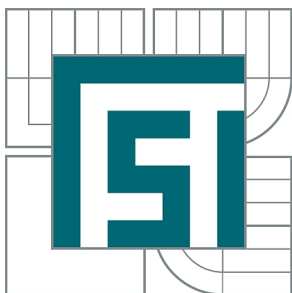




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

KONSTRUKČNÍ NÁVRH DESTILAČNÍ KOLONY

DESIGN OF COLUMN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LIBOR MARKO

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. FILIP NOVÁČEK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Libor Marko

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

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

Konstrukční návrh destilační kolony

v anglickém jazyce:

Design of column

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na návrh destilační kolony na základě dodaného náčrtku a datasheetu. Součástí práce bude konstrukční návrh založený na specifikaci zařízení a pevnostním výpočtu. Detailní pevnostní výpočty budou provedeny dle MKP.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámení se s řešenou problematikou.
2. Rozbor specifikace zařízení.
3. Konstrukční řešení zařízení.
4. Návrhový výpočet zařízení dle normy ČSN EN 13 445.
5. Kontrola vybraných částí pomocí MKP.
6. Tvorba základní výkresové dokumentace.

Seznam odborné literatury:

- [1] Schneider P.: Základy konstruování procesních zařízení, PC-DIR Real, s.r.o., Brno 1999.
- [2] ČSN EN 13 445 – Netopené tlakové nádoby.
- [3] Křupka, V.: Výpočet válcových tenkostěnných kovových nádob a potrubí, SNTL, Praha 1967.
- [4] Křupka V., Schneider P.: Konstrukce aparátů, PC-DIR, Brno 1998.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Filip Nováček

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 22.11.2013

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá problematikou tlakových nádob, a popisuje konštrukciu ich jednotlivých častí. V práci je uvedená výroba jednotlivých častí aparátu, ako aj proces zmontovania častí do jedného celku. Práca popisuje možnosti kontroly a skúšania tlakových nádob. Sú v nej opísané základné druhy vnútorných súčastí destilačnej kolóny a základné princípy a druhy destilácie. Je prevedený pevnostný výpočet častí tlakovej nádoby podľa normy ČSN EN 13 445 – 3, a tiež napäťová analýza vybranej časti destilačnej kolóny pomocou MKP. Súčasťou práce je základná výkresová dokumentácia destilačnej kolóny.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

tlaková nádoba, škrupina, valcový plášť, dno, otvor, hrdlo, príruha, valcový podstavec, destilácia, destilačná kolóna, prevádzkový stav, skúšobný stav, poschodie, výplň, dovolené namáhanie, tlak, teplota

ABSTRACT

The thesis contains information about the design of pressure vessels and describes their individual parts. It is mentioned production of individual parts and the process including assembly parts in one unit. The thesis includes options of control and testing of pressure vessels. It is described kinds of built-ins of distillation column and the basic principles and types of distillation. It is created stress analysis of pressure vessels parts according to ČSN EN 13 445 – 3, and also stress analysis of the selected part of column by using FEM. Mechanical drawing of distillation column is part of the thesis.

KEYWORDS

pressure vessel, shell, cylindrical shell, bottom hole, neck, flange, cylindrical base, distillation, distillation column, operating state, test state, distillation tray, packings, permissible stress, pressure, temperature

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MARKO, L. *Konstrukčný návrh destilačnej kolóny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 78 s. Vedúci diplomovej práce Ing. Filip Nováček.

PREHLÁSENIE O PÔVODNOSTI

Prehlasujem, že predkladanú diplomovú prácu som vypracoval samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho diplomovej práce.

V Brne dňa 27. 5. 2014

.....

Podpis

POĎAKOVANIE

Týmto by som chcel poďakovať vedúcemu práce Ing. Filipovi Nováčkovi a pánom Ing. Tomášovi Létalovi, Ing. Pavlovi Lošákovi a Ing. Jiřímu Buzíkovi za cenné rady a pripomienky, ktoré mi pomohli k spracovaniu diplomovej práce.

OBSAH

1. Úvod	11
2. Destilačné kolóny	13
2.1. Tlakové nádoby	13
2.1.1. Normy	13
2.2. Konštrukcia tlakových nádob	14
2.3. Škrupiny	15
2.3.1. Výroba škrupinových dielov	15
2.4. Zváranie	16
2.4.1. Druhy zvárania	17
2.4.2. Kontrola kvality zvarov	18
2.5. Korózna ochrana	19
2.6. Skúška	19
2.7. Destilácia	20
2.8. Vnútorne súčasti destilačných kolón	21
2.8.1. Destilačné poschodia	22
2.8.2. Destilačné náplne a výplne	24
3. Pevnostný výpočet	27
3.1. Vstupné dáta	28
3.2. Maximálna prípustná hodnota dovoleného namáhania tlakových častí	28
3.3. Skušobný tlak	30
3.4. Škrupiny zaťažené vnútorným tlakom	31
3.4.1. Válcová škrupina	31
3.4.2. Torosférické dno	33
3.5. Otvory v škrupinách	37
3.5.1. Hrdlo L01, L07	38
3.5.2. Hrdlá L02, L03, L04, L05, L06, L08, M01, M02, N01, N02, N03, N05, N06	44
3.5.3. Priľahlé pravidelne rozdelené hrdlá N04, N07, N08	47
3.6. Príruby	50
3.7. Válcový podstavec	57
4. Kontrola pomocou MKP	65
4.1. Kontrola výrezu s príľahlými otvormi, otvory N04, N07, N08, L01, L02, L07	65
4.2. Kontrola submodelu, otvor N08	70
4.3. Kategorizácia napätí	71
5. Záver	74

Zoznam použitej literatúry.....	75
Zoznam príloh.....	77
Príloha č.1 - Priebehy napätí po úsečkách linearizácie pri prevádzkovom a skúšobnom stave.....	78

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV

Zoznam použitých symbolov je uvedený na začiatku každej kapitoly, pretože rovnaké symboly môžu v jednotlivých kapitolách zastupovať iné veličiny alebo premenné.

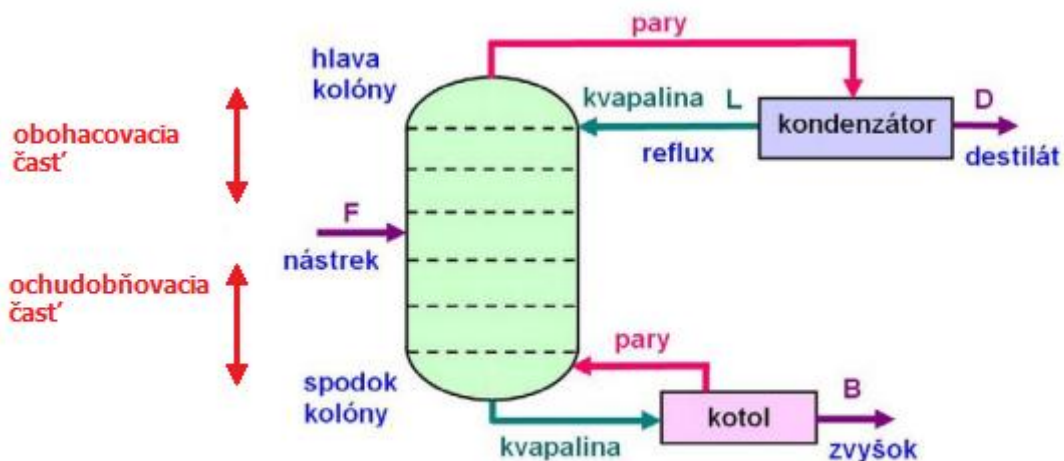
1. Úvod

Destilačné kolóny sú procesné aparáty v ktorých dochádza k destilácii. Destilačné kolóny majú rôzne rozmery. Priemer destilačnej kolóny môže dosahovať 10 metrov, a výška môže dosahovať 45 metrov a viac. Taktiež existujú menšie destilačné kolóny, s ktorými sa stretávame v miniatúrnych laboratórnych zariadeniach. Destilácia sa využíva v technológiách v chemickom priemysle pri spracovaní ropy, alebo v potravinárskom priemysle pri výrobe destilátov. [5][10] Destilačné kolóny na výrobu destilátov sú zobrazené na Obr. 1.1.



Obr. 1.1 Destilačné kolóny na výrobu destilátov [8]

Destilácia je metóda oddeľovania kvapalných zmesí, ktorej základom je oddelenie kvapalín, ktoré majú pri rovnakej teplote rôzne tenzie pár, tiež to znamená, že majú pri rovnakom tlaku rôzne body varu. Rektifikácia je najrozšírenejší spôsob destilácie, ktorý sa uplatňuje v ropnom priemysle, vo výrobe organických, anorganických, potravinárskych a farmaceutických produktov. Schéma destilácie v rektifikačnej kolóne je na Obr. 1.2. V rektifikačnej kolóne je kvapalná zmes



Obr. 1.2 Schéma rektifikačnej kolóny [9]

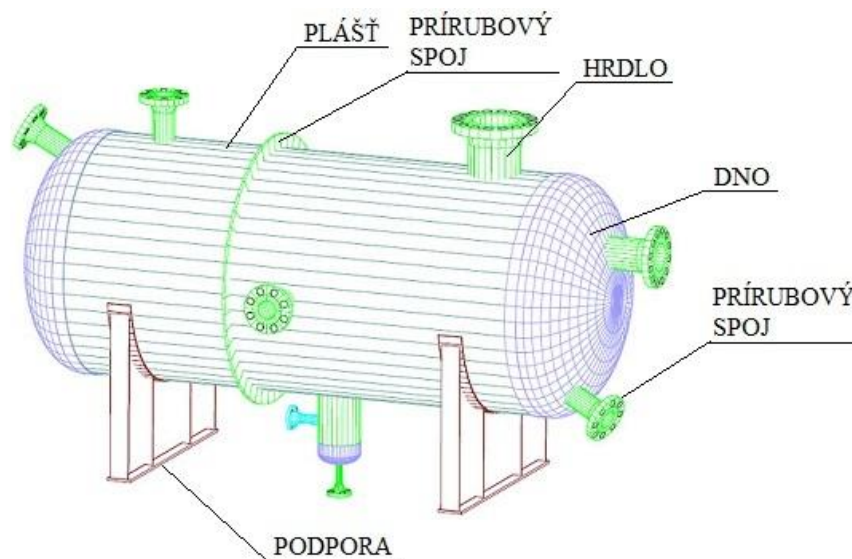
privedená do kolóny nástrekom F . Z kondenzátora sa odvádza destilát D , a z kotla sa odvádza zvyšok B . Prchavosť určuje mieru, s ktorou je zložka schopná sa odparovať. Destilát predstavuje ľahšie zložky, to sú látky s najvyššou prchavosťou a teda nižším bodom varu. Naopak zvyšok predstavuje ťažšie zložky, čiže najmenej prchavé látky s vyšším bodom varu. Časť kondenzátu sa vracia do kolóny cez reflux. Kvapalina z nástreku a refluxu steká dolu kolónou naproti parám stúpajúcim nahor. V každej časti kolóny sa stretávajú tieto dva prúdy látok a dochádza k látkovej a tepelnej výmene. V hlave kolóny je teplota najnižšia a na spodku kolóny je teplota najvyššia. Kolóna je rozdelená na dve časti, obohacovacia časť je časť kolóny nad nástrekom a ochudobňovacia časť je časť kolóny pod nástrekom. Refluxný pomer je pomer prietoku refluxu k prietoku destilátu. Refluxný pomer má vplyv na čistotu produktu, pričom platí, že čím väčší je refluxný pomer, tým je čistejší destilát, zároveň je ale proces energeticky náročnejší. [5][9]

2. Destilačné kolóny

Destilačná kolóna je procesný aparát, ktorého konštrukcia pozostáva z tlakovej nádoby, vnútorných súčastí, kondenzátoru a kotla.

2.1. Tlakové nádoby

Tlaková nádoba je nádoba, ktorej objem je väčší ako 0 litrov a tlak v nej presahuje hodnotu 0,5 bar, čiže je neustále spojená zo zdrojom tlaku. Tlakom pôsobí pracovná látka na steny nádoby. Pracovnou látkou je kvapalina, para alebo plyn. Tlaková nádoba (Obr. 2.1) vzniká spojením tlakových a netlakových častí. Tlakové časti sú plášť, dná, hrdlá, prielezy alebo pracovné otvory. Netlakové časti sú časti na ktoré tlakom pracovná látka nepôsobí, sú to podpory, úchyty, izolácia. [1][10]



Obr. 2.1 Tlaková nádoba [18]

2.1.1. Normy

V súčasnej dobe podliehajú tlakové nádoby a ich jednotlivé konštrukčné časti normám. Väčšina krajín si vytvorila svoje vlastné normy na výpočty, konštruovanie a skúšky tlakových nádob. Medzi najčastejšie štandardy patria:

- norma Európskej únie PED 97/23/ES
- harmonizovaná norma pre ČR ČSN EN 13 445 (spadá pod PED 97/23/ES)
- norma pre USA ASME Code
- norma pre UK British Code BS5500
- norma pre Nemecko A.D.Merkblätter

2.2. Konštrukcia tlakových nádob

Požiadavkou na konštrukciu tlakovej nádoby je čo najjednoduchší tvar. Ideálny tvar je rotačný, u ktorého je výrobná technológia hospodárna a spoľahlivá. Konštrukcia tlakovej nádoby musí byť taká, aby bolo možné nádobu odvzdušniť, vyčistiť a vyprázdniť. Ak je to možné, tak vnútorné ústrojenstvo nádoby by malo byť odnímateľné. [1]

- **Plášť**

Základným stavebným dielom plášťa tlakovej nádoby je lub. Plášť nádoby sa zhotovuje zvarením viacerých lubov. Luby sú vyrábané tak, aby bol plášť zhotovený s čo najmenším počtom zvarových spojov. [1]

- **Dná**

Dná sa používajú na uzatvorenie plášťa. Rozlišujú sa dva typy dna tlakových nádob, rovné a klenuté. Väčšinou sa používajú klenuté dna. Rozdeľujú sa podľa ich tvaru na guľové, torosférické a eliptické. Torosférické dno sa skladá z nasledujúcich troch rotačne symetrických telies: guľový vrchlík, anuloidový prechod a valcový lem. Výraznú koncentráciu ohybových napätí predstavujú prechody guľového vrchlíku do anuloidu a prechod anuloidu do valcovej časti, v týchto miestach môže dôjsť k ohybovej poruche membránovej napätosti, preto sa pri konštrukcii dna dbá na veľkosť vnútorného tlaku, pričom čím je vnútorný tlak väčší, tým je konštrukcia dna klenutejšia. Z toho vyplýva, že najvýhodnejšie sú guľaté dna, avšak ich nevýhodou je vyššia pracnosť výroby a možnosť zhotovenia len pre niekoľko priemerov. [1][10]

- **Hrdlá, prielezy, a pracovné otvory**

Prielezy a pracovné otvory sú na tlakovej nádobe z dôvodu zabezpečenia prístupu obsluhy na prehliadku, čistenie, montáž a demontáž rozoberateľných vnútorných ústrojenstiev, opravy a kontroly nádob. Počet potrebných prielezov a ich minimálne rozmery sa odvíjajú od rozmerov celého aparátu. Existujú výnimky nádob, ako napr.: konštrukcia s dvojitém plášťom alebo nádoby pre prácu s vysoko jedovatými látkami, kedy nádoba môže byť bez prielezu a bez pracovných otvorov. [1][10]

Hrdlo slúži na privod a odvod pracovných médií z a do tlakovej nádoby. Skladá sa z trubky, samotného hrdla, príruby a poprípadе výstužného goliera. [1][10]

V častiach plášťa nádoby, kde sú umiestnené prielezy a hrdlá dochádza k odstráneniu materiálu a tým pádom k oslabeniu plášťa. Z toho dôvodu sa umiestňujú prioritne hrdlá a prielezy mimo pozdĺžnych zvarov. Zvary, v ktorých sú umiestnené otvory pre hrdlá, sa musia kontrolovať prežiarovacou metódou alebo ultrazvukovou defektoskopiou. [1][10]

Na pripojenie meracej a regulačnej techniky, k odvodneniu a odvzdušneniu aparátu sa používajú návarky. [1]

- **Prírubové spoje**

Príruby sa používajú na realizáciu rozoberateľných spojov na tlakových nádobách. Celý prírubový spoj sa skladá z príruby, tesnenia a spojovacej časti. Pripojenie príruby k plášťu je rôzne a závisí od typu príruby, väčšinou sa jedná o zvarový spoj. Na spojenie pri vysokotlakových zariadeniach sa najčastejšie používajú závitové príruby. [1][11]

Na utesnenie spojov v tlakových nádobách sa používa tesnenie. Tesnenie sa vkladá medzi tesniace plochy na vnútornej strane listu príruby, pričom treba upraviť tesniace plochy tak, aby spoj spoľahlivo tesnil. Typy tesniacej plochy sú tesniaca lišta, pero-drážka, nákrúžok-výkrúžok, alebo rovná plocha. [1][11]

Spojenie prírubových spojov sa realizuje skrutkami. Pri tlakových nádobách sa používajú svorníkové skrutky. [1]

- **Výstroj**

Tlakové nádoby obsahujú nasledovnú výstroj:

- Uzatváracia a vypúšťacia armatúra
- Tlakomer
- Poistné zariadenie
- Odvetrávací uzáver (odvzdušnenie)
- Hladinomer
- Teplomer

Výstroj musí byť umiestnená tak, aby bola prístupná počas prevádzky. [1]

- **Podpory**

Používa sa viac druhov podpôr tlakových nádob, pričom druh podpory závisí na veľkosti tlakovej nádoby a jej orientácii. Volí sa vhodný typ podpory, aby bola zabezpečená stabilita nádoby vzhľadom na jej hmotnosť, a na druh zaťažovania. [10]

2.3. Škrupiny

Škrupina je označenie pre základné časti tlakovej nádoby, plášť a dna. Tieto časti sa vyrábajú z plechu, majú rotačný a čo najjednoduchší tvar. Typickým tvarom je valec, kužeľ, kužeľová plocha, anuloid alebo ich kombinácia. [1]

2.3.1. Výroba škrupinových dielov

Výroba plášťa a dna má viacero po sebe nasledujúcich krokov. Ako prvé sa skontroluje výrobný plech, či neobsahuje nerovnosti. Ak sú nerovnosti ležiaceho plechu na rovnej doske väčšie ako 4 mm, plech sa musí vyrovnať ručne alebo na vyrovnávacom lise. Tiež sa kontroluje kvalita plechu, to znamená, či je plech vhodný na výrobu, teda či neobsahuje nedostatky ako trhliny, praskliny apod. [1]

Následne sa plech orysuje podľa výkresu pri kusovej výrobe, resp. podľa šablóny pri sériovej výrobe. [1]

Orysovaný plech sa upravuje strihaním alebo rezaním plameňom. Plechy do hrúbky 10 mm sa upravujú strihaním, pri väčších hrúbkach sa rezanie uskutočňuje kyslíkovo-acetylenovým plameňom pomocou automatov alebo poloautomatov. [1]

Ďalej sa upravujú hrany určené na zváranie. Tvar hrán sa volí podľa normy. Hrany plechov do hrúbky 40 mm určené na pozdĺžny a obvodový zvar sa opracovávajú pred zkrúžením. Pri plechoch s hrúbkou nad 40 mm by sa po skružení mohli objaviť deformácie plôch pre obvodové zvary, preto sa opracujú pred zkrúžením hrany určené na pozdĺžne zvary a po zkrúžení sa opracujú plochy pre obvodové zvary osústružením na karusele. Možnosť úpravy návarových hrán je ich rezanie plameňom skloneným pod určitým uhlom. [1]

Zaistenie požadovaného kruhového profilu plechu po zkrúžení sa docieľi predhýbaním, inak môže vzniknúť nekruhový profil. Ďalším negatívnym javom je predhýbanie plechu na menší polomer ako je požadované, a tým vznikne nevyhovujúci tvar valca. [1]

Nasleduje skružovanie plechu na trojvalcových zkrúžovacích stoliaciach, pričom sa plech plasticky deformuje. Polomer zkrúžovaného plechu sa reguluje nastavením výšky stredného valca stolice. V prípade hrúbky plechu väčšej ako 50 mm sa zkrúžuje za tepla. [1]

Následné zostavenie skružených a zvarných plechov (lubov) a ich lícovanie sa deje na samonastaviteľných polohovadlách. Poloha lubov sa nastavuje príložkami. Zhotovené luby sa pred zvarením kontrolujú na súosnosť, a tiež sa kontroluje vzájomná poloha pozdĺžnych zvarov na luboch. Zvary sa nastehujú tak, aby sa bezpečne premiestnilo teleso na zvaracie stanovisko, kde sa zvaria automatom obvodové zvary. [1]

Príprava klenutých dien nádob sa realizuje lisovaním v zápustkách. Ak je dno veľkého priemeru na ktorý nie je dostatočný formát plechu, tak sa dná lisujú z kruhoviek, ktoré sú zvarené z niekoľkých dielov. [1]

2.4. Zváranie

Pri výrobe a zostavovaní jednotlivých dielov tlakových nádob sa používajú nasledovné spôsoby zvárania:

- Ručné tavné zváranie
- Zváranie automatom pod tavivom
- Elektrostruskové zváranie
- Zváranie v ochrannej atmosfére argónu
- Zváranie v ochrannej atmosfére CO₂

2.4.1. Druhy zvarania

- **Ručné tavné zvaranie**

Ručné tavné zvaranie je zvaranie pomocou prídavného materiálu vo forme obalenej taviacej sa elektródy. Používa sa najmä na zvaranie drobnejších častí, kde nie je možné použiť automat. [1][12]

- **Automatické zvaranie pod tavivom**

Automatické zvaranie pod tavivom je oblúkové zvaranie, pričom elektrický oblúk horí medzi elektródou a základným materiálom pod vrstvou taviva. Zvaranie je automatizované a zvaracie parametre sa ovládajú elektronicky. Tento spôsob zvarania je veľmi produktívny a výkonný. Dajú sa zvariť prakticky všetky kovy a ich zliatiny. [1][12] Aby bolo možné vytvoriť kvalitný zvar po celej dĺžke, je potrebné začať a skončiť zvar mimo samotné zvarané časti, preto sa u pozdĺžnych zvarov k zvaranému telesu umiestnia tzv. nájazdové dosky, ktorých hrúbka a materiál odpovedá zvaranému telesu. Použitie nájazdovej dosky zabezpečí požadovanú hĺbku zvaru na začiatku zvarovej húsenice a ukončenie zvaru bez vzniku krátera. [1]

- **Elektrostruskové zvaranie**

Elektrostruskové zvaranie je bezoblúkový spôsob automatického zvarania vo zvislej polohe pomocou elektrického prúdu prechádzajúceho kúpeľom. Z oboch strán materiálu sa prisúvajú príložky chladené vodou. Výhodou je možnosť zvarovania materiálov s veľkou hrúbkou. Elektrostruskové zvaranie sa využíva pri výrobe tlakových nádob pre jadrový priemysel, pre vysokotlakové reaktory v procesnom priemysle, a pre zvaranie lodných trupov a ťažkých odliatkov. [1][12]

- **Zvaranie metódou MIG**

Metóda zvarania MIG je oblúkové zvaranie taviacou sa elektródou v plynnej ochrane, ktorá je sprostredkovaná cez inertný ochranný plyn - argón. Pozitívom je dobré prevarenie, formovanie zvarovej húsenice a hlboký zvar v tvare palca. Argón sa používa na zvaranie ocelí, hliníka a jeho zliatin, horčíka, niklu, medi a titánu. [1][12]

- **Zvaranie metódou MAG**

Metóda zvarania MAG je oblúkové zvaranie taviacou sa elektródou v plynnej ochrane. Uskutočňuje sa pomocou aktívneho ochranného plynu – oxidu uhličitého. Výhodou je veľká rýchlosť zvarania. Oxid uhličitý sa používa pri zvaraní ocelí. [1][12]

2.4.2. Kontrola kvality zvarov

Zvary podliehajú kontrolám kvality rôznymi skúšobnými metódami, ako sú:

- Vonkajšia prehliadka zvarov
- Skúšky zvarov bez porušenia (defektoskopické)
- Mechanické a technologické skúšky
- Prvá tlaková skúška
- Zvláštne skúšky (meranie tvrdosti, skúška na medzikryštáľovú koróziu)

V prípade zistenia chyby sa chyba opraví podľa schváleného postupu a znovu sa preskúša kvalita zvaru. [1]

- **Vonkajšia prehliadka zvaru**

Vonkajšia prehliadka zvaru je nedeštruktívna skúška. Vykonáva sa prvotne a u každého zvaru po celej dĺžke. Zvar sa testuje na nedostatky ako je prevýšenie, pórovitosť, odchýlky, nepravidelnosť, alebo krátery. Kritériá prípustnosti nedostatkov sú uvedené v norme. [1][10]

- **Defektoskopické skúšky**

Defektoskopickými skúškami sa odhaľujú povrchové aj skryté nedostatky zvarov. Medzi defektoskopické skúšky patrí skúška prežiarením a skúška ultrazvukom. [1]

Princípom skúšky prežiarením je vyslanie prenikavého žiarenia skúšaným materiálom. V prípade nehomogenít v materiáli sa žiarenie zoslabí a po priechode materiálom sa zachytí na špeciálny film, podľa ktorého sa nedostatok alebo chyba v zvare vyhodnotí. [1]

Skúška ultrazvukom je najrozšírenejší spôsob nedeštruktívneho skúšania zvarov. Používa sa najmä odrazová metóda, ktorej princípom je vyslanie krátkych ultrazvukových impulzov, ktoré sa odrážajú od vnútorných porúch materiálu a po odraze sa vrátia na sondu, ktorá pracuje ako prijímač. [1]

- **Indikačná skúška zvaru**

Indikačná skúška sa používa na zistenie povrchových chýb. Principiálne ide o mechanické očistenie skúšaného povrchu, ktorý sa následne natrie indikačnou kvapalinou. Indikačná kvapalina sa nechá pôsobiť minimálne takú dobu, aby vnikla do trhlín. Následne sa prebytočná kvapalina odstráni a na povrch sa naniesie vrstva bieleho prášku, pričom indikačná kvapalina vystúpi z trhlín a na bielom podklade sa objavia farebné trhliny. Druhým spôsobom je použitie fluorescenčnej indikácie, ktorá sa vyhodnocuje v zatemnenom priestore s použitím zdroja ultrafialového žiarenia. [1][10]

- **Mechanické a technologické skúšky**

Mechanické skúšky slúžia na overenie pevnosti a húževnatosti zvaru. Principiálne sa rozdeľujú na skúšku ťahom, ohybom a rázom v ohybe. [1]

- **Metalografické skúšky**

Metalografickými skúškami sa overuje celistvosť zvarov. Overuje sa, či zvar neobsahuje nedostatky ako póry, trhliny, bubliny, struskové vmestky, neprevarený koreň alebo studený spoj a vrub. [1]

2.5. Korózna ochrana

Tlakové nádoby sú počas svojej životnosti vystavené koróznym účinkom buď prostredia, v ktorom sa nachádzajú, alebo pracovnej látky, ktorá nimi prechádza. Ak sú korózne účinky malé, navýši sa hrúbka steny nádoby o korózný prídavok. V prípade, že sa predpokladá väčší úbytok materiálu vplyvom korózie počas životnosti nádoby, treba zabezpečiť tlakovú nádobu účinnejšími metódami ochrany. Možnosťou je vyrobiť nádobu z materiálu, ktorý nepodlieha korózii, alebo použiť bežný materiál a jeho povrch opatriť koróziivzdornou vrstvou nasledovnými spôsobmi:

- Plátovanie
- Alitovanie
- Žiarové striekanie
- Smaltovanie
- Pogumovanie

2.6. Skúška

Po kompletnom zhotovení a zmontovaní jednotlivých častí tlakovej nádoby do celku sa vykoná skúška nádoby, ktorej výstupom je pasport. Pasport je doklad, ktorý potvrdzuje charakteristiku nádoby a jej súlad s technickou dokumentáciou. [1]

Prvým krokom je prevedenie stavebnej skúšky, v ktorej sa hodnotí, či celkové prevedenie nádoby a použité materiály odpovedajú norme a podmienkam uvedeným v dokumentácii. Výsledok stavebnej skúšky sa potvrdí v pasporte tlakovej nádoby, pričom ak boli pri výrobe nádoby použité výnimky z noriem, tak sa tieto uvedú v pasporte. [1]

Na preukázanie pevnosti a tesnosti nádoby a jej častí sa následne vykonáva prvá tlaková skúška. Veľkosť skúšobného pretlaku pri prvej tlakovej skúške a tiež veľkosť skúšobného pretlaku, pri ktorom bude nádoba skúšaná pri pravidelných prehliadkach sa zapisuje do pasportu. Tlaková skúška sa prevádza vodou alebo inou predpísanou skúšobnou kvapalinou. Tlaková nádoba sa plní, až kým kvapalina nevyteká všetkými odvzdušňovacími otvormi bez penenia. Skúšobný tlak sa zvýši najskôr na najvyšší pracovný pretlak, poprezerá sa celý vonkajší povrch nádoby, pričom sa detailne zameriava na zvarové spoje. V prípade nezistenia žiadnych netesností alebo iných nedostatkov sa pretlak zvýši na hodnotu skúšobného pretlaku. Pretlak sa zvyšuje postupne a rovnomerne, pričom potrebný čas na dosiahnutie pracovného pretlaku z nuly, a z pracovného na skúšobný pretlak nemôže byť menší ako 1 minúta. Minimálna doba pôsobenia skúšobného pretlaku pri skúške sa líši v závislosti na hrúbke steny nádoby. Po ukončení skúšky sa skúšobná látka odstráni. [1]

Tlaková nádoba vyhovela požiadavkam prvej tlakovej skúšky, ak boli dodržané nasledovné tvrdenia:

- Nie sú pozorovateľné žiadne trvalé deformácie po skúške.
- Nie sú zistené príznaky trhlín.
- Skúšobný pretlak v priebehu skúšky zostane konštantný.
- Pri skúške plynnou skúšobnou látkou sa v penotvornom prostredí neobjavia bubliny.
- Nie je zistené vytekanie skúšobnej látky (za vytekanie sa nepovažuje unikanie preukázateľne spôsobené netesnosťou armatúr)

Výsledky prvej tlakovej skúšky sa uvedú do protokolu a zapíšu do pasportu. [1]

2.7. Destilácia

Základ procesu rektifikačnej destilácie v kolóne a základné termíny sú opísané v časti 1.Úvod. Existuje viac druhov destilácií, ktoré môžeme rozdeliť na dva základné, jednoduchú a rektifikačnú destiláciu. Pri jednoduchej destilácii sa pary vzniknuté v kotli odvádzajú do kondenzátoru a nestretávajú sa s vriacou kvapalinou. Takáto destilácia sa označuje aj ako jednostupňová. Pri rektifikácii sa pary z kotla protiprúdne stretávajú s kondenzátom, a teda sa obohacujú o ďalšiu prchavú zložku, takáto destilácia sa označuje aj ako viacstupňová. Jednoduchá aj rektifikačná destilácia sa z hľadiska prevádzky rozdeľujú na kontinuálnu (nepretržitú) a periodickú (pretržitú). Väčšina veľkoprevádzkových destilácií je nepretržitá, naopak v laboratóriách sa najviac využíva periodická destilácia. [5][6]

• Jednoduchá kontinuálna destilácia

Pri jednoduchej nepretržitej destilácii sa privádzaný nástrek ohreje a následne sa čiastočne odparuje. Vznikajúca para sa odlučuje od zvyšnej kvapaliny väčšinou vo valcovej tzv. uvoľňovacej nádobe, pričom odchádza destilačný zvyšok. Táto operácia sa deje za nepretržitej prevádzky a v jednom stupni. Tento spôsob destilácie sa vzhľadom na zlú deliacu účinnosť používa len ako pomocná operácia. [5][6]

• Jednoduchá periodická destilácia

Pri jednoduchej periodickej destilácii sa všetok nástrek napustí do kotla. Následným zahriatím vznikne para, ktorá je z kotla odoberaná. Para následne kondenzuje a vzniknutý kondenzát je možné rozdeliť na jednotlivé frakcie postupným zachytávaním do oddelených nádob. U tohto spôsobu destilácie sa dosahuje lepšej účinnosti delenia ako u jednostupňovej nepretržitej destilácie. Jednostupňová periodická destilácia sa využívala v počiatoch rozvoja ropných rafinérií, momentálne sa tento spôsob destilácie nevyužíva. [5][6]

- **Kontinuálna rektifikácia**

Kontinuálna rektifikácia sa uskutočňuje vo vertikálnej kolóne. Rektifikačná kolóna je rozdelená na jednotlivé stupne, v ktorých sa stretáva vriaca kvapalina s parou. Para prúdi jednotlivými poschodiami nahor do kondenzátora, kde sa skvapalňuje a vzniknutá kvapalina sa rozdelí na dve zložky. Jedna zložka sa vracia cez reflux späť do kolóny, a druhá zložka sa odvádza ako destilát. Kvapalina prúdiaca do kotla sa pridanou energiou čiastočne odparuje a vzniknutá para sa vracia späť do kolóny, pričom kvapalný zvyšok sa z kotla odvádza mimo kolóny. Na každom poschodí dochádza k výmene tepla stykom oboch fáz, pričom je vrstva kvapaliny prebublávaná parou. Keď sa dosiahne na poschodí rovnováha, tak kvapalina a para odchádzajúca z poschodia majú zloženie zodpovedajúce fázovej rovnováhe. Rektifikácia je veľmi účinná metóda delenia, ktorou je možné doceliť rozdelenie zmesi na jednotlivé zložky požadovanej čistoty. S rastúcou čistotou produktu sa však zvyšujú náklady na výrobu aparátu. [5][6][7]

- **Periodická rektifikácia**

Pri periodickej rektifikácii sa na začiatku každej periódy – varu privedie nástrek do kotla. Celá kolóna pracuje ako obohacovacia časť rektifikačnej kolóny. Postupne sa odparuje zmes a tým klesá množstvo prchavejšej zložky, čím sa menia pracovné podmienky. V praxi sa prevádzka periodickej rektifikačnej kolóny deje pri konštantnom zložení destilátu alebo s konštantným refluxným pomerom. Periodická rektifikácia sa využívala pri spracovaní ropy a na výrobu chemikálií. Postupne sa od tohto spôsobu upúšťa, a má menšie využitie v chemickom priemysle. [5][6] .

- **Azeotropná destilácia**

Azeotropná destilácia nastáva u azeotropnej zmesi. Azeotropná zmes má rovnovážny bod, pri ktorom je zloženie pár rovnaké ako zloženie vriacej kvapaliny. Existujú azeotropné zmesi s minimálnym a maximálnym bodom varu. Azeotropnú zmes nie je možné úplne rozdeliť ani jednoduchou ani rektifikačnou destiláciou. Destiláciou takejto zmesi sa vždy získa na jednej strane kolóny zmes azeotropného zloženia. V praxi sa využíva azeotropná destilácia pri odstraňovaní vody z niektorých rozpúšťadiel alebo reakčných zmesí. [5][6]

2.8. Vnútorne súčasti destilačných kolón

Vnútorne súčasti destilačných kolón slúžia na zväčšenie medzifázovej plochy, v ktorej dochádza k zdieľaniu pracovných látok pri destilácii. Čím väčšia je medzifázová plocha, tým má kolóna lepšiu deliacu účinnosť. Existuje viacero druhov vnútorných súčastí, hlavnými konštrukčnými typmi sú poschodia, výplne a náplne. [5][6]

2.8.1. Destilačné poschodia

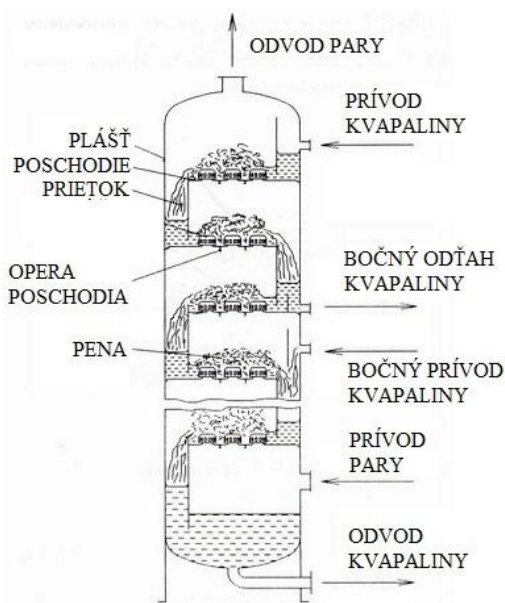
Destilačné poschodia sú vodorovné dosky s otvormi umiestnené v kolóne v určitých vzdialenostiach nad sebou. Úlohou poschodia je zadržať vrstvu stekajúcej kvapaliny určitej výšky a zabezpečiť aby kvapalinou prechádzala nahor prúdiaca para. Konštrukčné riešenie poschodí z hľadiska vzájomného toku pracovných látok môže byť dvojaké, buď kvapalina tečie rovnakými otvormi ako para, vtedy ide o bezprepadoú konštrukciu. Alebo sa jedná o tzv. krížový tok (Obr. 2.3). [5][6]

Pri krížovom toku kvapalina tečie naprieč jednotlivými poschodiami. Na konci poschodia je hrádza, ktorá zaisťuje požadovanú výšku vrstvy kvapaliny na poschodí. Kvapalina musí mať vyššiu hladinu ako vrchol hrádze, aby následne cez prepád pretiekla na nižšie poschodie. Plocha prepádu je často sklonená smerom k stene kolóny. Aby kvapalina tiekla naprieč poschodím je potrebná určitá hnacia sila, tou je gradient kvapaliny naprieč poschodím. Para prechádza kolónou od päty smerom k hlave kolóny, pričom prechádza vrstvou kvapaliny tečúcou jednotlivými poschodiami. Prevzdušením kvapaliny parou vzniká vrstva peny, ktorej hladina stúpa, až sa rýchlosť jej tvorby nevyrovná rýchlosti jej rozpadu. Väčšina priemyslových kolón pracuje na princípe krížového toku. [5][6]

Jednotlivé poschodia majú rôzne modifikácie, k hlavným typom patria klobúčikové, sieťové, ventilové a tunelové poschodia. [5][6]

- **Klobúčikové poschodia**

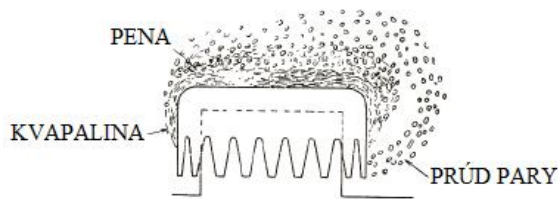
Klobúčikové poschodia sú dosky vybavené otvormi s priemerom niekoľko centimetrov, komínkom, a klobúčikom. Používajú sa v kolónach s krížovým tokom. Na poschodí je množstvo klobúčikov usporiadaných v rade za sebou, pričom ich vzájomná orientácia je štvorcová alebo trojuholníková. Klobúčikové poschodie je zobrazené na Obr. 2.4. Klobúčik počas prevádzky je na Obr. 2.5. Komínok je prikrytý klobúčikom v tvare zvonku. Klobúčik usmerňuje tok pary smerom dole, teda do kvapaliny na poschodí. Spodná časť klobúčika má otvory, alebo výrezy. Horná časť každého výrezu nasáva zmes pary a kvapaliny, pričom para, ktorá opúšťa klobúčik spôsobuje striekanie kvapaliny medzi klobúčikmi, a dochádza tak k peneniu. V priestore nad klobúčikom sa pena rozkladá, pri tom kvapalina padá na povrch klobúčika a ďalšia pena tečie do



Obr. 2.3 Kolóna s krížovým tokom [6]



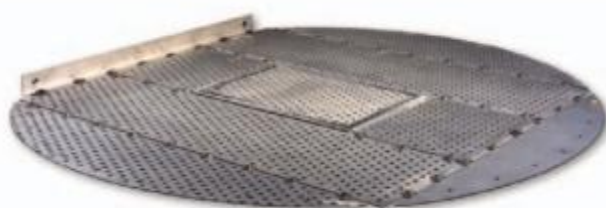
Obr. 2.4 Klobúčikové poschodie [13]



rozkladacieho priestoru. Kvapalina steká z povrchu klobúčika po jeho stenách a zase je strhnutá parou prúdiacou nahor. Výhodou klobúčikových poschodí je vysoká účinnosť, nevýhodou je ich vysoká cena. [5][6][15]

Obr. 2.5 Klobúčik počas prevádzky [5]

- **Sieťové poschodia**



Obr. 2.6 Sieťové poschodie [13]

Sieťové poschodia (Obr. 2.6) sú ploché dosky s množstvom kruhových otvorov. Prietok pary poschodím je regulovaný množstvom a veľkosťou otvorov. Sieťové poschodia sa používajú aj pre nástriky, ktoré vytvárajú tuhé nánosy alebo polymerujú v kolóne, vtedy sa použijú väčšie otvory aby nebolo potrebné časté čistenie poschodí. Výhodami sú

jednoduchá konštrukcia, nízke náklady na údržbu, nevýhodou ostáva malá flexibilita k meniacim sa zaťaženiám. [5][15]

- **Ventilové poschodia**

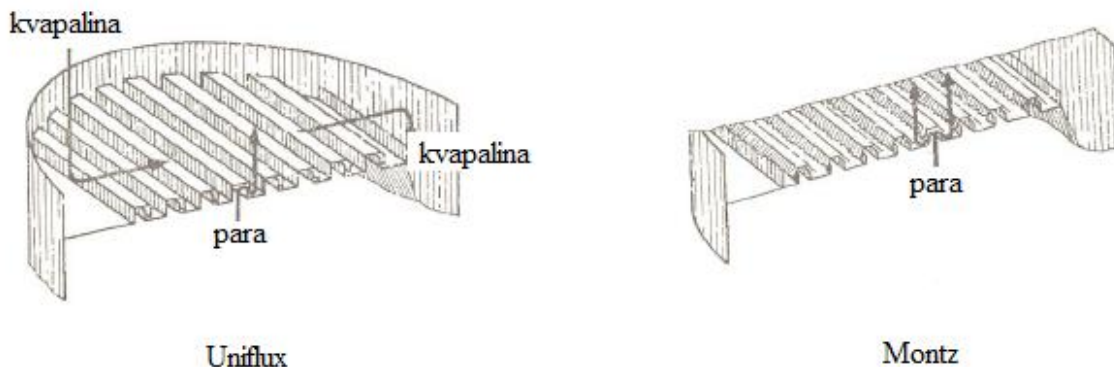
Ventilové poschodia sú perforované otvormi s pohyblivými ventilmi. Vyrába sa veľa typov a obmien ventilov s podobnou konštrukciou, a odlišným druhom uchytenia. Príklad pohyblivých ventilov je na Obr. 2.7. Ventily sa pohybujú vo zvislom smere čím umožnia prúdenie pár poschodím. Veľkosť zdvihnutia ventilu je ovplyvnená rýchlosťou pary. Čím prúdi para rýchlejšie, tým viac sa ventil zdvihne. Využívajú sa v procesoch, v ktorých para neprúdi kontinuálne, resp. keď je malý prietok pár, aby neumožnili kvapaline stekať na nižšie poschodie. Výhodou sú výborný kontakt kvapaliny s parou, a oproti sieťovým poschodiám majú ventilové poschodia vyššiu flexibilitu a zvládnu vyššie zaťaženie. [5][15]



Obr. 2.7 Druhy pohyblivých ventilov [13]

- **Tunelové poschodia**

Tunelové poschodia pracujú na obdobnom princípe ako klobúčikové poschodia. Na poschodí sú prichytené buď diely tvaru S, ktoré sa prekladajú cez seba, takéto poschodia sa označujú Uniflux. Diely tvaru U, ktoré sú striedavo a obrátene prichytené k sebe sa označujú Montz. Typy tunelových poschodí sú na Obr. 2.8. Konštrukcia tunelových poschodí je výrobne lacnejšia a ich údržba jednoduchšia ako pri klobúčkových poschodiach. [5]



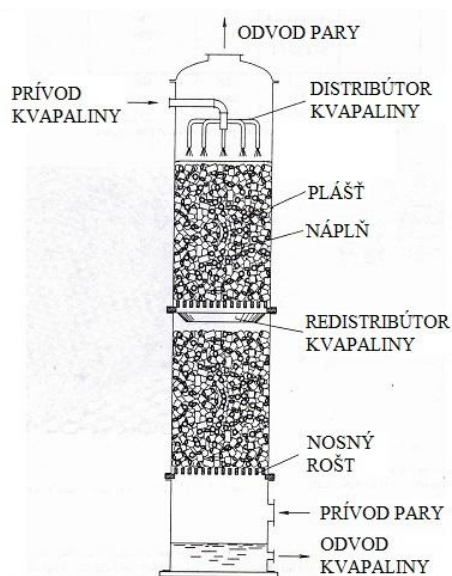
Obr. 2.8 Typy tunelových poschodí [5]

2.8.2. Destilačné náplne a výplne

Úlohou náplní a výplní je tvorba povrchu, po ktorom steká kvapalina, pričom je obklopená stúpajúcou parou. Konštrukcia destilačnej kolóny s náplňou je na Obr. 2.8. Distribútor kvapaliny sa používa v kolónach s náplňami a výplňami, aby sa nevytvorili kanály v kolóne, a aby sa kvapalina rovnomerne rozdelila a prúdila celým prierezom kolóny. [6][5]

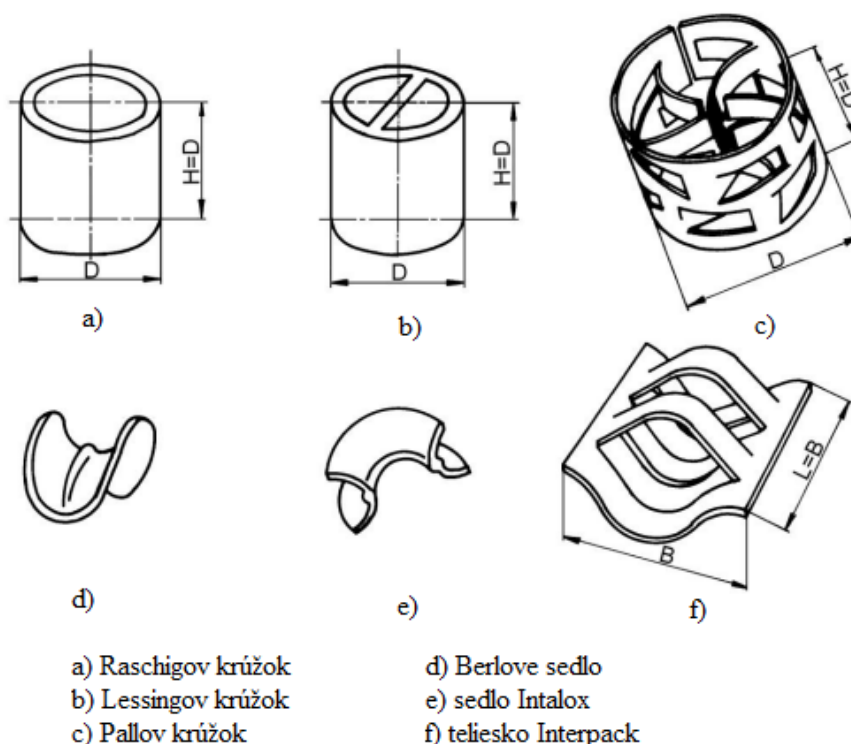
- **Náplne**

Náplne destilačných kolón pozostávajú z veľkého množstva teliesok tvoriacich náplňovú vrstvu. Vrstva náplne môže byť do kolóny voľne sypaná, alebo jednotlivé telieska môžu tvoriť pravidelne uloženú vrstvu. Náhodne sypané telieska sa môžu blokovať navzájom a tým klesá účinnosť kolóny. Telieska sa umiestňujú na nosné poschodie a medzi jednotlivé vrstvy náplne sa niekedy dávajú pridržovacie poschodia, aby sa pri pohybe vrstvy náplne následne nepopraskali samotné telieska. Otvory nosného aj pridržovacieho poschodia musia byť dostatočne veľké na to, aby para a kvapalina mohli voľne prúdiť, teda aby sa nezahltla kolóna, a dostatočne malé, aby sa cez ne neprepadli jednotlivé náplňové telieska. [5][16]



Obr. 2.8 Konštrukcia náplňovej destilačnej kolóny [6]

Náplňové telieska majú rôzne tvary a rozmery. Pri náplňových telieskach sa zo znižovaním ich rozmerov zvyšuje deliaca účinnosť kolóny. Niektoré druhy náplní sú na Obr. 2.9.



Obr. 2.9 Druhy náplňových teliesok [17]

Náplňové telieska sa rozdeľujú na krúžky a sedlá. Krúžky majú výšku rovnú priemeru, a sú bez vnútornej súčasti (Raschigov krúžok), alebo s vnútornou súčastou (Lessingov krúžok). Vnútorné súčasti zvyšujú ich povrch a pevnosť. Pallove krúžky majú v stenách vyrazené otvory ohnuté dovnútra, čím sa tiež vytvorí dodatočný povrch. Zväčšením povrchu krúžku sa zvyšuje jeho účinnosť. Sedlá majú výhodu oproti krúžkom vo vzájomnom viazaní sa na seba, a preto pôsobia menším bočným tlakom na steny kolóny. Nevýhodou sediel je ich vyššia cena. [5][16]

- **Výplne**

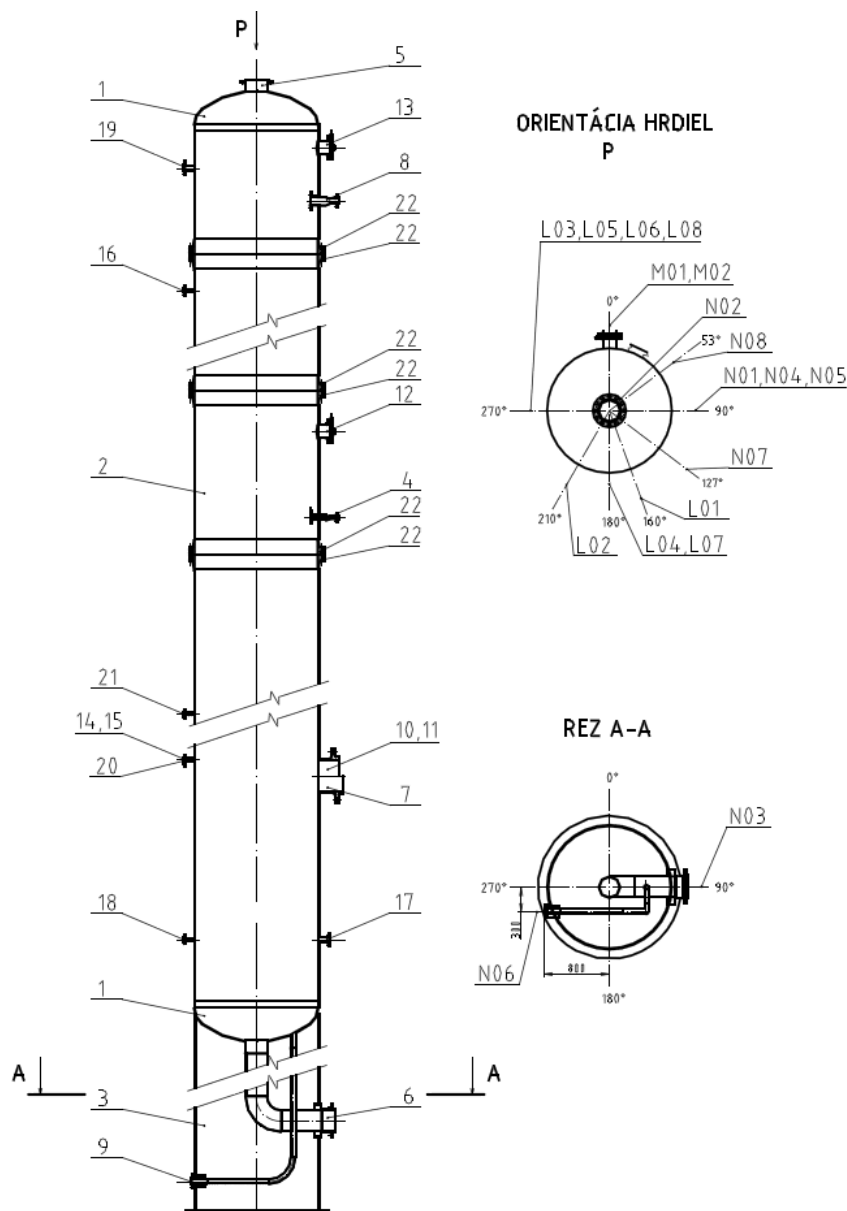
Výplň pozostáva z vedľa seba usporiadaných listov ohnutého plechu. Jednotlivé listy sú umiestnené v radách striedavo, a tým sa vytvoria priestupné otvory. Plechy majú rôzne prevedenia a sú zhotovené z rôznych materiálov. Výplne sú poukladané v kolóne na seba ako jednotlivé rošty (Obr. 2.10), alebo je výplň súvislá. [5][17]



Obr. 2.10 Rošty výplne poukladané na seba [13]

3. Pevnostný výpočet

Pevnostný výpočet destilačnej kolóny (Obr. 3.1) je spracovaný pomocou normy ČSN EN 13445 – 3. Pre výpočet bola dodaná technická špecifikácia, návrhový výkres a datasheet. Tvar a parametre tlakovej nádoby sú dané a výpočtom je spracovaná kontrola hlavných častí zaťažených vnútorným tlakom. Výpočet je spracovaný pre valcový plášť, torosférické dno, otvory v škrupine, hrdlá, príruby a valcový podstavec. Výpočet je spracovaný pre podmienky prevádzky a tlakovej skúšky.



Obr. 3.1 Destilačná kolóna: 1 – Torosférické dno; 2 – Válcový plášť; 3 – Válcový podstavec; 4 – Hrdlo N01; 5 – Hrdlo N02; 6 – Hrdlo N03; 7 – Hrdlo N04; 8 – Hrdlo N05; 9 – Hrdlo N06; 10 – Hrdlo N07; 11 – Hrdlo N08; 12 – Hrdlo M01; 13 – Hrdlo M02; 14 – Hrdlo L01; 15 – Hrdlo L02; 16 – Hrdlo L03; 17 – Hrdlo L04; 18 – Hrdlo L05; 19 – Hrdlo L06; 20 – Hrdlo L07; 21 – Hrdlo L08; 22 – Príruba

3.1. Vstupné dáta

Tab. 3.1.1 Vstupné dáta

Názov	Značka	Hodnota		Jednotka
Výpočtová teplota	t_v	180		°C
Výpočtový tlak	P_v	0,25		MPa
Najvyšší dovolený tlak nádoby	P_s	0,65		MPa
Korózný prídavok	c	0		mm
Súčiniteľ zvarového spoja	z	Prevádzka	Skúška	
		0.85	1	-

Tab. 3.1.2 Použité materiály

Časť nádoby	Materiál
Valcový plášť	X6CrNiTi 18-10 (AISI 321)
Torosférické dno	X6CrNiTi 18-10 (AISI 321)
Hrdlá	X6CrNiTi 18-10 (AISI 321)
Valcový podstavec	X6CrNiTi 18-10 (AISI 321)
Príruby	X6CrNiTi 18-10 (AISI 321)
Škrutky	SA 320 GrL7 (AISI 4140)

3.2. Maximálna prípustná hodnota dovoleného namáhania tlakových častí

Tab. 3.2.1 Zoznam použitých symbolov

Značka	Popis	Jednotka
f_a	Maximálna hodnota dovoleného namáhania pre bežné prevádzkové zaťaženie pri skúšobnej teplote	MPa
f_d	Maximálna hodnota dovoleného namáhania pre bežné prevádzkové zaťaženie	MPa
f_{test}	Maximálna hodnota dovoleného namáhania pre skúšobné zaťaženie	MPa
R_m	Minimálna medza pevnosti v ťahu	MPa
$R_m / test$	Minimálna medza pevnosti v ťahu pre skúšobné zaťaženie	MPa
$R_{p1,0} / t$	Minimálna zmluvná medza klzu 1 % pri teplote t °C	MPa
$R_{p1,0} / test$	Minimálna zmluvná medza klzu 1 % pre skúšobné zaťaženie	Mpa

Tab. 3.2.2 Vstupné hodnoty

Značka	Hodnota		Jednotka
R_m / t	510		MPa
$R_m / test$	510		MPa
$R_{p1,0} / t$	Pre prevádzkovú teplotu	Pre skúšobnú teplotu	MPa
	190	225	MPa
$R_{p1,0} / test$	235		MPa

Hodnoty dovoleného namáhania sú vypočítané podľa nasledujúcich vzťahov pre austenitické oceli s ťažnosťou $A \geq 35 \%$.

- Pre prípady normálneho prevádzkového zaťaženia:

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

- Pre prípady skúšobného zaťaženia:

$$f_{test} = \max \left(\frac{R_{p1,0}/test}{1,05}; \frac{R_m/test}{2} \right) \quad (2.)$$

- Pre prípady normálneho prevádzkového zaťaženia uvažované pri skúšobnej teplote:

$$f_a = \left[\max \left(\frac{R_{p1,0}/t}{1,5} \right); \min \left(\frac{R_{p1,0}/t}{1,2}; \frac{R_m/t}{3} \right) \right] \quad (3.)$$

Maximálne hodnoty dovoleného namáhania častí destilačnej kolóny pri jednotlivých druhoch zaťaženia sú uvedené v Tab. 3.2.3.

Tab. 3.2.3 Maximálne hodnoty dovoleného namáhania

Časť nádoby	Maximálna hodnota dovoleného namáhania			Jednotka
	f_d	f_{test}	f_a	
Valcový plášť	158,33	255	170	MPa
Torosférické dná	158,33	255	170	MPa
Hrdlá	158,33	255	170	MPa
Valcový plášť	158,33	255	170	MPa
Príruby	158,33	255	170	MPa

3.3. Skúšobný tlak

Tab. 3.3.1 Zoznam použitých symbolov

Značka	Popis	Jednotka
D_i	Vnútorňý priemer škrupiny	m
f_a	Dovolené namáhanie pre normálne prípady prevádzkového zaťaženia materiálu pri skúšobnej teplote	MPa
f_{Td}	Dovolené namáhanie pre normálne prípady prevádzkového zaťaženia materiálu pri najvyššej dovolenej teplote	MPa
g	Tiažové zrýchlenie	$m \cdot s^{-2}$
P_v	Výpočtový tlak	MPa
$P_{hydtest}$	Maximálny hydrostatický tlak počas hydrostatickej skúšky	MPa
P_s	Najvyšší dovolený tlak nádoby	MPa
P_t	Skúšobný tlak meraný v najvyššom bode nádoby v skúšobnej polohe	MPa
P_{t1}	Skúšobný tlak 1	MPa
P_{t2}	Skúšobný tlak 2	MPa
P_{tmax}	Maximálny skúšobný tlak	MPa
P_{tmod}	Upravený skúšobný tlak	MPa
ρ	Hustota skúšobnej kvapaliny	$kg \cdot m^3$

Tab. 3.3.2 Vstupné hodnoty

Značka	Hodnota	Jednotka
D_i	1,5	m
f_{Td}	158,33	MPa
g	9,81	$m \cdot s^{-2}$
P_v	0,25	MPa
P_s	0,65	MPa
ρ	1000	$kg \cdot m^3$

Skúšobný tlak je stanovený ako vyššia z nasledovných hodnôt P_{t1} a P_{t2} :

$$P_{t1} = 1,25 \cdot P_v \cdot \frac{f_a}{f_{Td}} = 0,34 \text{ MPa} \quad (4.)$$

$$P_{t2} = 1,43 \cdot P_s = 0,93 \text{ MPa} \quad (5.)$$

$$P_{tmax} = \max(P_{t1}; P_{t2}) = 0,93 \text{ MPa} \quad (6.)$$

Skúšobný tlak je potrebné navýšiť o hydrostatický tlak spôsobený skúšobnou kvapalinou (voda). Pri skúške bude zariadenie vo vodorovnej polohe.

$$P_{hydtest} = D_i \cdot \rho \cdot g = 14\,715\,Pa = 0,015\,MPa \quad (7.)$$

$$P_{tmod} = P_{tmax} + P_{hydtest} = 0,94\,MPa \quad (8.)$$

Upravený skúšobný tlak častí destilačnej kolóny je uvedený v Tab. 3.3.3.

Tab. 3.3.3 Skúšobné tlaky

Časť nádoby	Skúšobný tlak	Jednotka
	P _{tmod}	
Valcový plášť	0,94	MPa
Torosférické dná	0,94	MPa
Hrdlá	0,94	MPa
Valcový podstavec	0,94	MPa
Príruby	0,94	MPa

3.4. Škrupiny zaťažené vnútorným tlakom

3.4.1. Valcová škrupina

Tab. 3.4.1.1 Zoznam použitých symbolov

Značka	Popis	Jednotka
c	Korózný prídavok	mm
D _e	Vonkajší priemer škrupiny	mm
D _i	Vnútorný priemer škrupiny	mm
D _m	Stredný priemer škrupiny	mm
e	Požadovaná hrúbka steny pri prevádzkovom zaťažení	mm
e _a	Analyzovaná hrúbka	mm
e _n	Zvolená hrúbka steny	mm
f	Maximálna hodnota dovoleného namáhania pri prevádzkovom zaťažení	MPa
P _{max}	Maximálny prípustný tlak pri prevádzkovom zaťažení	MPa
P _{test}	Skúšobný tlak	MPa
P _v	Výpočtový tlak	MPa
z	Hodnota súčiniteľa zvaraného spoja pri prevádzkovom zaťažení	-
δ _e	Absolútna hodnota možnej zápornej tolerancie	mm
Indexy	Popis	
test	Vzťahuje sa k skúšobnému zaťaženiu (spodný index)	

Tab. 3.4.1.1 Vstupné hodnoty

Značka	Hodnota	Jednotka	Značka	Hodnota	Jednotka
c	0	mm	P_{test}	0,94	MPa
D_e	1518	mm	P_v	0,25	MPa
D_i	1500	mm	z	0,85	-
D_m	1509	mm	z_{test}	1	-
f	158,33	MPa	δ_e	1	mm
f_{test}	255	MPa			

Kontroluje sa podmienka výpočtu, minimálna požadovaná hrúbka steny a vypočíta sa maximálny prípustný tlak vo valcovej škrupine.

➤ **Kontrola podmienky**

$$\frac{e}{D_e} \leq 0,16 \qquad 0,0009 \leq 0,16 \qquad (9.)$$

$$\frac{e_{test}}{D_e} \leq 0,16 \qquad 0,0007 \leq 0,16 \qquad (10.)$$

Podmienka je splnená a výpočet prebieha podľa nasledovného postupu.

➤ **Výpočet požadovanej hrúbky steny**

• **Pre prevádzkové podmienky:** (11.)

$$e = \frac{P_v \cdot D_i}{2 \cdot f \cdot z - P_v} = 1,39 \text{ mm}$$

• **Pre skúšobné podmienky:**

$$e_{test} = \frac{P_{test} \cdot D_i}{2 \cdot f_{test} \cdot z_{test} - P_{test}} = 2,78 \text{ mm} \qquad (12.)$$

Minimálna požadovaná hrúbka steny je menšia ako navrhnutá hrúbka podľa výkresu. Zvolená hrúbka steny $e_n = 10 \text{ mm}$ vyhovuje.

Pre výpočet maximálneho tlaku je potrebné vyjadriť analyzovanú hrúbku steny:

$$e_a = e_n - \delta_e - c = 9 \text{ mm} \qquad (13.)$$

➤ **Výpočet maximálneho prípustného tlaku vo valcovej škrupine**

• **Pre prevádzkové podmienky:**

$$P_{max} = \frac{2 \cdot f \cdot z \cdot e_a}{D_m} = 1,61 \text{ MPa} \qquad (14.)$$

• **Pre skúšobné podmienky:**

$$P_{maxtest} = \frac{2 \cdot f_{test} \cdot z_{test} \cdot e_a}{D_m} = 3,04 \text{ MPa} \quad (15.)$$

Maximálny prípustný tlak pre prevádzkové podmienky P_{max} je väčší ako prevádzkový tlak, a maximálny prípustný tlak pre súšobné podmienky $P_{maxtest}$ je väčší ako skúšobný tlak. Navrhnutá geometria vyhovuje.

3.4.2. Torosférické dno

Tab. 3.4.2.1 Zoznam použitých symbolov

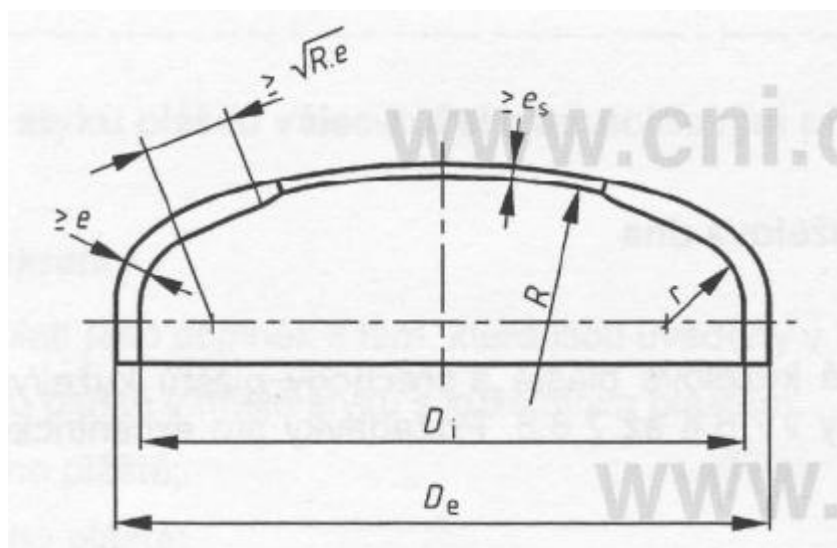
Značka	Popis	Jednotka
D_e	Vonkajší priemer valcového lemu dna	mm
D_i	Vnútorý priemer valcového lemu dna	mm
e	Požadovaná hrúbka steny dna pri prevádzkových podmienkach	mm
e_a	Analyzovaná hrúbka steny dna	mm
e_b	Požadovaná hrúbka steny anuloidového prechodu pre zabránenie plastickému zrúteniu pri prevádzkovom zaťažení	mm
e_n	Zvolená hrúbka steny	mm
e_s	Požadovaná hrúbka steny dna pre obmedzenie membránového napätia v strednej časti dna pri prevádzkovom zaťažení	mm
e_y	Požadovaná hrúbka steny anuloidového prechodu pre zabránenie axiálne symetrickej deformácie pri prevádzkovom zaťažení	mm
f	Maximálna hodnota dovoleného namáhania pri prevádzkovom zaťažení	MPa
f_b	Výpočtové napätie pre výpočtový vzorec plastického zrútenia pri prevádzkovom zaťažení	MPa
P_v	Výpočtový tlak	MPa
P_b	Maximálny prípustný tlak pre zabránenie plastickému zrúteniu pri prevádzkovom zaťažení	MPa
P_{max}	Maximálny prípustný tlak pri prevádzkovom zaťažení	MPa
P_s	Maximálny prípustný tlak pre obmedzenie membránového napätia v strednej časti dna pri prevádzkovom zaťažení	MPa
P_{test}	Skúšobný tlak	MPa
P_y	Maximálny prípustný tlak pre zabránenie axiálne symetrickej deformácie pri prevádzkovom zaťažení	MPa
R	Zvolený vnútorný polomer guľovej strednej časti torosférického dna	mm
r	Zvolený vnútorný polomer krivosti anuloidového prechodu	mm
$R_{p0.2t}$	Zmluvná medza klzu 0,2 % pri návrhovej teplote 180°C	MPa
z	Súčiniteľ hodnoty zvarového spoja pri prevádzkovom zaťažení	-

β_t	Súčiniteľ beta pri návrhu hrúbky dna pri prevádzkovom zaťažení	-
β_u	Súčiniteľ beta pri únosnosti dna pri prevádzkovom zaťažení	-
δ_e	Absolútna hodnota možnej zápornej tolerancie	mm

Indexy

Popis

test	Vzťahuje sa k skúšobnému zaťaženiu (spodný index)
------	---



Obr. 3.4.2.1 Geometria torosférického dna [2]

Tab. 3.4.3 Vstupné hodnoty

Značka	Hodnota	Jednotka	Značka	Hodnota	Jednotka
D_e	1518	mm	r	250	mm
D_i	1500	mm	R	1100	mm
e	2,29	mm	$R_{p0,2t}$	161	MPa
e_a	9	mm	$R_{p0,2ttest}$	190	MPa
e_n	10	mm	z	0,85	-
e_{test}	4,16	mm	z_{test}	1	MPa
f	158,33	MPa	β_t	0,76	-
f_b	107,33	MPa	β_{ttest}	0,74	-
f_{btest}	180,95	MPa	β_u	0,65	-
f_{test}	255	MPa	β_{utest}	0,65	
P_{test}	0,94	MPa	δ_e	1	mm
P_v	0,25	MPa			

Kontroluje sa podmienka výpočtu, minimálna požadovaná hrúbka steny a vypočíta sa maximálny prípustný tlak pre danú geometriu.

➤ **Kontrola podmienky**

$$r \leq 0,2 \cdot D_i \quad 250 \leq 300 \quad (16.)$$

$$r \geq 0,06 \cdot D_i \quad 250 \geq 90 \quad (17.)$$

$$r \geq 2 \cdot e \quad 250 \geq 4,58 \quad (18.)$$

$$r \geq 2 \cdot e_{test} \quad 250 \geq 8,32 \quad (19.)$$

$$e \leq 0,08 \cdot D_e \quad 2,29 \leq 121,44 \quad (20.)$$

$$e_{test} \leq 0,08 \cdot D_e \quad 4,16 \leq 121,44 \quad (21.)$$

$$e_a \geq 0,001 \cdot D_i \quad 9 \geq 1,518 \quad (22.)$$

$$R \leq D_e \quad 1100 \leq 1518 \quad (23.)$$

Podmienka je splnená, výpočet prebieha podľa nasledovného postupu. Určenie potrebných parametrov na výpočet minimálnej požadovanej hrúbky steny dna a maximálneho prípustného tlaku β_t , β_{ttest} , β_u , β_{utest} a hodnôt výpočtového napätia pre výpočtový vzorec plastického zrútenia f_b a f_{btest} je uvedené v prílohe č.3 – CD-Rom, ktorá obsahuje výpočet v programe MAPLE.

➤ **Výpočet požadovanej hrúbky steny dna**

• **Pre prevádzkové podmienky** je požadovaná hrúbka dna e najväčšia z hrúbok e_s , e_y , e_b :

$$e_s = \frac{P \cdot R}{2 \cdot f \cdot z - 0,5 \cdot P} = 1,02 \text{ mm} \quad (24.)$$

$$e_y = \frac{\beta_t \cdot P \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i)}{f} = 1,35 \text{ mm} \quad (25.)$$

$$e_b = (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i) \cdot \left[\frac{P}{111 \cdot f_b} \cdot \left(\frac{D_i}{r} \right)^{0,825} \right]^{\left(\frac{1}{1,5} \right)} = 2,29 \text{ mm} \quad (26.)$$

$$e = \max(e_s; e_y; e_b) = 2,29 \text{ mm} \quad (27.)$$

• **Pre skúšobné podmienky** je požadovaná hrúbka dna e_{test} najväčšia z hrúbok e_{stest} , e_{ytest} , e_{btest} :

$$e_{stest} = \frac{P_{test} \cdot R}{2 \cdot f_{test} \cdot z_{test} - 0,5 \cdot P_{test}} = 2,02 \text{ mm} \quad (28.)$$

$$e_{ytest} = \frac{\beta_{ttest} \cdot P_{test} \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i)}{f_{test}} = 3,08 \text{ mm} \quad (29.)$$

$$e_{btest} = (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i) \cdot \left[\frac{P_{test}}{111 \cdot f_{btest}} \cdot \left(\frac{D_i}{r} \right)^{0,825} \right]^{\left(\frac{1}{1,5} \right)} = 3,93 \text{ mm} \quad (30.)$$

$$e_{test} = \max(e_{stest}; e_{ytest}; e_{btest}) = 3,93 \text{ mm} \quad (31.)$$

Minimálna požadovaná hrúbka steny dna je menšia ako navrhnutá hrúbka podľa výkresu. Zvolená hrúbka steny dna $e_n = 10 \text{ mm}$ vyhovuje.

Pre výpočet maximálneho tlaku je potrebné vyjadriť analyzovanú hrúbka steny dna:

$$e_a = e_n - \delta_e - c = 9 \text{ mm} \quad (32.)$$

➤ **Výpočet maximálneho prípustného tlaku**

- **Pre prevádzkové podmienky** je maximálny prípustný tlak P_{max} najmenšia z hodnôt P_s , P_y , P_b :

$$P_s = \frac{2 \cdot f \cdot z \cdot e_a}{R + 0,5 \cdot e_a} = 2,19 \text{ MPa} \quad (33.)$$

$$P_y = \frac{f \cdot e_a}{\beta_u \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i)} = 1,95 \text{ MPa} \quad (34.)$$

$$P_b = 111 \cdot f_b \cdot \left(\frac{e_a}{0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{r}{D_i} \right)^{0,825} = 0,65 \text{ MPa} \quad (35.)$$

$$P_{max} = \min(P_s; P_y; P_b) = 0,65 \text{ MPa} \quad (36.)$$

- **Pre skúšobné podmienky** je maximálny prípustný tlak $P_{maxtest}$ najmenšia z hodnôt P_{stest} , P_{ytest} , P_{btest} :

$$P_{stest} = \frac{2 \cdot f_{test} \cdot z_{test} \cdot e_a}{R + 0,5 \cdot e_a} = 4,16 \text{ MPa} \quad (37.)$$

$$P_{ytest} = \frac{f_{test} \cdot e_a}{\beta_{utest} \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i)} = 3,14 \text{ MPa} \quad (38.)$$

$$P_b = 111 \cdot f_{btest} \cdot \left(\frac{e_a}{0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{r}{D_i} \right)^{0,825} = 1,09 \text{ MPa} \quad (39.)$$

$$P_{maxtest} = \min(P_{stest}; P_{ytest}; P_{btest}) = 1,09 \text{ MPa} \quad (40.)$$

Maximálne prípustné tlaky P_{max} a $P_{maxtest}$ sú väčšie ako dovolené tlaky a navrhnutá geometria dna vyhovuje.

3.5. Otvory v škrupinách

Výpočet otvorov je rozdelený na 3 podkapitoly, ktoré sa líšia postupom z dôvodu umiestnenia hrdiel. V jednotlivých podkapitolách je uvedený vzorový postup výpočtu pre 1 hrdlo, výpočet ostatných hrdiel v danej podkapitole prebieha podľa vzorového postupu. Všetky výpočty sú uvedené v prílohe č.3 – CD-Rom, ktorá obsahuje výpočet v programe MAPLE. Hrdlá označené L slúžia ako rezervy, alebo na meranie tlaku a teploty. Hrdlá označené M sú kontrolné hrdlá, a hrdlá označené N slúžia na vstup alebo výstup média. Konkrétne popisy jednotlivých hrdiel sú vyznačené v prílohe č.2.

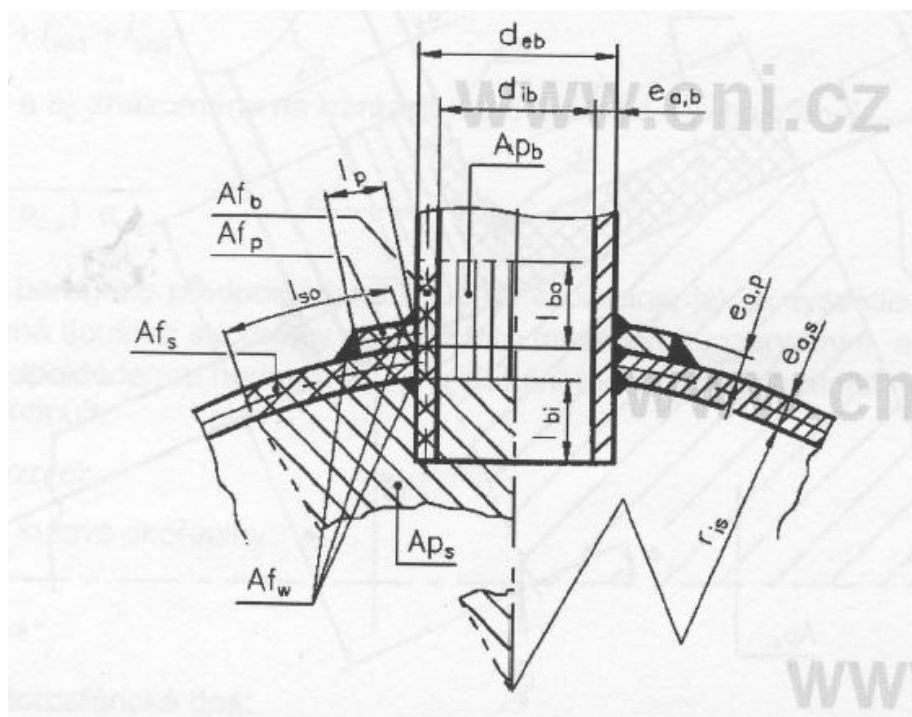
Tab. 3.5.1 Zoznam použitých symbolov

Značka	Popis	Jednotka
a_1, a_2	Hodnoty a na strane mostíka otvorov	mm
A_f	Nosná plocha priečneho prierezu účinná ako vystuženie	mm ²
$A_{f_{L_s}}$	A_f škrupiny pozdĺž dĺžky L_b	mm ²
A_{f_w}	Priečna plocha prierezu kútového zvaru medzi hrdlom a škrupinou	mm ²
$A_{p_{L_s}}$	A_p škrupiny pre dĺžku L_b	mm ²
A_p	Plocha zaťažaná tlakom	mm ²
A_{p_φ}	Dodatočná zaťažaná plocha pre spoje šikmých hrdiel ako funkcia uhlu φ	mm ²
d	Priemer otvoru, alebo vnútorný priemer hrdla	mm
D_e	Vonkajší priemer valcovej škrupiny alebo valcovej časti torosférického dna	mm
e_a	Analyzovaná hrúbka steny	mm
e	Efektívna hrúbka steny	mm
e_{cs}	Predpokladaná hrúbka steny škrupiny	mm
f	Dovolené namáhanie materiálu	MPa
l'_b	Efektívna vystužujúca dĺžka vonkajšej časti hrdla škrupiny	mm
l'_{bi}	Efektívna vystužujúca dĺžka vnútornej časti hrdla	mm
l'_p	Efektívna vystužujúca šírka výstužného goliera	mm
l'_s	Efektívna vystužujúca dĺžka škrupiny	mm
L_b	Vzdialenosť stredov 2 otvorov alebo hrdiel meraná na strednici škrupiny	mm
l_b	Dĺžka vonkajšej časti hrdla škrupiny	mm
l_{bo}	Maximálna vystužujúca dĺžka vonkajšej časti hrdla	mm
l_{bi}	Dĺžka vnútornej časti hrdla škrupiny	mm
l_p	Šírka výstužného goliera	mm
l_s	Dĺžka škrupiny medzi okrajom otvoru alebo vonkajším priemerom hrdla a škrupinovou diskontinuitou	mm

l_{so}	Maximálna vystužujúca dĺžka škrupiny meraná na strednici steny škrupiny	mm
P	Tlak	MPa
r_{is}	Vnútny polomer krivosti škrupiny v mieste stredu otvoru	mm
r_{ms}	Stredný priemer škrupiny	mm
w	Vzdialenosť medzi vonkajším priemerom hrdla a diskontinuitou škrupiny	mm
w_{min}	Požadovaná minimálna hodnota w	mm
Φ	Uhol medzi spojnicou dvoch stredov hrdiel a tvoriacou priamkou valcovej škrupiny	°

Indexy	Popis
b	Vzťahuje sa k hrdlu (spodný index)
e	Vzťahuje sa k vonkajšej strane alebo vonkajšiemu rozmeru (spodný index)
i	Vzťahuje sa k vnútornej strane alebo vnútornému rozmeru (spodný index)
p	Vzťahuje sa k výstužnému golieru (spodný index)
s	Vzťahuje sa k škrupine (spodný index)
t	Vzťahuje sa k skúšobným podmienkam (spodný index)
test	Vzťahuje sa k skúšobným podmienkam (spodný index)
v	Vzťahuje sa k prevádzkovým podmienkam (spodný index)

3.5.1. Hrdlo L01, L07



Obr. 3.5.1.1 Geometria hrdla [2]

Tab. 3.5.1.1 Vstupné hodnoty

Značka	Hodnota	Jednotka	Značka	Hodnota	Jednotka
a₁	16,85	mm	e_{b2}	2,9	mm
a₂	30,15	mm	e_{cs}	9	mm
d	33,7	mm	f_{bt}	255	MPa
D_e	1520	mm	f_{bv}	158,33	MPa
d_{eb}	33,7	mm	f_{pt}	0	MPa
d_{eb1}	33,7	mm	f_{pV}	0	MPa
d_{eb2}	60,3	mm	f_{st}	255	MPa
d_{ib}	28,5	mm	f_{sv}	158,33	MPa
d_{i1}	28,5	mm	l_{b1}	150	mm
d_{i2}	54,5	mm	l_{b2}	150	mm
e_{ab}	2,6	mm	l_{bi1}	0	mm
e_{ap1}	0	mm	l_{bi2}	0	mm
e_{ap2}	0	mm	l_{p1}	0	mm
e_{as}	9	mm	l_{p2}	0	mm
e_{b1}	2,6	mm	Φ	90	°

Kontrolujú sa podmienky výpočtu, určí sa, či je otvor osamotený a v dostatočnej vzdialenosti od diskontinuity a kontroluje sa podmienka vystuženia otvoru.

➤ **Kontrola medze priemerov**

Pre otvory vystužené hrdlami musí platiť nasledujúca podmienka:

$$\frac{d_{ib}}{2 \cdot r_{is}} \leq 1,0 \qquad 0,019 \leq 1,0 \qquad (41.)$$

Hodnota r_{is} je pre valcovú škrupinu daná vzorcom:

$$r_{is} = \frac{D_e}{2} - e_{as} = 751 \text{ mm} \qquad (42.)$$

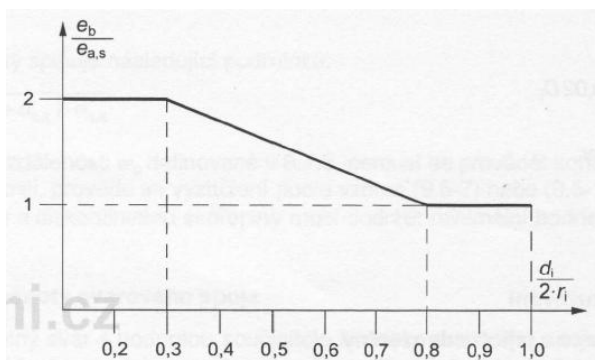
Podmienka medze priemerov je splnená.

➤ **Kontrola medze hrúbiek stien**

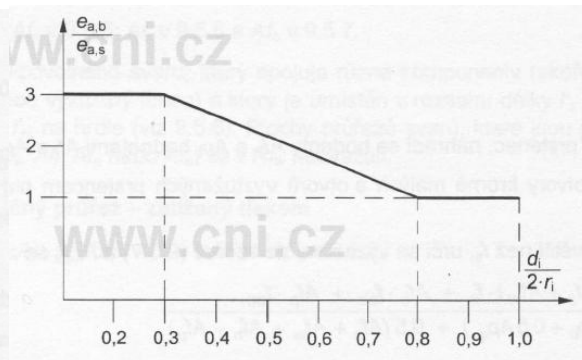
Pomer e_b / e_{as} nesmie prekročiť hodnotu danú diagramom (Obr. 3.5.1.2), a pomer e_{ab} / e_{as} nesmie prekročiť hodnotu danú diagramom (Obr. 3.5.1.3).

$$\frac{e_b}{e_{as}} = 0,29 \qquad \frac{e_{ab}}{e_{as}} = 0,29 \qquad (43.)$$

$$\frac{d_{ib}}{2 \cdot r_{is}} = 0,019$$



Obr. 3.5.1.2 Medza priemerov efektívnej hrúbky hrdiel – pre výpočet [2]



Obr. 3.5.1.3. Medza priemerov skutočnej hrúbky hrdiel – pre výrobu [2]

Podmienka medze hrúbky stien je splnená.

➤ Osamotené otvory

Výpočet potrebných hodnôt r_{is1} , r_{is2} , l_{so1} , l_{so2} , L_b , kde spodný index 1 je označenie pre hrdlo L01 a index 2 je označenie pre hrdlo L07:

$$r_{is1} = r_{is2} = \frac{D_e}{2} - e_{as} = 751 \text{ mm} \quad (44.)$$

$$l_{so1} = l_{so2} = \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_{as}) \cdot e_{as}} = 116,61 \text{ mm} \quad (45.)$$

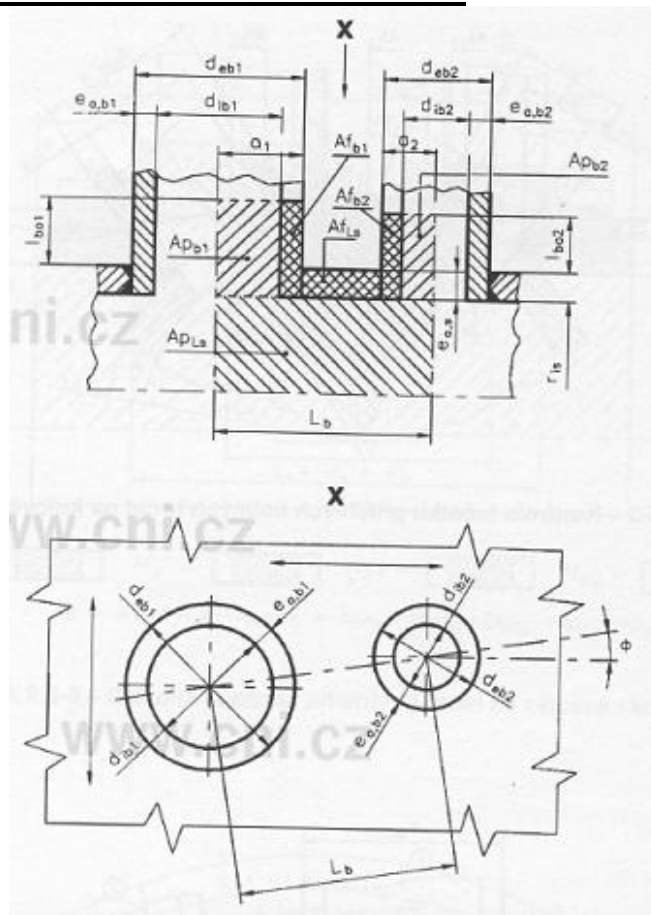
$$L_b = \frac{\pi \cdot D_m}{360} \cdot 20 = 263,24 \text{ mm} \quad (46.)$$

Otvor sa považuje za osamotený, ak je splnená nasledovná podmienka :

$$L_b \geq a_1 + a_2 + l_{so1} + l_{so2} \quad 263,24 \not\geq 280,23 \quad (47.)$$

Podmienka nie je splnená, preto treba skontrolovať mostík priľahlých kolmých hrdiel L01 a L07 (Obr. 3.5.1.4).

➤ **Kontrola mostíka medzi hrdlami L01 a L07**



Obr.3.5.1.4 Kontrola mostíka hrdiel [2]

Mostík medzi hrdlami musí spĺňať nasledovnú podmienku:

$$L_b \geq \max (3 \cdot e_{as} ; 0,2 \cdot \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_{as}) \cdot e_{as}}) \quad (48.)$$

$$263,23 \geq 69,97 \quad (49.)$$

Podmienka pre minimálnu dĺžku mostíka je splnená.

Potrebné hodnoty efektívnych hrúbok e_{p1} , e_{p2} a vystužujúcich dĺžok l_{b01} , l_{b02} , l'_{b1} , l'_{b2} , l'_{bi1} , l'_{bi2} , l'_{p1} , l'_{p2} ku kontrole podmienky dostatočného vystuženia sú určené nasledovne :

$$e_{p1} = \min(e_{ap1} ; e_{as}) = 0 \text{ mm} \quad (50.)$$

$$e_{p2} = \min(e_{ap2} ; e_{as}) = 0 \text{ mm} \quad (51.)$$

$$l_{b01} = \sqrt{(d_{eb} - e_{b1}) \cdot e_{b1}} = 8,99 \text{ mm} \quad (52.)$$

$$l_{b02} = \sqrt{(d_{eb} - e_{b2}) \cdot e_{b2}} = 12,90 \text{ mm} \quad (53.)$$

$$l'_{b1} = \min(l_{b01} ; l_{b1}) = 8,99 \text{ mm} \quad (54.)$$

$$l'_{b2} = \min(l_{b02} ; l_{b2}) = 12,90 \text{ mm} \quad (55.)$$

$$l'_{bi1} = \min(0,5 \cdot l_{b01} ; l_{bi1}) = 0 \text{ mm} \quad (56.)$$

$$l'_{bi2} = \min(0,5 \cdot l_{b02} ; l_{bi2}) = 0 \text{ mm} \quad (57.)$$

$$l_{p1} = \min(l_{so}; l_{p1}) = 0 \text{ mm} \quad (58.)$$

$$l_{p2} = \min(l_{so}; l_{p2}) = 0 \text{ mm} \quad (59.)$$

Dovolené namáhanie materiálu hrdiel a výstužných golierov sú vyrátané týmto spôsobom.

• **Pri prevádzke:**

$$f_{obv1} = \min(f_{sv}; f_{bv}) = 158,33 \text{ MPa} \quad (61.)$$

$$f_{obv2} = \min(f_{sv}; f_{bv}) = 158,33 \text{ MPa} \quad (61.)$$

$$f_{opv1} = \min(f_{sv}; f_{pv}) = 0 \text{ MPa} \quad (62.)$$

$$f_{opv2} = \min(f_{sv}; f_{pv}) = 0 \text{ MPa} \quad (63.)$$

• **Pri skúške:**

$$f_{obt1} = \min(f_{st}; f_{bt}) = 255 \text{ MPa} \quad (64.)$$

$$f_{obt2} = \min(f_{st}; f_{bt}) = 255 \text{ MPa} \quad (65.)$$

$$f_{opt1} = \min(f_{st}; f_{pt}) = 0 \text{ MPa} \quad (66.)$$

$$f_{opt2} = \min(f_{st}; f_{pt}) = 0 \text{ MPa} \quad (67.)$$

Potrebné plochy priečneho prierezu účinné ako vystuženie :

$$Af_{b1} = e_{b1} \cdot (l_{b1} + l_{bi1} + e_{as}) = 46,78 \text{ mm}^2 \quad (68.)$$

$$Af_{b2} = e_{b2} \cdot (l_{b2} + l_{bi2} + e_{as}) = 63,52 \text{ mm}^2 \quad (69.)$$

$$Ap_{LS} = \frac{0,5 \cdot r_{is}^2 \cdot L_b \cdot (1 + \cos \theta)}{r_{is} + 0,5 \cdot e_{as} \cdot \sin \theta} = 54\,264,68 \text{ mm}^2 \quad (70.)$$

$$Af_{LS} = (L_b - a_1 - a_2) \cdot e_{cs} = 1946,13 \text{ mm}^2 \quad (71.)$$

$$Ap_{\varphi 1} = 0 \text{ mm}^2 \quad (72.)$$

$$Ap_{\varphi 2} = 0 \text{ mm}^2 \quad (73.)$$

$$Af_w = 2 \text{ mm}^2 \quad (74.)$$

$$Af_{p1} = e_{p1} \cdot l_{p1} = 0 \text{ mm}^2 \quad (75.)$$

$$Af_{p2} = e_{p2} \cdot l_{p2} = 0 \text{ mm}^2 \quad (76.)$$

$$Ap_{b1} = 0,5 \cdot d_{i1} \cdot (l_{b1} + e_{as}) = 256,39 \text{ mm}^2 \quad (77.)$$

$$Ap_{b2} = 0,5 \cdot d_{i2} \cdot (l_{b2} + e_{as}) = 596,83 \text{ mm}^2 \quad (78.)$$

➤ **Vzorec na kontrolu mostíka priláhlých otvorov**

• **Pri prevádzkových podmienkach:**

$$(Af_{LS} + Af_w) \cdot (f_{sv} - 0,5 \cdot P_v) + Af_{b1} \cdot (f_{obv1} - 0,5 \cdot P_v) + Af_{p1} \cdot (f_{opv1} - 0,5 \cdot P_v) + Af_{b2} \cdot (f_{obv2} - 0,5 \cdot P_v) + Af_{p2} \cdot (f_{opv2} - 0,5 \cdot P_v) \geq P_v \cdot (Ap_{LS} + Ap_{b1} + 0,5 \cdot Ap_{\varphi1} + Ap_{b2} + 0,5 \cdot Ap_{\varphi2}) \quad (79.)$$

$$3,26 \cdot 10^5 \geq 13\,779,47 \quad (80.) \quad \text{-vyhovuje}$$

• **Pri skúšobných hodnotách:**

$$(Af_{LS} + Af_w) \cdot (f_{st} - 0,5 \cdot P_t) + Af_{b1} \cdot (f_{obt1} - 0,5 \cdot P_t) + Af_{p1} \cdot (f_{opt1} - 0,5 \cdot P_t) + Af_{b2} \cdot (f_{obt2} - 0,5 \cdot P_t) + Af_{p2} \cdot (f_{opt2} - 0,5 \cdot P_t) \geq P_t \cdot (Ap_{LS} + Ap_{b1} + 0,5 \cdot Ap_{\varphi1} + Ap_{b2} + 0,5 \cdot Ap_{\varphi2}) \quad (81.)$$

$$5,24 \cdot 10^5 \geq 52\,043,15 \quad (82.) \quad \text{-vyhovuje}$$

➤ **Otvor v blízkosti diskontinuity**

Potrebné hodnoty na kontrolu dostatočnej vzdialenosti od diskontinuity sú vzdialenosť medzi vonkajším priemerom hrdla a diskontinuitou w , a požadovaná minimálna hodnota w :

$$w_{min} = \max \left(0,2 \cdot \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_{as}) \cdot e_{as}} ; 3 \cdot e_{as} \right) = 27 \text{ mm} \quad (83.)$$

$$w = 2950 - \frac{33,7}{2} = 2933,15 \text{ mm} \quad (84.)$$

$$w \geq w_{min} \quad 2933,15 \geq 27 \quad (85.)$$

Podmienky vystuženia a podmienka dostatočnej vzdialenosti otvoru od diskontinuity sú splnené pri prevádzkových aj skúšobných hodnotách, geometria uvedených hrdiel vyhovuje.

3.5.2. Hrdlá L02, L03, L04, L05, L06, L08, M01, M02, N01, N02, N03, N05, N06

Tab. 3.5.2.1 Vstupné hodnoty

Značka	Hodnota	Jednotka	Značka	Hodnota	Jednotka
a_1	16,85	mm	e_{cs}	9	mm
a_2	30,15	mm	f_{bt}	255	MPa
d	33,7	mm	f_{bv}	158,33	MPa
D_e	1520	mm	f_{pt}	0	MPa
d_{eb}	33,7	mm	f_{pv}	0	MPa
d_i	28,5	mm	f_{st}	255	MPa
e_a	9	mm	f_{sv}	158,33	MPa
e_{ab}	2,6	mm	l_b	150	mm
e_{ap}	0	mm	L_b	394,86	mm
e_{as}	9	mm	l_{bi}	0	mm
e_b	2,6	mm	l_p	0	mm

Geometria hrdiel je na Obr. 3.5.1.1.

Je demonštrovaný výpočet hrdla L02, výpočet hrdiel L03, L04, L05, L06, L08, M01, M02, N01, N02, N03, N05, N06 prebiehal obdobným spôsobom a je uvedený v prílohe prílohe č.3 – CD-Rom, ktorá obsahuje výpočet v programe MAPLE.

Kontrolujú sa podmienky výpočtu, určí sa, či je otvor osamotený, malý a v dostatočnej vzdialenosti od diskontinuity a kontroluje sa podmienka vystuženia.

➤ Kontrola medze priemerov

Pre otvory vystužené hrdlami musí platiť nasledujúca podmienka:

$$\frac{d_{ib}}{2 \cdot r_{is}} \leq 1,0 \qquad 0,019 \leq 1,0 \qquad (86.)$$

Hodnota r_{is} je pre valcovú škrupinu daná vzorcom:

$$r_{is} = \frac{D_e}{2} - e_{as} = 751 \text{ mm} \qquad (87.)$$

Podmienka medze priemerov je splnená.

➤ Kontrola medze hrúbky stien

Pomer e_b / e_{as} nesmie prekročiť hodnotu danú diagramom (Obr. 3.5.1.2), a pomer e_{ab} / e_{as} nesmie prekročiť hodnotu danú diagramom (Obr. 3.5.1.3).

$$\frac{e_b}{e_{as}} = 0,29 \qquad \frac{e_{ab}}{e_{as}} = 0,29 \qquad (88.)$$

$$\frac{d_{ib}}{2 \cdot r_{is}} = 0,019 \quad (89.)$$

Podmienka medze hrúbky stien je splnená.

➤ **Osamotené otvory**

Výpočet potrebných hodnôt r_{is1} , r_{is2} , l_{so1} , l_{so2} , L_b . Spodný index 1 je označenie pre hrdlo L02 a index 2 je označenie pre hrdlo L07.

$$r_{is1} = r_{is2} = \frac{D_e}{2} - e_{as} = 751 \text{ mm} \quad (90.)$$

$$l_{so} = l_{so1} = l_{so2} = \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_{as}) \cdot e_{as}} = 116,61 \text{ mm} \quad (91.)$$

$$L_b = \frac{\pi \cdot D_m}{360} \cdot 30 = 394,86 \text{ mm} \quad (92.)$$

Otvor sa považuje za osamotený, ak je splnená nasledovná podmienka :

$$L_b \geq a_1 + a_2 + l_{so1} + l_{so2} \quad 394,86 \geq 280,23 \quad (93.)$$

Podmienka je splnená.

➤ **Malé otvory**

Otvor je považovaný za malý, ak spĺňa podmienku:

$$d \leq 0,15 \cdot \sqrt{(2 \cdot e_{as}) \cdot e_{as}} \quad 33,7 \nless 17,49 \quad (94.)$$

Podmienka nie je splnená, preto sa kontroluje podmienka vystuženia.

➤ **Otvor v blízkosti diskontinuity**

Potrebné hodnoty na kontrolu dostatočnej vzdialenosti od diskontinuity sú vzdialenosť medzi vonkajším priemerom hrdla a diskontinuitou w , a požadovaná minimálna hodnota w :

$$w_{min} = \max \left(0,2 \cdot \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_{as}) \cdot e_{as}} ; 3 \cdot e_{as} \right) = 27 \text{ mm} \quad (95.)$$

$$w = 2950 - \frac{33,7}{2} = 2933,15 \text{ mm} \quad (96.)$$

$$w \geq w_{min} \quad 2933,15 \geq 27 \quad (97.)$$

Podmienka dostatočnej vzdialenosti otvoru od diskontinuity je splnená.

➤ **Podmienka vystuženia**

Potrebné hodnoty efektívnej hrúbky e_p a vystužujúcich dĺžok $l_{b0}, l'_b, l'_{bi}, l'_p$ ku kontrole podmienky dostatočného vystuženia sú určené nasledovne :

$$e_p = \min(e_{ap} ; e_{as}) = 0 \text{ mm} \quad (98.)$$

$$l_{b0} = \sqrt{(d_{eb} - e_{b1}) \cdot e_{b1}} = 8,99 \text{ mm} \quad (99.)$$

$$l'_b = \min(l_{b0} ; l_b) = 8,99 \text{ mm} \quad (100.)$$

$$l'_{bi} = \min(0,5 \cdot l_{b0} ; l_{bi}) = 0 \text{ mm} \quad (101.)$$

$$l'_p = \min(l_{s0} ; l_p) = 0 \text{ mm} \quad (102.)$$

Musí platiť podmienka:

$$e_{ap} \leq 1,5 \cdot e_{as} \quad 0 \leq 13,5 \quad (103.)$$

Podmienka je splnená.

Dovolené namáhanie materiálu hrdiel a výstužných golierov sú vyrátané nasledovne.

• **Pri prevádzke:**

$$f_{obv} = \min(f_{sv} ; f_{bv}) = 158,33 \text{ MPa} \quad (104.)$$

$$f_{opv} = \min(f_{sv} ; f_{pv}) = 0 \text{ MPa} \quad (105.)$$

• **Pri skúške:**

$$f_{obt} = \min(f_{st} ; f_{bt}) = 255 \text{ MPa} \quad (106.)$$

$$f_{opt} = \min(f_{st} ; f_{pt}) = 0 \text{ MPa} \quad (107.)$$

Potrebné plochy priečného prierezu účinné ako vystuženie :

$$A_s = 0,5 \cdot r_{is}^2 \cdot \frac{l'_s + a}{0,5 \cdot e_{as} + r_{is}} = 49\,818 \text{ mm}^2 \quad (108.)$$

$$A_{fb} = e_b \cdot (l'_b + l'_{bi} + e_{as}) = 46,78 \text{ mm}^2 \quad (109.)$$

$$A_{ps} = A_s \cdot 0,5 \cdot d \cdot e_{as} + 0,5 \cdot d_i \cdot e_p = 49\,969,68 \text{ mm}^2 \quad (110.)$$

$$A_{fs} = e_{cs} \cdot l'_s = 1049,53 \text{ mm}^2 \quad (111.)$$

$$A_{p\varphi} = 0 \text{ mm}^2 \quad (112.)$$

$$A_{fw} = 2 \text{ mm}^2 \quad (113.)$$

$$Af_p = e_p \cdot l_p = 0 \text{ mm}^2 \quad (114.)$$

$$Ap_b = 0,5 \cdot d_i \cdot (l_b + e_{as}) = 256,39 \text{ mm}^2 \quad (115.)$$

➤ **Vzorec na kontrolu vystuženia osamoteného otvoru**

• **Pri prevádzkových podmienkach:**

$$(Af_s + Af_w) \cdot (f_{sv} - 0,5 \cdot P_v) + Af_p \cdot (f_{opv} - 0,5 \cdot P_v) + Af_b \cdot (f_{obv} - 0,5 \cdot P_v) \geq P_v \cdot Aps + Apb + 0,5 \cdot Ap\varphi \quad (116.)$$

$$1,74 \cdot 10^5 \geq 12\,556,52 \quad (117.) \quad \text{-vyhovuje}$$

• **Pri skúšobných hodnotách:**

$$(Af_s + Af_w) \cdot (f_{st} - 0,5 \cdot P_t) + Af_p \cdot (f_{opt} - 0,5 \cdot P_v) + Af_b \cdot (f_{obt} - 0,5 \cdot P_t) \geq P_t \cdot Aps + Apb + 0,5 \cdot Ap\varphi \quad (118.)$$

$$2,80 \cdot 10^5 \geq 47\,424,21 \quad (119.) \quad \text{-vyhovuje}$$

Podmienka vystuženia osamotených hrdiel L02, L03, L04, L05, L06, L08, M01, M02, N01, N02, N03, N05, N06 je splnená vo všetkých prípadoch (viď. Príloha č. 3 – CD-rom – výpočet v programe MAPLE) aj pri prevádzkových aj skúšobných hodnotách, geometria uvedených hrdiel vyhovuje.

3.5.3. Príhlé pravidelne rozdelené hrdlá N04, N07, N08

Tab. 3.5.3.1 Vstupné hodnoty

Značka	Hodnota	Jednotka	Značka	Hodnota	Jednotka
a₁	203,2	mm	f_{bt}	255	MPa
a₂	16,85	mm	f_{bv}	158,33	MPa
D_e	1520	mm	f_{st}	255	MPa
d_{eb}	406,4	mm	f_{sv}	158,33	MPa
d_i	392,2	mm	L_b	478,18	mm
e_{ab}	7,1	mm	l_{so}	116,6	mm
e_{as}	9	mm	n	2	-
e_b	7,1	mm	r_{is}	751	mm
e_{cs}	9	mm	Φ	90	°

Geometria hrdiel je na Obr. 3.5.1.1.

Kontrolujú sa podmienky výpočtu, určí sa, či je otvor osamotený, a v dostatočnej vzdialenosti od diskontinuity, a kontroluje sa podmienka vystuženia.

➤ **Kontrola medze priemerov**

Pre otvory vystužené hrdlami musí platiť nasledujúca podmienka:

$$\frac{d_{ib}}{2 \cdot r_{is}} \leq 1,0 \qquad 0,26 \leq 1,0 \qquad (120.)$$

Hodnota r_{is} je pre valcovú škrupinu daná vzorcom:

$$r_{is} = \frac{D_e}{2} - e_{as} = 751 \text{ mm} \qquad (121.)$$

Podmienka medze priemerov je splnená.

➤ **Kontrola medze tlšťiek stien**

Pomer e_b / e_{as} nesmie prekročiť hodnotu danú diagramom (Obr. 3.5.1.2), a pomer e_{ab} / e_{as} nesmie prekročiť hodnotu danú diagramom (Obr. 3.5.1.3).

$$\frac{e_b}{e_{as}} = 0,79 \qquad \frac{e_{ab}}{e_{as}} = 0,79 \qquad (122.)$$

$$\frac{d_{ib}}{2 \cdot r_{is}} = 0,26 \qquad (123.)$$

Podmienka medze tlšťiek stien je splnená.

➤ **Osamotené otvory**

Výpočet potrebných hodnôt r_{is1} , r_{is2} , l_{so1} , l_{so2} , L_b , kde spodný index 1 je označenie pre hrdlo N07 a index 2 je označenie pre hrdlo L01:

$$r_{is1} = r_{is2} = \frac{D_e}{2} - e_{as} = 751 \text{ mm} \qquad (124.)$$

$$l_{so} = l_{so1} = l_{so2} = \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_{as}) \cdot e_{as}} = 116,61 \text{ mm} \qquad (125.)$$

Otvor sa považuje za osamotený, ak je splnená nasledovná podmienka :

$$L_b \geq a_1 + a_2 + l_{so1} + l_{so2} \qquad 478,18 \geq 453,28 \qquad (126.)$$

Podmienka je splnená.

➤ **Otvor v blízkosti diskontinuity**

Potrebné hodnoty na kontrolu dostatočnej vzdialenosti od diskontinuity sú vzdialenosť medzi vonkajším priemerom hrdla a diskontinuitou w , a požadovaná minimálna hodnota w :

$$w_{min} = \max \left(0,2 \cdot \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_{as}) \cdot e_{as}} ; 3 \cdot e_{as} \right) = 27 \text{ mm} \qquad (127.)$$

$$w = 2950 - \frac{406,4}{2} = 2546,8 \text{ mm} \qquad (128.)$$

$$w \geq w_{min} \quad 2546,8 \geq 27 \quad (129.)$$

Podmienka dostatočnej vzdialenosti otvoru od diskontinuity je splnená.

➤ **Podmienka vystuženia**

Podmienka minimálnej vzdialenosti ďalšieho otvoru od sústavy priľahlých pravidelne rozdelených otvorov:

$$L_b \geq 2 \cdot l_{so} \quad (130.)$$

$$478,18 \geq 233,23 \quad - \text{splnené} \quad (131.)$$

Potrebná vzdialenosť stredov otvorov N07-N04, N04-N08:

$$L_{bp} = \frac{\pi \cdot 1509}{360} \cdot 30 = 394,86 \text{ mm} \quad (132.)$$

Potrebná hodnota vystužujúcej dĺžky l_{bo} ku kontrole podmienky dostatočného vystuženia je určená nasledovne :

$$l_{bo} = \sqrt{(d_{eb} - e_b) \cdot e_b} = 53,24 \text{ mm} \quad (133.)$$

Potrebné plochy priečného prierezu účinné ako vystuženie :

$$Ap_{LS} = \frac{0,5 \cdot r_{is}^2 \cdot L_b \cdot (1 + \cos \theta)}{r_{is} + 0,5 \cdot e_{as} \cdot \sin \theta} = 81\,990,37 \text{ mm}^2 \quad (134.)$$

$$Af_{LS} = (L_b - d_i) \cdot e_{as} = 49,80 \text{ mm}^2 \quad (135.)$$

$$Af_b = e_{ab} \cdot l_{bo} = 378,04 \text{ mm}^2 \quad (136.)$$

$$Ap_b = 0,5 \cdot d_i \cdot l_{bo} = 10\,441,34 \text{ mm}^2 \quad (137.)$$

➤ **Vzorec na kontrolu vystuženia pravidelne rozdelených priľahlých otvorov**

• **Pri prevádzkových podmienkach:**

$$\frac{n \cdot Af_{LS} \cdot (f_{sv} - 0,5 \cdot P_v) + n \cdot 2 \cdot Af_b \cdot (f_{sv} - 0,5 \cdot P_v)}{(Ap_{LS} + 2 \cdot Ap_b)} \geq P_v \cdot n \quad (138.)$$

$$2,38 \cdot 10^7 \geq 51\,436,53 \quad (139.) \quad -\text{vyhovuje}$$

• **Pri skúšobných hodnotách:**

$$\frac{n \cdot Af_{LS} \cdot (f_{st} - 0,5 \cdot P_t) + n \cdot 2 \cdot Af_b \cdot (f_{st} - 0,5 \cdot P_t)}{(Ap_{LS} + 2 \cdot Ap_b)} \geq P_t \cdot n \quad (140.)$$

$$3,84 \cdot 10^7 \geq 1,94 \cdot 10^5 \quad (141.) \quad -\text{vyhovuje}$$

➤ **Podmienka pre vystuženie pravidelne rozdelených príľahlých otvorov**

• **Pri prevádzkových podmienkach:**

$$e_{as} \cdot (L_b - d_i) + 2 \cdot e_{ab} \cdot l_{bo} \geq \frac{P_v}{(f_{sv} - 0,5 \cdot P_v)} \cdot (A_{pLs} + d_i \cdot l_{bo}) \quad (142.)$$

$$805,88 \geq 162,56 \quad (143.) \quad \text{-vyhovuje}$$

• **Pri skúšobných hodnotách:**

$$e_{as} \cdot (L_b - d_i) + 2 \cdot e_{ab} \cdot l_{bo} \geq \frac{P_t}{(f_{st} - 0,5 \cdot P_t)} \cdot (A_{pLs} + d_i \cdot l_{bo}) \quad (144.)$$

$$805,88 \geq 381,63 \quad (145.) \quad \text{-vyhovuje}$$

Podmienky vystuženia sú splnené pri prevádzkových aj skúšobných hodnotách, geometria hrdiel vyhovuje.

3.6. Príruby

Tab. 3.6.1 Zoznam použitých symbolov

Značka	Popis	Jednotka
A	Vonkajší priemer príruby	mm
A_B	Skutočná plocha skrutky v mieste najmenšieho priemeru	mm ²
A_{B1}	Skutočná plocha skrutky v mieste najmenšieho priemeru	mm ²
A_{Bmin}	Celková požadovaná plocha prierezu skrutky	mm ²
B	Vnútorný priemer príruby	mm
b	Účinná šírka tesnenia alebo dosadacej plochy	mm
b₀	Základná šírka tesnenia alebo dosadacej plochy	mm
C	Priemer roztečnej kružnice skrutiek	mm
C_F	Korekčný súčiniteľ rozteče skrutiek	-
d_b	Vonkajší priemer skrutky	mm
e	Minimálna hrúbka príruby	mm
f_B	Dovolené namáhanie skrutiek pri prevádzkovej teplote	MPa
f_{BA}	Dovolené namáhanie skrutiek pri montážnej teplote	MPa
G	Priemer reakčnej sily	mm
g₀	Hrúbka krku pri spojení s plášťom	mm
g₁	Hrúbka krku u spoja s listom príruby	mm
H	Celková osová sila od tlaku	N
H_D	Osová sila prenášaná cez plášť na prírubu	N
h_D	Radiálna vzdialenosť od roztečnej kružnice skrutiek ku kružnici	mm
H_G	Tlaková sila na tesnenie pre dosiahnutie tesnosti	N

h_G	Radiálna vzdialenosť $\square$ od reakčnej sily v tesnení k roztečnej kružnici skrutiek	mm
H_T	Osová sila od tlaku na čelnú plochu príruby	N
h_T	Radiálna vzdialenosť od roztečnej kružnice skrutiek ku kružnici ku kružnici, na ktoré pôsobí H_T	mm
l_0	Parameter dĺžky	-
m	Súčiniteľ tesnenia	-
M_A	Celkový moment pôsobiaci na prírubu v zmontovanom stave príruby	Nmm
M_{op}	Celkový moment pôsobiaci na prírubu v prevádzkovom stave príruby	Nmm
M_p	Krútiaci moment pôsobiaci na jednotku dĺžky príruby pre prevádzkový stav	Nmm
M_z	Krútiaci moment pôsobiaci na jednotku dĺžky príruby pre zmontovaný stav	Nmm
n	Počet skrutiek	-
P_t	Skúšobný tlak	MPa
P_v	Prevádzkový tlak	MPa
r	Polomer prechodu medzi prírubou a krkom	mm
R_{msr}	Minimálna medza pevnosti v ťahu materiálu šroubu	MPa
t_p	Prevádzková teplota	°C
t_t	Skúšobná teplota	°C
w	Styková šírka tesnenia obmedzená šírkou tesnenia a tesniacej plochy	mm
W	Výpočtové zaťaženie skrutiek v zmontovanom stave	MPa
W_A	Minimálne zaťaženie skrutiek pri montážnom stave = minimálne požadované zaťaženie skrutiek v zmontovanom stave	MPa
W_{op}	Minimálne zaťaženie skrutiek pri prevádzkovom stave = celkový moment pôsobiaci na prírubu v prevádzkovom stave	MPa
y	Minimálny tlak na usadenie tesnenia alebo spoja	MPa
β_T	Súčiniteľ	-
β_U	Súčiniteľ	-
β_Y	Súčiniteľ	-
σ_Φ	Tangenciálne napätie v príрубе	MPa
σ_H	Pozdĺžne napätie v krku	MPa
σ_r	Radiálne napätie v príрубе	MPa

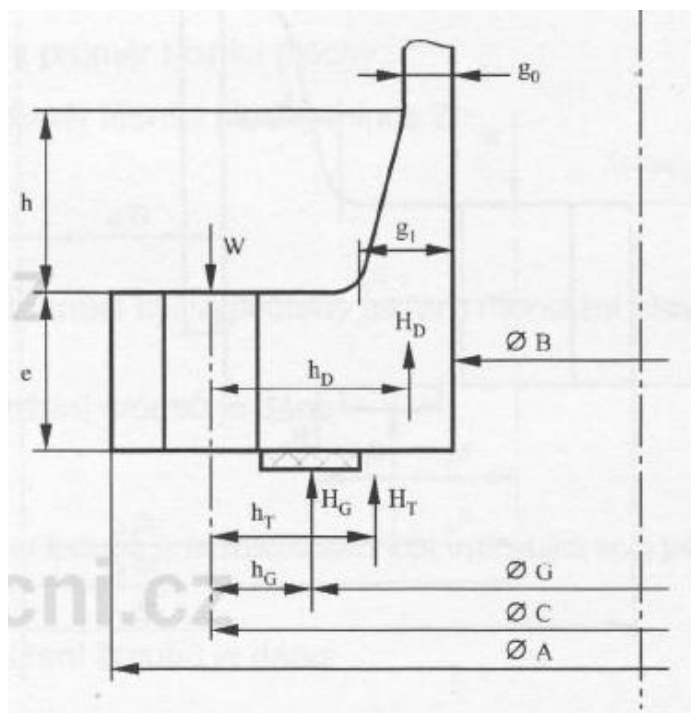
Index	Popis
p	Vzťahuje sa k prevádzkovému stavu (spodný index)
t	Vzťahuje sa k skúšobnému stavu (spodný index)

z

Vzťahuje sa k zmontovanému stavu (spodný index)

Tab.3.6.2 Vstupné hodnoty

Značka	Hodnota	Jednotka	Značka	Hodnota	Jednotka
A	1750	mm	n	40	mm
A _{B1}	226,98	mm ²	r	8	mm
B	1500	mm	R _{msr}	860	MPa
C	1600	mm	t _p	180	°C
C _F	1	-	t _t	20	°C
d _b	20	mm	w	25	mm
e	80	mm	y	22	MPa
G	1562,18	mm	σ _b	125,53	mm
g ₀	9	mm	β _T	3,5	-
g ₁	17	mm	β _U	26,30	-
l ₀	116,96	-	β _Y	23,94	-
m	4,25	-			



Obr. 3.6.1 Geometria príruby [2]

Kontrolujú sa podmienky výpočtu, počíta sa zaťaženie skrutiek, momenty pôsobiace na prírubu, a napätia v príрубе, ktoré sa porovnávajú s ich limitmi.

➤ **Kontrola podmienky**

Konštrukcia príruby musí spĺňať podmienky:

$$r \geq 0,25 \cdot g_0 \qquad 8 \geq 2,25 \qquad (146.)$$

$$r \geq 5 \qquad 8 \geq 5 \qquad (147.)$$

Podmienka konštrukcie príruby je splnená.

Pre výpočet napätí je použitá voľná metóda, pričom musia byť splnené nasledovné podmienky:

$$g_0 \leq 16 \qquad 9 \leq 16 \qquad (148.)$$

$$P_v \leq 2 \text{ MPa} \qquad 0,25 \text{ MPa} \leq 2 \text{ MPa} \qquad (149.)$$

$$P_t \leq 2 \text{ MPa} \qquad 0,94 \text{ MPa} \leq 2 \text{ MPa} \qquad (150.)$$

$$\frac{B}{g_0} \leq 300 \qquad 166,67 \leq 300 \qquad (151.)$$

$$t_p \leq 370 \qquad 180 \leq 370 \qquad (152.)$$

$$t_t \leq 370 \qquad 20 \leq 370 \qquad (153.)$$

Podmienky sú splnené.

➤ **Zaťaženie skrutiek a plochy**

Jednotlivé šírky dosadacej plochy b_0 , b , skutočná plocha skrutiek v mieste najmenšieho priemeru A_B sú vypočítané nasledovne:

$$b_0 = \frac{w}{2} = 12,5 \text{ mm} \qquad (154.)$$

$$b = 2,52 \cdot \sqrt{b_0} = 8,9 \text{ mm} \qquad (155.)$$

$$A_B = n \cdot A_{B1} = 9079 \text{ mm}^2 \qquad (156.)$$

Sily H , H_G a dovolené namáhania skrutiek f_{BA} , f_B :

• **Pre prevádzkové podmienky**

$$H = \frac{\pi}{4} \cdot (G^2 \cdot P_v) = 4,79 \cdot 10^5 \text{ N} \qquad (157.)$$

$$H_G = 2 \cdot \pi \cdot G \cdot m \cdot P_v = 10\,423,65 \text{ N} \qquad (158.)$$

$$f_{BAZ} = \frac{R_{msr}}{4} = 215 \text{ MPa} \qquad (159.)$$

$$f_{Bp} = f_{BAZ} = 215 \text{ MPa} \qquad (160.)$$

• **Pre skúšobné podmienky**

$$H_t = \frac{\pi}{4} \cdot (G^2 \cdot P_t) = 1,8 \cdot 10^6 \text{ N} \qquad (161.)$$

$$H_{Gt} = 2 \cdot \pi \cdot G \cdot m \cdot P_t = 39\,368,67 \text{ N} \qquad (162.)$$

$$f_{BAZ} = \frac{R_{msr}}{4} = 215 \text{ MPa} \qquad (163.)$$

$$f_{Bp} = f_{BAz} = 215 \text{ MPa} \quad (164.)$$

Minimálne zaťaženie skrutiek je dané:

• **Pri montážnom stave**

$$W_A = \pi \cdot b \cdot G \cdot y = 9,61 \cdot 10^5 \text{ MPa} \quad (165.)$$

• **Pri prevádzkovom stave**

$$W_{op} = H + H_G = 4,89 \cdot 10^5 \text{ MPa} \quad (166.)$$

• **Pri skúšobnom stave**

$$W_{opt} = Ht + H_{Gt} = 1,85 \cdot 10^6 \text{ MPa} \quad (167.)$$

Celková požadovaná plocha prierezu A_{Bmin} a podmienka zvolenia skrutiek:

• **Pri prevádzkových podmienkach**

$$A_{Bmin} = \max\left(\frac{W_A}{f_{BA}}; \frac{W_{op}}{f_B}\right) = 4471,99 \text{ mm}^2 \quad (168.)$$

$$A_B \geq A_{Bmin} \quad 9079 \geq 4471,99 \quad (169.)$$

Podmienka je splnená.

• **Pri skúšobnom stave**

$$A_{Bmint} = \max\left(\frac{W_A}{f_{BAt}}; \frac{W_{op}}{f_{Bt}}\right) = 4471,99 \text{ mm}^2 \quad (170.)$$

$$A_B \geq A_{Bmint} \quad 9079 \geq 4471,99 \quad (171.)$$

Podmienka je splnená.

➤ **Momenty pôsobiace na prírubu**

Radiálne vzdialenosti h_D , h_G , h_T pre prevádzkové aj skúšobné podmienky sú dané nasledovne:

$$h_D = \frac{C-B-g_1}{2} = 41,5 \text{ mm} \quad (172.)$$

$$h_G = \frac{C-G}{2} = 18,91 \text{ mm} \quad (173.)$$

$$h_T = \frac{2 \cdot C-B-G}{4} = 34,45 \text{ mm} \quad (174.)$$

Celkové osovú sily H_D , H_T , a výpočtové zaťaženie skrutiek W_z :

• **Pri prevádzkových podmienkach**

$$H_D = \frac{\pi}{4} \cdot (B^2 \cdot P_v) = 4,53 \cdot 10^5 \text{ N} \quad (175.)$$

$$H_T = H - H_D = 37\,610,72 \text{ N} \quad (176.)$$

$$W_Z = 0,5 \cdot (AB_{min} + A_B) \cdot f_{BA} = 1,46 \cdot 10^6 \text{ MPa} \quad (177.)$$

• **Pri skúšobných podmienkach**

$$H_{Dt} = \frac{\pi}{4} \cdot (B^2 \cdot P_t) = 1,67 \cdot 10^6 \text{ N} \quad (178.)$$

$$H_{Tt} = H_t - H_{Dt} = 1,81 \cdot 10^6 \text{ N} \quad (179.)$$

$$W_t = 0,5 \cdot (AB_{mint} + A_B) \cdot f_{BA_t} = 1,46 \cdot 10^6 \text{ MPa} \quad (180.)$$

Celkové momenty pôsobiace na prírubu M_A, M_{op}, M_{opt} :

• **Pri zmontovanom stave**

$$M_A = W \cdot h_G = 2,75 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (181.)$$

• **Pri prevádzkovom stave**

$$M_{op} = H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_g = 1,52 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (182.)$$

• **Pri skúšobnom stave**

$$M_{opt} = H_{Dt} \cdot h_D + H_{Tt} \cdot h_T + H_{Gt} \cdot h_g = 5,75 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (183.)$$

➤ **Napätia v prírubě**

Výpočet potrebných súčiniteľov $C_F, \beta_T, \beta_U, \beta_Y$ je uvedený v prílohe č.3 – CD-Rom, ktorá obsahuje výpočet v programe MAPLE.

Krútiace momenty:

• **Pre zmontovaný stav**

$$M_Z = M_A \cdot \frac{C_F}{B} = 18\,122,72 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (184.)$$

• **Pre prevádzkový stav**

$$M_p = M_{op} \cdot \frac{C_F}{B} = 13\,211,88 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (185.)$$

• **Pre skúšobný stav**

$$M_{pt} = M_{opt} \cdot \frac{C_F}{B} = 49\,899 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (186.)$$

Výpočet tangenciálneho napätia σ_Φ , pozdĺžneho napätia σ_H a radiálneho napätia σ_r pre voľnú metódu:

• **Pre zmontovaný stav**

$$\sigma_{\theta z} = \frac{\beta_Y \cdot M_z}{e^2} = 68,69 \text{ MPa} \quad (187.)$$

$$\sigma_{Hz} = 0 \text{ MPa} \quad (188.)$$

$$\sigma_{rz} = \sigma_{Hz} = 0 \text{ MPa} \quad (189.)$$

• **Pre prevádzkový stav**

$$\sigma_{\theta p} = \frac{\beta_Y \cdot M_p}{e^2} = 49,42 \text{ MPa} \quad (190.)$$

$$\sigma_{Hp} = 0 \text{ MPa} \quad (191.)$$

$$\sigma_{rp} = \sigma_{Hp} = 0 \text{ MPa} \quad (192.)$$

• **Pre skúšobný stav**

$$\sigma_{\theta t} = \frac{\beta_Y \cdot M_{pt}}{e^2} = 186,66 \text{ MPa} \quad (193.)$$

$$\sigma_{Ht} = 0 \text{ MPa} \quad (194.)$$

$$\sigma_{rt} = \sigma_{Ht} = 0 \text{ MPa} \quad (195.)$$

➤ **Limity napätí**

Hodnota dovoleného namáhania príruby k :

$$k = \frac{2}{3} \cdot \left(1 + \frac{B}{2000}\right) = 1,167 \text{ MPa} \quad (196.)$$

Napätia v príрубе musia spĺňať nasledovné požiadavky:

$$k \cdot \sigma_H \leq 1,5 \cdot \min(f ; f_H) \quad (197.)$$

$$k \cdot \sigma_r \leq f \quad (198.)$$

$$k \cdot \sigma_\theta \leq f \quad (199.)$$

$$0,5 \cdot k \cdot (\sigma_H + \sigma_r) \leq f \quad (200.)$$

$$0,5 \cdot k \cdot (\sigma_H + \sigma_\theta) \leq f \quad (201.)$$

Tab. 3.6.3 zobrazuje splnené požiadavky napätí v prírube pre všetky zaťažovacie stavy.

Tab.3.6.3 Podmienky napätí v prírube v zaťažovacích stavoch

Podmienka	Stav		
	Prevádzkový stav		Skúšobný stav
	Zmontovaný stav	Prevádzka	
$k \cdot \sigma_H \leq 1,5 \cdot \min(f ; f_H)$	$0 \leq 237,5$	$0 \leq 237,5$	$0 \leq 382,5$
$k \cdot \sigma_r \leq f$	$0 \leq 158,33$	$0 \leq 158,33$	$0 \leq 255$
$k \cdot \sigma_\theta \leq f$	$80,16 \leq 158,33$	$57,66 \leq 158,33$	$217,77 \leq 255$
$0,5 \cdot k \cdot (\sigma_H + \sigma_r) \leq f$	$0 \leq 158,33$	$0 \leq 158,33$	$0 \leq 255$
$0,5 \cdot k \cdot (\sigma_H + \sigma_\theta) \leq f$	$40,07 \leq 158,33$	$28,83 \leq 158,33$	$108,89 \leq 255$

Požiadavky limitov napätí sú splnené vo všetkých stavoch zaťaženia, geometria príruby vyhovuje.

3.7. Valcový podstavec

Tab.3.7.1 Zoznam použitých symbolov

Značka	Popis	Jednotka
a	Rameno síl od presadenia stredníc stien škrupiny	mm
D_B	Stredný priemer škrupiny	mm
D_Z	Stredný priemer podstavca	mm
e_a	Analyzovaná hrúbka	mm
e_B	Hrúbkasteny nádoby	mm
e_Z	Hrúbkasteny podstavca	mm
f	Dovolené namáhanie materiálu škrupiny	MPa
F₁	Celková globálna prídavná sila bez zaťaženia od tlaku	N
F_{add}	Prídavná axiálna sila bez zaťaženia od tlaku	N
F_F	Tiaž obsahu pri prevádzke	N
F_g	Tiaž nádoby bez obsahu	N
F_Z	Ekvivalentná sila v uvažovanom mieste v podstavci	N
f_Z	Dovolené namáhanie materiálu podstavca	MPa
M	Globálny ohybový moment v uvažovanom mieste	Nmm
M₁	Výsledný moment od externých zaťažení	Nmm
P	Výpočtový tlak	MPa
r	Vnútorň polomer elipsy anuloidového prechodu	mm
Δ_{FG}	Tiaž nádoby pod rezom 2-2	N
χ	Časť uhlu anuloidového prechodu	°
σ	Napätie	MPa
Index	Popis	

-
- Technical drawing of a curved beam joint (Tvar B) showing forces, dimensions, and angles. The diagram includes the following elements:
- Forces:**
 - $F_G - \Delta F_G$ (upward at the top left)
 - $F_F + \Delta F_F$ (upward at the bottom left)
 - F_F (downward on the right side)
 - Dimensions and Angles:**
 - ϕD_B (horizontal dimension line)
 - ϕD_Z (horizontal dimension line)
 - θ_L (angle between the vertical and the tangent to the curve)
 - θ_Z (angle between the horizontal and the tangent to the curve)
 - θ (angle between the vertical and the tangent to the curve)
 - r (radius of curvature)
 - R (radius of curvature)
 - Labels:**
 - 1, 2, 3 (point labels on the curve)
 - a (vertical distance from the base to point 1)

58

Tab. 3.7.2 Vstupné hodnoty

Značka	Hodnota	Jednotka	Značka	Hodnota	Jednotka
D_B	1509	mm	F_{add}	20 537,90	N
D_Z	1 515	mm	F_F	$3,00 \cdot 10^5$	N
a	11,90	mm	F_g	$1,19 \times 10^5$	N
C	0,61	-	f_z	158,33	MPa
e_a	9	mm	M_1	$5,19 \times 10^8$	Nmm
e_B	9	mm	P	0,25	MPa
e_B	9	mm	r	250,00	mm
e_z	15	mm	Δ_{FG}	$8,33 \times 10^5$	N
f	158,33	MPa	χ	5	°

Kontrolujú sa základné podmienky, určia sa globálne prídavné sily a výsledné momenty, ekvivalentné sily v uvažovaných miestach v podstavci, membránové napätia v rezoch 1-1, 2-2, 3-3, ohybové napätia v rezoch 1-1, 2-2, 3-3 a celkové napätia v rezoch 1-1, 2-2, 3-3, a skontrolujú sa podmienky platnosti výpočtu. Výpočet valcového podstavca je prevedený pre prevádzkové podmienky, pre skúškové podmienky by bol výpočet neplatný, pretože nádoba sa bude skúšať v horizontálnej polohe.

➤ Kontrola podmienky

Tvar konštrukcie podstavca B (Obr. 3.7.1) musí spĺňať pomer hrúbok steny:

$$0,5 \leq \frac{e_B}{e_Z} \leq 2,25 \qquad 0,5 \leq 0,6 \leq 2,25 \qquad (202.)$$

Pomer hrúbky steny je splnený.

➤ Sily

Určenie celkovej potrebnej globálnej prídavnej sily F_1 , ekvivalentnej sily v bode, kde spôsobuje globálny ohybový moment najväčšiu ťahovú silu v podstavci F_{Zp} , a ekvivalentnej sily v bode, kde spôsobuje globálny ohybový moment najväčšiu tlakovú silu v podstavci F_{Zq} :

$$F_1 = F_{add} + \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot P = 8,86 \cdot 10^5 \text{ N} \qquad (203.)$$

$$F_{Zp} = -F_1 - \delta_{FG} - F_F + \left(4 \cdot \frac{M_1}{D_Z}\right) = 1,0 \cdot 10^5 \text{ N} \qquad (204.)$$

$$F_{Zp} = -F_1 - \delta_{FG} - F_F - \left(4 \cdot \frac{M_1}{D_Z}\right) = -2,64 \cdot 10^6 \text{ N} \qquad (205.)$$

➤ **Membránové napätia**

• **V reze 1-1**

$$\sigma_{1p}^m = \frac{F_{Zp} + \Delta_{FG} + F_F}{\pi \cdot D_B \cdot e_B} + \frac{P \cdot D_B}{4 \cdot e_B} = 21,82 \text{ MPa} \quad (206.)$$

$$\sigma_{1q}^m = \frac{F_{Zq} + \Delta_{FG} + F_F}{\pi \cdot D_B \cdot e_B} + \frac{P \cdot D_B}{4 \cdot e_B} = -42,46 \text{ MPa} \quad (207.)$$

Kontrola platnosti:

$$|\sigma_{1p}^m| \leq f \quad 21,82 \leq 158,33 \quad (208.)$$

$$|\sigma_{1q}^m| \leq f \quad 42,46 \leq 158,33 \quad (209.)$$

Podmienka platnosti je splnená.

• **V reze 2-2**

$$\sigma_2^m = \frac{F_F + \Delta_{FG}}{\pi \cdot D_B \cdot e_B} + \frac{P \cdot D_B}{4 \cdot e_B} = 19,48 \text{ MPa} \quad (300.)$$

$$\sigma_{2p}^m = \sigma_2^m = 19,48 \text{ MPa} \quad (301.)$$

$$\sigma_{2q}^m = \sigma_2^m = 19,48 \text{ MPa} \quad (302.)$$

Kontrola platnosti:

$$|\sigma_2^m| \leq f \quad 19,48 \leq 158,33 \quad (303.)$$

Podmienka platnosti je splnená.

• **V reze 3-3**

$$\sigma_{3p}^m = \frac{F_{Zp}}{\pi \cdot D_Z \cdot e_Z} = 1,4 \text{ MPa} \quad (304.)$$

$$\sigma_{3q}^m = \frac{F_{Zq}}{\pi \cdot D_Z \cdot e_Z} = -37,01 \text{ MPa} \quad (305.)$$

Kontrola platnosti:

$$|\sigma_{3p}^m| \leq f \quad 1,4 \leq 158,33 \quad (306.)$$

$$|\sigma_{3q}^m| \leq f \quad 37,01 \leq 158,33 \quad (307.)$$

Podmienka platnosti je splnená.

➤ **Ohybové napätia**

Výpočet ramena síl od presadenia stredníc stien škrupiny a , a korekčného súčiniteľa C je uvedený v prílohe prílohe č.3 – CD-Rom.

Výpočet globálnych ohybových momentov v bode p a q M_p a M_q .

$$M_p = a \cdot F_{Zp} = 1,19 \cdot 10^6 \text{ Nmm} \quad (308.)$$

$$M_q = a \cdot F_{Zq} = -3,14 \cdot 7 \text{ Nmm} \quad (309.)$$

• **V reze 1-1**

$$\sigma_{1p}^b = C \cdot \frac{6 \cdot M_p}{\pi \cdot D_B \cdot e_B^2} = 11,35 \text{ MPa} \quad (310.)$$

$$\sigma_{1q}^b = C \cdot \frac{6 \cdot M_q}{\pi \cdot D_B \cdot e_B^2} = -299,51 \text{ MPa} \quad (311.)$$

• **V reze 2-2**

$$\sigma_{2p}^b = \sigma_{1p}^b = 11,35 \text{ MPa} \quad (312.)$$

$$\sigma_{2q}^b = \sigma_{1q}^b = -299,51 \text{ MPa} \quad (313.)$$

• **V reze 3-3**

$$\sigma_{3p}^b = C \cdot \frac{6 \cdot M_p}{\pi \cdot D_Z \cdot e_Z^2} = 4,07 \text{ MPa} \quad (314.)$$

$$\sigma_{3q}^b = C \cdot \frac{6 \cdot M_q}{\pi \cdot D_Z \cdot e_Z^2} = -107,4 \text{ MPa} \quad (315.)$$

➤ **Celkové napätia**

• **V reze 1-1**

V mieste p :

$$\sigma_{1pi}^{tot} = \sigma_{1p}^m - \sigma_{1p}^b = 10,48 \text{ MPa} \quad (316.)$$

$$\sigma_{1po}^{tot} = \sigma_{1p}^m + \sigma_{1p}^b = 33,17 \text{ MPa} \quad (317.)$$

V mieste q :

$$\sigma_{1qi}^{tot} = \sigma_{1q}^m - \sigma_{1q}^b = 257,05 \text{ MPa} \quad (318.)$$

$$\sigma_{1qo}^{tot} = \sigma_{1q}^m + \sigma_{1q}^b = -341,97 \text{ MPa} \quad (319.)$$

• V reze 2-2

V mieste p :

$$\sigma_{2pi}^{tot} = \sigma_{2p}^m + \sigma_{2p}^b = 30,83 \text{ MPa} \quad (320.)$$

$$\sigma_{2po}^{tot} = \sigma_{2p}^m - \sigma_{2p}^b = 8,13 \text{ MPa} \quad (321.)$$

V mieste q :

$$\sigma_{2qi}^{tot} = \sigma_{2q}^m + \sigma_{2q}^b = -280,03 \text{ MPa} \quad (322.)$$

$$\sigma_{2qo}^{tot} = \sigma_{2q}^m - \sigma_{2q}^b = 318,98 \text{ MPa} \quad (323.)$$

• V reze 3-3

V mieste p :

$$\sigma_{3pi}^{tot} = \sigma_{3p}^m - \sigma_{3p}^b = -2,67 \text{ MPa} \quad (324.)$$

$$\sigma_{3po}^{tot} = \sigma_{3p}^m + \sigma_{3p}^b = 5,47 \text{ MPa} \quad (325.)$$

V mieste q :

$$\sigma_{3qi}^{tot} = \sigma_{3q}^m - \sigma_{3q}^b = 70,38 \text{ MPa} \quad (326.)$$

$$\sigma_{3qo}^{tot} = \sigma_{3q}^m + \sigma_{3q}^b = -144,41 \text{ MPa} \quad (327.)$$

➤ **Podmienky platnosti**

V rezoch 1-1 a 2-2 musia byť splnené nasledovné podmienky platnosti:

V mieste p :

$$\sigma_{rez\ pi}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{rez\ p}^m}{f} \right)^2 \right] \quad (328.)$$

$$\sigma_{rez\ po}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{rez\ p}^m}{f} \right)^2 \right] \quad (329.)$$

V mieste q :

$$\sigma_{rez\ qi}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{rez\ q}^m}{f} \right)^2 \right] \quad (330.)$$

$$\sigma_{rez\ qo}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{rez\ q}^m}{f} \right)^2 \right] \quad (331.)$$

V reze 3-3 musia byť splnené nasledovné podmienky platnosti:

V mieste p :

$$\sigma_{3\ pi}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{3\ p}^m}{f_z} \right)^2 \right] \quad (332.)$$

$$\sigma_{3\ po}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{3\ p}^m}{f_z} \right)^2 \right] \quad (333.)$$

V mieste q :

$$\sigma_{3\ qi}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{3\ q}^m}{f_z} \right)^2 \right] \quad (334.)$$

$$\sigma_{3\ qo}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{3\ q}^m}{f_z} \right)^2 \right] \quad (335.)$$

Podmienky platnosti sú zhrnuté v Tab. 3.7.3.

Tab.3.7.3 Podmienky platnosti napätí vo valcovom podstavci

Podmienka platnosti	Hodnoty	Vyhodnotenie
Rez 1-1		
$\sigma_{1pi}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{1p}^m}{f} \right)^2 \right]$	$10,48 \leq 472,99$	OK
$\sigma_{1po}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{1p}^m}{f} \right)^2 \right]$	$33,17 \leq 472,99$	OK
$\sigma_{1qi}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{1q}^m}{f} \right)^2 \right]$	$257,05 \leq 467,41$	OK
$\sigma_{1qo}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{1q}^m}{f} \right)^2 \right]$	$341,97 \leq 467,41$	OK
Rez 2-2		
$\sigma_{2pi}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{2p}^m}{f} \right)^2 \right]$	$30,82 \leq 474,40$	OK
$\sigma_{2po}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{2p}^m}{f} \right)^2 \right]$	$8,13 \leq 473,40$	OK
$\sigma_{2qi}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{2q}^m}{f} \right)^2 \right]$	$280,03 \leq 473,40$	OK
$\sigma_{2qo}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{2q}^m}{f} \right)^2 \right]$	$318,99 \leq 473,40$	OK
Rez 3-3		
$\sigma_{3pi}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{3p}^m}{f_z} \right)^2 \right]$	$2,67 \leq 474,99$	OK
$\sigma_{3po}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{3p}^m}{f_z} \right)^2 \right]$	$5,47 \leq 474,99$	OK
$\sigma_{3qi}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{3q}^m}{f_z} \right)^2 \right]$	$2,67 \leq 469,23$	OK
$\sigma_{3qo}^{tot} \leq f_z \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{3q}^m}{f_z} \right)^2 \right]$	$5,47 \leq 469,23$	OK

Podmienky platnosti celkových napätí v rezoch 1-1, 2-2, 3-3 v bodoch p , q , i , o sú splnené, geometria valcového podstavca je vyhovujúca.

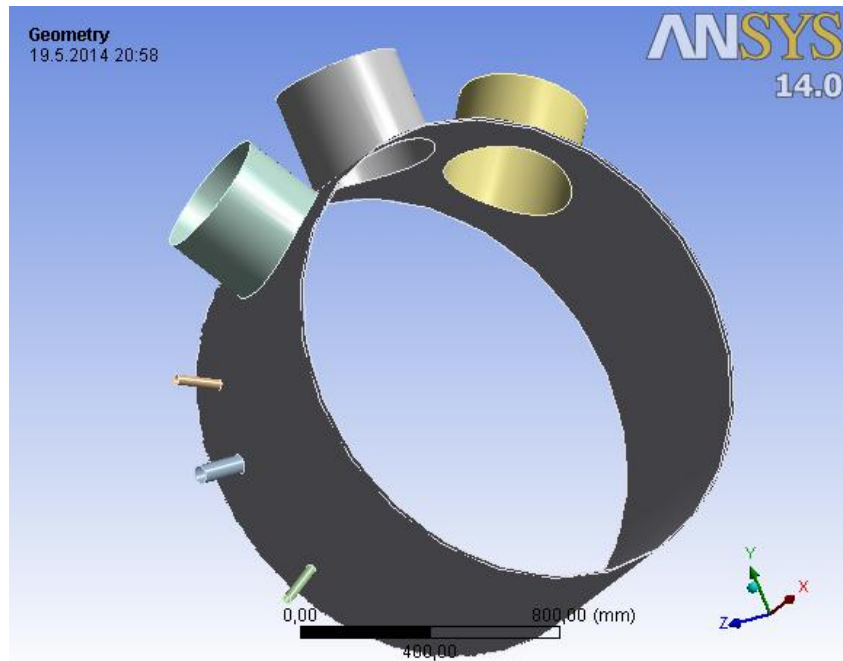
4. Kontrola pomocou MKP

Vybraná časť destilačnej kolóny bola analyzovaná pomocou MKP. Analýza prebiehala v programe ANSYS Workbench 14.0. Výpočtové modely boli vytvorené v programe SolidWorks 2013. Vybraným výpočtovým modelom bol výsek z kolóny, ktorý predstavuje časť valcového plášťa a 6 príľahlých otvorov. Najprv bol vytvorený plošný model a následne objemový submodel najrizikovejšej časti. Analýza pomocou MKP bola prevedená pre podmienky prevádzky a podmienky tlakovej skúšky.

4.1. Kontrola výrezu s príľahlými otvormi, otvory N04, N07, N08, L01, L02, L07

➤ Výpočtový plošný model

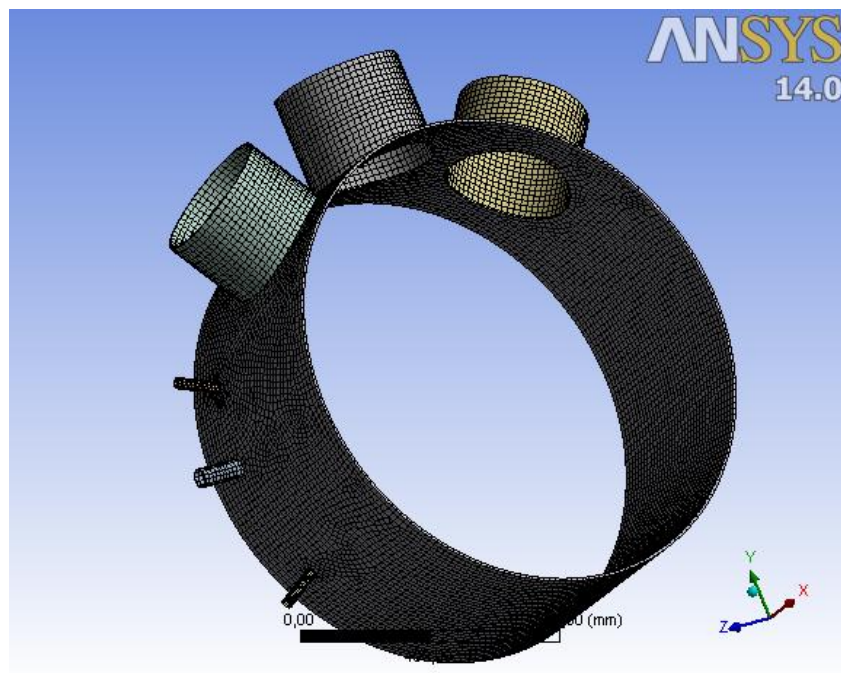
Pre výpočtový plošný model bol zvolený výrez, ktorý obsahuje časť valcového plášťa a hrdlá N04, N07, N08, L01, L02, L07. Výpočtový plošný model je na Obr. 4.1.1.



Obr. 4.1.1 Geometria výpočtového plošného modelu

➤ Sieť konečných prvkov

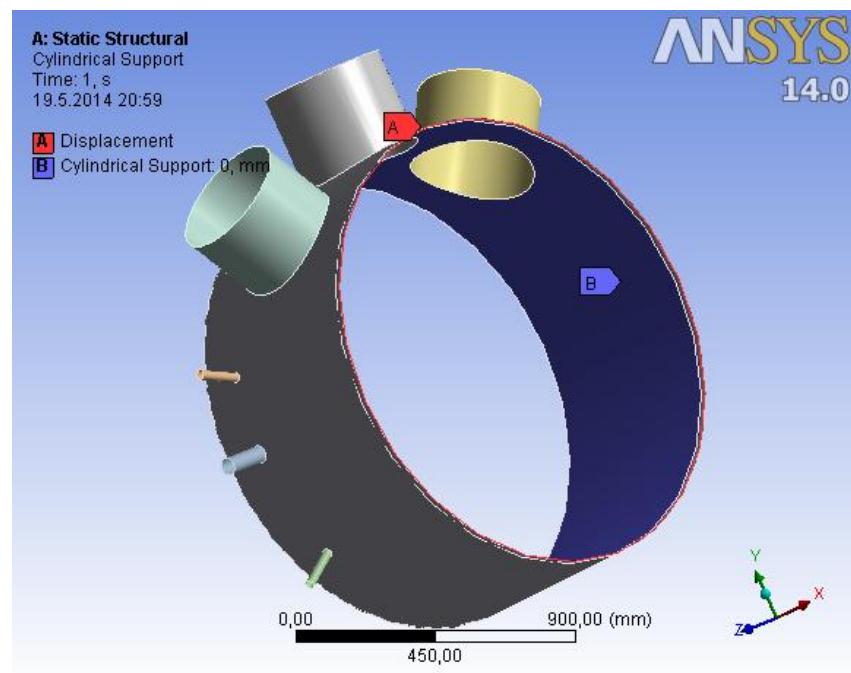
Následne bola vytvorená sieť konečných prvkov. Pri tvorbe siete bolo pomocou príkazu *Edge Sizing* nastavené členenie hrán v prechodoch medzi jednotlivými hrdlami a valcovým plášťom. V prípade hrdiel L01, L02, a L07 bol nastavený počet hrán 10, pri hrdlách N04, N07, a N08 bol nastavený počet hrán 20. Sieť konečných prvkov je na Obr. 4.1.2.



Obr. 4.1.2 Sieť konečných prvkov

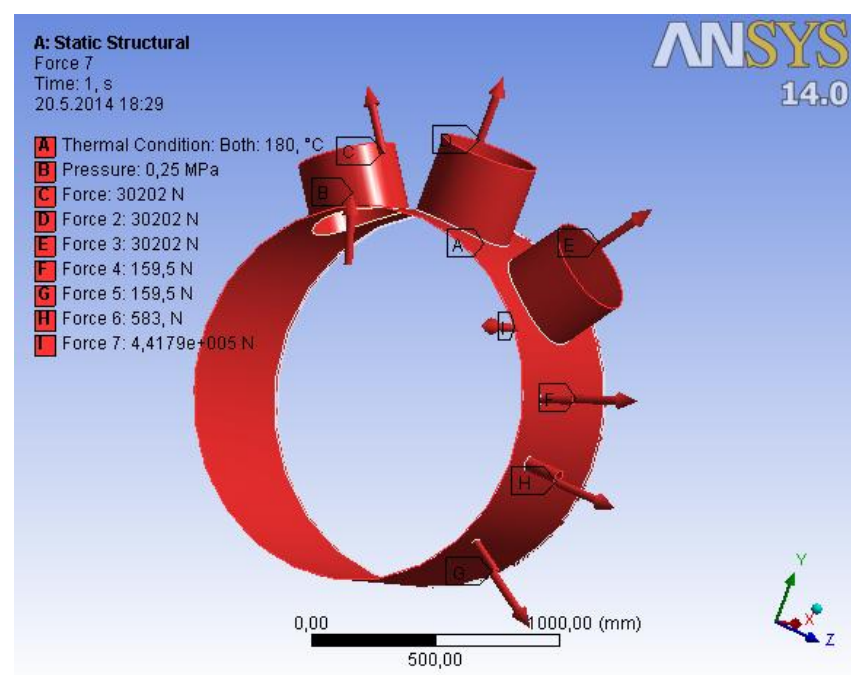
➤ Okrajové podmienky

Následne bolo treba zadať okrajové podmienky. Bola zvolená väzbová okrajová podmienka (Obr. 4.1.3) *Displacement*, ktorá zamedzuje posun modelu v smere osi plášťa. Ďalšia väzbová okrajová podmienka *Cylindrical Support* je valcová väzba na vnútornú plochu plášťa, ktorá dovoľuje posun modelu v radiálnom a axiálnom smere a zamedzuje posun modelu v tangenciálnom smere.



Obr. 4.1.3 Väzbové okrajové podmienky

Ako záťažové okrajové podmienky (Obr. 4.1.4) boli zvolené zaťaženie celého modelu teplotou (označenie A na Obr. 4.1.4), a zaťaženie vnútornej plochy plášťa a hrdiel tlakom (označenie B). Voľné koncové plochy hrdiel boli zaťažené ekvivalentnou silou smerujúcou v smere von od hrdla (označenie C, D, E, F, G, H), touto silou bola zaťažená aj voľná koncová plocha plášťa (označenie I). Hodnoty jednotlivých zaťažení pri prevádzkových a skúšobných podmienkach sú uvedené v Tab.4.1.



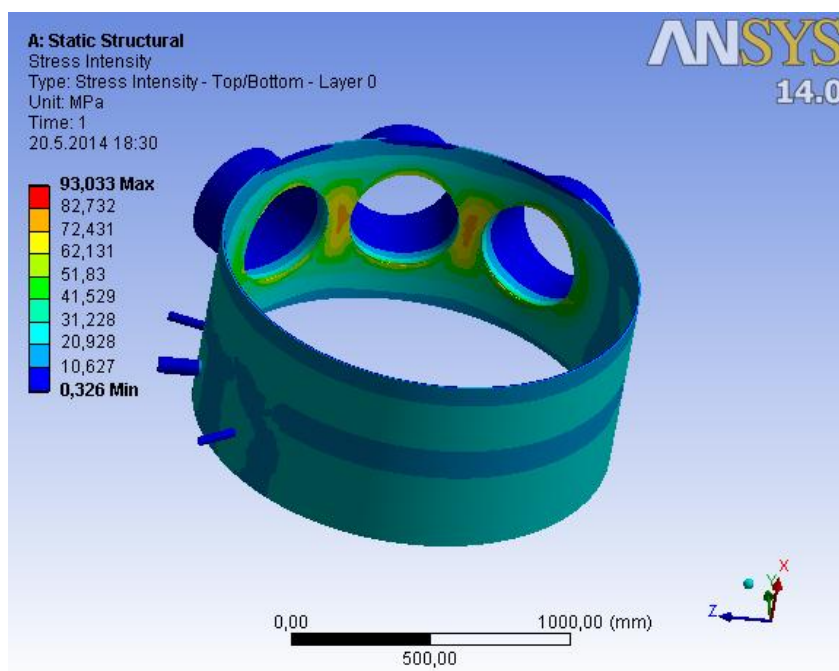
Obr. 4.1.4 Záťažové okrajové podmienky pri prevádzkovom stave

Tab. 4.1 Druhy zaťaženia modelu

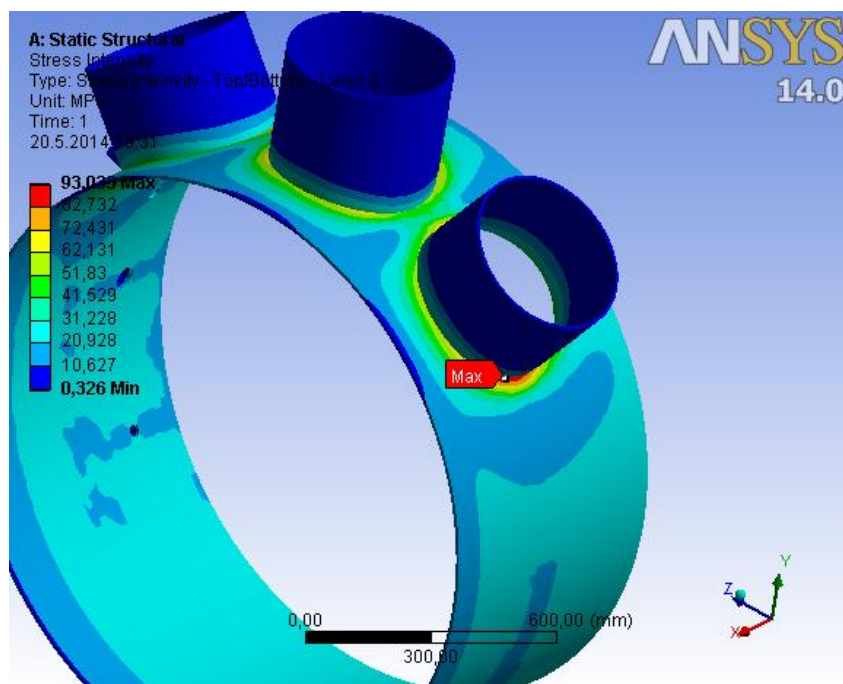
Druh zaťaženia	Hodnota		
	Prevádzkový stav	Skušobný stav	Jednotka
Teplota	180,00	20,00	°C
Tlak	0,25	0,94	MPa
Sila (hrdlo N04)	30 202,00	113 562,00	N
Sila (hrdlo N07)	30 202,00	113 562,00	N
Sila (hrdlo N08)	30 202,00	113 562,00	N
Sila (hrdlo L01)	159,50	599,70	N
Sila (hrdlo L02)	159,50	599,70	N
Sila (hrdlo L07)	583,00	2193,00	N
Sila (plášť)	441 786,00	1 661 117,00	N

➤ Výpočet

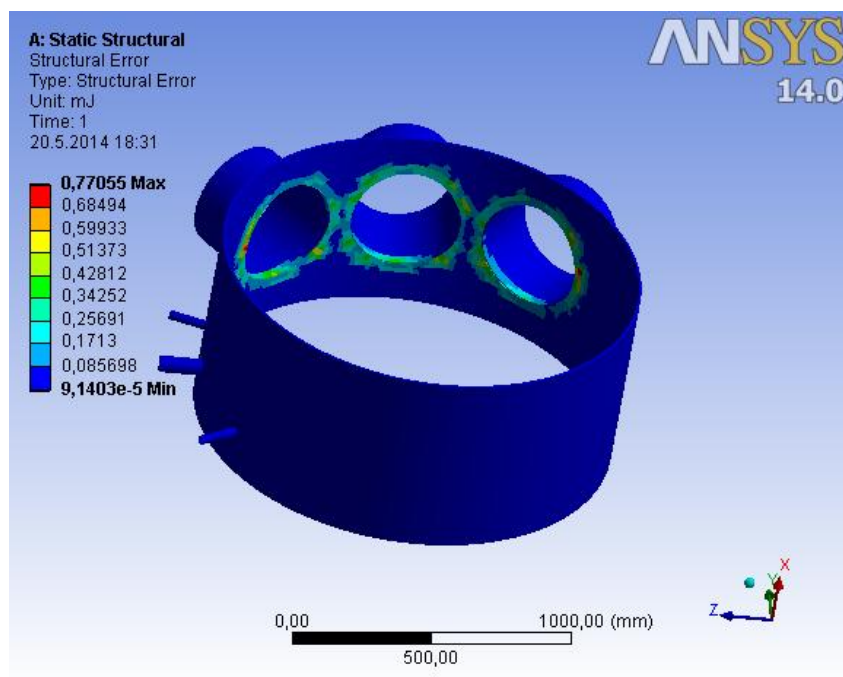
Prebehol výpočet *Stress intensity*, ktorého výsledok je rozloženie napätia na modeli (Obr. 4.1.5). Najväčšie dosiahnuté napätie v celom modeli je v oblasti prechodu hrdla N08 na plášť (Obr. 4.1.6). Pre túto časť s najvyšším napätím bol vytvorený objemový submodel, v ktorom sa kategorizuje napätie v oblasti prechodu hrdla N08 na valcový plášť. Pri výpočte rozloženia napätia v plošnom modeli je tiež vykreslený *Structural error* (Obr. 4.1.7), ktorý zobrazuje pravdepodobnú chybu veľkosti napätia a deformácie. Z Obr. 4.1.7 vyplýva, že v oblasti prechodu hrdiel do plášťa je potrebné očakávať odchýlku výpočtového modelu od skutočnosti.



Obr. 4.1.5. Výsledné rozloženie napätia pri prevádzkovom stave



Obr. 4.1.6. Najväčšie dosiahnuté napätie pri prevádzkovom stave

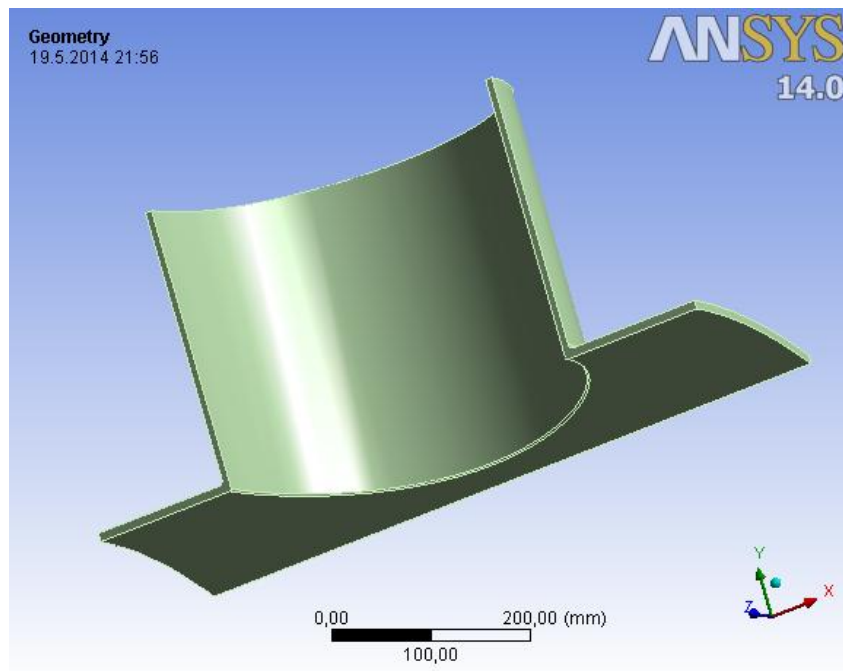


Obr. 4.1.7 Pravdepodobnosť presnosti výpočtu

4.2. Kontrola submodelu, otvor N08

➤ Submodel

Bol vytvorený objemový submodel hrdla N08 a časti valcového plášťa (Obr. 4.2.1). Submodel je pomocou osovej symetrie zjednodušený. Zvar je namodelovaný pomocou zaoblenia prechodu hrdla do valcového plášťa.



Obr. 4.2.1 Submodel

➤ Sieť konečných prvkov

Následne bola vytvorená sieť konečných prvkov metódou *Hex dominant*. Sieť je tvorená primárne z elementov tvaru kocky, v oblasti navarenia hrdla na plášť bola sieť zjemnená, aby boli dosiahnuté presnejšie výsledky.

➤ Okrajové podmienky

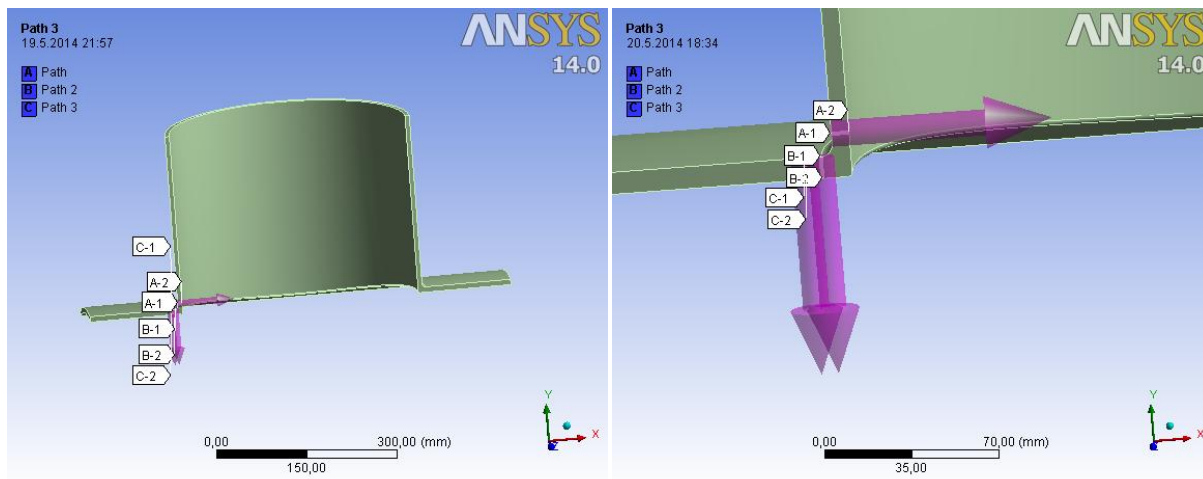
Boli nastavené nasledovné okrajové podmienky. Väzbové okrajové podmienky *Displacement* a *Cylindrical Support*, s rovnakými vlastnosťami ako v prípade plošného modelu. Ako záťažové okrajové podmienky boli zvolené zaťaženie celého modelu teplotou, a zaťaženie tlakom na vnútornú plochu plášťa. Voľné koncové plochy hrdla N08 boli zaťažené ekvivalentnou silou v smere von z hrdla, tiež bola zaťažená voľná koncová bočná plocha plášťa ekvivalentnou silou. Hodnoty jednotlivých zaťažení pri prevádzkových a skúšobných podmienkach sú uvedené v tab.4.1.

➤ Výpočet

Bol prevedený výpočet *Stress intensity*, ktorý vykreslil rozloženie napätia v submodele.

➤ Úsečka linearizácie

Bolo potrebné určiť úsečky linearizácie (Obr. 4.2.2), ktoré sú vedené po hrúbke steny v blízkosti prechodu hrdla do valcového plášťa. Po týchto úsečkách bol vykreslený priebeh napätí, ktoré slúžia na kategorizáciu napätí.



Obr. 4.2.2 Úsečky linearizácie

4.3. Kategorizácia napätí

Postup kategorizácie napätí vychádza z ČSN EN 13 445 – 3, príloha C. Kategorizácia napätí je prevedená pre úsečky A1-A2, B1-B2, C1-C2 (Obr. 4.2.2) podľa obmedzení pre jednotlivé kategórie napätia. Kategorizácia napätí je prevedená pre prevádzkové podmienky a skúšobné podmienky.

Obmedzenie ekvivalentných primárnych napätí

$$(\sigma_{eq})_{Pm} \leq f \quad (336.)$$

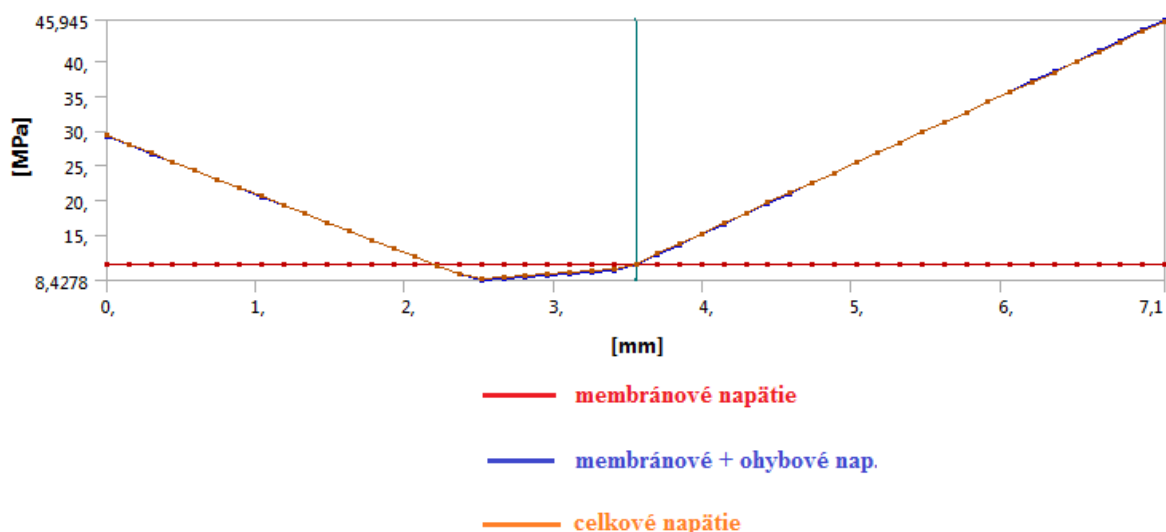
$$(\sigma_{eq})_p \leq 1,5 \cdot f \quad (337.)$$

Obmedzenie ekvivalentných rozkmitov napätí plynúcich z primárnych + sekundárnych napätí

$$(\Delta \sigma_{eq})_{P+Q} \leq 3 \cdot f \quad (338.)$$

Vo vzorcoch (336.), (337.), (338.) predstavuje f dovolené namáhanie materiálu, $(\sigma_{eq})_{Pm}$ predstavuje globálne membránové napätie, $(\sigma_{eq})_p$ predstavuje súčet membránového a ohybového napätia, $(\Delta \sigma_{eq})_{P+Q}$ predstavuje celkové napätie. Celkové napätie na úsečke predstavuje súčet lineárnych membránových a ohybových napätí. [2]

Priebeh napätí po úsečke A1-A2 pri prevádzkovom zaťažení je na Obr. 4.2.3. Priebeh napätí po úsečkách B1-B2, C1-C2 pri prevádzkovom a skúšobnom zaťažení je uvedený v prílohe č.1.



Obr. 4.2.3 Priebeh napätí po úsečke A1-A2 pri prevádzkovom zaťažení

Kategorizácia napätí pre prevádzkový stav je uvedená v Tab. 4.3, pre skúšobný stav v Tab. 4.4. Hodnoty napätí boli odčítané z výsledkov v programe ANSYS Workbench 14.0.

Tab. 4.3 Kategorizácia napätí pre prevádzkový stav

Úsečka linearizácie	Typ napätia	Kategória napätia	Hodnota napätia [MPa]	Limit napätia [MPa]	Podmienka splnená/nesplnená
A1-A2	membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	10,67	158,33	splnená
	membránové + ohybové	$(\sigma_{eq})_P$	45,95	237,50	splnená
	celkové	$(\Delta\sigma_{eq})_{P+Q}$	45,66	474,99	splnená
B1-B2	membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	15,82	158,33	splnená
	membránové + ohybové	$(\sigma_{eq})_P$	57,33	237,50	splnená
	celkové	$(\Delta\sigma_{eq})_{P+Q}$	69,61	474,99	splnená
C1-C2	membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	26,98	158,33	splnená
	membránové + ohybové	$(\sigma_{eq})_P$	81,82	237,50	splnená
	celkové	$(\Delta\sigma_{eq})_{P+Q}$	81,99	474,99	splnená

Tab.4.4 Kategorizácia napätí pre skúšobný stav

Úsečka linearizácie	Typ napätia	Kategória napätia	Hodnota napätia [MPa]	Limit napätia [MPa]	Podmienka splnená/nespĺnená
A1-A2	membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	40,11	255,00	splnená
	membránové + ohybové	$(\sigma_{eq})_P$	172,75	382,50	splnená
	celkové	$(\Delta\sigma_{eq})_{P+Q}$	171,68	765,00	splnená
B1-B2	membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	59,48	255,00	splnená
	membránové + ohybové	$(\sigma_{eq})_P$	215,57	382,50	splnená
	celkové	$(\Delta\sigma_{eq})_{P+Q}$	261,72	765,00	splnená
C1-C2	membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	101,45	255,00	splnená
	membránové + ohybové	$(\sigma_{eq})_P$	307,65	382,50	splnená
	celkové	$(\Delta\sigma_{eq})_{P+Q}$	308,29	765,00	splnená

Všetky výsledné hodnoty napětí sú nižšie ako ich limity pri prevádzkovom stave aj pri skúšobnom stave, z čoho vyplýva, že navrhnutá geometria vyhovuje záťažnému stavu.

5. Záver

Úvodná časť diplomovej práce obsahuje rešerš, ktorá sa zaoberá problematikou tlakových nádob. Sú uvedené teoretické znalosti z oblasti konštrukcie tlakových nádob, možnosti ich výroby, montáže a kontroly. Rešerš tiež uvádza princípy druhov destilácií, a popisuje typy vnútorných súčastí destilačných kolón.

Praktická časť je venovaná konštrukčnému návrhu a pevnostnému výpočtu destilačnej kolóny podľa normy ČSN EN 13 445 – 3. Výpočet bol vykonaný pre prevádzkové aj skúšobné podmienky a realizovaný programom MAPLE. V konštrukčnom návrhu sa stanovili hodnoty dovoleného namáhania materiálu jednotlivých častí kolóny, a bola určená hodnota skúšobného tlaku. Tiež sa stanovili minimálne hodnoty hrúbky stien škrupinových častí, teda valcového plášťa a torosferických dien. Ďalej bola prevedená pevnostná kontrola jednotlivých častí aparátu. Valcový plášť, torosferické dná, hrdlá, príruby a valcový podstavec splňujú požadované kritériá, a teda geometria destilačnej kolóny z pevnostného hľadiska vyhovuje daným požiadavkam. Bola tiež uskutočnená kontrola vystuženia hrdiel. Geometria všetkých hrdiel spĺňa podmienky dané normou.

V praktickej časti bola ďalej uskutočnená analýza zvolenej časti aparátu pomocou MKP v programe ANSYS Workbench 14.0. Analýza bola prevedená pre zaťaženie kolóny pri prevádzkovom aj skúšobnom stave. Najskôr bol analýze podrobený plošný model, teda výrez destilačnej kolóny, ktorý zahrňuje časť valcového plášťa a 6 priľahlých hrdiel. Bolo zistené miesto v modeli, kde je dosiahnuté najväčšie napätie. Následne bol vytvorený submodel najrizikovejšej časti, v ktorom bola realizovaná kategorizácia napätí. V submodele boli určené priamky linearizácie, na ktorých boli vypočítané pôsobiace napätia. Napätia boli ďalej kategorizované a porovnané s ich limitmi. Podmienky pre jednotlivé pôsobiace napätia boli splnené, a teda zvolená časť nádoby vyhovuje z pevnostného hľadiska danému zaťaženiu.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] SCHNEIDER, P.: *Základy konstruování procesních zařízení*. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., Brno, 1999. ISBN 80-214-1483-9.
- [2] ČSN EN 13445-3: *Netopené tlakové nádoby - Část 3: Konstrukce a výpočet*. Brno: Český normalizační institut, 2003.
- [3] KŘUPKA, V.: *Výpočet válcových tenkostěnných kovových nádob a potrubí*. Praha: SNTL, 1967. ISBN 04-714-67.
- [4] KŘUPKA, V., SCHNEIDER P.: *Konstrukce aparátů*. Brno: PC-DIR, spol. s.r.o., 1998. ISBN 80-214-1124-4.
- [5] HENGSTEBECK, R.J.: *Destilace: Teoretické základy a návrh provozního zařízení*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. ISBN 04-603-66.
- [6] DITL, P.: *Difúzně separační pochody*. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03972-4.
- [7] *Destilace a rektifikace* [online]. 1997 [cit. 2014-03-05]. ISBN 8070803126. Dostupné z WWW: <<http://www.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.text.k21.destilace.rektifikace.pdf>>.
- [8] Ethanol Production Plants. *Tribal Energy and Environmental Information* [online]. [cit. 2014-03-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.teeic.anl.gov/er/biomass/restech/desc/ethanolplants/index.cfm>>.
- [9] MIKLOVIČOVÁ, E.: *Spojité procesy*. [online]. [cit. 2014-03-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.kasr.elf.stuba.sk/predmety/dp/destilacne.pdf>>.
- [10] Hampa Energy Engineering & Design Company.: *Pressure Vessel Design* [online]. 2011 [cit. 2014-03-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.pv-book.com/PVBOOK.pdf>>.
- [11] *Přírubové spoje* [online]. [cit. 2014-03-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.ipotrubni.cz/clanky/3.-projektovani-potrubni-spoje/prirubove-spoje.html>>.
- [12] HRIVNÁK, I.: *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2009. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [13] KOCH-GLITSCH.: *Flexitray: Valve trays* [online]. 2013 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.koch-glitsch.com/Document%20Library/FLEXITRAY.pdf>>
- [14] Hat International.: *Tray specification*. [online]. [cit. 2014-03-16]. Dostupné z WWW: <[http://www.hatltd.com/hosted/55000702/home.nsf/396e036940cdfb7a802571280074ad47/ac2df6c56cdcc671802573cf005227f1/\\$FILE/Design%20Guide%20-%20Trays.pdf](http://www.hatltd.com/hosted/55000702/home.nsf/396e036940cdfb7a802571280074ad47/ac2df6c56cdcc671802573cf005227f1/$FILE/Design%20Guide%20-%20Trays.pdf)>.
- [15] Distillation Column Tray Selection & Sizing – 1. *Separation technologies* [online]. 2012 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.seperationtechnology.com/distillation-column-tray-selection-1/>>
- [16] Selection Criteria of Packings. *Separation Technologies* [online]. 2012 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z WWW: <<http://seperationtechnology.com/selection-criteria-of-packings/>>.
- [17] JIROUT, T.: *Náplňové a patrové kolony*. [online]. [cit.2014-03-16]. Dostupné z WWW: <http://users.fs.cvut.cz/tomas.jirout/vyuka/hmp/hmp_soubory/hmp4_2.pdf>.
- [18] PRESSURE VESSELS DESIGN & ANALYSIS. *THE CULMINATES ENGINEERING SERVICES* [online]. 2010 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z WWW: <http://www.theculminates.com/pressure_vessels_d_a.html>.

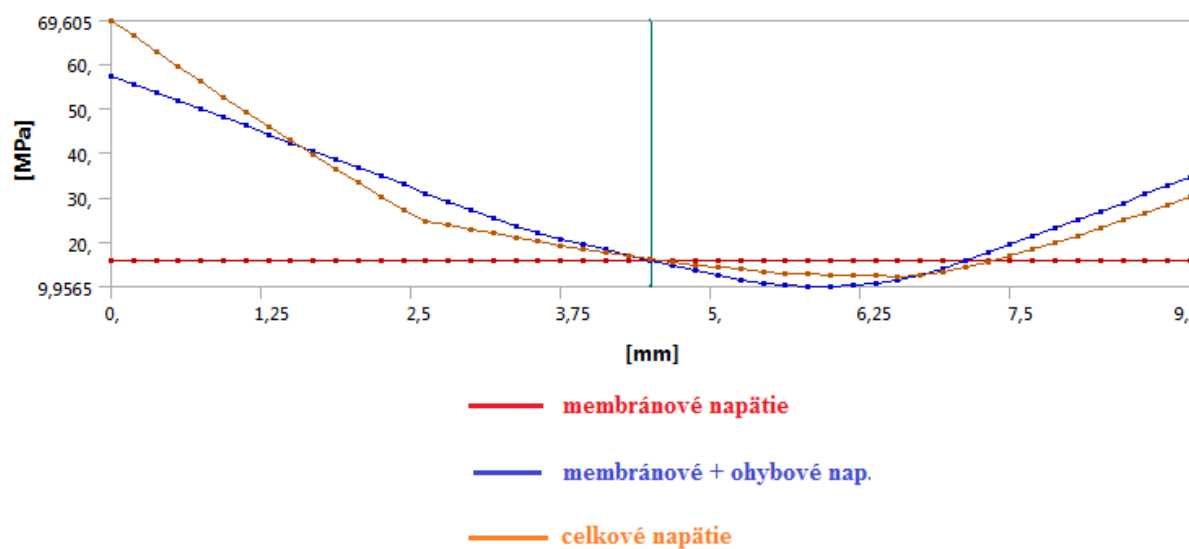
ZOZNAM PRÍLOH

Príloha č.1 – Priebehy napätí po úsečkách linearizácie pri prevádzkovom a skúšobnom stave

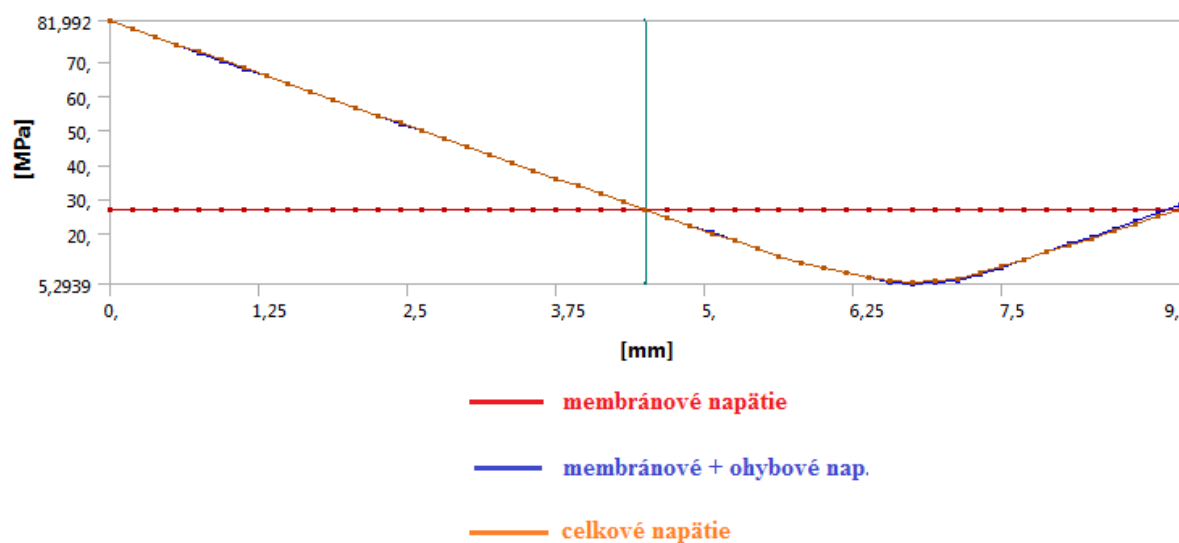
Príloha č.2 – Výkresová dokumentácia destilačnej kolóny

Príloha č.3 – CD-ROM

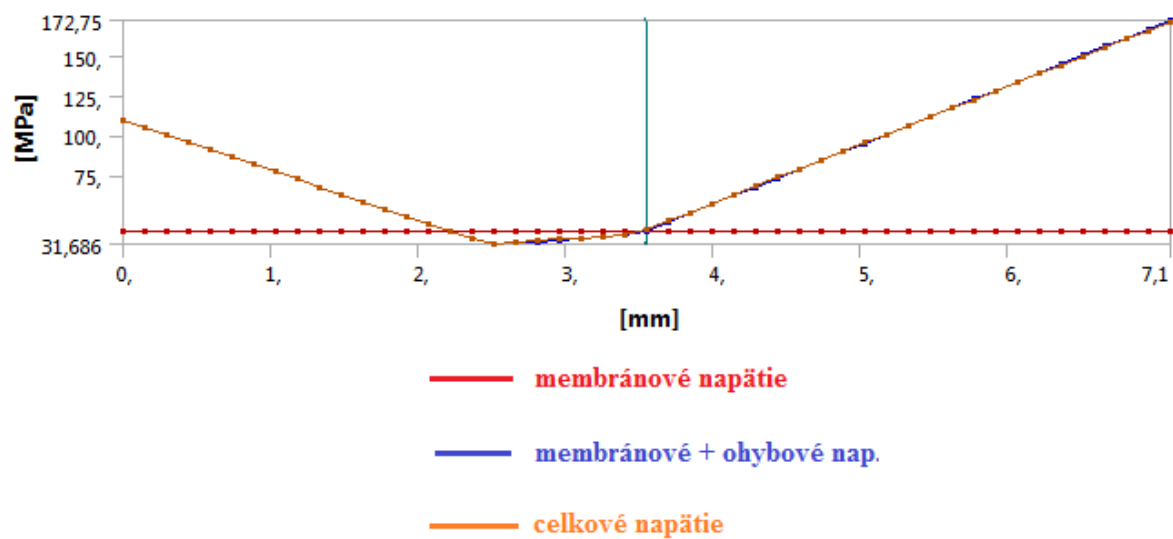
PRÍLOHA Č.1 - PRIEBEHY NAPÄTÍ PO ÚSEČKÁCH LINEARIZÁCIE PRI PREVÁDZKOVOM A SKUŠOBNOM STAVE



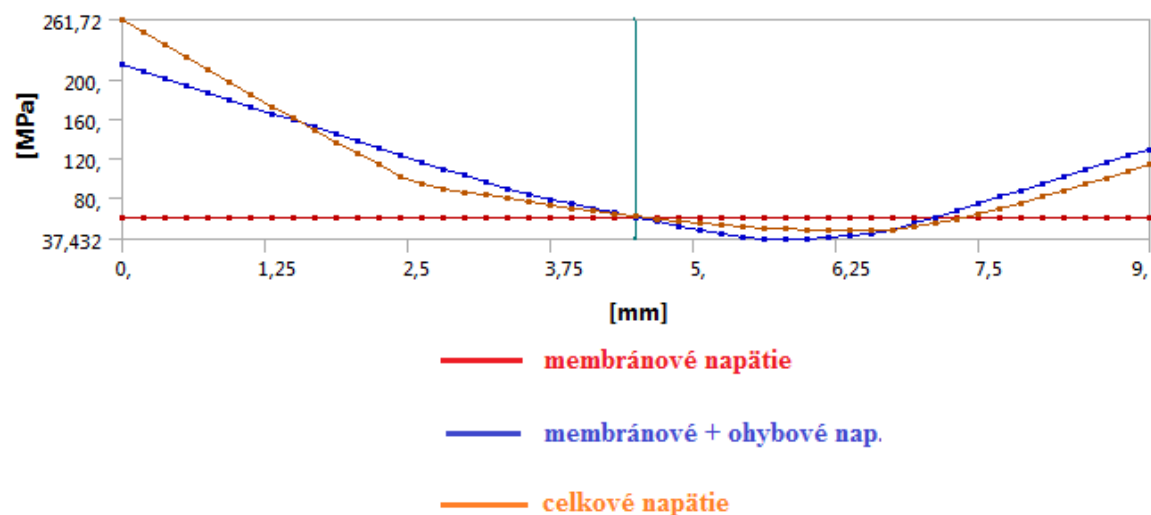
Obr. 1 Pribeh napätí po úsečke B1-B2 pri prevádzkovom zaťažení



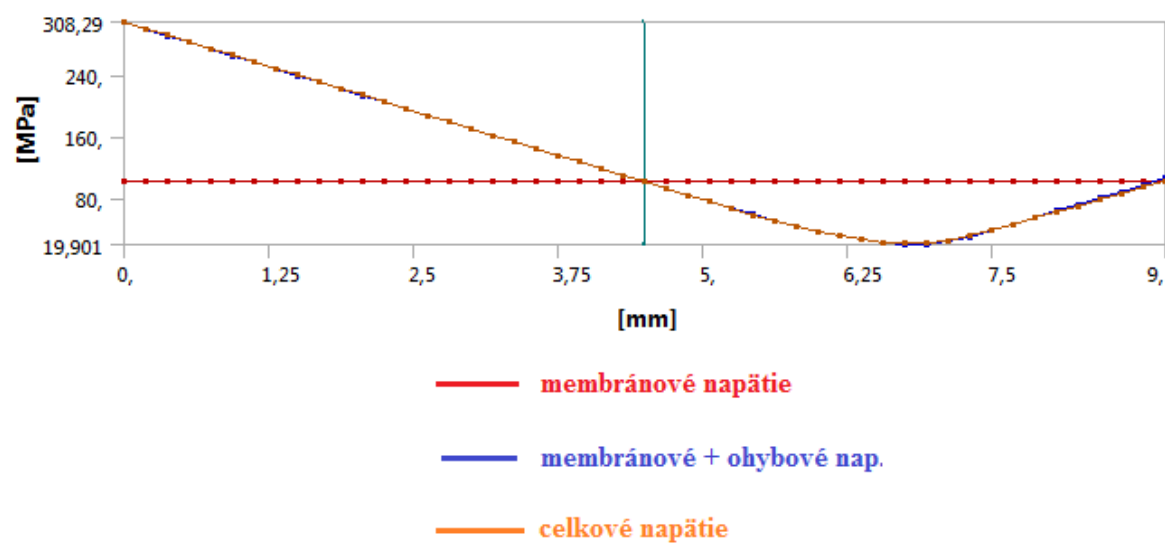
Obr. 2 Pribeh napätí po úsečke C1-C2 pri prevádzkovom zaťažení



Obr. 3 Priebeh napätí po úsečke A1-A2 pri skúšobnom zaťažení



Obr. 4 Priebeh napätí po úsečke B1-B2 pri skúšobnom zaťažení



Obr. 5 Priebeh napätí po úsečke C1-C2 pri skúšobnom zaťažení