



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

DUPLIKÁTORY NEREZOVÝCH TLAKOVÝCH APARÁTŮ

JACKETED STAINLESS STEEL PRESSURE VESSEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Miroslav Kamarád

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Lošák, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Miroslav Kamarád**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Lošák, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Duplikátory nerezových tlakových aparátů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nerezové zařízení s duplikátory jsou využívány pro náročné procesy do chemického průmyslu, farmacie či potravinářského průmyslu. Tyto aparáty jsou vyráběny dle různých požadavků, například dle norem AD 2000 Merkblatt, ČSN EN 13445, ASME code a dalších. Musí splňovat nejnáročnější kritéria tak, aby splnily požadavky na procesy v nich uskutečňované. Bakalářská práce se zaměří na pevnostní návrh a optimalizaci duplikátorů nerezových nádob.

Cíle bakalářské práce:

- Rešerše literatury z dané oblasti.
- Ověření konstrukce duplikátorů z pevnostního hlediska pro dané provozní podmínky.
- Návrh úpravy geometrie daného duplikátoru a jeho pevnostní ověření.
- Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam literatury:

ČSN EN 13445-3. Netopené tlakové nádoby - Část 3: Konstrukce a výpočet. Praha: Český normalizační institut, 2015.

AD 2000-Merkblatt. Berlin: Beuth, 2004.

NICHOLS R. W., Pressure Vessel Engineering Technology, roč. 1971. London: Applied Science Publisher.

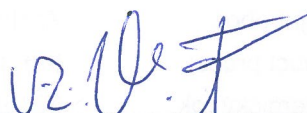
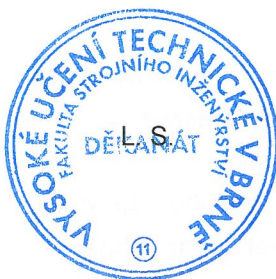
CHATTOPADHYAY S., Pressure vessels: design and practice, 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.

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

V Brně, dne 4. 11. 2016



prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu



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

ABSTRAKT

Tlakové nádoby zaujímají významné místo na poli procesních zařízení díky jejich širokému využití v různých odvětvích průmyslu. Z pohledu návrhu a dimenzování je kladen velký důraz na přesnost, spolehlivost a především bezpečnost.

Bakalářská práce je zaměřena na zhotovení pevnostní analýzy tlakového duplikátoru dle normy ČSN EN 13 445 [1]. Pevnostní analýza byla provedena metodou konečných prvků (MKP) s využitím programu ANSYS Workbench společně s kategorizací napětí dle ČSN EN 13 445 [1].

ABSTRACT

Pressure vessels occupy a prominent place in the field of process equipment due to their wide use in various industries. From design and dimensional point of view, great emphasis is placed on accuracy, reliability and above all safety.

The bachelor thesis is focused on the stress analysis of the jacketed pressure vessel according to ČSN EN 13445 [1]. The stress analysis was performed with use of finite element method (FEM) using ANSYS Workbench software together with stress categorization by EN 13445 [1].

KLÍČOVÁ SLOVA

Tlaková nádoba, duplikátor, pevnostní analýza, kategorizace napětí, MKP, ANSYS Workbench,

KEYWORDS

Pressure vessel, Jacketed pressure vessel, stress analysis, stress categorization, FEM, ANSYS Workbench

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAMARÁD, M. *Duplikátory nerezových tlakových aparátů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Lošák, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma *Duplikátory nerezových tlakových aparátů* vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce pana Ing. Pavla Lošáka, Ph.D. a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 20. 5. 2017

.....

Miroslav Kamarád

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval především svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Pavlovi Lošákovi, PhD za čas a cenné rady při vypracování této práce a Adéle Křivské za rady při formátování práce. Také bych rád poděkoval společnosti TENEZ, a. s. za umožnění práce na reálném problému z praxe. V neposlední řadě musím poděkovat rodině a přátelům, zejména své přítelkyni, která mě během studia podporovala v maximální možné míře.

OBSAH

ÚVOD	10
1 ČÁSTI TLAKOVÝCH NÁDOB	12
1.1 Části zatížené tlakem.....	12
1.1.1 Plášť	12
1.1.2 Dna, víka	12
1.1.3 Hrdla, průlezy a pracovní otvory	13
1.1.4 Přírubové spoje	13
1.2 Výstroj tlakových nádob	15
1.2.1 Tlakoměry	15
1.2.2 Armatury	15
1.2.3 Pojistné ventily	15
1.2.4 Výfukové trubky a odvodnění	16
1.2.5 Uzávěry	16
1.2.6 Teploměry	17
1.2.7 Hladinoměry	17
2 NÁVRH TLAKOVÉ NÁDOBY	18
2.1 Směrnice evropského parlamentu a rady 2014/68/EU	18
2.2 Normy	18
2.2.1 ČSN EN 13445- Netopné tlakové nádoby	18
2.2.2 ASME Code	19
2.3 Návrh na základě ČSN EN 13 445-3	19
2.3.1 Návrh na základě vzorců.....	20
2.3.2 Návrh na základě analýzy	20
2.3.3 Návrh na základě experimentu	20
3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	21

4	NÁVRH NA ZÁKLADĚ ANALÝZY – METODA ZALOŽENÁ NA KATEGORIZACI NAPĚTÍ	22
5	PEVNOSTNÍ ANALÝZA TLAKOVÉHO DUPLIKÁTORU DLE ČSN EN 13445	25
5.1	Pevnostní ověření daného místa.....	27
5.1.1	Vytvoření geometrie pro pevnostní analýzu	28
5.1.2	Pevnostní analýza 2D v Ansys Workbench 18	29
5.1.3	Tlaková zkouška dle ČSN EN 13445-5.....	31
5.1.4	Vyhodnocení pevnostní analýzy pro dané místo	32
5.2	Pevnostní analýza tlakového duplikátoru.....	37
5.2.1	Zatížení tlakové nádoby	38
5.2.2	Vyhodnocení pevnostní analýzy	40
5.2.3	Porovnání výsledků 2D analýzy a 3D analýzy pro kritické místo styku vnitřního pláště a vnějšího pláště	47
	ZÁVĚR	49
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	50
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, ZKRATEK A JEDNOTEK.....	51
	SEZNAM PŘÍLOH.....	53
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	54
	SEZNAM TABULEK	55

ÚVOD

Je současná vyspělá civilizace schopná vést plnohodnotný život bez tlakových nádob? Když si budeme chtít na tuto otázku odpovědět, musíme se podívat na to, kde všude se vlastně s tlakovými nádobami setkáváme v našem každodenním životě.

Celá řada průmyslových odvětví dnes není schopná fungovat bez využití tlakových nádob, např. potravinářství, chemický průmysl, farmaceutický průmysl atd. Ale i v domácnosti běžně využíváme Papinův hrnec, nebo bojler na ohřívání vody, i toto jsou příklady využití tlakových nádob.

Jak bychom vlastně takovou tlakovou nádobu definovali?

Tlaková nádoba je uzavřená nádoba sloužící k uchovávání tekutin (v plynném či kapalném skupenství) za vysokého tlaku (případně i teploty). Existuje mnoho různých typů tlakových nádob lišících se tvarem, velikostí, využitím a dalšími specifickými vlastnostmi [2].

Tlakovou nádobu můžeme definovat také tímto způsobem: *„Tlaková nádoba je nádoba, na jejíž stěny působí tlak pracovní látky, nádoba nemění své stanoviště nebo je přenosná, převozná, popřípadě pojízdná a je trvale nebo přechodně spojena se zdrojem tlaku a neslouží k dopravě kapalin a plynů, vzniká spojením tlakových částí nádoby.“* [3].

Jedním z typů tlakových nádob je tzv. tlaková nádoba s duplikátorem. Čím je tento typ nádoby odlišný od klasických tlakových nádob? Tlakový duplikátor má dvojitý plášť, díky kterému vzniká prostor mezi vnitřním a vnějším pláštěm. Tento prostor je vyplněn médiem, které ochlazuje, nebo ohřívá médium v hlavním prostoru nádoby, dle požadované funkce duplikátoru. Tímto médiem je většinou voda nebo pára. Duplikátory jsou využívány například ve farmaceutickém průmyslu při výrobě léků.

A právě duplikátorové tlakové nádoby jsou hlavním tématem této bakalářské práce.

Bakalářská práce plní dva základní cíle. V prvním předává čtenáři základní informace o tlakových nádobách. Motivací pro druhou část práce bylo ověření pevnostní přípustnosti dané geometrické modifikace části duplikátoru pro usnadnění a zlevnění výrobního procesu. Práce je rozdělena na dvě základní části. První částí je rešerše týkající se dané

problematicy. Zde jsou blíže popsány části tlakové nádoby, návrh tlakové nádoby dle různých kritérií anebo také základní informace o metodě konečných prvků, která je využita k pevnostní analýze daného duplikátoru. Druhá část práce se týká pevnostní analýzy tlakového duplikátoru. Zde je provedena pevnostní analýza duplikátoru dle ČSN EN 13445 [1] za využití programu ANSYS Workbench pro dvě různá konstrukční řešení. Na závěr je provedena diskuze, porovnání dosažených výsledků a posouzení jejich vhodnosti v závislosti na pevnostní analýze.

1 ČÁSTI TLAKOVÝCH NÁDOB

Jednotlivé komponenty, ze kterých se tlakové nádoby skládají můžeme rozdělit na tlakové části neboli části zatížené tlakem. Mezi tyto komponenty se řadí např. plášť, dna, víka, průhledítka atd. Druhou skupinou komponentů jsou části tvořící vnitřní vybavení tlakové nádoby např. míchadla, tlakoměry, rozrážeče, pojistné ventily atd.

1.1 Části zatížené tlakem

Za tlakem zatížené části považujeme části nádoby, na jejichž stěny působí tlak pracovní látky [3].

1.1.1 Plášť

Plášť se skládá z tzv. lubů, což jsou základní stavební prvky válcovitého tvaru. Počet lubů pro danou tlakovou nádobu je dán její výškou. Jednotlivé luby se zhotovují tak, aby bylo zabezpečeno co nejmenší množství svarových spojů [3].

1.1.2 Dna, víka

Tlakové nádoby bývají nejčastěji uzavřeny klenutým dnem, ale může být využito i jiné, dle nutnosti. Rozměry den jsou normalizovány, aby byla zajištěna rozměrová podobnost den, pro jednodušší pevnostní výpočet. Používají se tyto druhy den:

- a) Dna klenutá
- b) Dna hlubokoklenutá
- c) Dna vysokotlaká
- d) Dna půlkulová [3]

Dna rozdělujeme na dna rovná a klenutá. Klenutá dna jsou používanější, dále je dělíme na dna kulová, torosferická a eliptická. Torosferická dna se skládají ze tří rotačních geometrických útvarů: kulového vrchlíku, anuloidového přechodu a válcového lemu. „V místech přechodu geometrických útvarů vznikají výrazné koncentrace ohybových napětí – ohybové poruchy membránové napjatosti. Proto se dna volí v závislosti na vnitřním přetlaku podle zásady: čím větší přetlak, tím klenutější dno.“ [3].

1.1.3 Hrdla, průlezy a pracovní otvory

V oblasti procesních zařízení musí být nádoby opatřeny hrdly, průlezy nebo pracovními otvory v místech dostupných obsluze, zabezpečující prohlídku, čištění, montáž a demontáž rozebíratelných vnitřních ústrojí, opravy a kontrolu nádob [3]. Přesný počet a typ průlezů či pracovních otvorů musí tlaková nádoba obsahovat je psáno v normě ČSN EN 13445, část 5 – Kontrola zkoušení [1].

Nádoby, které mají snímatelné dno, víko, přírubový spoj nebo další příslušenství nemusí být vybaveny průlezem, pokud je čištění a prohlídka umožněna sejmutím výše uvedených částí nádoby [1].

Minimální průměr kruhového průlezu je 420 mm, minimální rozměr oválného průlezu je stanoven na hodnotu 320 mm x 420 mm. Výška hrdla průlezu je maximálně 150mm, pokud nejmenší průměr je menší než 460 mm nebo je oválný 460 mm x 410 mm [1].

Hrdla slouží převážně pro přívod a odvod média. Hrdlo má 3 základní části: trubka, příruba, případně výztužný límec [3].

Hrdla a průlezy se primárně umísťují mimo podélné svary pláště nádob. V podélných svarech je možné umísťovat otvory, za předpokladu, že ve výpočtu budeme uvažovat součinitel hodnoty svarového spoje [3]. Součinitel hodnoty svarového spoje je hodnota využívaná pro pevnostní výpočet. Tato hodnota je určena na základě mechanických a plastických vlastností svaru, závisí na druhu svarového spoje, způsobu svařování a rozsahu kontroly. Součinitel hodnoty svarového spoje musí být ve výpočtu tloušťky stěny, která obsahuje alespoň jeden tupý svar, který ale není obvodový. U zařízení podrobených destruktivnímu nebo nedestruktivnímu zkoušení, které kontroluje kvalitu spojů se použije součinitel roven 1. Pro případ, kdy je zařízení podrobeno namátkové kontrole nedestruktivním zkoušením nesmí součinitel spoje překročit hodnotu 0,85. Pro zařízení, který se nepodrobují nedestruktivnímu zkoušení nesmí hodnota součinitele překročit 0,7. Pro bezešvé části se použije součinitel 1 [4].

1.1.4 Přírubové spoje

Příruby tvoří primární prvek pro vytváření rozebíratelných spojů na tlakových nádobách a potrubích. Připojení příruby k plášti nebo trubce je realizováno několika způsoby. Připojení je závislé na typu příruby, obvykle se volí svarový spoj [3].

Existuje několik základních typů nejčastěji používaných přírub, mezi ně patří např. ploché příruby, krkové příruby, závitové příruby, točivé příruby nebo vnitřní příruby.

Příruby jsou nejčastěji vyráběny kováním, pálením z plechu, litím nebo zkružením z ploché oceli [3].

Ploché příruby

Ploché příruby jsou vhodné pro PN 2,5 – 16 MPa a DN 10 – 3600 mm. Jsou vyráběny v několika konfiguracích, jako příruby s vnitřním řídícím průměrem a jako příruby s plášťovým kroužkem [5].

Krkové příruby

Krkové příruby se využívají pro vyšší zatížení. List příruby rovnoměrně přechází krčkem do pláště nebo trubky. Tyto příruby jsou normalizovány pro tlakové stupně 6 MPa až 400 MPa a DN 10 – 3600 mm [5].

Závitové příruby

Závitové příruby jsou určeny pro spojení vysokotlakých zařízení, hlavně vysokotlakého potrubí. Příruba má na svém vnitřním průměru závit, trubka má stejný závit na svém vnějším průměru. Příruba je následně našroubována na trubku, díky tomuto řešení získáváme vysokou tuhost spoje. Tuhost spoje se dá ovlivnit šířkou listu nebo vlastnostmi použitého materiálu [3].

Tyto příruby nejsou vhodné pro dynamicky namáhané potrubí, což je způsobeno vrubovými účinky v závitech [3].

Závitové příruby jsou normalizovány pro potrubí do 400 MPa a jmenovitý průměr v rozsahu DN 10 až DN 3600. Často jsou zhotovovány z materiálů jako např. 1.0352; 1.4404, atd. [5].

Točivé příruby

Točivé příruby se používají u potrubí, které je snadno rozebíratelné nebo u speciálních typů aparátů. Na konci trubky jsou přivařeny kroužky nebo speciální obruba, díky které je možné spojení pomocí volně točených přírubových listů [3].

Vnitřní příruby

Tyto příruby se využívají k zaslepování potrubí. Zhotovují se kované nebo svařované [3].

1.2 Výstroj tlakových nádob

Základní požadavky na výstroj jsou posuzovány dle ČSN EN 764-7 [6]

Tlaková nádoba musí být opatřena:

- a) Uzavírací a vypouštěcí armaturou
- b) Tlakoměrem
- c) Pojistným zařízením
- d) Odvětrávacím uzávěrem (odvzdušněním)[3]

Výstroj nádrže musí být umístěna tak, aby byla přístupná za provozu [3].

1.2.1 Tlakoměry

Pro tlakoměry se musíme řídit dle normy ČSN 25 7203 [7]. Tlakoměry musí být umístěny tak, aby byly čitelné, dobře přístupné a chráněné proti poškození. Maximální pracovní přetlak musí být vyznačen červenou značkou na stupnici [8].

Tlakoměr primárně umístíme na samotnou nádobu, výjimečně je dovoleno umístit tlakoměr na přívodní potrubí do nádoby nebo do skupiny nádob se stejným pracovním přetlakem [3].

1.2.2 Armatury

Pro tlakové nádoby jsou platné normy ČSN 13 3060-1[9].

1.2.3 Pojistné ventily

Pojistná zařízení musí zabezpečit nepřekročení maximálního pracovního tlaku či teploty v tlakové nádobě [1].

Přímo zatěžované ventily musí být v souladu s prEN ISO 4126-1, řízeně ovládané prEN 4126-4 [10].

Překročení maximální pracovní teploty je zabráněno pomocí tavné pojistky nebo jiného signalizačního zařízení [3].

Pojistné ventily se umísťují přímo na samotnou nádobu, nejčastěji do nejvyššího místa. Není-li toto dovoleno umísťují se v bezprostřední blízkosti na potrubí [3].

1.2.4 Výfukové trubky a odvodnění

Obsahuje-li nádoba vznětlivé nebo jedovaté plyny, je nutné zajistit jejich bezpečné odvádění, to se děje pomocí odváděcích trubek. Tyto trubky vedou od pojistných zařízení až na místo mimo pracoviště, kde dochází k bezpečné likvidaci nebezpečných látek. Konstrukční řešení je voleno tak, aby vzniklé odpory neovlivňovaly funkce pojistných ventilů, dále volíme co nejkratší délku, je-li nutný ohyb, umísťujeme jej co nejbližší k pojistnému ventilu. Pojistná trubka by neměla namáhat pojistný ventil, proto je zachycena podporami nebo závěsu [3].

Odvodňovací potrubí je konstruováno tak, aby bylo vyspádované, pro bezpečný odvod pracovní látky. Konec odvodnění musí být viditelný [3].

1.2.5 Uzávěry

Rychlouzávěr musí být zajištěn pojistným zařízením, které nesmí dovolit natlakování nádoby, pokud nejsou vstupní dveře dokonale uzavřeny [1].

Automatické uzávěry jsou řízeny impulsem automaticky. I tyto uzávěry musí splňovat jisté podmínky. Uzavírání a otevírání musí být kdykoliv přerušitelné. Otevření je možné pouze pokud je přívodní zařízení uzavřeno, vypouštěcí zařízení je otevřeno a zároveň přetlak v nádobě je roven atmosférickému [1].

Nádoby vybavené uzávěry musí mít výstražné zařízení, které zvukově či opticky varuje obsluhu, pokud je do nádoby napouštěna tlaková látka před dokonalým uzavřením a zajištěním. Dále varuje obsluhu, pokud dochází k manipulaci s uzávěrem ve chvíli, kdy je v nádobě přetlak [1].

1.2.6 Teploměry

Pokud je nutná kontrola teploty media, aby nedošlo k nedovolenému zvýšení či snížení teploty stěny nebo pracovní látky během provozu musí být nádoba vybavena teploměrem [3].

Teploměr umísťujeme tam, kde budou jeho údaje dobře viditelné. Není-li toto možné, nádoba je vybavena dálkovým nebo signalizačním teploměrem [3].

Maximální nebo minimální teplota musí být vyznačena červenou ryskou či jiným dobře identifikovatelným způsobem [3].

1.2.7 Hladinoměry

Hladinoměry používáme přímé nebo nepřímé.

Hladinoměr musí být dostatečně osvětlený a viditelný, výška hladiny musí být dobře čitelná po celé výšce hladinoměru. Stupnice hladinoměru musí být dostatečně dlouhá [3].

2 NÁVRH TLAKOVÉ NÁDOBY

Návrh tlakové nádoby podléhá jistým normám. Každá země má své normy, např. ASME Code je normou pro USA, nicméně tato norma je používána i ve velké části světa, JIS je japonská norma, ČSN EN 13445 je evropská norma pro tlaková zařízení. Evropské normy podléhají směrnici PED 2014/68/EU (PED – Pressure Equipment Directive).

Rozlišujeme několik základních způsobů návrhu tlakové nádoby, je to návrh pomocí vzorců, návrh pomocí pevnostní analýzy a návrh na základě experimentu.

2.1 Směrnice evropského parlamentu a rady 2014/68/EU

PED je evropská směrnice pro tlaková zařízení, která zaštiťuje předpisy členských států Evropské unie, které se týkají tlakových zařízení.

Tlaková zařízení patří k rychle se rozvíjející oblasti průmyslu. Z tohoto důvodu bylo nutné zaštitit evropské normy jednotnou normou, díky které bude jednodušší obchodování na mezinárodní úrovni. Právě z tohoto důvodu byla vytvořena evropská směrnice PED [11].

2.2 Normy

Každá země měla své normy, nicméně tyto normy byly nahrazeny Evropskými normami. Mezi ty nejčastěji používané bych zařadil evropskou normu ČSN EN 13 445. Celosvětově jednou z nejpoužívanějších norem je ASME Code (USA), další světovou normou je např. JIS (JA) anebo například AD 2000 Merkblatt (DEU).

2.2.1 ČSN EN 13445- Netopené tlakové nádoby

Tato norma poskytuje základní pravidla pro návrh, výrobu a následné zkoušení tlakových nádob. ČSN EN 13445 vysvětluje základní termíny, definice a značky použitelné pro netopené tlakové nádoby. Je platná od roku 2002, odpovídá evropské směrnici pro tlakové nádoby PED 2014/68/EU.

Norma ČSN EN 13445 – Netopené tlakové nádoby se skládá z 9 částí, mezi které patří např. obecná ustanovení, výroba anebo část týkající se používaných materiálů [12]. V částech 1 až 5 jsou popsány pouze nádoby vyráběné z oceli a ocelových odlitků. Část

2 se zaměřuje pouze na materiály. Část 6 se zaměřuje na požadavky pro navrhování a výrobu tlakových nádob a tlakových částí z litiny s kuličkovým grafitem [13].

2.2.2 ASME Code

ASME Code (American Society of Mechanical Engineers) je americkou normou, která předepisuje pravidla pro návrh, výrobu a testování tlakových nádob. ASME Code je jednou z nejpoužívanějších norem ve světě.

Je rozdělena na 12 základních částí. Na tlakové nádoby se zaměřuje především část 8 s názvem Tlakové nádoby. Tato část je rozdělena do 3 sekcí, kdy sekce 1 obsahuje např. požadavky na konstrukci, výrobu anebo také zkoušení. Sekce 2 obsahuje další alternativní pravidla pro konstruování a výrobu tlakových nádob. Sekce 3 se zabývá navrhováním vysokotlakých tlakových nádob.

2.3 Návrh na základě ČSN EN 13 445-3

Základem všech aktuálních metod pro navrhování tlakových zařízení jsou mezní stavy zatížení a k nim příslušející bezpečnostní rezervy. Na tomto principu je postavena i norma EN 13 445-3 [14].

Marginální vliv zde zaujímá stav pevnosti uzlu či části neboli mezní stav plastické únosnosti-stav při kterém se mění elastická deformace na deformaci plastickou a následně plastické destrukci [14].

Dalšími mezními stavy jsou například mezní stav únavy, ztráta stability anebo tzv. creep, což je tečení materiálu za vyšších teplot [14].

Existují tři základní způsoby navrhování tlakových zařízení:[14]

- a) Návrh na základě vzorců
- b) Návrh na základě analýzy
- c) Návrh na základě experimentu

2.3.1 Návrh na základě vzorců

„Návrh na základě vzorců je základní metodou dimenzování a kontroly části tlakové nádoby. Návrh pláště a jednotlivých uzlů vychází z mezního stavu plastické únosnosti.“ [14].

2.3.2 Návrh na základě analýzy

Návrh na základě analýzy popisuje pravidla pro návrh libovolné součásti a může být použit jako pomocná metoda k návrhu na základě vzorců nebo jako doplněk k návrhu na základě vzorců pro případy, které nejsou obsaženy v návrhu na základě vzorců [1].

Existují dvě základní metody návrhu na základě analýzy: [14]

- a) Přímý způsob – metoda založená na přímém fyzikálním řešení mezních stavů
- b) Metoda založená na kategorizaci napětí – metoda založená na pseudo-elastické analýze napětí, která se vyhodnocují na základě rozdělení podle původu a druhu do jednotlivých kategorií, a posuzují se podle příslušných kritérií

2.3.3 Návrh na základě experimentu

Úkolem této metody je experimentálně ověřit návrh nádob nebo jejich částí zatížených tlakem. Tato metoda je založena na zkoušce roztržení, případně doplněná dalšími zkouškami, kontrolou deformace nebo zkouškou na únavu. Tato metoda je v současnosti omezena na navrhování nádob, kde není nutno v úvahu brát tečení [1].

Obecně jsou však upřednostňovány metody návrhu na základě vzorců nebo analýzy před metodou na základě experimentu [14].

„Je třeba připomenout, že ověření části nádoby neověřuje návrh celé nádoby“ [1].

3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda, která slouží k simulaci průběhu napětí, deformace, vlastní frekvence, proudění tepla, proudění tekutin atd. na vytvořeném fyzikálním modelu. Její princip spočívá ve vytvoření tzv. uzlových bodů. MKP je užívána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro vyhledání kritického místa dané konstrukce. K rozvoji této metody dochází díky vývoji moderní výpočetní techniky a CAE programů (Computer Aided Engineering) [15].

Principem MKP je rozdělení vyšetřované oblasti na geometricky jednoduché podoblasti s jednoduchými hranicemi. Vyšetřovaná oblast je rozdělena na konečný počet prvků, tyto prvky tvoří tzv. síť konečných prvků. Prvky se mohou stýkat v uzlech, hranách a stěnách [16].

Síť konečných prvků se skládá ze dvou základních typů částic – z elementů a uzlů [16].

4 NÁVRH NA ZÁKLADĚ ANALÝZY – METODA ZALOŽENÁ NA KATEGORIZACI NAPĚTÍ

Tato metoda je dána normou ČSN EN 13445 [1] a může být použita jako alternativa k návrhu na základě vzorců nebo jako doplněk metody na základě vzorců pro nezahrnuté případy, případy vyžadující využití superpozice akcí prostředí anebo také jako alternativa k návrhu na základě analýzy přímým způsobem [1].

Elastické napětí, které vzniká v tlakové nádobě je rozloženo do tří kategorií, do primárního napětí, sekundárního napětí a špičkového napětí [1].

Primární napětí vzniká působením tlaku, síly nebo momentu a je dále děleno na globální primární membránové napětí P_m , lokální primární membránové napětí P_L a primární ohybové napětí P_b . Sekundární napětí vzniká v důsledku geometrických diskontinuit, použitím materiálu s různými moduly pružnosti při vnějším zatížení nebo různými teplotními roztažnostmi. Špičkové napětí je část napětí, která společně s primárním a sekundárním napětím tvoří celkové napětí [1].

Pro určování napětí jsou nutné 3 základní předpoklady:[1]

- a) Materiálové vlastnosti jsou lineární dle Hookova zákona
- b) Materiál je izotropní
- c) Posunutí a poměrné deformace jsou malé

4.1 Klasifikace napětí:

K jednotlivým napětím se zavádí příslušná ekvivalentní napětí σ_{eq} a ekvivalentní rozkmit napětí $\Delta\sigma_{eq}$, které jsou posuzovány vůči jejich maximálním hodnotám dle následujících rovnic z ČSN EN 13 445-3.(3)

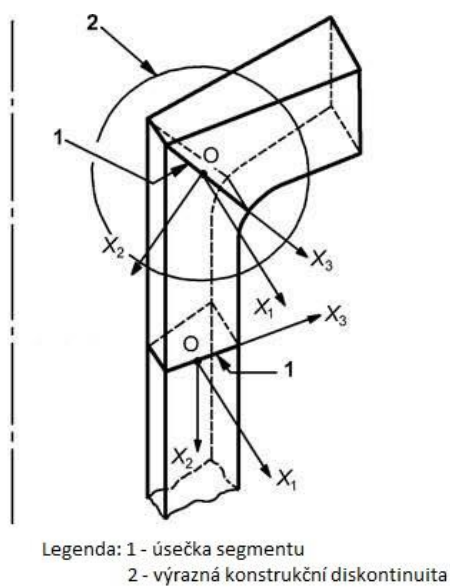
$$(\sigma_{eq})_{pm} \leq f_d$$

$$(\sigma_{eq})_P \leq 1,5 * f_d$$

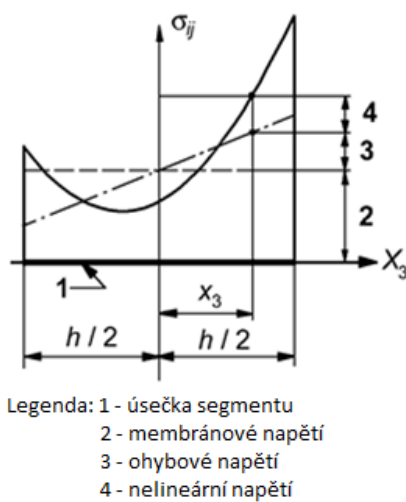
$$(\Delta\sigma_{eq})_{P+Q} \leq 3 * f_d$$

4.2 Linearizace napětí:

Linearizace napětí je interpolace po úsečce segmentu. Hodnoty se interpolují z hodnot napětí v uzlových bodech elementů, kterými prochází úsečka segmentu. Pro získání výsledku je nutné, aby úsečka procházela minimálně třemi elementy. Úsečka segmentu je nejkratší úsečka, která spojuje obě strany stěny. Vně oblastí výrazných diskontinuit je tato úsečka kolmá ke střednicové ploše v daném místě [1].



Obr. 1: Volba úsečky segmentu [1]



Obr. 2: Rozklad základního napětí [1]

Napětí na této přímce je tvořeno součtem lineárních membránových napětí P_m , ohybových napětí P_b a špičkových napětí P_{np} .

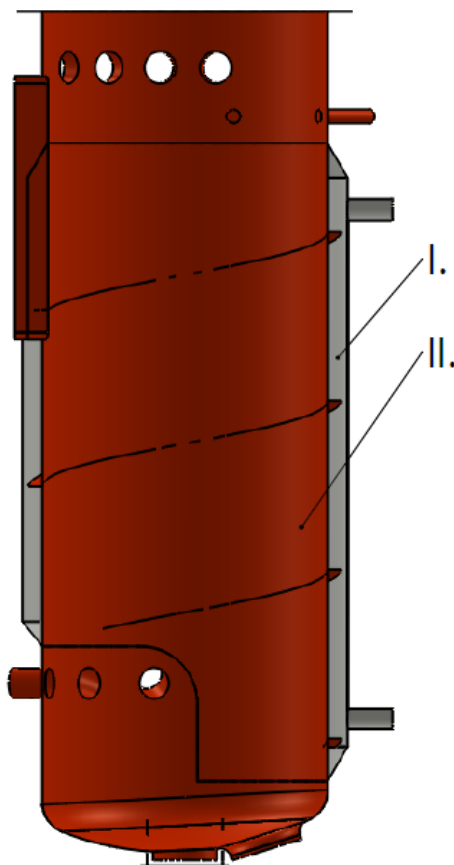
$$\text{Platí: } \sigma_{celk.} = P_m + P_b + P_{np}$$

Většinou je vedeno několik úseček segmentu, které jsou vedeny v okolí kritického (posuzovaného) místa na tlakové nádobě, v pozicích, tak jak je požaduje norma [1].

5 PEVNOSTNÍ ANALÝZA TLAKOVÉHO DUPLIKÁTORU DLE ČSN EN 13445

V této práci byl proveden výpočet tlakové nádoby metodou konečných prvků. Pro tuto analýzu byl využit software Ansys Workbench 18. Analyzované modely byly vytvořeny v programu SolidWorks 2016. Vyhodnocení analýz bylo provedeno kategorizací napětí dle normy ČSN EN 13445-3, PŘÍLOHY C – Metoda založená na kategorizaci napětí [1].

Pro potřeby analýzy byly tlakové prostory rozděleny na dvě části. Část první je samotný vnitřní tlakový prostor, kde dochází k míchání media. Druhou částí je tlakový duplikátor, který slouží k vyhřívání vnitřního tlakového prostoru.



Obr. 3: Rozdělení tlakových prostorů na hlavní tlakový prostor I a tlakový duplikátor II

Tlaková nádoba s duplikátorem byla vybrána ve spolupráci s průmyslem. Hlavní tlakový prostor (pozice I na obr.2) a tlakový duplikátor (pozice II na obr.2) je definována Tab. 1 s technickými údaji.

Všechny provedené pevnostní analýzy neuvažují dynamické účinky způsobené vnitřním vybavením nebo uchycením daného tlakového duplikátoru.

Tab. 1: Technické údaje tlakové nádoby

TECHNICKÉ ÚDAJE				
TLAKOVÝ PROSTOR			I.	II.
KONSTRUKČNÍ ÚDAJE	PROVOZNÍ TLAK (barg)	MAX	3,1	6,2
		MIN	-	-
	MAX. DOVOL. PRACOVNÍ TLAK (barg)	MAX	3,1	6,2
		MIN	-	-
	KONSTRUKČNÍ TLAK (barg)	MAX	3,1	6,2
		MIN	-	-
	PROVOZNÍ TEPLOTA (°C)	MAX	150	150
		MIN	10	10
	MAX. DOVOL. PRACOVNÍ TEPLOTA (°C)	MAX	150	150
		MIN	10	10
	KONSTRUKČNÍ TEPLOTA (°C)	MAX	150	150
		MIN	10	10
	HYDRAUL. ZKUŠEBNÍ TLAK (barg)	MAX	5	10,3
		MIN	-	-
	POLOHA PŘI TLAKOVÉ ZKOUŠCE		VERTIKÁL.	VERTIKÁL.
	OBJEM TLAKOVÉHO PROSTORU (L)		72	11
	MEDIUM		PRODUCT	VODA
	HMOTNOST APARÁTU (kg)		73,77	
	HMOTNOST PŘI TLAK. ZKOUŠCE (kg)		157	
	VÝROBNÍ PŘEDPIS		ČSN EN 13445	
ÚDAJE O MATERIÁLU	PLÁŠŤ		1.4404	1.4404
	DNA-VÍKA		1.4404	1.4404
	PŘÍRUBY		1.4404	1.4404
	SVĚRKY		-	-
	LÍMEC		-	-
	TĚSNĚNÍ		EPDM	EPDM

Pevnostní analýza pro daný tlakový duplikátor byla prováděna pro různé provozní stavy dle normy ČSN EN 13445[1] a následně byla také vyhodnocena dle požadavků této normy. Všechny provozní stavy jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2: Provozní stavy tlakové nádoby

PROVOZ. STAV	ZATÍŽENÍ NÁDOBY				
		TLAK (MPa)		TEPLOTA (°C)	
		I	II	I	II
	1.	0,31	-	150	150
	2.	-	0,62	150	150
3.	0,31	0,62	150	150	

K provoznímu stavu 1 dochází v případě, kdy je tlakově zatížený pouze hlavní tlakový prostor. Provozní stav 2 nastává, když je tlakově zatížený pouze tlakový prostor duplikátoru. Provozní stav 3 je za normálních provozních podmínek.

Tlakový duplikátor je vyroben z materiálu DIN 1.4404. Vlastnosti materiálu potřebné k provedení pevnostní analýzy jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3: Vlastnosti materiálu DIN 1.4404

MATERIÁL: 1.4404				
TEPLOTA	T (°C)	20	100	150
MEZ KLUZU	$R_{p1,0}^T$ (MPa)	270	200	180
MEZ PEVNOSTI	R_m^T (MPa)	530	430	410

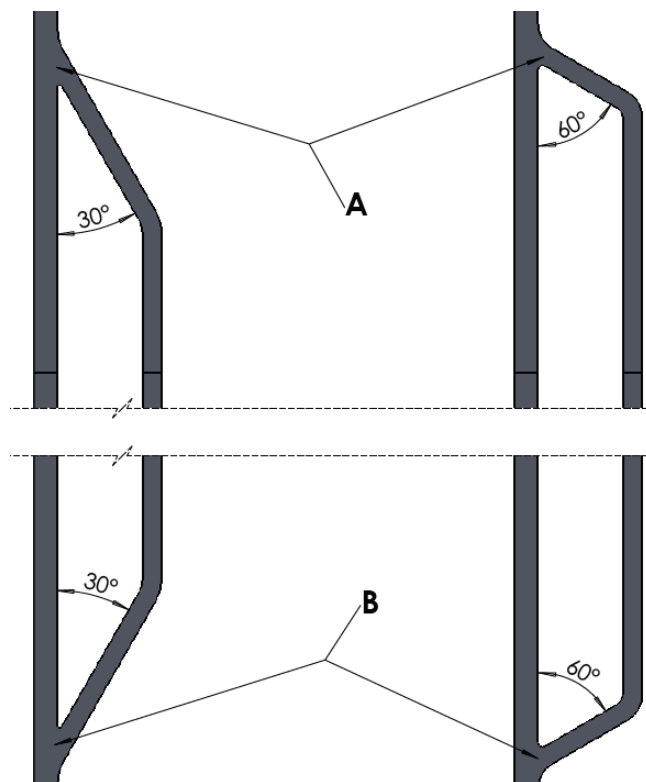
5.1 Pevnostní ověření daného místa

V této části byla provedena pevnostní analýza pro dané místo dle dodané geometrie výrobcem nádoby. Nejprve byla provedena pevnostní analýza původního konstrukčního řešení, následně bylo změněno konstrukční provedení nádoby. Dalším krokem byla pevnostní analýza a její vyhodnocení

Na pozici kritického místa byl zvolen styk vnějšího pláště duplikátoru s vnitřním pláštěm tlakové nádoby. V tomto místě dochází v původním řešení ke styku pod úhlem 30°. Toto řešení bohužel způsobuje časté technologické problémy při výrobě, proto by bylo vhodné

provést změnu úhlu styku. Pro nový úhel styku byla stanovena hodnota 60° , tato hodnota byla zvolena z technologických důvodů výroby.

Analýza byla provedena na 2D modelu využitím s axisymetrie.



Obr. 4: Kritická místa tlakového duplikátoru

5.1.1 Vytvoření geometrie pro pevnostní analýzu

2D geometrie pro pevnostní analýzu byla vytvořena za pomoci programu SolidWorks 2016. Geometrie byla vytvořena pomocí funkce „Povrchy“, kdy z vytvořené skici byl namodelován povrch, tento povrch byl následně rozdělen pomocí funkce „Formy“ do několika oblastí. Konečný model geometrie byl uložen ve formátu .STEP a naimportován do programu Ansys Workbench 18.

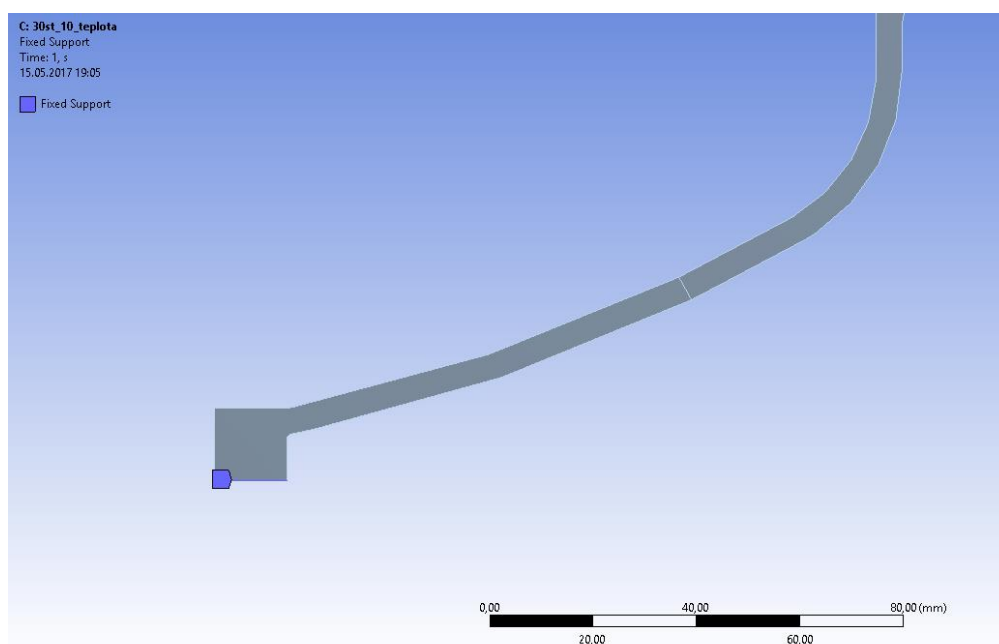
Skica byla umístěna na přední rovině (rovina X-Y) a nutnou podmínkou pro export geometrie do softwaru ANSYS Workbench je její umístění v kladných směrech os x, y. Provedení 2D analýzy za pomoci axisymetrie, je omezeno další podmínkou, to že osa y musí být zároveň osou rotace.

Tento postup byl proveden pro obě řešené konfigurace.

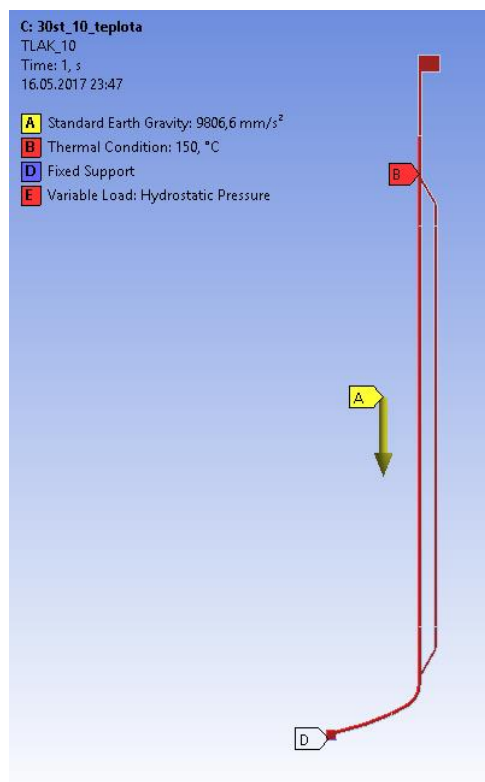
5.1.2 Pevnostní analýza 2D v Ansys Workbench 18

Pevnostní analýza je provedena v programu Ansys Workbench 18. Nejprve bylo nutno importovat model geometrie do prostředí Ansys Workbench 18. Následně byla vytvořena síť konečných prvků a zadány okrajové podmínky pro analýzu. Poté už byl proveden výpočet pro různé stavy namáhání a výsledky dle normy ČSN EN 13445 [1].

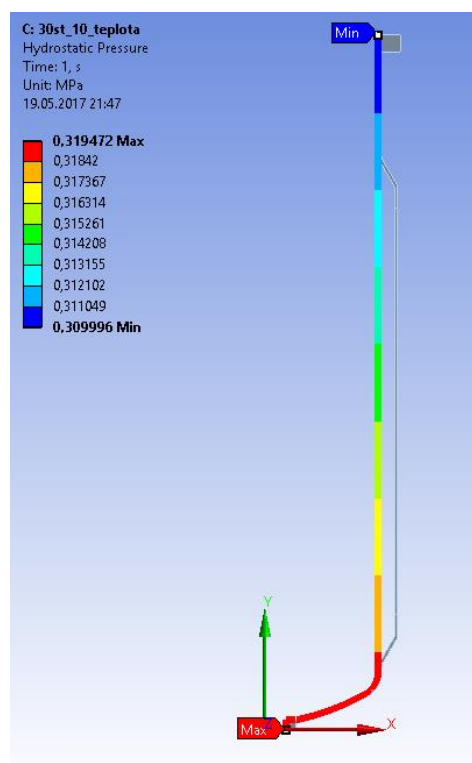
Výpočet byl proveden pro obě řešené konfigurace, stykový úhel 30° , resp. 60° při stejných provozních stavech. (viz. Tab. 2).



Obr. 5: Uchycení fixní vazby; provozní stav 1; konfigurace 30°

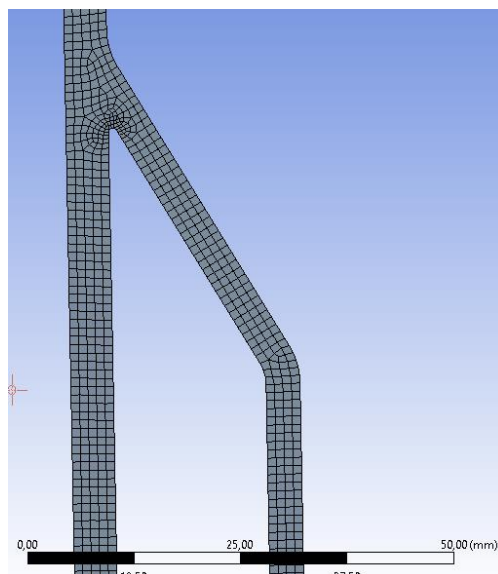


Obr. 6: Okrajové podmínky; provozní stav 1; konfigurace 30°



Obr. 7: Rozložení hydrostatického tlaku

Výpočtová síť byla vytvořena pomocí zpřesňující funkce „sizing“. Síť obsahuje 30430 uzlů, počet prvků je 8952.



Obr. 8: Detail sítě v kritickém místě A; konfigurace 30°

5.1.3 Tlaková zkouška dle ČSN EN 13445-5

Pro danou tlakovou nádobu byla také provedena MKP analýza tlakové zkoušky pro tlak stanovený dle normy ČSN EN 13 445-5 [1]. Pro tlakový duplikátor je zkušební tlak určen jako vyšší tlak vypočtený pomocí následujících vztahů [1].

$$P_t = 1,25 \cdot P_d \cdot \frac{f_a}{f_{T_d}}$$

$$P_t = 1,43 \cdot P_s$$

Výpočet zkušební tlaku pro daný tlakový duplikátor:

$$f_a = 180 \text{ MPa}$$

$$f_{T_d} = 137 \text{ MPa}$$

a) Určení zkušební tlaku v tlakové prostoru I:

$$P_d = P_s = 3,1 \text{ barg} = 0,31 \text{ MPa}$$

$$P_t = 1,25 \cdot P_d \cdot \frac{f_a}{f_{T_d}} = 1,25 \cdot 0,31 \cdot \frac{180}{137} = 0,509 \text{ MPa}$$

$$P_t = 1,43 \cdot P_s = 1,43 \cdot 0,31 = 0,4433 \text{ MPa}$$

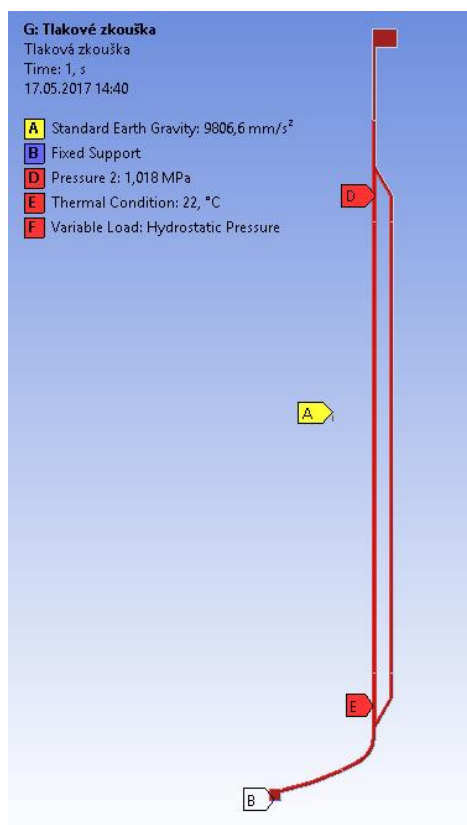
b) Určení zkušebního tlaku v tlakovém prostoru II:

$$P_d = P_s = 3,1 \text{ barg} = 0,62 \text{ MPa}$$

$$P_t = 1,25 \cdot P_d \cdot \frac{f_a}{f_{T_d}} = 1,25 \cdot 0,62 \cdot \frac{180}{137} = 1,018 \text{ MPa}$$

$$P_t = 1,43 \cdot P_s = 1,43 \cdot 0,062 = 0,8866 \text{ MPa}$$

Dle výpočtu byl zvolen zkušební tlak 0,509 MPa pro tlakový prostor I a 1,018 MPa pro tlakový prostor II. Dále byl zahrnut hydrostatický tlak, který působí na hlavní tlakový prosto I.



Obr. 9: Okrajové podmínky tlakové zkoušky

5.1.4 Vyhodnocení pevnostní analýzy pro dané místo

Vyhodnocení pevnostní analýzy bylo provedeno podle normy ČSN EN 13445-3, PŘÍLOHA C, Návrh na základě analýzy – Metoda založená na kategorizaci napětí [1].

Pevnostní analýza byla vyhodnocena pomocí srovnání maximálního dosaženého napětí v kritických místech a dovoleného napětí f_d , které je určeno pomocí vzorců dle Tabulky 6-1 v ČSN EN 13445-3 [1].

$$f_d = \max \left[\left(\frac{R_{p1,0/T}}{1,5} \right); \min \left(\frac{R_{p1,0/T}}{1,2}; \frac{R_{m/T}}{3} \right) \right]$$

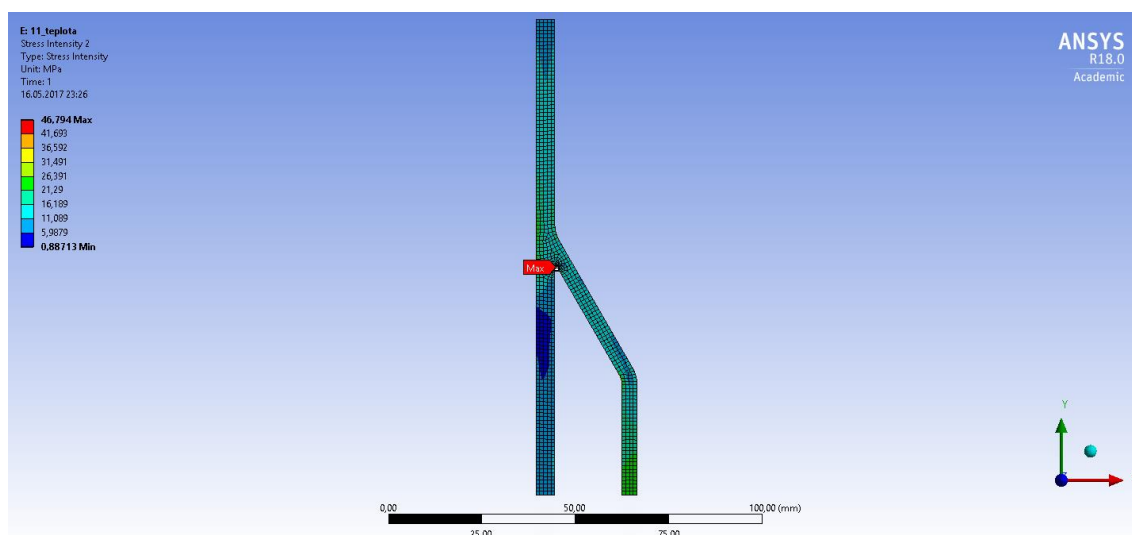
Hodnotu dovoleného napětí byla zvolena pro teplotu 150 °C.

$$f_d = \max \left[\left(\frac{180}{1,5} \right); \min \left(\frac{180}{1,2}; \frac{410}{3} \right) \right] \text{ MPa} = \max[120; \min(150; 137)] \text{ MPa}$$

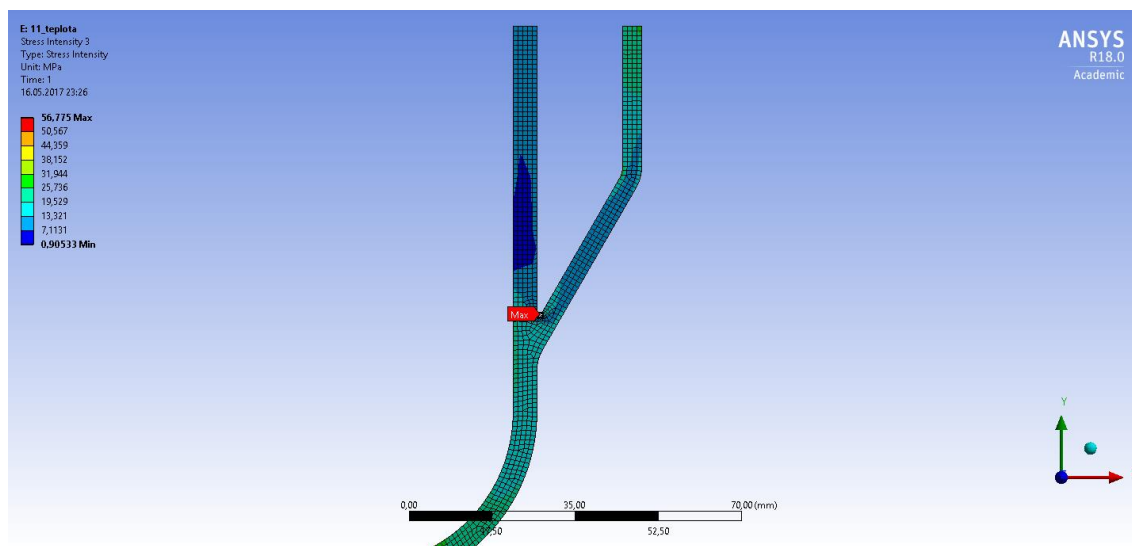
$$f_d = 137 \text{ MPa}$$

Dovolená hodnota byla stanovena na 137 MPa. Vůči této hodnotě byly porovnána všechna napětí. Jelikož maximální napětí na konstrukci nedosahují dovolené hodnoty napětí nebylo přistoupeno ke kategorizaci napětí za použití koeficientů 1,5 a 3, kterými se zvyšuje dovolené namáhání. Vyhodnocení bylo provedeno při zachování většího konzervatismu pouze porovnáním dosaženého s nejpřísnější podmínkou $1f_d$.

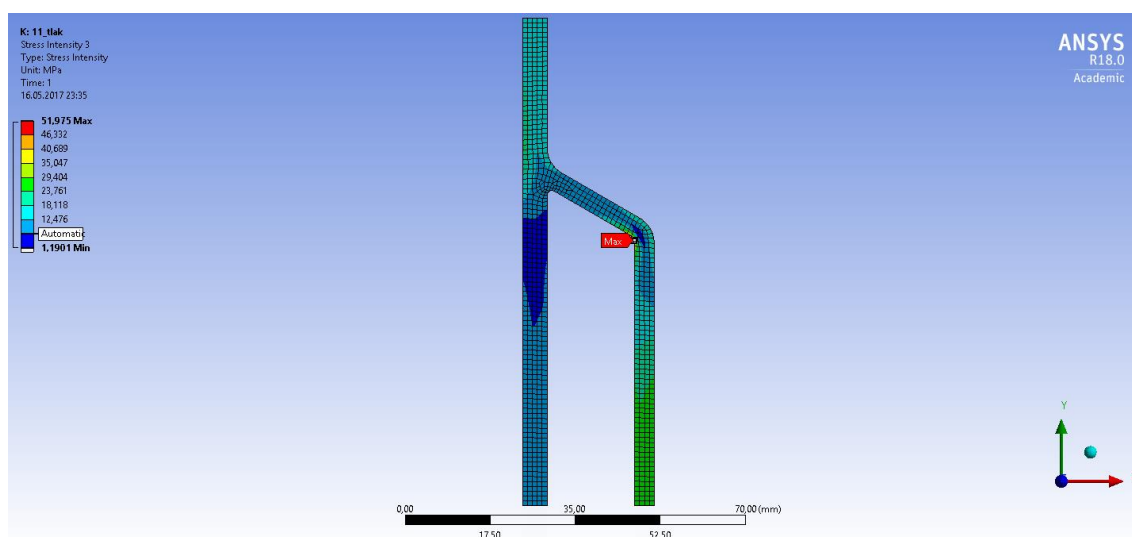
Na Obr. 6 až 9 jsou zobrazeny výsledky rozložení napětí v kritických místech pro obě porovnávané konfigurace při stejných provozních podmínkách. Zobrazené napětí je dle terminologie ANSYS Workbench „stress intensity“, což odpovídá redukovanému napětí dle hypotézy maximálních smykových napětí – Tresca.



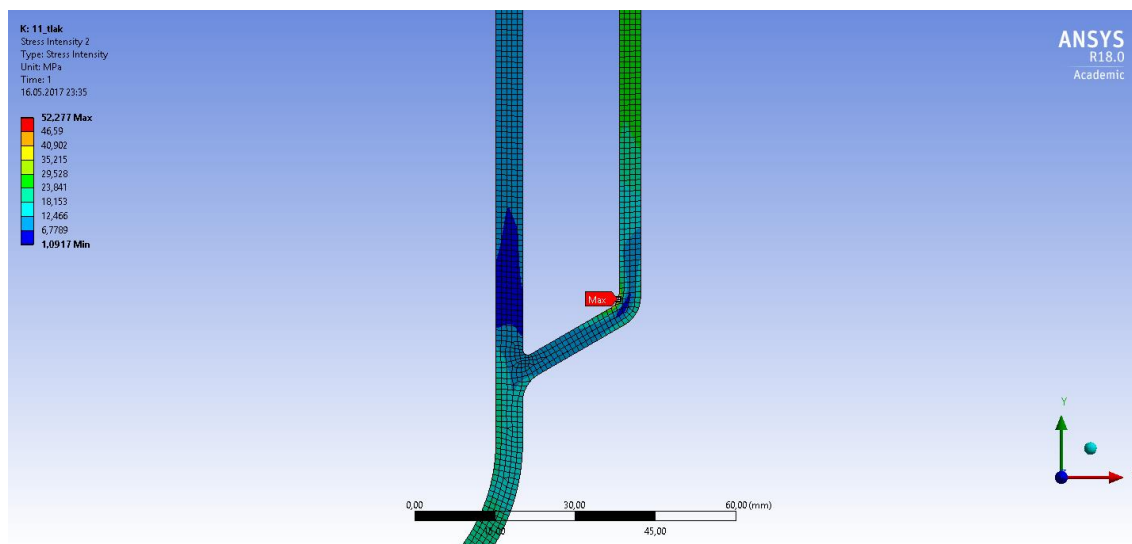
Obr. 10: Rozložení napětí v místě A; provozní stav 3; konfigurace 30°



Obr. 11: Rozložení napětí v kritickém místě B; provozní stav 3; konfigurace 30°



Obr. 12: Rozložení napětí v místě A; provozní stav 3; konfigurace 60°



Obr. 13: Rozložení napětí v místě B; provozní stav 3; konfigurace 60°

Tab. 4: Vyhodnocení pevnostní analýzy pro dané místo

VYHODNOCENÍ PEVNOSTNÍ ANALÝZY PRO DANÉ MÍSTO									
KONFIGURACE PRO STYKOVÝ ÚHEL 30°									
PROVOZ. STAV	TLAK (MPa)		TEPLOTA (°C)		KRITICKÉ MÍSTO	σ_{max} (MPa)		f_d (MPa)	VYHOVUJE/ NEVYHOVUJE
	I	II	I	II					
1	0,31	-	150		A	12,4	<	137	VYHOVUJE
			150		B	12,2	<	137	VYHOVUJE
2	-	0,62	150		A	56,9	<	137	VYHOVUJE
			150		B	65,7	<	137	VYHOVUJE
3	0,31	0,62	150		A	46,8	<	137	VYHOVUJE
			150		B	56,8	<	137	VYHOVUJE
TLAK. ZKOUŠKA	0,51	1,02	22		A	76,8	<	137	VYHOVUJE
			22		B	92,7	<	137	VYHOVUJE
KONFIGURACE PRO STYKOVÝ ÚHEL 60°									
PROVOZ. STAV	TLAK (MPa)		TEPLOTA (°C)		KRITICKÉ MÍSTO	σ_{max} (MPa)		f_d (MPa)	VYHOVUJE/ NEVYHOVUJE
	I	II	I	II					
1	0,31	-	150		A	14,2	<	137	VYHOVUJE
			150		B	13,5	<	137	VYHOVUJE
2	-	0,62	150		A	64,2	<	137	VYHOVUJE
			150		B	63,9	<	137	VYHOVUJE
3	0,31	0,62	150		A	52	<	137	VYHOVUJE
			150		B	52,3	<	137	VYHOVUJE
TLAK. ZKOUŠKA	0,51	1,02	22		A	85,5	<	137	VYHOVUJE
			22		B	86,3	<	137	VYHOVUJE

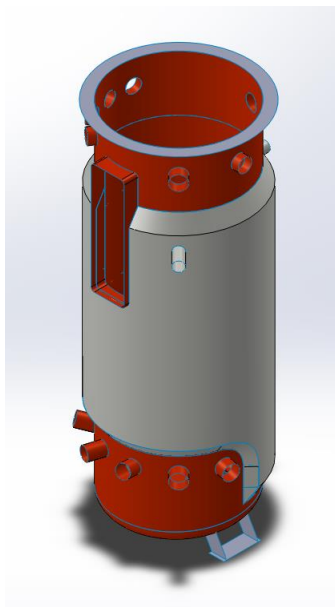
V Tab. 4 jsou zaznamenány napětí v kritických místech pro všechny provozní stavy. Pro zvolené okrajové podmínky a zatížení dle provozních stavů vyšla všechna napětí v kritických místech menší než nejpřísnější podmínka $1 f_d$, proto lze pozměnit konstrukční řešení styku vnitřního pláště a vnějšího pláště z hodnoty 30° na hodnotu 60° . Tato změna nebude mít zásadní vliv na pevnost dané tlakové nádoby při uvažování daných okrajových podmínek.

Všechny průběhy napětí v kritických místech jsou na obrázcích v Příloze 1.

5.2 Pevnostní analýza tlakového duplikátoru

V této části práce byla provedena pevnostní analýza celé tlakové nádoby v programu Ansys Workbench 18. Pevnostní analýza byla provedena na střednicovém skořepinovém modelu tlakového duplikátoru. Model byl vytvořen v programu SolidWorks 2016. Následně byla vytvořena výpočetní síť, zadány okrajové podmínky pro různé provozní stavy, proveden výpočet a vyhodnocení dle ČSN EN 13 445 [1].

Výpočet byl proveden pro stejnou nádobu jako v části, kde byla provedena 2D analýza, ale v tomto případě byla řešena celá tlaková nádoba, nikoli jen kritické místo. Materiál i provozní stavy jsou totožné, viz. Tab. 2 a Tab. 3. Pro tlakový duplikátor byla rovněž simulována tlaková zkouška v souladu s ČSN EN 13445 [1].



Obr. 14: 3D střednicový skořepinový model tlakového duplikátoru

5.2.1 Zatížení tlakové nádoby

Tlaková nádoba byla „pevně“ uchycena využitím tzv. fixní vazby, která byla uchycena na nohy tlakové nádoby.

Další nutností při tvorbě analýzy tlakového duplikátoru byl výpočet ekvivalentních zatížení na hrdla, průhledítka a další otvory, na které působí vnitřní tlak a není z tohoto důvodu automaticky zahrnut do okrajových podmínek. Ekvivalentní zatížení bylo spočteno z tlaku v daném tlakovém prostoru a průměru daného otvoru.

Ekvivalentní zatížení byla vypočtena následujícím způsobem:

$$p = \frac{F}{S} \Rightarrow F = p \cdot S = p \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}$$

Jako příklad výpočtu byl vybrán výpočet ekvivalentní síly na otvor o průměru $d=26$ mm platí:

$$F_{ekv.} = p \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = 310000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,026^2}{4} = 329,176 \text{ N}$$

Ostatní ekvivalentní zatížení byla vypočtena totožným způsobem a následně zadána do programu ANSYS WORKBENCH společně s dalšími zatíženími.

Dalším krokem bylo zadání tlakového a teplotního zatížení tlakové nádoby. Teplotní zatížení bylo zadáno pro celou nádobu. Poté následovalo zadání tlakových zatížení dle provozních stavů. Nejprve bylo nutné zadat hydrostatický tlak, dle následujícího postupu.

Určení hydrostatického tlaku pro provozní stav 1:

Pro přesné zadání hydrostatického tlaku bylo přistoupeno k dopočítání výšku hladiny působící na danou nádobu, tak abychom přesně zadali tlak, kdy v nejvyšším bodě je hydrostatický tlak roven provoznímu tlaku v daném prostoru a následně tento tlak směrem ke dnu nádoby roste až ke své maximální hodnotě, které je dosaženo v nejnižším bodě nádoby.

Výška hladiny byla určena následujícím způsobem:

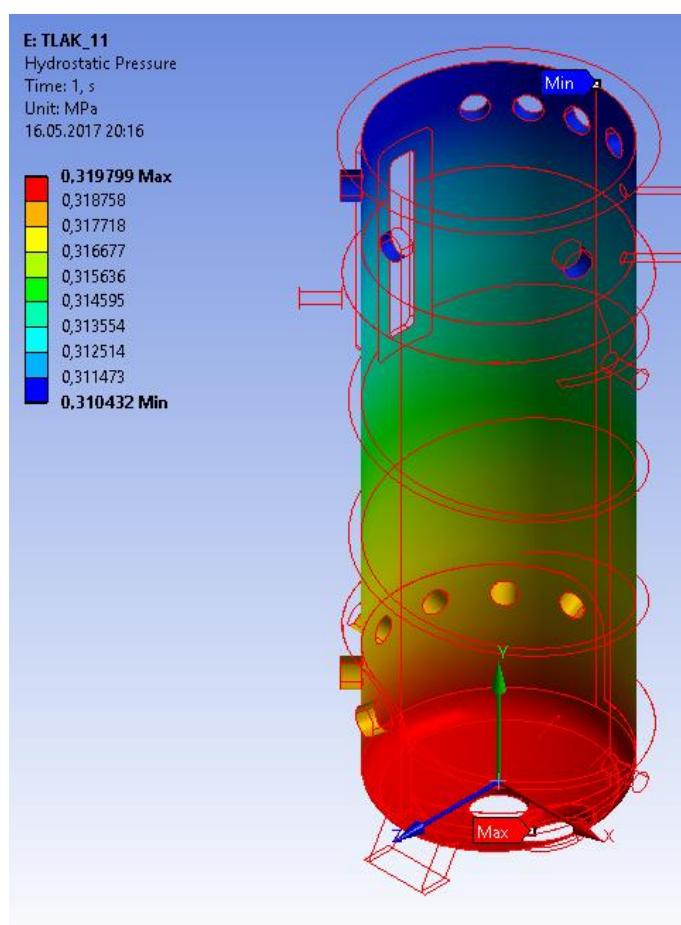
$$p_h = h \cdot \rho \cdot g \Rightarrow h = \frac{p_h}{\rho \cdot g} = \frac{310000}{1000 \cdot 9,81} = 31,6m$$

K vypočtené výšce h nyní musíme přičíst výšku tlakové nádoby, díky tomu získáme celkovou výšku, kterou musíme následně zadat při zadávání hydrostatického tlaku do simulace.

$$h_{celk} = h_n + h = 0,966 + 31,6 = 32,566m = 32566mm$$

Kontrolou správného zadání je rozložení hydrostatického tlaku v nádobě, kdy na horní hraně je tlak roven pracovnímu tlaku a směrem dolů roste.

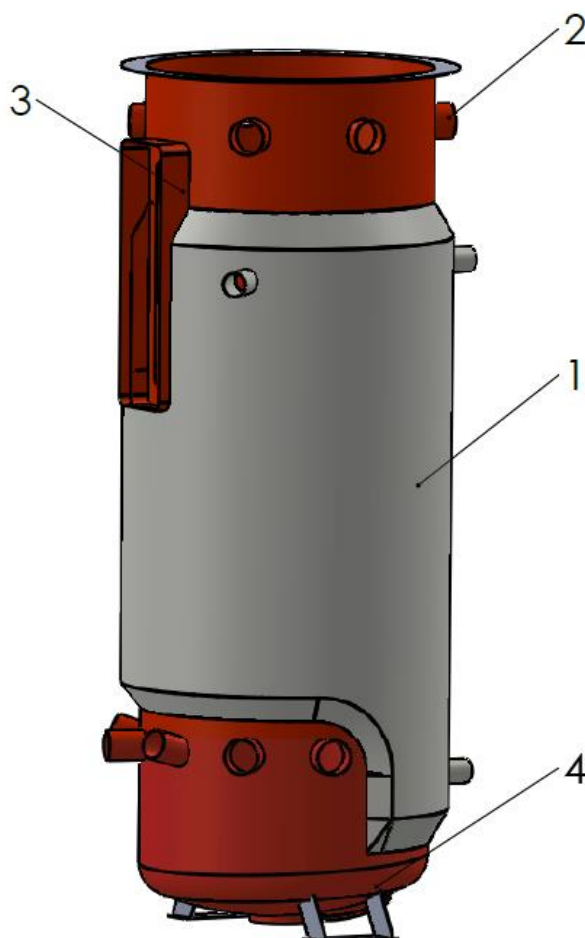
Stejným postupem byl určen a následně zadán také hydrostatický tlak pro tlakovou zkoušku.



Obr. 15: Rozložení hydrostatického tlaku v hlavním tlakovém prostoru; provozní stav 1

5.2.2 Vyhodnocení pevnostní analýzy

Pro vyhodnocení pevnosti byla na základě výsledů výpočtů vybrána 4 kritická místa, tato místa jsou: celé vnější opláštění nádoby, styk hrdla s vnitřním pláštěm, kontakt nohou a dna a jako poslední bylo zvoleno průhledítko nádoby.



Obr. 16: Místa pro vyhodnocení pevnosti

Pevnostní vyhodnocení je provedeno v souladu s ČSN EN 13445, PŘÍLOHA C – Návrh na základě analýzy – Metoda založená na kategorizaci napětí [1]. Dle této normy bylo nejprve nutné provést kategorizaci napětí a rozdělit vznikající napětí do několika základních kategorií a následně byla tato napětí porovnávána s příslušnými hodnotami maximálních napětí pro daný případ. Při kategorizaci napětí se postupuje dle obr. 17.

	Kategorie napětí				
	Primární napětí			Sekundární membránové + ohybové napětí	Špičkové napětí
	Globální membránové napětí	Lokální membránové napětí	Ohybové napětí		
Popis (pro praktické příklady viz tabulku C-2)	Primární střední napětí vypočtené napříč tloušťkou stěny bez zohlednění diskontinuit a koncentrací napětí. Způsobené pouze mechanickými zatíženími.	Primární střední napětí vypočtené napříč tloušťkou stěny zohledňující výrazné diskontinuity, ale ne koncentrace napětí. Způsobené pouze mechanickými zatíženími.	Složka primárního napětí, která je proporcionální vzhledem ke vzdálenosti od těžiště řezu stěny. Nezahrnuje diskontinuity a koncentrace napětí. Způsobené pouze mechanickými zatíženími.	Napětí, které je samo se sebou v rovnováze, nutné pro splnění kontinuity konstrukce. Vyskytuje se u výrazných diskontinuit, ale neobsahuje koncentrace napětí. Může být způsobeno jak mechanickými zatíženími, tak i teplotními vlivy.	a) Dodatek k primárnímu nebo sekundárnímu napětí způsobený koncentrací napětí. b) Určitá teplotní napětí, která mohou způsobit únavu, ale ne deformaci.
Značka	P_m	$P_L^{1)}$	P_b	$Q (= Q_m + Q_b)$	F
Posouzení statických zatížení	— = konstrukční zatížení - - - = provozní zatížení				
Posouzení únavy (pouze je-li požadováno)	Posouzení založené na: $(\Delta \sigma_w)_{b-c}$ nebo $\max(\Delta \sigma_r)$ nebo $(\Delta \sigma_w)_{p-c \text{ a } p-f}$				

Obr. 17: Znázornění posuzovacích kritérií [1]

V případě dané tlakové nádoby byl výrobcem poskytnut provozní a konstrukční tlak o stejných hodnotách, proto bylo přistoupeno pouze k jednomu vyhodnocení pevnosti.

Ekvivalentní primární membránová napětí musí pro všechny simulované podmínky zatížení splňovat vztah [1]:

Globální membránové napětí:

$$(\sigma_{eq})_{pm} \leq f_d$$

Lokální membránové napětí:

$$(\sigma_{eq})_{pL} \leq 1,5f_d$$

Lokální membránová napětí je: „*Primární střední napětí vypočtené napříč tloušťkou stěny zohledňující výrazné diskontinuity, ale ne koncentrace napětí.*“ [1]. Lokální membránová napětí jsou způsobena pouze mechanickými zatíženími [1].

Součet lokálního membránového a ohybového napětí:

$$(\sigma_{eq})_p \leq 1,5f_d$$

Omezení ekvivalentních rozkmitů napětí od primárních a sekundárních napětí musí splňovat ve všech bodech následující vztah [1]:

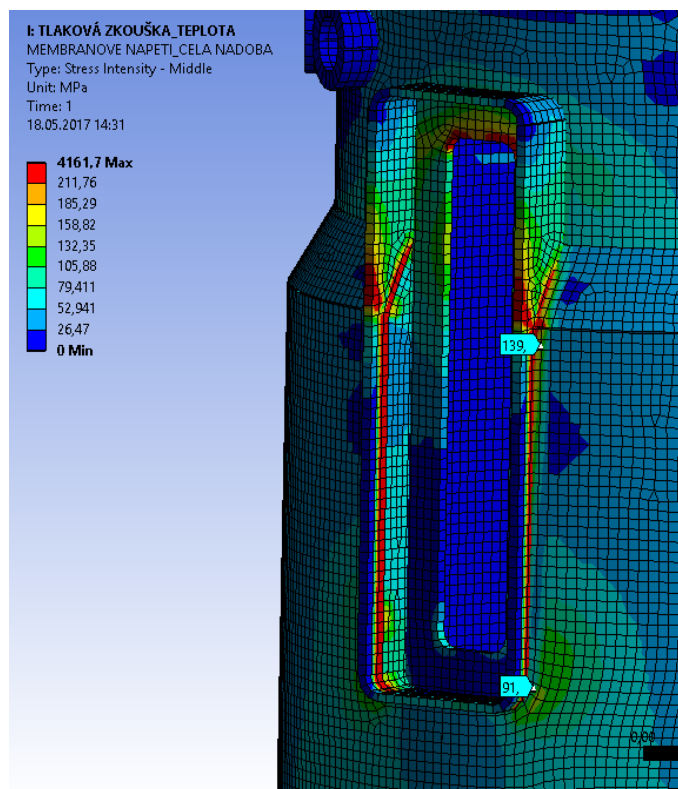
$$(\sigma_{eq})_{p+q} \leq 3f_d$$

Výsledky vyhodnocení jsou zobrazeny v Tab. 5, obrázky pro jednotlivé stavy jsou v příloze.

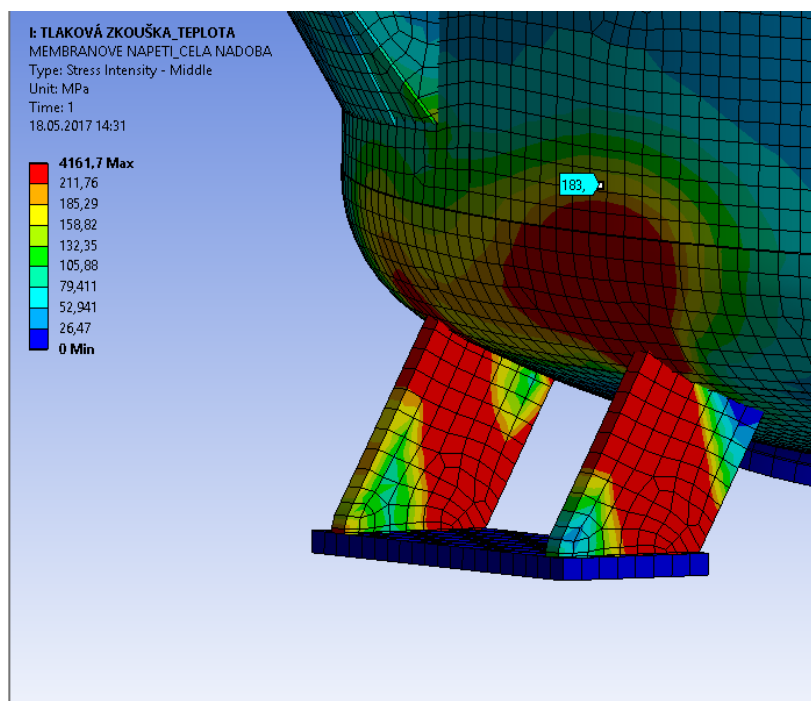
Při vyhodnocování pevnosti u místa 3 nastal problém, kdy vzniká špičkové napětí v místě styku průhledítka s vnějším pláštěm, špičkové napětí dosahuje hodnoty téměř 390 MPa. Kvůli použité metodě, tedy využití skořepinového modelu – napětí touto metodou nelze v daném místo vyhodnocovat. Pro vyhodnocení daného místa by bylo nutné využít jinou metodu vyhodnocení daného místa, např. submodelingu, kdy se pro zkoumanou oblast vytvoří 3D model s objemovými elementy na který se z globálního modelu přenesou působící zatížení formou okrajové podmínky.

U místa 4 vznikl opět problém s vyhodnocením. Stejně jako u místa 3 zde dochází ke styku dvou skořepinových ploch tak, že dochází ke vzniku špičkového napětí. Opět tedy nemůžeme řešit toto místo touto metodou. Pro vyřešení pevnosti tohoto místa by bylo nutné využít jinou metodu určování pevnosti, např. již zmiňovaný submodeling.

I když nemohla být touto metodou plně vyhodnocena místa 3 a 4, splňují podmínku, kdy pro napětí, které leží dál od diskontinuity než $\sqrt{R \cdot e_a}$ musí být menší než $1,5f_d$.



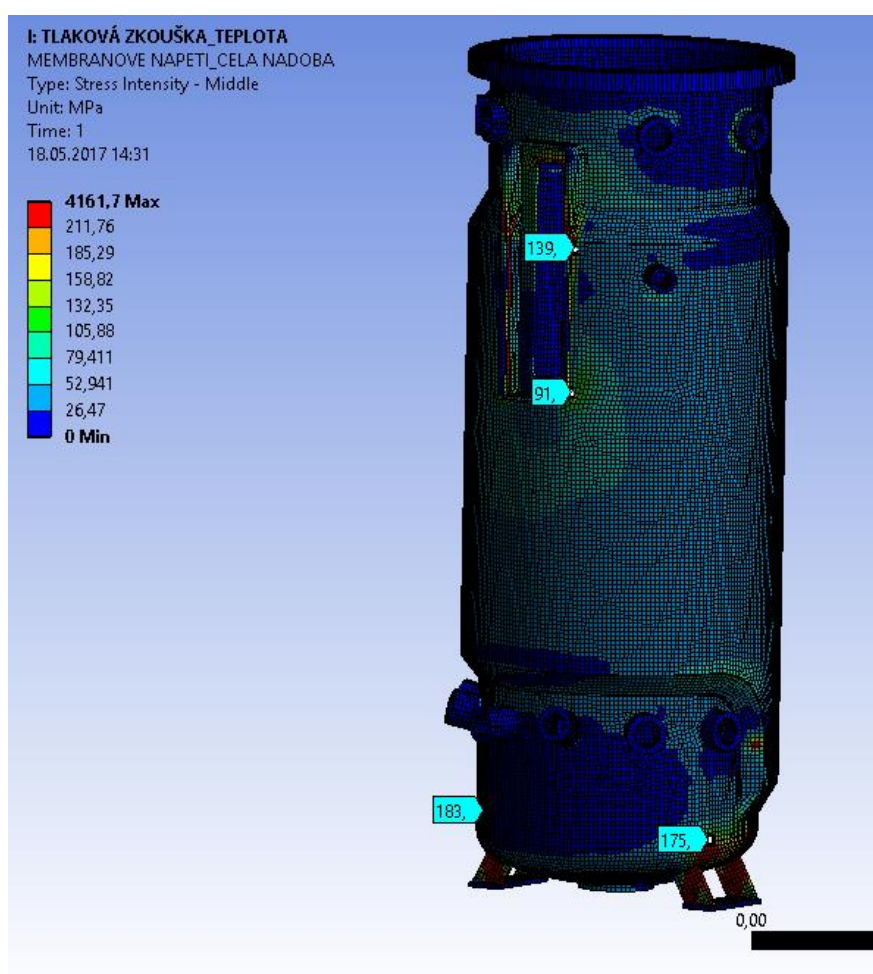
Obr. 18: Špičkové napětí na průhledítku; provozní stav 1 bez teploty



Obr. 19: Detail rozložení napětí na noze nádoby

Místa 1 a 2 byla vyhodnocena pro všechny provozní stavy. Pro všechny provozní stavy byly určeny hodnoty napětí P_m , P_L+P_b a Q_m+Q_b dle Tabulky C-3 v normě ČSN EN 13445-3[1] a následně porovnány s příslušnými dovolenými napětími. Vše je zaznamenáno v Tab. 5.

Rozložení membránového napětí po celé nádobě ukazuje, že všechna dosažená napětí jsou menší než nejpřísnější porovnávací kritérium f_d kromě případů, kde dochází ke kontaktu skořepin, který zapříčiňuje vznik špičkových napětí, která nelze vyhodnocovat porovnáváním s dovoleným napětím, ale je zde nutno využít jinou metodu vyhodnocování a následně ověřit přípustnost těchto konstrukčních částí.

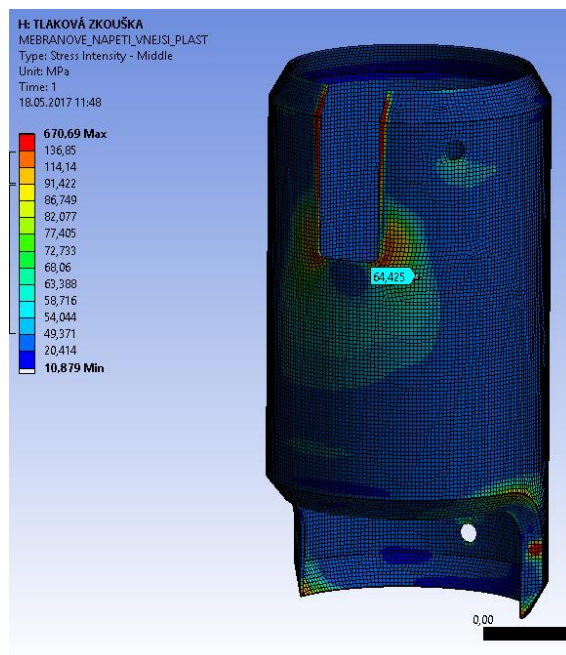


Obr. 20: Rozložení membránového napětí po celé nádobě při tlakové zkoušce

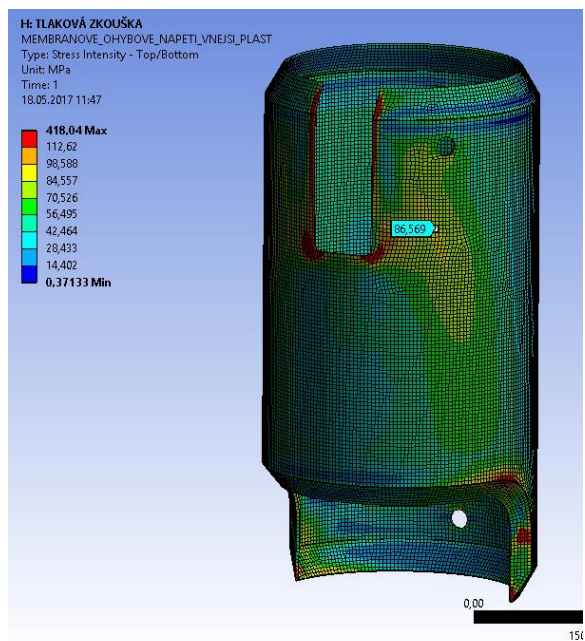
Tab. 5: Vyhodnocení pevnostní analýzy pro místa 1 a 2

VYHODNOCENÍ PEVNOSTNÍ ANALÝZY PRO SKOŘEPINOVÝ MODEL															
PROVOZ. STAV	TLAK (MPa)		TEPLOTA (°C)		MÍSTO	P_m (MPa)		f_d (MPa)	$P_L + P_b$ (MPa)		$1,5f_d$ (MPa)	$Q_m + Q_b$ (MPa)		$3f_d$ (MPa)	VYHOVUJE/ NEVYHOVUJE
	I	II	I	II											
1	0,31	-	-		1	4,2	<	137	6,6	<	206	-	<	411	VYHOVUJE
			150		1	-	<	137	-	<	206	8,9	<	411	VYHOVUJE
			-		2	10,6	<	137	10,1	<	206	-	<	411	VYHOVUJE
			150		2	-	<	137	-	<	206	11,9	<	411	VYHOVUJE
2	-	0,62	-		1	36,1	<	137	51,8	<	206	-	<	411	VYHOVUJE
			150		1	-	<	137	-	<	206	50,3	<	411	VYHOVUJE
			-		2	6,2	<	137	10,9	<	206	-	<	411	VYHOVUJE
			150		2	-	<	137	-	<	206	33,7	<	411	VYHOVUJE
3	0,31	0,62	-		1	28,6	<	137	51,3	<	206	-	<	411	VYHOVUJE
			150		1	-	<	137	-	<	206	49,9	<	411	VYHOVUJE
			-		2	10,6	<	137	13,6	<	206	-	<	411	VYHOVUJE
			150		2	-	<	137	-	<	206	38,4	<	411	VYHOVUJE
TLAK. ZKOUŠKA	0,51	1,02	-		1	64,4	<	137	86,6	<	206	-	<	411	VYHOVUJE
			22		1	-	<	137	-	<	206	88,3	<	411	VYHOVUJE
			-		2	23,8	<	137	35,9	<	206	-	<	411	VYHOVUJE
			22		2	-	<	137	-	<	206	42,5	<	411	VYHOVUJE

Porovnání ohybového a membránového napětí při provozním stavu 1 a při tlakové zkoušce, oba provozní stavy jsou bez uvažování teploty



Obr. 21: Rozložení membránového a ohybového napětí na vnější plášti; provozní stav 3 bez teploty



Obr. 22: Rozložení membránového a ohybového napětí na vnější plášti; tlaková zkouška bez teploty

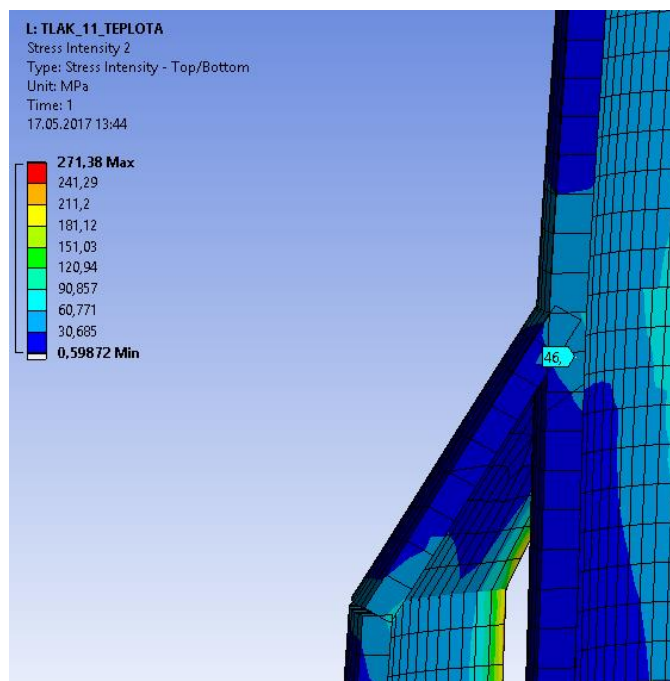
5.2.3 Porovnání výsledků 2D analýzy a 3D analýzy pro kritické místo styku vnitřního pláště a vnějšího pláště

Dle výsledků analýzy pro 2D případ s využitím axisymetrie a 3D případ s využitím skořepinového střednicového modelu vyšly pro oba případy obdobné výsledky při stejných provozních stavech, tyto výsledky jsou srovnány v Tab. 6.

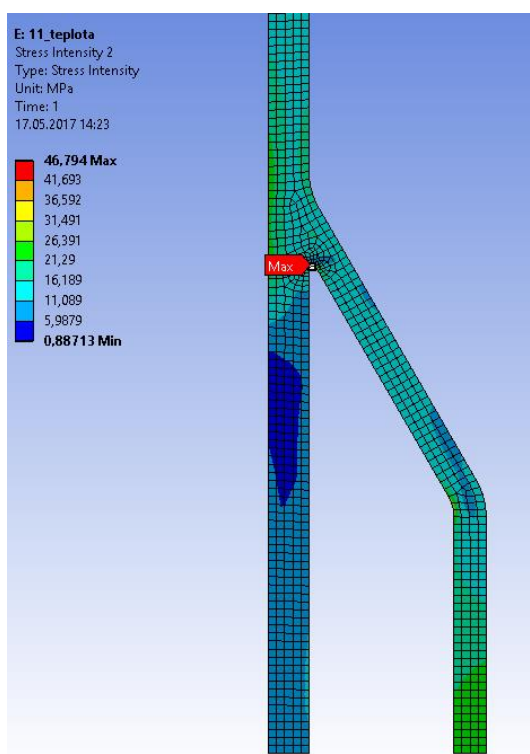
Tab. 6: Porovnání napětí pro 2D a 3D analýzu v kritickém místě A a B

Porovnání 2D a 3D analýzy pro kritické místo A a B			
Provozní stav	Kritické místo	$\sigma_{max}(MPa)$	
		2D	3D
1	A	12,4	15,5
	B	12,2	9,1
2	A	56,9	55,4
	B	65,7	63,4
3	A	46,8	46,6
	B	56,8	53,4
TLAK. ZKOUŠKA	A	60,2	60,3
	B	75,3	78,3

V Tab. 6 jsou zobrazeny hodnoty maximálních napětí v kritických místech A a B, v hodnotách pro 2D analýzu a 3D analýzu jsou mírné rozdíly, nicméně i přesto všechna dosažená maximální napětí jsou menší než nejkritičtější kritérium posuzování pevnosti dovolené napětí f_d .



Obr. 23: Kritické místo A; 3D analýza; provozní stav 3



Obr. 24: Kritické místo A; 2D analýza; provozní stav 3

ZÁVĚR

V úvodních kapitolách byly popsány základní informace o částech tlakových nádob, návrhu tlakových nádob společně s poznatky o světových normách, které se zabývají tlakovými nádobami. Jedna z kapitol byla také věnována metodě konečných prvků. V poslední kapitole týkající se teoretické části této bakalářské práce je popsán návrh tlakových nádob na základě analýzy – metoda založená na kategorizaci napětí.

Dále byla metodou konečných prvků provedena pevnostní kontrola tlakového duplikátoru na geometrii poskytnuté výrobcem zařízení, přičemž primárním úkolem této kontroly bylo ověření možnosti provedení změny v konstrukci daného tlakového duplikátoru.

Po provedení pevnostní analýzy v programu ANSYS Workbench byla napětí dosažená v kritických místech nádoby porovnána s dovolenými napětími, dle normy ČSN EN 13445 [1]. Dle vyhodnocení pevnostní analýzy lze změnit konstrukční řešení dané tlakové nádoby, tato změna nebude mít zásadní vliv na statickou pevnost daného tlakového duplikátoru při uvažování zvolených okrajových podmínek.

V poslední části této práce byla provedena pevnostní analýza celé tlakové nádoby za využití skořepinového modelu, dle ČSN EN 13445 [1]. Na základě výsledků výpočtů byla zkontrolována kritická místa, provedena kategorizace napětí a následně tato napětí porovnána s dovolenými napětími, dle ČSN EN 13445 [1]. Všechna napětí byla posouzena a vyhodnocena. U špičkových napětí vzniklých ostrým spojem skořepinových ploch nebylo přistoupeno k vyhodnocení a bylo doporučeno využít doplňující metody pro posouzení přípustnosti daného místa.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Český normalizační institut, *ČSN EN 13 445 - Netopené tlakové nádoby*, vol. 2010.
- [2] S. Chattopadhyay, *Pressure Vessels: Design and Practice*. CRC Press, 2004.
- [3] P. Schneider, *Základy konstruování procesních zařízení*, Vyd. 1. Brno: PC-DIR Real, 1999.
- [4] “TLAKinfo: oborový portál pro vyhrazená tlaková zařízení - kotle, tlakové nádoby, potrubí.” [Online]. Available: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1411&z=2>. [Accessed: 15-May-2017].
- [5] “Příruby - krkové, nerezové, ploché a točivé příruby | G.D.P.P. spol. s r.o.” [Online]. Available: <http://www.priruby.cz/priruby>. [Accessed: 11-May-2017].
- [6] “ČSN EN 764-7 | ČSN online.” [Online]. Available: <http://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=66246>. [Accessed: 22-May-2017].
- [7] “ČSN 25 7203 (257203) - Technické normy ČSN.” [Online]. Available: http://www.technicke-normy-csn.cz/257203-csn-25-7203_4_32719.html. [Accessed: 14-Feb-2017].
- [8] R. Kontroly.cz, “Bezpečnostní výstroj a provoz tlakových nádob dle ČSN 69 0012.” [Online]. Available: <http://www.revizekontroly.cz/tlakova-zarizeni/item/bezpecnostni-vystroj-a-provoz-tlakovych-nadob-dle-csn-69-0012>. [Accessed: 11-May-2017].
- [9] “ČSN 13 3060-1 (133060) - Technické normy ČSN.” [Online]. Available: http://www.technicke-normy-csn.cz/133060-csn-13-3060-1_4_25103.html. [Accessed: 14-Feb-2017].
- [10] “TLAKinfo: Tlakové nádoby - Výstroj a bezpečnostní systémy - ČSN EN 764-7.” [Online]. Available: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1298>. [Accessed: 11-May-2017].
- [11] “TLAKinfo: Evropská směrnice 97/23/ES (tlaková zařízení) - Pravidla.” [Online]. Available: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=2004>. [Accessed: 28-Feb-2017].
- [12] “ČSN EN 13445-1 (695245) - Náhled normy.” [Online]. Available: <https://nahledy.normy.biz/n.php?i=86757>. [Accessed: 28-Feb-2017].
- [13] “TConsult.” [Online]. Available: http://www.tconsult-brno.cz/tc_main/p_predpisy.htm#EN13445. [Accessed: 15-May-2017].
- [14] “TLAKinfo: Dimenzování tlakových zařízení podle mezních stavů.” [Online]. Available: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1818>. [Accessed: 28-Feb-2017].
- [15] E. Ondráček and Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, *Mechanika těles: pružnost a pevnost. II*, Vyd. 4., Přepřac., V Akademickém nakladatelství CERM 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006.
- [16] “Knihovna příkladů z MKP: Texty.” [Online]. Available: http://mechanika2.fs.cvut.cz/old/pme/examples/TEXTY/intro/ansys_geom.html. [Accessed: 15-May-2017].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, ZKRATEK A JEDNOTEK

Symbol	Význam	Jednotka
DN	jmenovitý průměr	mm
d_i	průměr daného otvoru	mm
e_a	analyzovaná tloušťka stěny	mm
F_{ekv}	ekvivalentní zatěžující síla	N
f_a	dovolené namáhání, pro normální případy provozního zatížení	MPa
f_d	dovolené napětí	MPa
f_{Td}	dovolené namáhání, pro normální případy provozního zatížení materiálu uvažované části při teplotě T_d	MPa
g	tíhové zrychlení	m/s^2
h	výška hladiny od hydrostatického tlaku	mm
h_{celk}	celková výška	mm
h_n	výška nádoby	mm
PN	jmenovitý tlak	MPa
P_b	ohybové napětí	MPa
P_d	konstrukční tlak pro případ nejvyššího zatížení	MPa
P_L	lokální membránové napětí	MPa
P_m	globální primární membránové napětí	MPa
P_{np}	špičkové napětí	MPa
P_s	nejvyšší dovolený tlak nádoby	MPa
P_t	zkušební tlak měřený v nejvyšším bodě komory nádoby ve zkušební poloze	MPa
p	tlak	Pa
R	polomer křivosti střednice	mm
p_h	hydrostatický tlak	Pa
R_m^T	minimální mez pevnosti v tahu při výpočtové teplotě	MPa
$R_{p1,0}^T$	minimální smluvní mez kluzu 1% při výpočtové teplotě	MPa
T	teplota	$^{\circ}C$
T_d	konstrukční teplota pro případ nejvyššího zatížení tlakem	$^{\circ}C$
$P_L + P_b$	součet lokálního membránového napětí a ohybového napětí	MPa

Q_m+Q_b	Sekundární membránové napětí + ohybové napětí	MPa
ρ	hustota	Kg/m ³
σ_{celk}	celkové napětí	MPa
σ_{eq}	ekvivalentní napětí	MPa
σ_{max}	maximální hodnota součtu ohybového a membránového napětí	MPa
$\Delta\sigma_{eq}$	ekvivalentní rozkmit napětí	MPa
$(\sigma_{eq})_P$	součet ekvivalentního a membránového a ohybového napětí	MPa
$(\sigma_{eq})_{PL}$	ekvivalentní ohybové napětí	MPa
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	ekvivalentní membránové napětí	MPa
$(\Delta\sigma_{eq})_{P+Q}$	rozdíl ekvivalentního napětí pro součet primárního a sekundárního membránového napětí	MPa

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 Vyhodnocení tlakové nádoby konfigurace 30° a 60° - obrázky

Příloha č. 2 Vyhodnocení 3D tlakové nádoby - obrázky

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Volba úsečky segmentu [1]	23
Obr. 2: Rozklad základního napětí [1].....	23
Obr. 3: Rozdělení tlakových prostorů na hlavní tlakový prostor I a tlakový duplikátor II.....	25
Obr. 4: Kritická místa tlakového duplikátoru	28
Obr. 5: Uchycení fixní vazby; provozní stav 1; konfigurace 30°	29
Obr. 6: Okrajové podmínky; provozní stav 1; konfigurace 30°	30
Obr. 7: Rozložení hydrostatického tlaku	30
Obr. 8: Detail sítě v kritickém místě A; konfigurace 30°	31
Obr. 9: Okrajové podmínky tlakové zkoušky	32
Obr. 10: Rozložení napětí v místě A; provozní stav 3; konfigurace 30°	33
Obr. 11: Rozložení napětí v kritickém místě B; provozní stav 3; konfigurace 30°	34
Obr. 12: Rozložení napětí v místě A; provozní stav 3; konfigurace 60°	34
Obr. 13: Rozložení napětí v místě B; provozní stav 3; konfigurace 60°	35
Obr. 14: 3D střednicový skořepinový model tlakového duplikátoru.....	37
Obr. 15: Rozložení hydrostatického tlaku v hlavním tlakovém prostoru; provozní stav 1	39
Obr. 16: Místa pro vyhodnocení pevnosti	40
Obr. 17: Znázornění posuzovacích kritérií [1].....	41
Obr. 18: Špičkové napětí na průhledítku; provozní stav 1 bez teploty	43
Obr. 19: Detail rozložení napětí na noze nádoby.....	43
Obr. 20: Rozložení membránového napětí po celé nádobě při tlakové zkoušce	44
Obr. 21: Rozložení membránového a ohybového napětí na vnější plášti; provozní stav 3 bez teploty	46
Obr. 22: Rozložení membránového a ohybového napětí na vnějším plášti; tlaková zkouška bez teploty	46
Obr. 23: Kritické místo A; 3D analýza; provozní stav 3	48
Obr. 24: Kritické místo A; 2D analýza; provozní stav 3	48

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Technické údaje tlakové nádoby	26
Tab. 2: Provozní stavy tlakové nádoby.....	27
Tab. 3: Vlastnosti materiálu DIN 1.4404.....	27
Tab. 4: Vyhodnocení pevnostní analýzy pro dané místo.....	36
Tab. 5: Vyhodnocení pevnostní analýzy pro místa 1 a 2.....	45
Tab. 6: Porovnání napětí pro 2D a 3D analýzu v kritickém místě A a B	47

Tato práce vznikla za podpory a na přístrojovém vybavení NETME Centre, regionálního výzkumného a vývojového centra vybudovaného z finančních prostředků Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), Reg. č.: CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v navazující fázi udržitelnosti prostřednictvím projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

This thesis was elaborated with support and by using research equipment of NETME Centre, regional research and development centre, built with the financial support from the Operational Programme Research and Development for Innovations within the project NETME Centre (New Technologies for Mechanical Engineering), Reg. No. CZ.1.05/2.1.00/01.0002 and in the follow-up sustainability stage, financially supported through NETME CENTRE PLUS (LO1202) by the Ministry of Education, Youth and Sports under the „National Sustainability Programme I“.