nádoby a počtem obvodových výztuh koeficient bezpečnosti roste. Ovšem je nutné podotknout, že od určitého počtu výztuh je růst koeficientu bezpečnosti zanedbatelný a tudíž je další přidání obvodové výztuhy zbytečné. Názorně to můžeme vidět u tloušťky stěny $t=2,5$ mm. Koeficient bezpečnosti zřetelně stoupá až do počtu výztuh $n=2$ ks a poté je jeho růst zanedbatelný.

Koeficient bezpečnosti u všech analyzovaných tloušťek nádoby splňuje podmínku normy. Můžeme také vidět, že u nádob s tloušťkou stěny $t=4$ mm a výše, není potřeba přidávat obvodové výztuhy.

Konfigurace nádoby splňující podmínku normy jsou uvedeny v tabulce 25.

Tab. 25. Konfigurace nádoby D600_J15x15x1,5splňující podmínku normy

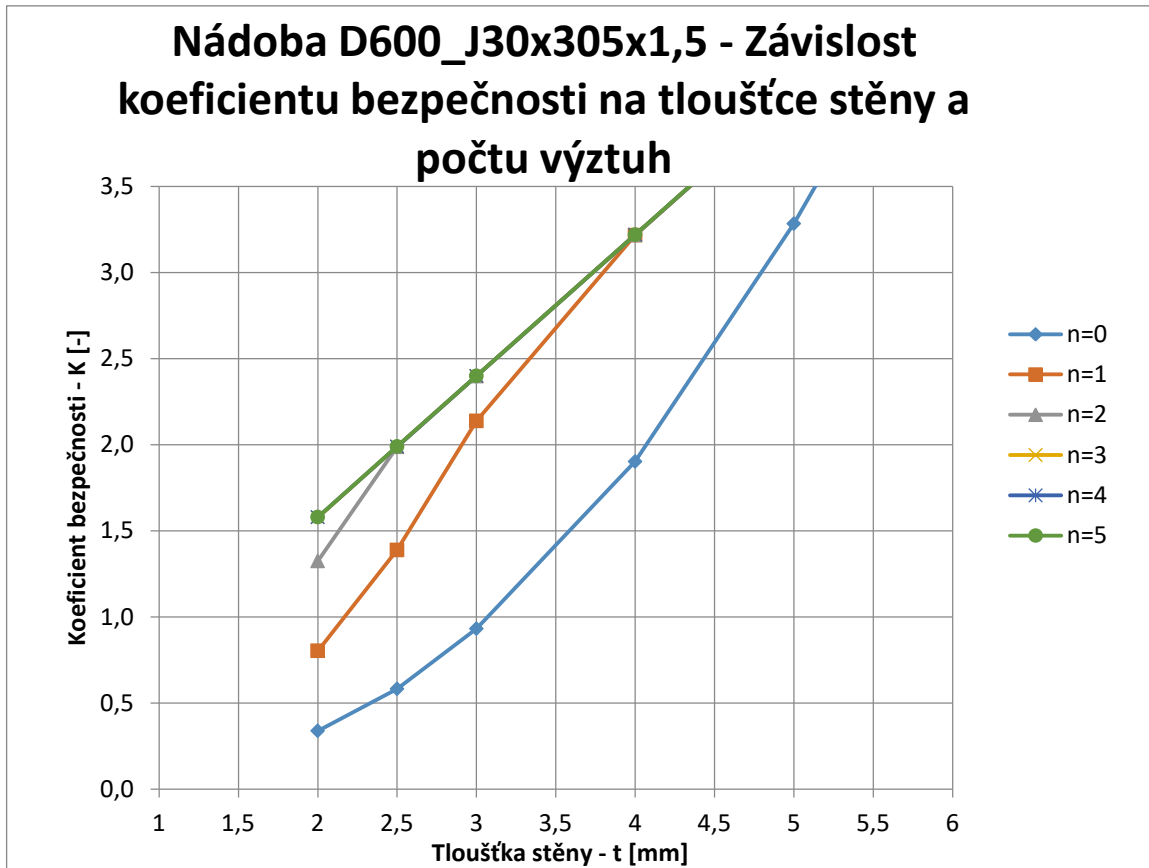
Tl. stěny t [mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. bezpečnosti K [-]
2	3	1,5665
2,5	2	1,9724
3	1	2,0724
4	0	1,9029
5	0	3,2846
6	0	4,8892
8	0	6,5932

8.4.2 Analýza nádoby D600_J30x30x1,5

Při této analýze byla postupně zvyšována tloušťka stěny nádoby a počet obvodových výztuh, jak je uvedeno v tabulce 26 tak, aby bylo dosaženo požadovaného koeficientu bezpečnosti. Dle normy ČSN EN 13445-3 je hodnota koeficientu bezpečnosti 1,5.

Tab. 26. Výsledky analýzy nádoby D600_J30x30x1,5

Tl. stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti – K [-] pro počet výztuh n [ks]					
	n = 0	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
2	0,3387	0,8037	1,3254	1,5792	1,5798	1,5804
2,5	0,5824	1,3890	1,9883	1,9891	1,9899	1,9905
3	0,9320	2,1388	2,3989	2,3993	2,4001	2,4007
4	1,9029	3,2178	3,2187	3,2195	3,2203	3,2209
5	3,2846	4,0381	4,0389	4,0396	4,0403	4,0410
6	4,8892	4,8903	4,8907	4,8918	4,8922	4,8929
8	6,5932	6,5948	6,5949	6,5954	6,5957	6,5963



Obr. 56. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D600_J30x30x1,5

Z dosažených výsledků lze vypožorovat, že se vzrůstající tloušťkou stěny nádoby a počtem obvodových výztuh koeficient bezpečnosti roste. Ovšem je nutné podotknout, že od určitého počtu výztuh je růst koeficientu bezpečnosti zanedbatelný a tudíž je další přidání obvodové výztuhy zbytečné. Názorně to můžeme vidět u tloušťky stěny $t=4$ mm. Koeficient bezpečnosti zřetelně stoupá až do počtu výztuh $n=1$ ks a poté je jeho růst zanedbatelný.

Koeficient bezpečnosti u všech analyzovaných tloušťek nádoby splňuje podmínku normy. Můžeme také vidět, že u nádob s tloušťkou stěny $t=4$ mm a výše, není potřeba přidávat obvodové výztuhy.

Konfigurace nádoby splňující podmínku normy jsou uvedeny v tabulce 27.

Tab. 27. Konfigurace nádoby D600_J30x30x1,5 splňující podmínku normy

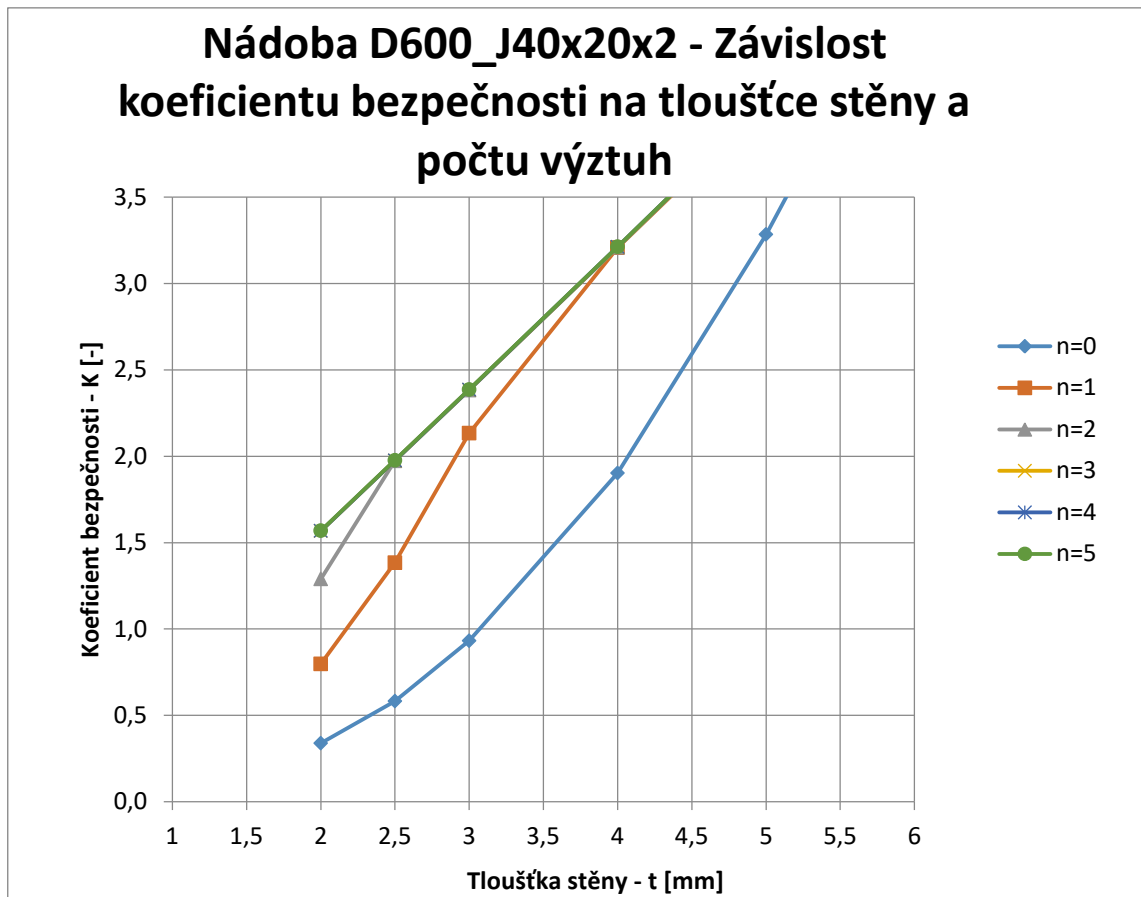
Tl. stěny t [mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. bezpečnosti K [-]
2	3	1,5792
2,5	2	1,9883
3	1	2,1388
4	0	1,9029
5	0	3,2846
6	0	4,8892
8	0	6,5932

8.4.3 Analýza nádoby D600_J40x20x2

Při této analýze byla postupně zvyšována tloušťka stěny nádoby a počet obvodových výztuh, jak je uvedeno v tabulce 28 tak, aby bylo dosaženo požadovaného koeficientu bezpečnosti. Dle normy ČSN EN 13445-3 je hodnota koeficientu bezpečnosti 1,5.

Tab. 28. Výsledky analýzy nádoby D600_J40x20x2

Tl. stěny	Koeficient bezpečnosti – K [-] pro počet výztuh n [ks]					
t [mm]	0	1	2	3	4	5
2	0,3387	0,7978	1,2899	1,5677	1,5686	1,5694
2,5	0,5824	1,3839	1,9734	1,9748	1,9758	1,9767
3	0,9320	2,1339	2,3829	2,3844	2,3854	2,3865
4	1,9029	3,2083	3,2100	3,2114	3,2126	3,2136
5	3,2846	4,0386	4,0469	4,0481	4,0492	4,0502
6	4,8892	4,8902	4,8914	4,8925	4,8934	4,8943
8	6,5932	6,5944	6,5953	6,5960	6,5967	6,5975



Obr. 57. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádoby D600_J40x20x2

Z dosažených výsledků lze vypořadovat, že se vzrůstající tloušťkou stěny nádoby a počtem obvodových výztuh koeficient bezpečnosti roste. Ovšem je nutné podotknout, že od určitého počtu výztuh je růst koeficientu bezpečnosti zanedbatelný a tudíž je další přidání obvodové výztuhy zbytečné. Názorně to můžeme vidět u tloušťky stěny $t=2,5$ mm. Koeficient bezpečnosti zřetelně stoupá až do počtu výztuh $n=2$ ks a poté je jeho růst zanedbatelný.

Koeficient bezpečnosti u všech analyzovaných tloušťek nádoby splňuje podmínku normy. Můžeme také vidět, že u nádob s tloušťkou stěny $t=4$ mm a výše, není potřeba přidávat obvodové výztuhy.

Konfigurace nádoby splňující podmínku normy jsou uvedeny v tabulce 29.

Tab. 29. Konfigurace nádoby D600_J40x20x2 splňující podmínku normy

Tl. stěny t [mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. bezpečnosti K [-]
2	3	1,5677
2,5	2	1,9734
3	1	2,1339
4	0	1,9029
5	0	3,2846
6	0	4,8892
8	0	6,5932

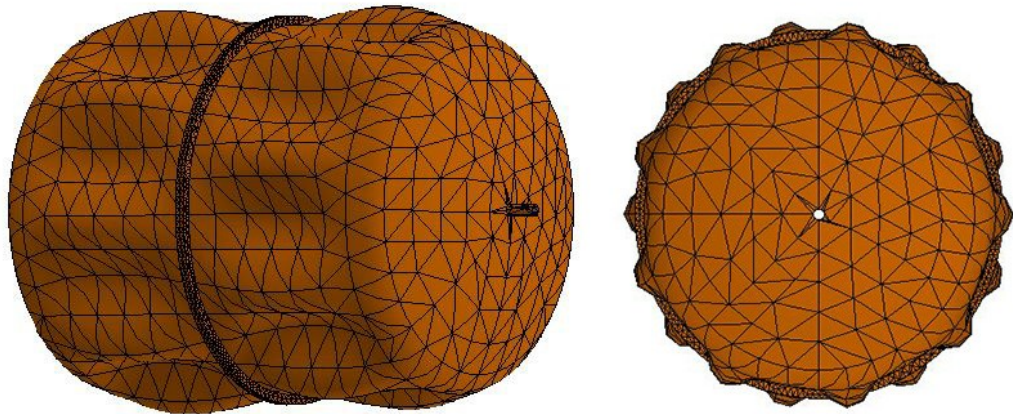
8.4.4 Srovnání výsledku nádob D600_J15x15x1,5, D600_J30x30x1,5 a D600_J40x20x2

V tabulce 30 jsou zobrazeny všechny konfigurace nádob splňující podmínku normy pro koeficient bezpečnosti. Červeně označené hodnoty jsou vybrány jako optimální konfigurace nádob.

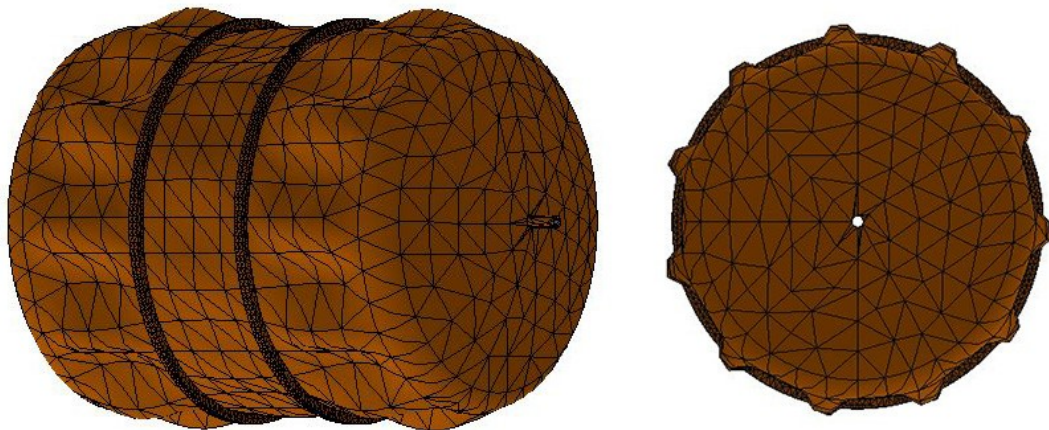
Tab. 30. Konfigurace nádob splňující podmínky normy

Tl. stěny	D600_J15x15x1,5		D600_J30x30x1,5		D600_J40x20x2	
t [mm]	n [ks]	K [-]	n [ks]	K [-]	n [ks]	K [-]
2	3	1,5665	3	1,5792	3	1,5677
2,5	2	1,9724	2	1,9883	2	1,9734
3	1	2,0724	1	2,1388	1	2,1339
4	0	1,9029	0	1,9029	0	1,9029
5	0	3,2846	0	3,2846	0	3,2846
6	0	4,8892	0	4,8892	0	4,8892
8	0	6,5932	0	6,5932	0	6,5932

Se stejným počtem výztuh, je rozdíl mezi koeficienty bezpečnosti u všech konfigurací nádob zanedbatelný, proto volím pro další srovnání nádobu typu D400_J15x15x1,5 s nejmenší a nejlevnější výztuhou. Nejmenší přípustná tloušťka stěny nádoby bez obvodových výztuh, splňující podmínky normy je tloušťka $t=4$ mm.



Obr. 58. Ukázka deformace nádoby D600_J15x15x1,5 s jednou výztuhou



Obr. 59. Ukázka deformace nádoby D600_J15x15x1,5 se dvěma výztuhami

8.5 Vyhodnocení výsledků analýz

Nádoby průměru 400 mm:

Tab. 31. Vybrané optimální konfigurace nádob průměru 400 mm

Označení nádoby	Tl. stěny t[mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. Bezpečnosti K [-]
D400_K30	2,5	3	1,8623
D400_J15x15x1,5	2,5	3	1,8633
D400_J30x30x1,5	2,5	2	1,5037
D400_K30	3	2	2,2284
D400_J15x15x1,5	3	2	2,2454
D400	4	0	1,5930

V tabulce 31 jsou uvedeny všechny vybrané konfigurace nádob z kapitol 8.1 a 8.2.

Jako optimální konfigurace volím nádoby s označením:

- D400_K30
- D400_J15x15x1,5
- D400_J30x30x1,5

Nádoby průměru 600 mm:

Tab. 32. Vybrané optimální konfigurace nádob průměru 600 mm

Označení nádoby	Tl. stěny t[mm]	Počet výztuh n [ks]	Koef. Bezpečnosti K [-]
D600_K10	2	4	1,5157
D600_K30	2	3	1,5791
D600_J15x15x1,5	2	3	1,5665
D600_K10	2,5	3	1,6042
D600_K30	2,5	2	1,9887
D600_J15x15x1,5	2,5	2	1,9724
D600_K10	3	2	1,6944
D600_J15x15x1,5	3	1	2,0724
D600	4	0	1,9029

V tabulce 32 jsou uvedeny všechny vybrané konfigurace nádob z kapitol 8.3 a 8.4.

Jako optimální konfigurace volím nádoby s označením:

- D600_K10
- D600_K30
- D600_J15x15x1,5

ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zaměřena na posouzení stabilní odolnosti ocelové nádoby zatížené vnějším přetlakem. Cílem této práce bylo navrhnout optimální konstrukční řešení nádoby splňující veškeré bezpečnostní parametry dané normou ČSN EN 13445-3.

V teoretické části této práce jsou popsány jednotlivé části a požadovaná výstroj nádoby. Dalším bodem této části je popis svařování jednotlivých částí nádoby. Jsou zde zmíněny požadavky na svarové spoje, druhy hlavních svarů, používané technologie svařování a zkoušky svarových spojů. Dále je zde zmíněna problematika zborcení nádob vlivem vnějšího přetlaku, popis mezních stavů a jsou zde také uvedeny praktické příklady ztráty stability ocelových nádob. Závěrečná kapitola této části se věnuje posouzení stability tenkostěnných konstrukcí s popisem výpočtu kritického zatížení.

V praktické části byly pro analýzu navrženy dva průměry nádoby o objemu 200 litrů. Nádoba průměru 400 s označením D400 a nádoba 600 mm s označením D600. Ke každé nádobě bylo vytvořeno šest typů obvodových výztuh s označením K10, K30, K50, J15x15x1,5, J30x30x1,5 a J20x40x2. Celkově bylo pro studii navrženo dvanáct typů nádob, jejichž označení je uvedeno v kapitole 7.2. Před provedením analýz byly nejprve jednotlivé typy nádob rozděleny do čtyř skupin. První skupina, nádoba průměru 400mm s typem výztuh K10, K30, K50. Druhá skupina, nádoba průměru 400mm s typem výztuh J15x15x1,5, J30x30x1,5 a J20x40x2. Rozdělní třetí a čtvrté skupiny pro průměr 600 mm je obdobný jako u nádoby průměru 400 mm.

Provedení a vyhodnocení analýz pro všechny typy nádob bylo následující. Při analýzách byla postupně zvětšována tloušťka stěny nádoby a počet obvodových výztuh. Výsledky analýz byly shrnuty do tabulek, ze kterých lze vyčíst koeficient bezpečnosti v závislosti na tloušťce stěny nádoby a počtu výztuh. Z vytvořených grafů lze zjistit jaký počet výztuh při dané tloušťce stěny nádoby zvolit, aby byl splněn koeficient bezpečnosti pro ocelové nádoby. Pro každý typ nádoby byly na základě výsledků analýzy vybrány konfigurace nádob splňující podmínku normy pro určení koeficientu bezpečnosti. Tyto vybrané konfigurace byly zapsány do tabulek podle jednotlivých skupin. Pro první skupinu tabulka 9, pro druhou skupinu tabulka 16, pro třetí skupinu tabulka 23 a pro čtvrtou skupinu tabulka 30. Následně z těchto čtyř tabulek byly do závěrečného srovnání vybrány optimální konfigurace nádob zapsané do tabulky 31 pro nádobu průměru 400 mm a do tabulky 32 pro nádobu průměru 600 mm.

Závěrem předkládám tyto návrhy

Pro průměr nádoby 400 mm bylo vybráno šest typů konfigurací nádob. Jako nejvhodnější varianty byly zvoleny nádoby typu D400_K30 s tloušťkou stěny $t=2,5$ mm a se třemi výztuhami typu K30, D400_J15x15x1,5 s tloušťkou stěny $t=2,5$ mm a se třemi výztuhami typu J15x15x1,5 a D400_J30x30x1,5 s tloušťkou stěny $t=2,5$ mm a se dvěma výztuhami typu J30x30x1,5.

Pro nádobu průměru 600 mm bylo vybráno devět typů konfigurací nádob. Jako nejvhodnější varianty byly zvoleny nádoby typu D600_K10 s tloušťkou stěny $t=2$ mm a se čtyřmi výztuhami typu K10, D600_K30 s tloušťkou stěny $t=2$ mm a se třemi výztuhami typu K30 a D600_J15x15x1,5 s tloušťkou stěny $t=2$ mm a se třemi výztuhami typu J15x15x1,5.

Tyto konfigurace nádob se vyznačují nejmenší tloušťkou stěny nádoby. Další zvětšování tloušťky stěny by se jevílo jako neekonomické řešení. Je běžnou praxí, že místo zvětšování tloušťky stěny nádoby jsou přidány obvodové výztuhy, což je jednoduchá a ekonomicky vhodnější varianta. Pomocí obvodových výztuh zkracujeme délky jednotlivých polí a tím dosáhneme výrazného zvýšení kritického přetlaku. Tudiž zvyšování stabilní únosnosti válcové skořepiny neprovádíme zvyšováním tloušťky stěny jako u pevnosti, ale zkracováním délky nádoby. Výběr nejvhodnější varianty závisí na více aspektech, jako jsou ekonomická náročnost výroby, přání zákazníka a vrcholového vedení firmy a na vzájemné diskuzi předložených návrhů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SCHNEIDER, P., *Základy konstruování procesních zařízení*, PC – DIR Real, s.r.o., Brno 1999. ISBN 80–214–1483–9
- [2] *B3 tříválcová zakružovačka plechu* [online]. In: . [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <https://www.maqfort.cz/tvareni/biko-b3-zakruzovacky-plechu>
- [3] KUBÍČEK, Jaroslav, Ladislav DANĚK a Bohumi KANDUS. *Technologie svařování a zařízení*. Plzeň: ŠKODA WELDING s.r.o, 2011.
- [4] *Laserové svařování – ekonomika a kvalita* [online]. 2008 [cit. 2017-12-29]. Dostupné z: Laserové svařování – ekonomika a kvalita. <http://www.konstrukce.cz/clanek/laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita/> [online]. 2008 [cit. 2017-12-29].
- [5] MÍŠEK, Bohumil. *Metody nedestruktivního zkoušení kovových materiálů a výrobků*. Brno: TESIYO, 2014. ISBN 978-80-87102-09-1.
- [6] BRUNDRETT, Laurence. *External Pressure* [online]. 2012 [cit. 2018-01-26]. Dostupné z: <https://pveng.com/external-pressure-methods/>
- [7] BABINSKÝ, Milan. Nebezpečí zborcení nádob vnějším přetlakem. *Tlakinfo.cz* [online]. 2006 [cit. 2018-01-26]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1260>
- [8] ŠUBA, Oldřich. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. ISBN 978-80-7454-015-8.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Integrální konstanta	[-]
B	Integrální konstanta	[-]
b	Šířka elementu	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
J_p	Kvadratický moment průřezu	[mm ⁴]
K	Koeficient bezpečnosti	[-]
L	Rozteč výztuh	[mm]
L^*	Délka skořepiny bez potřeby vyztužení	[mm]
n	Počet výztuh	[ks]
n_{KR}	Kritické normálová síla	[N]
p	Tlak	[Pa]
P, Q	Bod	[-]
q_{KR}	Kritické spojité zatížení	[N.mm ⁻¹]
R	Poloměr válcové skořepiny	[mm]
r_i	Křivost	[mm]
s	Tloušťka stěny elementu	[mm]
sin, cos	Goniometrické funkce	[-]
t	Tloušťka stěny nádoby	[mm]
V	Objem charakteristického elementu struktury	[m ³]
α, β, φ	Úhel	[°]
δ	Posunutí	[mm]
π	Konstanta	[-]
σ_e	Dovolená elastická mezní hodnota	[MPa]
R_m	Mez pevnosti v tlaku	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Klenutá dna.....	11
Obr. 2. Zkružování pláště[2].....	12
Obr. 3. Hrdla	12
Obr. 4. Příruba	13
Obr. 5. Kontrolní otvor	13
Obr. 6. Kulový kohout	14
Obr. 7. Tlakoměr.....	15
Obr. 8. Pojistný ventil	16
Obr. 9. Teploměr.....	16
Obr. 10. Podélný svar [1].....	17
Obr. 11. Uzavírací svar [1]	18
Obr. 12. Základní schéma svařování metodou MIG/MAG [3].....	19
Obr. 13. Princip svařování netavící se elektrodou v inertním plynu – WIG [3].....	19
Obr. 14. Princip plazmového hořáku [3]	20
Obr. 15. Laserové svařování [4]	21
Obr. 16. Selhání nádoby vnitřním přetlakem [6]	23
Obr. 17. Selhání nádoby vnějším přetlakem [6]	23
Obr. 18. Zborcení železniční cisterny [6]	24
Obr. 19. Vzpěr přímých prutů [7]	26
Obr. 20. Schéma chování jednotlivých konstrukcí [7]	26
Obr. 21. Zatížení válcové skořepiny [7]	27
Obr. 22. Chování jednoose tlačené desky [8]	28
Obr. 23. Chování válcové skořepiny zatížené osovým tlakem [8]	29
Obr. 24. Široký nosník namáhaný na vzpěr [8]	30
Obr. 25. Ztráta stability válcové skořepiny [8]	32
Obr. 26. Vyztužení typu vinuté roury [8]	34
Obr. 27. Prstencová výztuha [8]	35
Obr. 28. Sestava nádoby	38
Obr. 29. Počáteční parametry nádoby průměru 400 mm	40
Obr. 30. Rozměry obvodových výztuh nádoby průměru 400 mm	40
Obr. 31. Počáteční parametry nádoby průměru 600 mm	42
Obr. 32. Rozměry obvodových výztuh nádoby průměru 600 mm	42

Obr. 33. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D400_K10	44
Obr. 34. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D400_K30	46
Obr. 35. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D400_K50	47
Obr. 36. Ukázka deformace nádoby D400 bez obvodových výztuh	49
Obr. 37. Ukázka deformace nádoby D400_K10 se šesti výztuhami	49
Obr. 38. Ukázka deformace nádoby D400_K30 s jednou výztuhou	49
Obr. 39. Ukázka deformace nádoby D400_K30 se dvěma výztuhami.....	50
Obr. 40. Ukázka deformace nádoby D400_K30 se třemi výztuhami.....	50
Obr. 41. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D400_J15x15x1,5.....	51
Obr. 42. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D400_J30x30x1,5.....	53
Obr. 43. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D400_J40x20x2.....	55
Obr. 44. Ukázka deformace nádoby D400_J15x15x1,5 s jednou výztuhou.....	56
Obr. 45. Ukázka deformace nádoby D400_J15x15x1,5 se dvěma výztuhami	57
Obr. 46. Ukázka deformace nádoby D400_J15x15x1,5 se třemi výztuhami	57
Obr. 47. Graf závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D600_K10	58
Obr. 48. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D600_K30	59
Obr. 49. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D600_K50	61
Obr. 50. Ukázka deformace nádoby D600 bez obvodových výztuh	62
Obr. 51. Ukázka deformace nádoby D600_K30 s jednou výztuhou	63
Obr. 52. Ukázka deformace nádoby D600_K30 se dvěma výztuhami.....	63
Obr. 53. Ukázka deformace nádoby D600_K30 se třemi výztuhami.....	63
Obr. 54. Ukázka deformace nádoby D600_K10 se čtyřmi výztuhami.....	64
Obr. 55. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádobu D600_J15x15x1,5.....	65

- Obr. 56. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádoby D600_J30x30x1,5 67
- Obr. 57. Graf závislosti koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny a počtu výztuh pro nádoby D600_J40x20x2 69
- Obr. 58. Ukázka deformace nádoby D600_J15x15x1,5 s jednou výztuhou 71
- Obr. 59. Ukázka deformace nádoby D600_J15x15x1,5 se dvěma výztuhami 71

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Rozteče obvodových výztuh nádoby průměru 400 mm	40
Tab. 2. Rozteče obvodových výztuh nádoby průměru 600 mm	42
Tab. 3. Výsledky analýzy nádoby D400_K10	44
Tab. 4. Konfigurace nádoby D400_K10 splňující podmínku normy	45
Tab. 5. Výsledky analýzy nádoby D400_K30	45
Tab. 6. Konfigurace nádoby D400_K30 splňující podmínku normy	46
Tab. 7. Výsledky analýzy nádoby D400_K50	47
Tab. 8. Konfigurace nádoby D400_K50 splňující podmínku normy	48
Tab. 9. Konfigurace nádob splňující podmínky normy	48
Tab. 10. Výsledky analýzy nádoby D400_J15x15x1,5	50
Tab. 11. Konfigurace nádoby D400_J15x15x1,5 splňující podmínku normy.....	52
Tab. 12. Výsledky analýzy nádoby D400_J30x30x1,5	52
Tab. 13. Konfigurace nádoby D400_J30x30x1,5 splňující podmínku normy.....	54
Tab. 14. Výsledky analýzy nádoby D400_J40x20x2	54
Tab. 15. Konfigurace nádoby D400_J40x20x2 splňující podmínku normy.....	56
Tab. 16. Výsledky konfigurací nádob splňující podmínky normy	56
Tab. 17. Výsledky analýzy nádoby D600_K10	57
Tab. 18. Konfigurace nádoby D600_K10 splňující podmínku normy	58
Tab. 19. Výsledky analýzy nádoby D600_K30	59
Tab. 20. Konfigurace nádoby D600_K30 splňující podmínku normy	60
Tab. 21. Výsledky analýzy nádoby D600_K50	60
Tab. 22. Konfigurace nádoby D600_K50 splňující podmínku normy	61
Tab. 23. Konfigurace nádob splňující podmínky normy	62
Tab. 24. Výsledky analýzy nádoby D600_J15x15x1,5	64
Tab. 25. Konfigurace nádoby D600_J15x15x1,5splňující podmínku normy.....	66
Tab. 26. Výsledky analýzy nádoby D600_J30x30x1,5	66
Tab. 27. Konfigurace nádoby D600_J30x30x1,5 splňující podmínku normy.....	68
Tab. 28. Výsledky analýzy nádoby D600_J40x20x2	68
Tab. 29. Konfigurace nádoby D600_J40x20x2 splňující podmínku normy.....	70
Tab. 30. Konfigurace nádob splňující podmínky normy	70
Tab. 31. Vybrané optimální konfigurace nádob průměru 400 mm	71
Tab. 32. Vybrané optimální konfigurace nádob průměru 600 mm	72

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha PI:** CD obsahující
- Diplomovou práci (.pdf).
 - Tabulky a grafy výsledků analýz (.xlsx).
 - Modely nádob (.stp).