

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF ENERGY

VÝMĚNÍK TEPLA
HEAT EXCHANGER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR ČÍPEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JAN FIEDLER, DR.

BRNO 2010

Abstrakt:

Výměník tepla je zařízení zprostředkovávající výměnu tepla mezi dvěma proudícími médii. Tato výměna může probíhat periodicky nebo kontinuálně. O výběru daného typu výměníku rozhoduje jeho určení a parametry vstupujících médií.

V této práci byla zpracována problematika trubkových rekuperačních výměníků a výpočet nového výměníku. Tento výměník má nahradit stávající dodaný Královopolskou roku 1974. Jedná se o výměníky s velkým rozsahem použitelnosti. Nacházejí široké uplatnění ve všech oborech, od energetických zařízení až po farmaceutické provozy.

Přepočítání původního výměníku bylo provedeno dle ČSN EN 13445 pro netopené tlakové nádoby. Výpočet byl proveden pro všechny tlakem zatížené části. Mezi tyto části patří plášť, dna, hrdla, trubkovnice a patky. Veškeré části vyhovují pro všechny způsoby zatížení.

Klíčová slova:

Výměník tepla, rekuperační výměník, trubkovnice, hrdlo, torosférické dno.

Abstract:

Heat exchanger is a device mediating the exchange of heat between two flowing mediums. This exchange can be periodical or continuous. The choice of the type of heat exchanger depends on the usage and parameters of entering medium.

This thesis deals with the tube recuperation (recovery) exchanger and calculation of new one. This new heat exchanger is supposed to replace current one produced by Kralovopolska in 1974. These heat exchangers have wide range of application. They are widely used in all fields, from energy related equipment to the pharmaceutical plants.

The conversion of current heat exchanger was made according to the ČSN EN 13 445 for non-heated pressure vessels. The calculation was made for all pressure load parts, among these are the mantle, beds, throats, tube plates and tube feet. All parts are suitable for all the styles of load.

Key words

Heat exchanger, recuperative heat exchanger, tube plate, throat, torispherical end.

Bibliografická citace mé práce:

ČÍPEK, P. Výměník tepla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 40 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

Já, Petr Čípek, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne: 26.5.2010

.....

Poděkování:

Chci poděkovat panu ing. Václavu Nováčkovi, že mi umožnil vypracovat tuto práci ve spolupráci s Královopolskou Brno.

OBSAH:

1. Úvod	10
2. Princip funkce	10
3. Rozdělení výměníků.....	10
3.1 Dle směru vzájemného proudění médií.....	10
3.2 Dle pracovního pochodu	10
3.3 Dle způsobu cirkulace	11
3.4 Dle účelu dělíme výměníky.....	12
3.5 Dle způsobu předávání tepla	12
3.6 Dle druhu používaných teplotnosných médií.....	12
4. Používané druhy rekuperačních výměníků.....	12
4.1 Trubkové rekuperační výměníky.....	12
4.2 Deskový rekuperační výměník.....	14
5. Mechanické poruchy výměníků.....	15
5.1 Koroze	15
5.2 Zanášení.....	15
5.3 Abraze	16
6. Výpočet výměníku.....	16
6.1 Maximální přípustné hodnoty dovoleného namáhání tlakových částí	17
6.2 Návrh torosférického dna:	18
6.3 Hrdlo H1.....	20
6.3 Návrh torosférického dna	25
6.4 ČSN EN 13445-13 Trubkovnice	28
6.5 ČSN EN 13445: 13.10 Výpočet přírubového okraje trubkovnice s úzkým těsněním.	40
6.6 Návrh patek	42
7. Zhodnocení výpočtu.....	45
8. Závěr	46
9. Použité zdroje	48
10. Seznam příloh.....	48

1. Úvod

Tepelný výměník je zařízení, které slouží k výměně tepla mezi dvěma médii o různých parametrech. Výměna tepla může probíhat průběžně nebo přerušovaně. Médium o vyšší teplotě předává svou vnitřní energii kapalině o nižší teplotě. Jako tepelný výměník je bráno kterékoliv zařízení, které zprostředkovává přechod tepla mezi dvěma prostředími.

2. Princip funkce

Výměna tepla je termodynamický děj. Jedná se o děj, při kterém dochází ke změně jedné nebo více stavových veličin. Stavová veličina je základní veličina popisující stav termodynamické soustavy.

Teplu přechází z místa o vyšší teplotě do místa o teplotě nižší. Rozdíl teplot proudících médií je tedy hnací silou výměny tepla mezi nimi.

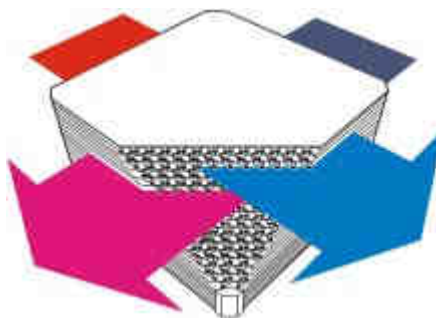
3. Rozdělení výměníků

3.1 Dle směru vzájemného proudění médií

- Souproudé:
Kapaliny v tomto typu výměníku proudí ve stejném směru.
- Protiproudé:
Kapaliny proudí v opačném směru.
- Křížový proud:
Kapaliny proudí v kolmém směru na sebe.

3.2 Dle pracovního pochodu

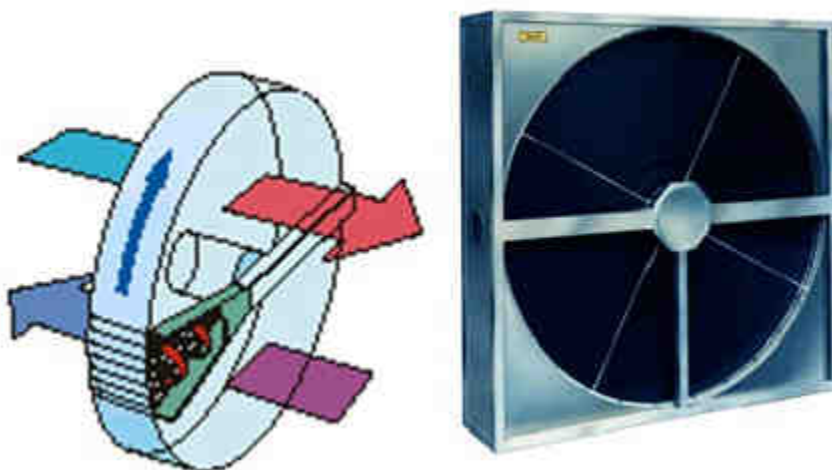
- Rekuperační
Teplosná média jsou zde oddělena stěnou, média tedy nejsou v kontaktu.
Rekuperační výměníky se často používají ke zpětnému získání odpadního tepla. Tyto výměníky mají poměrně široké uplatnění jak v průmyslových provozech, tak i v rodinných domech či bytech. Využívají se ve vzduchotechnických systémech ke zpětnému získání tepla odcházejícího s odpadním vzduchem. Odpadní vzduch sebou nese velké množství energie, která by jinak odešla bez užitku.
Toho se využívá například v hutnictví. Vzduch, který vstupuje do pecí je přehříván teplem odcházejících plynů.
Další využití je v kancelářských prostorách, rodinných domech a bytech kde je potřeba provádět výměnu znečištěného vzduchu za nový. Při přímém větrání by byly velké tepelné ztráty a použití výměníku slouží k úsporám energie, která by byla potřebná na ohřátí přivedeného vzduchu. Pokud je vzduch ve městech znečištěný kombinuje se výměník s filtrací, která čistí přiváděný vzduch.



Obr.1: Deskový rekuperační výměník [4]

- Regenerační

Tyto výměníky jsou schopné získávat z odváděného vzduchu jak teplo zjevné tak i teplo latentní. Ohřívané médium vtéká opakovaně do prostoru s teplo zprostředkujícím elementem, ze kterého přijímá teplo. Toto teplo mu předalo médium ohřívající. Nevýhodou těchto výměníků je možné přisávání části odpadního vzduchu do vzduchu přiváděného.



Obr.2: Rotační regenerační výměník [5]

- Směšovací

V těchto typech výměníků dochází ke kontaktu teplotonosných kapalin. Teplotonosné kapaliny tedy nejsou odděleny stěnou. Přiváděná média vytvářejí homogenní směs. Výhodou je vyšší teplota ohřátí oproti regeneračnímu výměníku. Rozdíl teplot vystupujících kapalin je nulový. Nevýhodou je nutnost stejného tlaku přiváděných kapalin.

- Kontaktní

Dochází k přímému kontaktu přiváděných médií. Přiváděná média jsou v různých fázích, předávají teplo přímým kontaktem. Po předání tepla jsou od sebe opět oddělena. Teplosměnná plocha je dána povrchem částic pevné fáze.

3.3 Dle způsobu cirkulace

- S přirozenou cirkulací
Cirkulace médií je způsobena rozdílem jejich hustot.
- S nucenou cirkulací

Cirkulaci zajišťuje cirkulační čerpadlo nebo ventilátor.

- S nuceným průtokem

3.4 Dle účelu dělíme výměníky

- ohříváky – Slouží ke zvýšení teploty přiváděného média. Médium zůstává ve stejné fázi.
- chladiče – Slouží ke snížení teploty přiváděného média bez změny jeho fáze.
- výparníky a odparky – Slouží ke změně ohřívaného média z kapalné fáze do plynné.
- kondenzátory – Slouží ke změně ohřívaného média z plynné fáze do kapalné. Kapalná fáze je odváděna jako kondenzát.
- přehříváky a přihříváky – Slouží ke zvýšení teploty syté nebo přehřáté páry.
- parní generátory – Slouží k výrobě páry.
- sušárny – Přiváděným teplem se suší (snižuje vlhkost) látky v pevné fázi.
- termické odplyňovávky vody – Při parním ohřevu vody kolem bodu varu se z ní vylučují pohlčené plyny.
- topná tělesa ústředního vytápění – Otopné médium ohřívá vzduch v místnosti.

3.5 Dle způsobu předávání tepla

- konvekční – předané teplo závisí na proudícím médiu
- sálavé – převážná část tepla se předává sáláním
- kombinované – jedná se o kombinaci obou předchozích případů

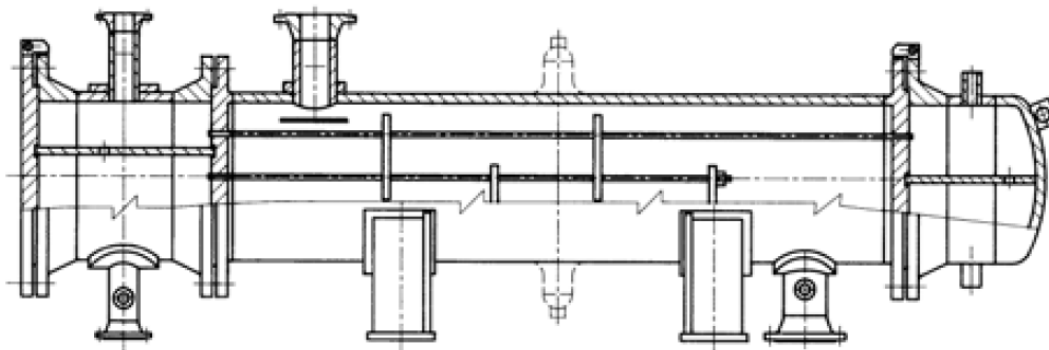
3.6 Dle druhu používaných teplotnosných médií

- kapalina-kapalina
- kapalina-plyn
- plyn-plyn

4. Používané druhy rekuperačních výměníků

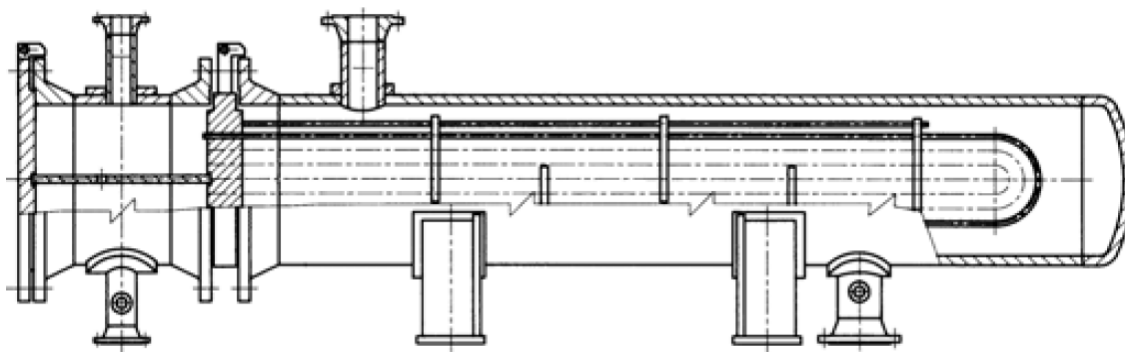
4.1 Trubkové rekuperační výměníky

Tyto výměníky nacházejí široké uplatnění v chemii, petrochemii, energetických zařízeních, průmyslových provozech, potravinářství, farmacii atd. Mají dobrou teplotní a tlakovou odolnost (závisí na druhu použitých materiálů).



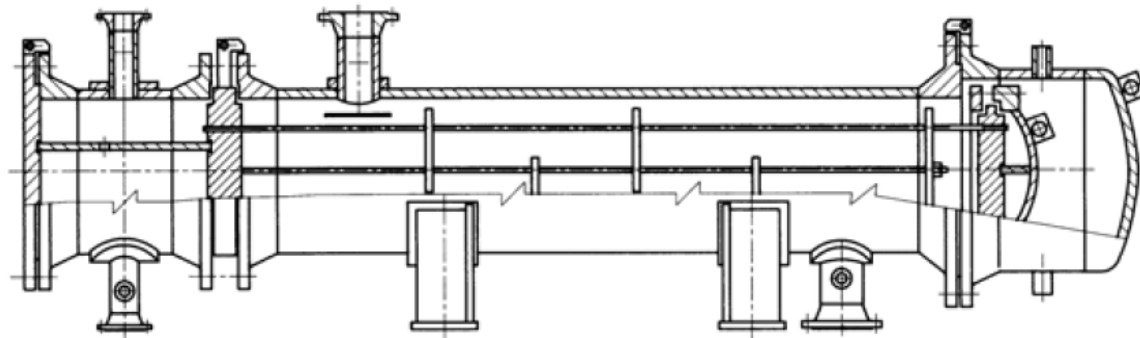
Obr.3: Výměník s pevnými trubkovnicemi, s možným kompenzátorem dilatací v plášti [6]

Jedná se o nenáročnou a odzkoušenou technologii. Oproti deskovým výměníkům mají při stejném výkonu až desetinásobnou hmotnost a horší regulovatelnost. Při použití kapilár, jejichž průměr je menší než 3mm hrozí ucpání mechanickými nečistotami. Skládá se z vnějšího pláště a dvou trubkovnic. V trubkovnicích jsou zaválcovány, zavařeny nebo zaválcovány a zavařeny teplosměnné trubky. Do mezitrubkového prostoru, který je 2-3x větší než průtokový průřez trubek, se často umísťují přepážky. Slouží k rozbití proudu kapaliny proudící v mezitrubkovém prostoru. Jakožto trubkový výměník se rovněž považuje výměník trubka v trubce. Mezi jejich přednosti patří možnost sestavení potřebného počtu výměníků za sebou, možnost výměny poškozené trubky, poměrně méně náročná výroba a dobrá možnost čištění. Dostí značnou nevýhodou je možnost použití pouze pro menší teplotní rozdíly obou médií. Pokud by byl velký rozdíl teplot, hrozí poškození trubek v důsledku teplotní dilatace. Teplotní dilatace se dají kompenzovat pouze v malé míře. Jednou z možností jejich kompenzování je použití kompenzátoru délkové dilatace. Další možností je výměník s plovoucí hlavou, nebo použití svazku U-trubek.



Obr.4: Výměník s U-trubkami [6]

Použití svazku U-trubek má mnoho výhod. Mezi jeho největší přednosti patří to, že trubky jsou umístěny volně a mohou se roztahovat (dilatovat). Výměníky mají nízkou hmotnost a svazek trubek je kompaktní a dobře využívá prostor pláště. Nevýhodou tohoto typu výměníku je nemožnost výměny poškozené trubky a nemožnost čištění svazku trubek. Při vyšších tlacích narůstá znatelně tloušťka trubkovnice.



Obr.5: Výměník s plovoucí hlavou [6]

Další používaný typ výměníku, který má možnost kompenzace délkové dilatace je výměník s plovoucí hlavou. Používají se tam kde roztažnost teplosměnných trubek a pláště výměníku je větší než povolená a docházelo by k nadměrnému zatížení trubkovnice.

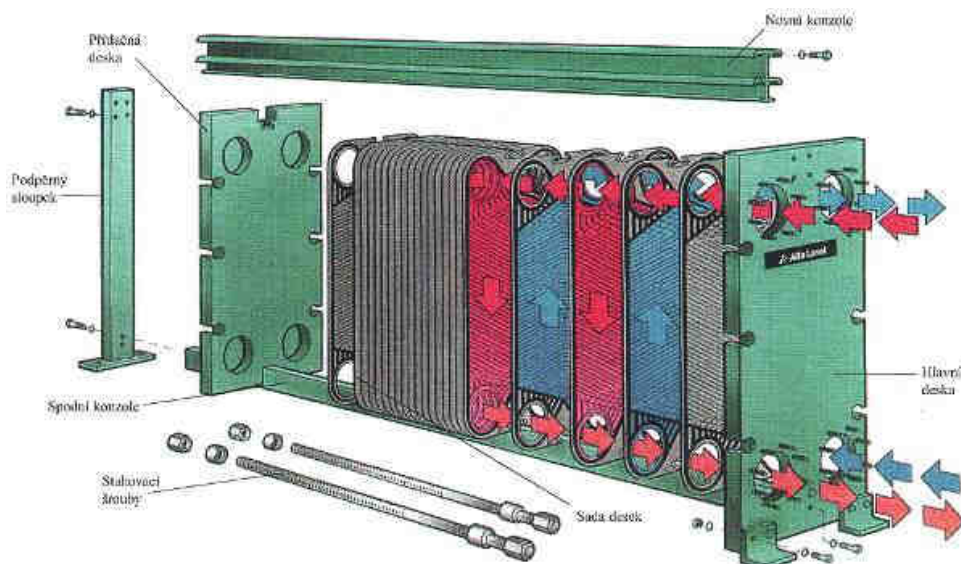
Další používaný typ trubkového výměníku je výměník se šroubovitě vinutými trubkami. Trubky jsou ve výměníku vedeny v jedné nebo více řadách. Jejich výhodou je jednoduchost výroby a dobré přestupy tepla při obtékání trubek. Negativem je horší využití prostoru výměníku a trubka z jednoho kusu, což má za následek výměnu celé trubky při jejím porušení. Tento výměník lze využít i jako parní vyvíječ páry. Ohřívacím médiem mohou být spaliny a ohříváním voda. Na konci výměníku z něj bude vystupovat sytá pára. V tomto případě by byl vnitřní prostor výměníku využit jako spalovací komora.

4.2 Deskový rekuperační výměník

Teplosměnou plochu tvoří tenké kovové desky, které mají v profilu vylisované kanálky. V těchto kanálcích proudí protiproudě v přilehlých deskách média. Desky mohou být spojeny pájením nebo staženy šroubovými svorníky. Při použití svorníků jsou mezi desky vložena těsnění.

Dobrý přestup tepla je způsoben malou tloušťkou desek. Desky jsou tvořeny z plechů tloušťky 0,4-1mm. Používaný materiál se liší podle proudících médií, teplot a tlaků. Deskové výměníky se nejčastěji používají pro ohřev kapalin při tlacích do 3,5MPa a teplotě do 150°C výjimečně se vyrábí některé typy pro teploty do 270°C.

Tyto výměníky jsou kompaktní a lze jednoduše zvýšit výkon přidáním dalších desek. Nevýhodou je obtížně dosažitelná těsnost pro vyšší tlaky a nutnost čistoty obou médií aby nedocházelo k zanášení.



Obr.6: Deskový rekuperační výměník [7]

5. Mechanické poruchy výměníků

Při provozu výměníků vznikají mechanické poruchy, které způsobují následující faktory. Lze je rozdělit na poruchy způsobené proudícími médii, kterými jsou:

- koroze
- zanášení
- abraze

Dalšími mechanickými poruchami jsou výrobní vady, kterým by se mělo předejít tlakovou zkouškou výměníku. Mezi tyto poruchy patří:

- netěsnost v zaválcování trubek
- špatné svary
- trhliny vzniklé v důsledku vibrační svazky trubek, případně tepelnou roztažností
- kavitační poškození

5.1 Koroze

Korozi způsobují teplotně agresivní média. Snižuje tloušťku stěn trubek a způsobuje jejich zanášení. O zanášení hovoříme spíše u malých průměrů trubek. Korozi způsobuje nejčastěji špatný pH faktor a špatně odplyněná voda. Působení koroze na výměník lze snížit použitím kvalitnějších materiálů teplosměnných trubek.

Další způsob odstranění korozního působení na výměník je katodová ochrana. Kov, který má být chráněn je v přímém styku s kovem, který snadněji podléhá koroznímu působení média. Médium postupně koroduje pouze tento materiál a tím je kov výměníku chráněn.

5.2 Zanášení

Pod pojmem zanášení rozumíme usazování různých materiálů, které obsahují teplosměnná média na teplosměnných plochách. Mezi usazující se materiály patří zejména různé druhy solí, produkty koroze a pevné látky. Usazeniny způsobují zvýšení tepelného odporu teplosměnných ploch a tím snižují přenos tepla čímž i celkovou účinnost výměníku.

Další negativní působení nánosů je zmenšení průtočného průměru, což má za následek zvýšení rychlosti proudícího média, z tohoto plynoucí zvýšení tlakové ztráty a dále nárůst výkonu čerpadla nebo ventilátoru, dle druhu použitého výměníku. Pokud dojde k úplnému zanesení výměníku, začne narůstat tlak a může dojít i k prasknutí trubek, vytržení trubky z trubkovnice, prasknutí svarů.

Způsoby ovlivnění zanášení:

- konstrukční opatření
- snížení množství solí v médiích
- snížení množství popílku ve spalínách
- mechanické čištění trubek výměníku
- chemické čištění

5.3 Abraze

Opotřebením teplosměnných ploch otěrem (abrazí) nastává tam kde teponosná média obsahují tuhé částice. Toto nastává převážně popílkem ze spalování, tzv. popílkovým otěrem. Další možný způsob abraze usazeninami ve výměníku. Tyto usazeniny způsobí zvýšení rychlosti proudícího média, které je pak strhává sebou. Opotřebením je dále podobné jako u spalin.

6. Výpočet výměníku

Jedná se trubkový rekuperační výměník pracující při teplotách do 150°C a tlacích do 0,3MPa. Vzhledem k poměrně nízkým teplotám má výměník pevnou trubkovnici. Trubkový svazek tvoří 85 trubek. Obě média proudící ve výměníku tvoří voda.

Tento výměník nahradí stávající trubkový výměník.

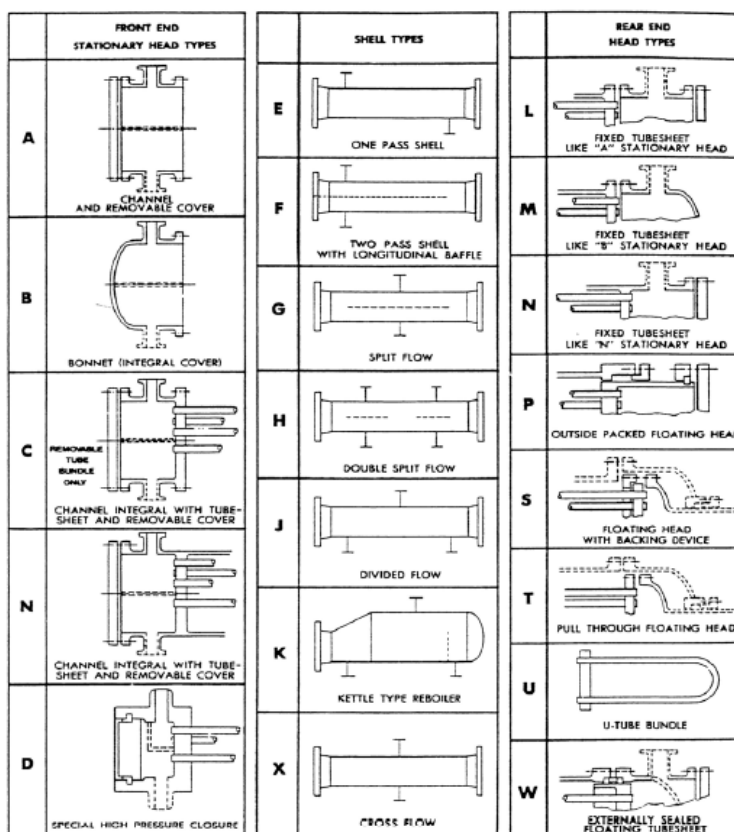
Vstupní hodnoty:

		plášťový prostor	trubkový prostor	
Největší pracovní tlak	P	0,3	0,17	MPa
Výpočtová teplota	t	150	100	°C
Zkušební tlak vodou	P _{test}	0,43	0,25	Mpa
Přídavek na korozi	c	1	2	mm
Počet trubek		85		
Objem	V	56	57	l
Teplosměnná plocha		6,18		m ²
Součinitel hodnoty svarového spoje	z	0,85		
Vnitřní průměr skořepiny	D _i	361		mm
Minimální horní mez kluzu	ReH	265		MPa
Minimální smluvní mez kluzu při t=150°C	Rp0,2/150	223		MPa
Minimální mez pevnosti v tahu	Rm	410-530		MPa
Maximální hodnota dovoleného namáhání pro běžné provozní zatížení	fd	148,67		MPa

Dovolené namáhání	f	148,67		MPa
Poloměr torosférického dna	R	302		mm
Vnitřní poloměr anuloidového přechodu	r	58		mm
Vnitřní průměr skořepiny	Di	361		mm
Vnější průměr skořepiny	De	377		mm

tab.1: Vstupní parametry

Použitý typ výměníku:



Obr.7: Používané typy trubkových výměníků dle TEMA Standard [8]

Dle TEMA Standardu se jedná o výměník typu BEN. Je to výměník s pevnými integrálními trubkovnicemi s pláštěm.

6.1 Maximální přípustné hodnoty dovoleného namáhání tlakových částí

Případy normálního provozního zatížení

Určení maximální hodnoty dovoleného namáhání pro běžné provozní zatížení:

-Nejmenší vypočtená hodnota dle použitého materiálu

$$f_d = \text{Min}(R_{p0,2/t}/1,5; R_{m/20}/2,4) = 148,67 \text{ MPa}$$

Skořepina zatížená vnitřním tlakem.

Válcová skořepina

Požadovaná tloušťka skořepiny:

$$e_{min} = P \cdot D_i / (2 \cdot f \cdot z - P) = 0,3 \cdot 361 / (2 \cdot 148,67 \cdot 0,85 - 0,3) = 0,43 \text{ mm}$$

$$e_{min} = e_{min} + c + th = 0,43 + 1 + 0,5 = 1,93 \text{ mm}$$

Rozbor tloušťky

$$ea=en-c-th=8-1-0,5=6,5\text{mm}$$

Podmínka platnosti

$$e/De=0,0011<0,16\Rightarrow \text{platí}$$

$$emin=1,93\Rightarrow en=8[\text{mm}]$$

Maximální přípustný pracovní tlak P_{max}

Vnitřní průměr skořepiny

$$Di=De-2*ea=377-2*6,5=364\text{mm}$$

Střední průměr skořepiny

$$Dm=(De+Di)/2=(377+364)/2=370,5\text{mm}$$

P_{maxk} (korozní stav při výpočtové teplotě)

$$P_{maxk}=2*f*z*ea/Dm=2*148,67*0,85*6,5/370,5=4,43\text{MPa}$$

P_{maxn} (nekorozní stav při teplotě okolí)

$$P_{maxn}=2*f_{20}*z*(ea+c)/Dm=2*170,83*0,85*(6,5+1)/370,5=5,88\text{MPa}$$

Maximální zkušební tlak P_{tmax}

$$P_{tmax}=2*f_{test}*z_{test}*(ea+c)/Dm=2*252,38*1*(6,5+1)/370,5=10,22\text{MPa}$$

Minimální hydrostatický zkušební tlak P_{tmin}

$$P_{tmin}=1,25*P_d*f_{20}/f=1,25*0,3*170,83/148,67=0,431\text{MPa}$$

$$P_{tmin}=1,43*P_d=1,43*0,3=0,429\text{MPa}$$

Největší nevystužený průměr skořepiny

Vnitřní poloměr skořepiny:

$$ris=Di/2=364/2=182\text{mm}$$

Délka skořepiny s přídatkem na zpevnění

$$Is=\text{Sqr}((2*ris+ea)*ea)=\text{Sqr}((2*182+6,5)*6,5)=49,07\text{mm}$$

$$d_{max1}=(ea*Is*(f-0,5*P)/P-ris*Is)/(0,5*ris+0,5*ea) =$$

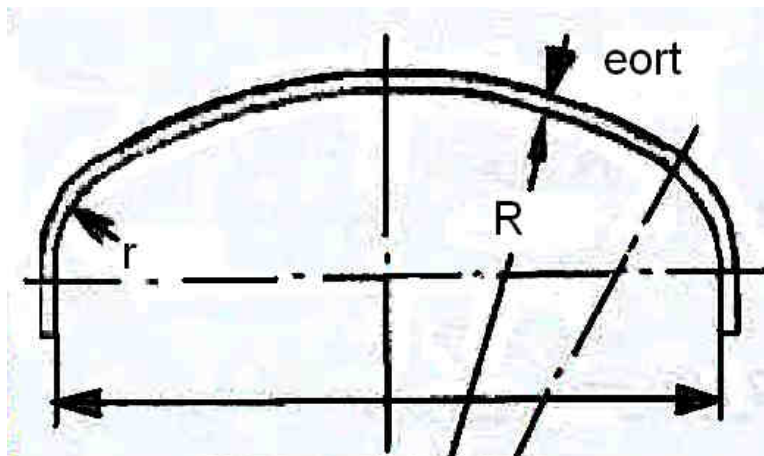
$$=(6,5*49,07*(148,67-0,5*0,3)/0,3-182*49,07)/(0,5*182+0,5*6,5)=182\text{mm}$$

$$d_{max2}=0,15*\text{Sqr}((2*ris+ea)*ea)=0,15*\text{Sqr}((2*182+6,5)*6,5)=7,36\text{mm}$$

Největší nevystužený průměr skořepiny

$$d_{max}=\text{MAX}(d_{max1};d_{max2})=\text{MAX}(182;7,36)=182\text{mm}$$

6.2 Návrh torosférického dna:



Obr.8: Torosférické dno

Minimální požadovaná tloušťka dna

$$es = P \cdot R / (2 \cdot f \cdot z - 0,5 \cdot P) = 0,187 \cdot 302 / (2 \cdot 166,67 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,187) = \underline{0,1695 \text{ mm}}$$

$$fb = R \cdot p_{0,2/1,5} = 205 / 1,5 = \underline{136,67 \text{ N/mm}^2}$$

$$eb = (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot Di) \cdot (P / (111 \cdot fb) \cdot (Di/r)^{0,825})^{(0,667)} = \\ = (0,75 \cdot 302 + 0,2 \cdot 361) \cdot ((0,187 / (111 \cdot 136,67)) \cdot (361/58)^{0,825})^{(0,667)} = \underline{0,434 \text{ mm}}$$

Parametr bpro torosférická dna

$$Y = \text{MIN}(emin/R; 0,04) = \text{MIN}(0,1695/302; 0,04) = 0,00056126$$

$$Z = \text{LOG}(1/Y) = \text{LOG}(1/0,00056126) = 3,2508$$

$$X = r/Di = 58/371$$

$$N = 1,006 - 1 / (6,2 + (90 \cdot Y)^4) = 1,006 - 1 / (6,2 + (90 \cdot 0,00056126)^4) = 0,8681$$

$$\text{beta}01 = N \cdot (-0,1833 \cdot Z^3 + 1,0383 \cdot Z^2 - 1,2943 \cdot Z + 0,837) = \\ = 0,8618 \cdot (-0,1833 \cdot 3,2508^3 + 1,0383 \cdot 3,2508^2 - 1,2943 \cdot 3,2508 + 0,837) = 1,1023$$

$$\text{beta}02 = \text{MAX}(0,5; 0,95 \cdot (0,56 - 1,94 \cdot Y - 82,5 \cdot Y^2)) =$$

$$= \text{MAX}(0,5; 0,95 \cdot (0,56 - 1,94 \cdot 0,00056126 - 82,5 \cdot 0,00056126^2)) = 0,5309$$

$$\text{beta} = 10 \cdot ((0,2 - X) \cdot \text{beta}01 + (X - 0,1) \cdot \text{beta}02) = 10 \cdot ((0,2 - X) \cdot 1,1023 + (X - 0,1) \cdot 0,5309) = 0,7804$$

Minimální tloušťka dna bez přídavků:

$$emin01 = \text{MAX}(es; eb) = (0,1695; 0,434) = \underline{0,434 \text{ mm}}$$

Minimální tloušťka dna s přídavky:

$$emin = emin01 + c + th = 0,434 + 2 + 0,5 = \underline{2,934 \text{ mm}}$$

Zvoleno $en = 5 \text{ mm}$

Analyzovaná tloušťka:

$$ea = en - c - th = 5 - 2 - 0,5 = 2,5 \text{ mm}$$

Vnitřní průměr dna:

$$Di = De - 2 \cdot (en - c) = 377 - 2 \cdot (2,5 - 2) = 371 \text{ mm}$$

Střední průměr dna:

$$Dm = (De + Di) / 2 = (377 + 371) / 2 = 374 \text{ mm}$$

Požadovaná minimální tloušťka válcové příruby

$$Llim = 0,2 \cdot \text{SQR}(Di \cdot emin01) = 0,2 \cdot \text{SQR}(371 \cdot 0,434) = 2,54 \text{ mm}$$

$$Lcyl > Llim$$

$$ecyl = P \cdot Di / (2 \cdot f \cdot z - P) = 0,187 \cdot 371 / (2 \cdot 166,67 \cdot 1 - 0,187) = \underline{2,0824 \text{ mm}}$$

Musí být splněny všechny následující vztahy:

$$r \leq 0,2D_i \quad 58 \leq 74,2 \Rightarrow \text{vztah platí}$$

$$r \geq 0,06D_i \quad 58 \geq 22,26 \Rightarrow \text{vztah platí}$$

$$r \geq 2e \quad 58 \geq 16 \Rightarrow \text{vztah platí}$$

$$e \leq 0,08D_e \quad 0,46 \leq 30,16 \Rightarrow \text{vztah platí}$$

$$e_a \geq 0,001D_e \quad 8 \geq 0,377 \Rightarrow \text{vztah platí}$$

$$R \leq D_e \quad 302 \leq 377 \Rightarrow \text{vztah platí}$$

MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÝ PRACOVNÍ TLAK: NOVÝ A STUDENÝ

$$Ps = 2 \cdot f \cdot z \cdot ea / (R + 0,5 \cdot ea) = 2 \cdot 180 \cdot 1 \cdot 4,5 / (302 + 0,5 \cdot 4,5) = 5,32 \text{ MPa}$$

$$Py = f \cdot ea / (\text{beta} \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot Di)) = 180 \cdot 4,5 / (0,7804 \cdot (0,75 \cdot 302 + 0,2 \cdot 371)) = 3,45 \text{ MPa}$$

$$PB = 111 \cdot fb \cdot (ea / (0,75 \cdot 302 + 0,2 \cdot 371))^{1,5} \cdot (r/Di)^{0,825} =$$

$$= 111 \cdot 138,46 \cdot (4,5 / (0,75 \cdot 302 + 0,2 \cdot 371))^{1,5} \cdot (58/371)^{0,825} = 6,08 \text{ MPa}$$

$$Pmax = \text{MIN}(Ps; Py; PB) = (5,23; 3,45; 6,08) = \underline{3,45 \text{ MPa}}$$

MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÝ PRACOVNÍ TLAK: TEPLÝ A ZKORODOVANÝ

$$P_s = 2 * f * z * e_a / (R + 0,5 * e_a) = 2 * 166,67 * 1 * 2,5 / (302 + 0,5 * 2,5) = 2,748 \text{ MPa}$$

$$P_y = f * e_a / (\beta * (0,75 * R + 0,2 * D_i)) = 166,67 * 2,5 / (0,7804 * (0,75 * 302 + 0,2 * 371)) = 1,77 \text{ MPa}$$

$$P_B = 111 * f_b * (e_a / (0,75 * 302 + 0,2 * 371))^{1,5} * (r / D_i)^{0,825} =$$

$$= 111 * 136,67 * (2,5 / (0,75 * 302 + 0,2 * 371))^{1,5} * (58 / 371)^{0,825} = 2,487 \text{ MPa}$$

$$P_{\max} = \text{MIN}(P_s; P_y; P_B) = (5,748; 1,77; 2,487) = \underline{1,77 \text{ MPa}}$$

MAXIMÁLNÍ ZKUŠEBNÍ TLAK (Nezkorodovaný, za normální teploty)

$$P_s = 2 * f * z * e_a / (R + 0,5 * e_a) = 2 * 265 * 1 * 4,5 / (302 + 0,5 * 4,5) = 7,839 \text{ MPa}$$

$$P_y = f * e_a / (\beta * (0,75 * R + 0,2 * D_i)) = 265 * 4,5 / (0,7804 * (0,75 * 302 + 0,2 * 371)) = 5,08 \text{ MPa}$$

$$P_B = 111 * f_b * (e_a / (0,75 * 302 + 0,2 * 371))^{1,5} * (r / D_i)^{0,825} =$$

$$= 111 * 197,8 * (4,5 / (0,75 * 302 + 0,2 * 371))^{1,5} * (58 / 371)^{0,825} = 8,694 \text{ MPa}$$

$$P_{\max} = \text{MIN}(P_s; P_y; P_B) = (7,839; 5,08; 8,694) = \underline{5,08 \text{ MPa}}$$

MINIMÁLNÍ POŽADOVANÝ HYDROSTATICKÝ ZKUŠEBNÍ TLAK: $P_{t\min}$

$$P_{t\min} = 1,25 * P_d * f_{20} / f = 1,25 * 0,17 * 180 / 166,67 = \underline{0,2945 \text{ MPa}}$$

$$P_{t\min} = 1,43 * P_d = 1,43 * 0,17 = \underline{0,2431 \text{ MPa}}$$

MAXIMÁLNÍ PRŮMĚR NEZPEVNĚNÉHO OTVORU, d_{\max}

$$r_{is} = R = 302 \text{ mm}$$

Příspěvek délky skořepiny ke zpevnění

$$I_s = \text{Sqr}((2 * r_{is} + e_a) * e_a) = \text{Sqr}((2 * 302 + 2,5) * 2,5) = 38,94 \text{ mm}$$

$$d_{\max 1} = (e_a * I_s * (f - 0,5 * P) / P - r_{is} * I_s) / (0,5 * r_{is} + 0,5 * e_a) =$$

$$= (2,5 * 38,94 * (166,67 - 0,5 * 0,187) / 0,187 - 302 * 38,94) / (0,5 * 302 + 0,5 * 2,5) = \underline{185,5 \text{ mm}}$$

$$d_{\max 2} = 0,15 * \text{Sqr}((2 * r_{is} + e_a) * e_a) = 0,15 * \text{Sqr}((2 * 302 + 2,5) * 2,5) = \underline{5,84 \text{ mm}}$$

Maximální průměr nezpevněného otvoru

$$d_{\max} = \text{Max}(d_{\max 1}, d_{\max 2}) = \text{Max}(185,5; 5,84) = \underline{185,5 \text{ mm}}$$

Žádný otvor ve skořepině nepřesahuje tento rozměr. Díky tomuto není nutné vystužení žádného z nich.

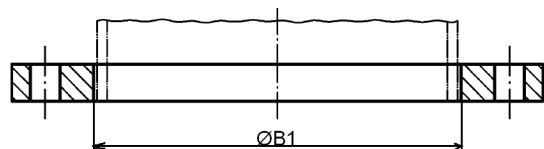
Tlak ve druhém torosférickém dně je nižší proto jsou voleny stejné tloušťky stěn jako v prvním případě. Pro tyto parametry druhé dno vyhovuje.

6.3 Hrdlo H1

Návrh příruby:

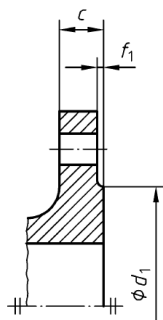
Příruba dle normy: EN1092-1:2007 Flanges

Tlaková třída: EN1092: třída PN 16

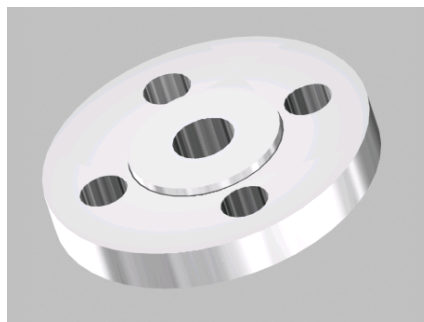


Obr.9: Příruba [9]

Typ příruby: Typ 01 Plochá přivařovací příruba (Type 01 Plate flange for welding)



Obr.10: Plochá příruba [9]



Obr.11: Plochá příruba-model [10]

Materiál příruby: 3E0, P245GH, EN10222-2, 1.0325, výkovek

Analyzovaná tloušťka skořepiny eas

$$eas=en-c-th=5-2-0,5=2,5\text{mm}$$

Analyzovaná tloušťka hrdla eab

$$eab=enb-c-NegDev=5-2-0,625=2,38\text{mm}$$

$$ris=R=302\text{mm}$$

$$dib=deb-2*eab=108-2*2,38=103,25\text{mm}$$

$$ebp=P*deb/(2*fb*z+P)=0,174*108/(2*166,67*1+0,174)=0,06\text{mm}$$

$$fob=Min(fs;fb)=Min(166,67;166,67)=166,67\text{N/mm}^2$$

Oblast skořepiny Afs(Area of Shell)

Mezní zpevnění podél skořepiny

$$Is=Sqr((2*ris+eas)*eas)=Sqr((2*302+2,5)*2,5)=38,91\text{mm}$$

Dosedací plocha hrdla

$$Afs=eas*Is=2,5*38,91=97,28\text{mm}^2$$

Oblast hrdla Afb

Mezní zpevnění podél hrdla

$$Ibo=Sqr((deb-eb)*eb)=Sqr((108-2,38)*2,38)=15,85\text{mm}$$

Dosedací plocha hrdla

$$Afb=eb*(Ibo+Ibi+eas)=2,38*(15,84+0+2,5)=43,55\text{mm}^2$$

Výpočet tlakově zatížené zóny

V hrdle Apb

$$Apb=0,5*did*(Ibo+eas)=0,5*103,25*(15,84+2,5)=946,73\text{mm}^2$$

Pro klenuté dno Aps

$$Aps=0,5*ris^2*(Is+a)/(0,5*eas+ris)=0,5*302^2*(38,91+54,29)/(0,5*2,5+302)=13997,1\text{mm}^2$$

Obecný vzorec pro vystužení osamoceného otvoru

$$pAREq=P*(Aps+Apb+0,5*Apphi)=0,174*(13997,1+946,73+0,5*0)=2,6\text{kN}$$

$$pAAval=(Afs+Afw)*(fs-0,5*P)+Afp*(fop-0,5*P)+Afb*(fob-0,5*P)=$$

$$=(97,28+0)*(166,67-0,5*0,174)+0*(0-0,5*0,174)+43,55*(166,67-0,5*0,174)=23,46\text{kN}$$

$$pAAval \geq pAREq \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Maximální přípustný tlak Pmax

$$Pmax=(Afs+Afw)*fs+Afb*fob/((Aps+Apb+0,5*Apphi)+0,5*(Afs+Afw+Afb+Afp))=$$

$$=(97,28+0)*166,67+43,55*166,67/((13997,1+946,73+0,5*0)+0,5*(97,28+0+43,55+0))=1,56\text{MPa}$$

Maximální přípustný zkušební tlak P_{tmax}

$$P_{tmax} = 4,49 \text{ MPa}$$

LOKÁLNÍ ZATÍŽENÍ HRDLA V KULOVÉ SKOŘEPINĚ

PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET

Analyzovaná tloušťka skořepiny e_{as}

$$e_{as} = e_{n-c-th} = 5 - 2 - 0,5 = 2,5 \text{ mm}$$

Analyzovaná tloušťka hrdla e_b

$$e_b = e_{n-b-c-NegDev} = 5 - 2 - 0,625 = 2,375 \text{ mm}$$

Průměr skořepiny

$$D = D_e - e_a = 377 - 2,5 = 374,5 \text{ mm}$$

Poloměr skořepiny

$$R = R + e_a = 302 + 2,5 = 304,5 \text{ mm}$$

PODMÍNKY PLATNOSTI

$$e_{as}/R = 0,0082 \geq 0,001$$

$$e_{as}/R = 0,0082 \leq 0,1$$

Celkový moment

$$M_B = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} = \sqrt{0,3^2} = \sqrt{0,3^2 + 0,3^2} = 0,4243 \text{ kNm}$$

VÝPOČET PRO VNEJŠÍ PRŮMĚR HRDLA

Průměr hrdla

$$d = d_{eb} - e_b = 108 - 2,375 = 105,625 \text{ mm}$$

Kombinovaná analyzovaná tloušťka

$$e_c = e_a = 2,5 \text{ mm}$$

$$\lambda S = d / \sqrt{R \cdot e_c} = 105,63 / \sqrt{304,5 \cdot 2,5} = 3,83$$

Posílený poměrný činitel

$$\kappa = \min(2 \cdot f_b / f \cdot e_b / e_c \cdot \sqrt{e_b / d}; 1) = \min(2 \cdot 166,67 / 166,67 \cdot 2,375 / 2,5 \cdot \sqrt{2,375 / 105,63}); 1) = 0,2849$$

MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÉ JEDNOTLIVÉ ZATÍŽENÍ

Dovolený tlak P_{max} :

$$P_{max} \text{ z výpočtu hrdla } P_{max} = 1,56 \text{ MPa}$$

$$T_{mp} = 0,91 \cdot \kappa \cdot \lambda S^2 = 0,91 \cdot 0,2849 \cdot 3,83^2 = 3,8$$

Dovolené axiální zatížení F_{zmax} :

$$F_{zmax} = f \cdot e_c^2 \cdot (1,81 + 2,4 \cdot \sqrt{1 + \kappa}) \cdot \lambda S + T_{mp} = 166,67 \cdot 2,5^2 \cdot (1,81 + 2,4 \cdot \sqrt{1 + 0,2849}) \cdot 3,83 + 3,8 = 16,70 \text{ kN}$$

Dovolený ohybový moment M_{Bmax} :

$$M_{Bmax} = f \cdot e_c^2 \cdot d / 4 \cdot (4,9 + 2 \cdot \sqrt{1 + \kappa}) \cdot \lambda S + T_{mp} = 166,67 \cdot 2,5^2 \cdot 105,63 / 4 \cdot (4,9 + 2 \cdot \sqrt{1 + 0,2849}) \cdot 3,83 + 3,8 = 0,4783 \text{ kNm}$$

SMYKOVÁ NAPĚTÍ

Smykové napětí od podélného zatížení τ_{FI} :

$$\tau_{FI} = 2 \cdot F_I / (\pi \cdot d_{eb} \cdot e_c) = 2 \cdot 1,2 / (3,14 \cdot 108 \cdot 2,5) = 2,83 \text{ N/mm}^2$$

Smykové napětí od obvodového zatížení τ_{Fc} :

$$\tau_{Fc} = 2 \cdot F_c / (\pi \cdot d_{eb} \cdot e_c) = 2 \cdot 1,2 / (3,14 \cdot 108 \cdot 2,5) = 2,83 \text{ N/mm}^2$$

Smykové napětí od krouticího momentu τ_{Mt} :

$$\tau_{Mt} = 2 \cdot M_t / (\pi \cdot d \cdot e_c^2) = 2 \cdot 0,45 / (3,14 \cdot 108^2 \cdot 2,5) = \underline{9,82 \text{ N/mm}^2}$$

Celkové smykové napětí τ :

$$\tau = \sqrt{\tau_{Fc}^2 + \tau_{Fl}^2} + \tau_{Mt} = \sqrt{2,83^2 + 2,83^2} + 9,82 = \underline{13,83 \text{ N/mm}^2}$$

KOMBINACE VNĚJŠÍHO ZATÍŽENÍ A VNITŘNÍHO TLAKU

$$\Phi_P = P / P_{\max} = 0,174 / 1,56 = \underline{0,1087}$$

$$\Phi_Z = F_z / F_{z\max} = 1 / 16,7 = \underline{0,0599}$$

$$\Phi_{\tau} = \tau / (0,5 \cdot f) = 13,83 / (0,5 \cdot 166,67) = \underline{0,1659}$$

$$\Phi_B = M_B / M_{B\max} = 0,4243 / 0,4783 = \underline{0,8870}$$

$$\begin{aligned} \text{MaxA11} &= \text{MAX}(\text{Abs}(\Phi_P + \Phi_Z), \text{Abs}(\Phi_Z), \text{Abs}(\Phi_O - 0,2 \cdot \Phi_Z)) = \\ &= \text{Max}(\text{abs}(0,1087 + 0,0599), \text{Abs}(0,0599), \text{Abs}(0,1087 - 0,2 + 0,0599)) = \underline{0,1686} \end{aligned}$$

$$\Phi_{A111} = \text{MAXA11} + \text{Abs}(\Phi_B) + \text{Abs}(\Phi_{\tau}) = 0,1687 + \text{Abs}(0,887) + \text{Abs}(0,1659) = \underline{1,22}$$

$$\Phi_{A112} = \sqrt{\text{MaxA11}^2 + \Phi_B^2 + \Phi_{\tau}^2} = \sqrt{0,1686^2 + 0,887^2 + 0,1659^2} = \underline{0,918}$$

$$\Phi_{A11} = \text{MIN}(\Phi_{A111}, \Phi_{A112}) = \text{MIN}(1,22; 0,918) = \underline{0,918}$$

$$\Phi_P \leq 1 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\Phi_Z \leq 1 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\Phi_{\tau} \leq 1 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\Phi_B \leq 1 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\Phi_{A11} \leq 1 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kontrolou kombinace vnějšího zatížení a vnitřního tlaku bylo zjištěno, že jejich kombinace je menší než maximální zatížení. Pokud by kombinace zatížení nevyhověla museli by se změnit parametry hrdla.

ROZMEZÍ A JEJICH KOMBINACE

ROZMEZÍ ZATÍŽENÍ

$$\Delta P = \text{Max}(P_{\max}, 0) - \text{Min}(P_{\min}, 0) = \underline{0,17 \text{ MPa}}$$

$$\Delta F_z = \text{Max}(F_{z\max}, 0) - \text{Min}(F_{z\min}, 0) = \underline{1 \text{ kN}}$$

$$\Delta M_x = \text{Max}(M_{x\max}, 0) - \text{Min}(M_{x\min}, 0) = \text{Max}(0,3; 0) - \text{Min}(0; 0) = \underline{0,3 \text{ kNm}}$$

$$\Delta M_y = \text{Max}(M_{y\max}, 0) - \text{Min}(M_{y\min}, 0) = \text{Max}(0,3; 0) - \text{Min}(0; 0) = \underline{0,3 \text{ kNm}}$$

$$\Delta M_B = \sqrt{\Delta M_x^2 + \Delta M_y^2} = \sqrt{0,3^2 + 0,3^2} = \underline{0,4243 \text{ kNm}}$$

$$\Delta F_l = \text{Max}(F_{l\max}, 0) - \text{Min}(F_{l\min}, 0) = \text{Max}(1,2; 0) - \text{Min}(0; 0) = \underline{1,2 \text{ kN}}$$

$$\Delta F_c = \text{Max}(F_{c\max}, 0) - \text{Min}(F_{c\min}, 0) = \text{Max}(1,2; 0) - \text{Min}(0; 0) = \underline{1,2 \text{ kN}}$$

$$\Delta F_{\text{shear}} = \sqrt{\Delta F_l^2 + \Delta F_c^2} = \sqrt{1,2^2 + 1,2^2} = \underline{1,7 \text{ kN}}$$

$$\Delta M_t = \text{Max}(M_{t\max}, 0) - \text{Min}(M_{t\min}, 0) = \text{Max}(0,45; 0) - \text{Min}(0, 0) = \underline{0,45 \text{ kNm}}$$

EKVIVALENTNÍ TLOUŠŤKA SKOŘEPINY

$$e_{eq} = e_c = 2,5 \text{ mm}$$

NAPĚTÍ

$$scf_P = 3,895$$

$$scf_Z = 1,806$$

$$scf_M = 1,705$$

Napětí díky tlakovému rozpětí

$$\sigma_P = scf_P \cdot \Delta P \cdot R / (2 \cdot e_{eq}) = 3,9 \cdot 0,17 \cdot 304,1 / (2 \cdot 2,5) = \underline{40,28 \text{ N/mm}^2}$$

Napětí díky axiálnímu rozpětí zatížení

$$\sigma_{Fz} = scf_z \cdot \Delta F_z / (\pi \cdot d \cdot e_{eq}) \cdot \sqrt{R / e_{eq}} =$$

$$=1,81 \cdot 1 / (3,14 \cdot 105,63 \cdot 2,5) \cdot \text{Sqr}(304,1/2,5) = \underline{402,047 \text{N/mm}^2}$$

Napětí díky obvodovému rozpětí momentů

$$\text{SigMB} = \text{scfM} \cdot 4 \cdot \Delta \text{MB} / (\text{PI} \cdot d^2 \cdot \text{eeq}) \cdot \text{Sqr}(R/\text{eeq}) = 1,7 \cdot 4 \cdot 0,4243 / (3,14 \cdot 105,63^2 \cdot 2,5) \cdot \text{Sqr}(304,1/2,5) = \underline{24,0 \text{N/mm}^2}$$

Napětí díky smykovému zatížení

$$\text{SigS} = \text{scfS} \cdot 2 \cdot (\text{Sqr}(\Delta \text{Fl}^2 + \Delta \text{Fc}^2) / (\text{PI} \cdot \text{deb} \cdot \text{eeq}) + \Delta \text{Mt} / (\text{PI} \cdot \text{deb}^2 \cdot \text{eeq})) = 0,206 \cdot 2 \cdot (\text{Sqr}(1,2^2 + 1,2^2) / (3,14 \cdot 108 \cdot 2,5) + 0,45 / (3,14 \cdot 108^2 \cdot 2,5)) = \underline{2,85 \text{N/mm}^2}$$

Celkové intenzita napětí díky rozmezí zatížení

$$\text{SigTot} = \text{Abs}(\text{SigT} + \text{Sqr}(\text{SigP}^2 + (\text{SigFz} + \text{SigMB})^2 + \text{SigS}^2)) = \text{Abs}(0 + \text{Sqr}(40,28^2 + (24,01 + 364,17)^2 + 2,85^2)) = \underline{390,28 \text{N/mm}^2}$$

Celkové napětí ve skořepině

$$\text{SigTot} = 390,28 \leq 3 \cdot f = 500,01 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

PODÉLNÁ NAPĚTÍ U HRDLA

Maximální podélné napětí v hrdle

$$\text{SigLong} = P \cdot d / (4 \cdot \text{eb}) + 4 \text{MB} / (\text{PI} \cdot d^2 \cdot \text{eb}) + \text{Fz} / (\text{PI} \cdot d \cdot \text{eb}) = 0,174 \cdot 105,63 / (4 \cdot 2,375) + 4 \cdot 0,4243 / (3,14 \cdot 105,63^2 \cdot 2,375) + 1000 / (3,14 \cdot 105,63 \cdot 2) = \underline{23,55 \text{N/mm}^2}$$

Podélné napětí v hrdle $\text{SigLong} = 23,55 \leq f_b = 166,67 \text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$

Limitní tlakové napětí

$$K = 1,21 \cdot E \cdot \text{ea} / (\text{Sige} \cdot D) = 1,21 \cdot 193180 \cdot 2,375 / (164 \cdot 105,63) = 32,05$$

$$\text{alfa} = 0,83 / \text{Sqr}(1 + 0,005 \cdot D/\text{ea}) = 0,83 / \text{Sqr}(1 + 0,005 \cdot 105,63/2,375) = 0,7507$$

$$\text{delta} = (1 - 0,4123 / (\text{alfa} \cdot K))^0,6 / S = (1 - 0,4123 / (0,7507 \cdot 32,05))^0,6 / 1,5 = 0,6259$$

Maximální přípustné tlakové napětí

$$\text{Sigcall} = \text{Sige} \cdot \text{delta} = 164 \cdot 0,6259 = \underline{102,65 \text{N/mm}^2}$$

Přípustné individuální napětí

Maximální tahová síla F_{tmax}

$$F_{\text{tmax}} = \text{PI} \cdot D \cdot \text{ea} \cdot f = 3,14 \cdot 105,63 \cdot 2,375 \cdot 166,67 = \underline{131,35 \text{kN}}$$

Maximální tlaková síla F_{cmax}

$$F_{\text{cmax}} = \text{PI} \cdot D \cdot \text{ea} \cdot \text{Sigcall} = 3,14 \cdot 105,63 \cdot 2,375 \cdot 102,65 = \underline{80,9 \text{kN}}$$

Maximální ohybový moment M_{max}

$$M_{\text{max}} = \text{PI} / 4 \cdot D^2 \cdot \text{ea} \cdot \text{Sigcall} = 3,14 / 4 \cdot 105,63^2 \cdot 2,375 \cdot 102,65 = \underline{2,14 \text{kNm}}$$

Ověření podélné stability

$$\text{LongStab} = \text{MB} / M_{\text{max}} + \text{Abs}(F_{\text{zmin}}) / F_{\text{cmax}} = 0,42543 / 2,14 + \text{Abs}(0) / 80,9 = \underline{0,1986}$$

Normální hrdlo ve skořepině, s nebo bez výstužné podložky

Mez vyztužení podél skořepiny

$$\text{Iso} = \text{Sqr}((2 \cdot \text{ris} + \text{eas}) \cdot \text{eas}) = \text{Sqr}((2 \cdot 301,6 + 2,5) \cdot 2,5) = 38,91 \text{mm}$$

Mez vyztužení podél hrdla

$$\text{Ibo} = \text{Min}(\text{Sqr}((\text{deb} - \text{eb}) \cdot \text{eb}); \text{ho}) = \text{Min}(\text{Sqr}((108 - 2,375) \cdot 2,375); 126) = 15,84 \text{mm}$$

Požadovaná oblast tlaku p_{AReq}

$$p_{\text{AReq}} = P \cdot (\text{Aps} + \text{Apb} + 0,5 \cdot \text{Aphi}) = 0,174 \cdot (13997,1 + 946,73 + 0,5 \cdot 0) = \underline{2,6 \text{kN}}$$

Oblast tlaku k dispozici p_{AAval}

$$p_{AAval} = (A_{fs} + A_{fw}) \cdot (f_s - 0,5 \cdot P) + A_{fp} \cdot (f_{op} - 0,5 \cdot P) + A_{fb} \cdot (f_{ob} - 0,5 \cdot P) =$$

$$= (97,28 + 0) \cdot (166,67 - 0,5 \cdot 0,174) + 0 \cdot (0 - 0,5 \cdot 0,174) + 43,55 \cdot (166,67 - 0,5 \cdot 0,174) = \underline{23,46 \text{ kN}}$$

Vyztužení hrdla $p_{AAval} = 23,46 \text{ kN} \geq p_{AReq} = 2,6 \text{ kN} \Rightarrow$ vyhovuje

Maximální přípustný tlak P_{max}

$$P_{max} = (A_{fs} + A_{fw}) \cdot f_s + A_{fb} \cdot f_{ob} / ((A_{ps} + A_{pb} + 0,5 \cdot A_{ppihi}) + 0,5 \cdot (A_{fs} + A_{fw} + A_{fb} + A_{fp})) =$$

$$= (97,28 + 0) \cdot 166,67 + 43,55 \cdot 166,67 / ((13997,1 + 946,73 + 0,5 \cdot 0) + 0,5 \cdot (97,28 + 0 + 43,55 + 0)) = \underline{1,56 \text{ MPa}}$$

Tlak na přírubu při 100°C $P = 0,174 \leq P_{max}(\text{příruba}) = 1,56 \text{ MPa} \Rightarrow$ vyhovuje

Ostatní hrdla jsou počítány stejným způsobem a pro dané rozměry a parametry vyhovují.

6.3 Návrh torosférického dna

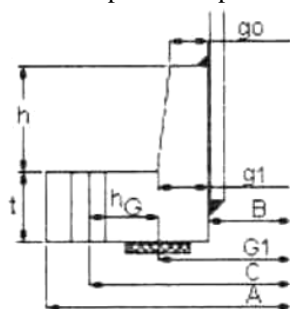
Teplota = 100°C

$P = 0,17 \text{ MPa}$

$c = 2 \text{ mm}$

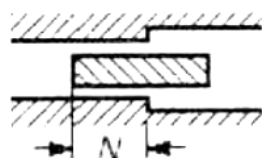
TYP PŘÍRUBY A TĚSNĚNÍ

Standartní příruba: Upřesnění příruby



Obr.12: Příruba torosférického dna

Typ příruby: Příruba s nákrůžkem a úzkým těsnicí plochou



Obr.13: Způsob utěsnění

Hodnoty skořepiny:

Použitý materiál: EN 10028-7:2007, 1.4539 X1NiCrMoCu25-20-5

Hodnoty při teplotě 100°C : $R_m = 530 \text{ MPa}$, $R_p = 270 \text{ MPa}$, $R_{pt} = 235 \text{ MPa}$, $f_{s20} = 180 \text{ MPa}$, $f_{test} = 265 \text{ MPa}$, $E = 193180 \text{ N/mm}^2$

Vnější průměr skořepiny: $D_o = 377 \text{ mm}$

Parametry příruby:

Vnitřní průměr příruby: $B = 382 \text{ mm}$

Vnější průměr příruby: $A = 485 \text{ mm}$

Tloušťka příruby: $e = 30 \text{ mm}$

Použitý materiál: EN 10028-7:2007, 1.4539 X1NiCrMoCu25-20-5

Parametry šroubů:

Použité šrouby: M20x2,5

Počet šroubů: n=12

Účinná plocha šroubů: $A_e=225,2\text{mm}^2$

Doporučená minimální vzdálenost od středu šroubu k okraji: $B_{ce}=21\text{mm}$

Doporučená minimální vzdálenost od středu šroubu k poloměru: $B_{cr}=29\text{mm}$

Průměr děr pro šrouby v přírubě: $d=22\text{mm}$

Průměr roztečné kružnice šroubů: $C=445\text{mm}$

Materiálové parametry šroubů: $R_m=500\text{MPa}$, $R_p=300\text{MPa}$, $R_{pt}=250\text{MPa}$, $S_b=88,33\text{mm}^2$, $S_a=100\text{mm}^2$, $F_{tst}=150\text{N/mm}^2$

Parametry těsnění:

Faktor těsnění: $m=2,75$

Faktor společného kontaktu ploch, celkový dosedací tlak: $y=25\text{N/mm}^2$

Typ těsnění: Temacarb

Vnější průměr těsnění: $G_o=415\text{mm}$

Vnitřního průměr: $A_1=379\text{mm}$

TEMA RGP-RCB-11.7

Jedná těsnění ze speciálního materiálu na bázi uhlíkových vláken a speciálních přísad spojených kvalitním NBR. Tato těsnění se používají převážně pro vyšší teploty a tlaky, hlavně pro přehřátou páru. Těsnění temacarb jsou vhodná i pro zásaditá média. Maximální pracovní teplota se pohybuje do 250°C a krátkodobě snesou i teplotu 450°C . Maximální tlak je až 140 barů.

Výpočet těsnění:

Faktor korekce tlaku K

$K=1$ (pro $D < 1000\text{mm}$)

$b=7,56\text{mm}$

Zatížení příruby

$H=0,785 \cdot G^2 \cdot p=0,785 \cdot 399,88^2 \cdot 0,1853=23,26\text{kN}$

$HG=(2 \cdot \pi \cdot b \cdot G \cdot m) \cdot p=(2 \cdot 3,14 \cdot 7,56 \cdot 399,88 \cdot 2,75) \cdot 0,1853=9,68\text{kN}$

$HD=0,785 \cdot B^2 \cdot p=0,785 \cdot 382^2 \cdot 0,1853=21,23\text{kN}$

$HT=H-HD=23,26-21,23=2,03\text{kN}$

Velikost ramen momentů

$hG=(C-G)/2=(445-399,88)/2=22,56\text{mm}$

$hD=(C-B)/2=(445-382)/2=31,5\text{mm}$

$hT=(2 \cdot C-B-G)/4=(2 \cdot 445-382-399,88)/4=27,03\text{mm}$

Zatížení šroubů

Provozní stav

$W_{op}=H+HG=23,26+9,68=32,94\text{kN}$

Horní stav

$W_{amb}=\pi \cdot b \cdot G \cdot y=3,14 \cdot 7,56 \cdot 399,88 \cdot 25=237,43\text{kN}$

Oblast šroubového spoje

$A_{m1}=W_{op}/S_b=32938,92/83,33=395,28\text{mm}^2$

$A_{m2}=W_{amb}/S_a=2,3743\text{E}5/100=2374,33\text{mm}^2$

Požadovaná plocha šroubového spoje A_m

$A_m=\text{Max}(A_{m1}; A_{m2})=2374,33\text{mm}^2$

Možná plocha šroubového spoje

$$A_b = n \cdot A_e = 12 \cdot 225,2 = \underline{2702,4 \text{ mm}^2}$$

$A_b \geq A_m \Rightarrow$ vyhovuje

$$W = 0,5 \cdot (A_b + A_m) \cdot S_a = 0,5 \cdot (2702,4 + 2374,33) \cdot 100 = \underline{253,84 \text{ kN}}$$

Výpočet šroubů zahrnuje zjištění velikosti jednotlivých sil na nich. Velikost největší zátěžné síly je 237,43 kN. Tato síla odpovídá hornímu meznímu stavu zatížení. Pro ni je spočtena nutná plocha šroubového spoje. Skutečná plocha šroubového spoje je vypočtena jako plocha jednoho šroubu násobená jejich počtem. Skutečná plocha šroubového spoje je větší než požadovaná. Šrouby tedy vyhovují.

MOMENTY ZATĚŽUJÍCÍ PŘÍRUBU

$$M_{op} = H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G = 21,23 \cdot 31,5 + 2,03 \cdot 27,03 + 9,68 \cdot 22,56 = \underline{941,95 \text{ Nm}}$$

$$M_{amb} = W \cdot h_G = 253,84 \cdot 22,56 = \underline{5726,55 \text{ Nm}}$$

Rozložení šroubů

$$B_{spc} = C \cdot \pi / n = 445 \cdot 3,14 / 12 = \underline{116,5 \text{ mm}}$$

Polohový korekční faktor šroubů

$$CF = \text{Max}(\text{Sqr}(B_{spc} / (2 \cdot d_b + 6 \cdot e / (m + 0,5))); 1) = \text{Max}(\text{Sqr}(116,5 / (2 \cdot 20 + 6 \cdot 30 / (2,75 + 0,5))); 1) = 1,11$$

$$M_o = M_{op} \cdot CF / B = 941,95 \cdot 1,11 / 382 = 2,74 \text{ Nm}$$

$$M_a = M_{amb} \cdot CF / B = 5726,55 \cdot 1,11 / 382 = 16,64 \text{ Nm}$$

TVAROVÉ KONSTANTY

$$K = A / B = 485 / 382 = 1,27$$

$$L_o = \text{Sqr}(B \cdot g_o) = \text{Sqr}(382 \cdot 3) = 33,85$$

$$\text{Beta}_T = 1,81, \text{Beta}_Z = 4,268, \text{Beta}_Y = 8,269, \text{Beta}_U = 9,087$$

PROVOZNÍ STAV

$$M = M_o = 2,74 \text{ Nm}$$

Napětí příruby pro tloušťku (maximální) $e = 30 \text{ mm}$

Tangenciální napětí

$$\text{Sig}_T = \text{Beta}_Y \cdot M / e^2 = 8,269 \cdot 16,64 / 30^2 = \underline{152,88 \text{ N/mm}^2}$$

Podélné napětí

$$\text{Sig}_H = 0 \text{ N/mm}^2$$

Radiální napětí

$$\text{Sig}_r = 0 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Sig}_T = 152,88 \text{ N/mm}^2 \leq f = 173,33 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Velikost tangenciálního napětí je menší než velikost dovoleného napětí pro daný materiál. Příruba tedy vyhovuje.

Požadovaný minimální zkušební hydrostatický tlak: P_{tmin}

$$P_{tmin} = 1,25 \cdot P_d \cdot f_{20} / f = 1,25 \cdot 0,17 \cdot 173,33 / 156,67 = \underline{0,2351 \text{ MPa}}$$

$$P_{tmin} = 1,43 \cdot P_d = 1,43 \cdot 0,17 = \underline{0,2431 \text{ MPa}}$$

$$\text{Zkušební tlak } P_{tmin} = 0,2351 \text{ MPa} \leq P_{tmax} = 1,901 \text{ MPa} \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Minimální zkušební tlak musí vyjít nižší než maximální tlak. Pokud by velikost minimálního zkušební tlaku vyšla větší než maximálního znamenalo by to, že zkušební tlak musí být větší než maximální a nádoba nevyhoví.

Napětí příruby pro tloušťku (pracovní) $e=30\text{mm}$

Tangenciální napětí

$$\text{SigTeta} = \text{BetaY} * M / e^2 = 8,269 * 2,74 / 30^2 = \underline{25,15 \text{N/mm}^2}$$

Podélné napětí

$$\text{SigH} = 0 \text{N/mm}^2$$

Radiální napětí

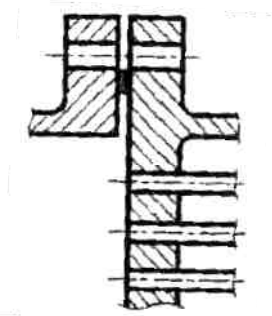
$$\text{Sigr} = 0 \text{N/mm}^2$$

Tangenciální napětí při pracovním momentu je menší než maximální. A proti dovolenému napětí je zřetelně menší. Příruba tedy vyhovuje.

6.4 ČSN EN 13445-13 Trubkovnice

(položka 3)

Jedná se o výměník s pevnými trubkovnicemi.



Obr.14: Způsob sestavení trubkovnice

Typ sestavy: sestava b

Trubkovnice integrální s pláštěm a utěsněná přírubovým okrajem ke komoře.

Případy zatížení

Popis	Značka	pouze Pt	pouze Ps	Ps+Pt
Vnitřek skořepiny (Mpa)	Ps	0	0,3	0,3
Vnitřek trubek (Mpa)	Pt	0,17	0	0,17
Skořepina dovolená koreze (mm)	cs	1	1	1
Trubkovnice dovolená koreze (mm)	ct	2	2	2
Dovolené napětí M faktor	Mf	1	1	1
Teplotní napěťový faktor	MdT	0	0	0

tab.2: Případy zatížení

Popis	pouze dT	Pt+dT	Ps+dT	Ps+Pt+dT
Vnitřek skořepiny (Mpa)	0	0	0,3	0,3
Vnitřek trubek (Mpa)	0	0,17	0	0,17
Skořepina dovolená koreze (mm)	1	1	1	1
Trubkovnice dovolená koreze (mm)	2	2	2	2
Dovolené napětí M faktor	1	1	1	1
Teplotní napěťový faktor	1	1	1	1
Střední teplota trubek (°C)	143	143	143	143
Střední teplota skořepiny (°C)	109	109	109	109

tab.3: Případy zatížení

HODNOTY TRUBKOVNICE

Materiál: 10028-7:2007, 1.4539 X1NiCrMoCu25-20-5

Materiálové parametry: $R_m=520\text{MPa}$, $R_p=260\text{MPa}$, $R_{pt}=235\text{MPa}$, $f=166,67$, $f_{20}=173,33\text{MPa}$, $f_{\text{test}}=260\text{MPa}$, $E=193180\text{N/mm}^2$, $\nu=7,93$

Vnější průměr trubkovnice: $A=485\text{mm}$

Tloušťka trubkovnice: $e_n=40\text{mm}$

Tlakový poměr pro materiál trubkovnice: $\nu=0,3$

TRUBKY

Materiál: 10216-5:2004/AC:08, 1.4539 X1NiCrMoCu25-20-5

Materiálové parametry: $R_m=520\text{MPa}$, $R_p=250\text{MPa}$, $R_{pt}=235\text{MPa}$, $f_{20}=166,67$, $f_t=156,67\text{MPa}$, $f_{\text{test}}=238,1\text{MPa}$, $E=193180\text{N/mm}^2$, $\nu=7,93$

Modul pružnosti: $E_t=1,9318\text{E}05\text{N/mm}^2$

Parametry trubek:

Vnější průměr trubek: $d_t=25\text{mm}$

Tloušťka stěny trubky: $e_t=2\text{mm}$

Poloha trubky: $p=32\text{mm}$

Průměr díry v trubkovnici: $d_h=25,2\text{mm}$

Průměr otrubkované plochy trubkovnice: $D_o=344,96$

Počet trubek v trubkovnici: $N_t=85$ trubek

Koeficient tepelné roztažnosti trubek: $\alpha_{tm}=1,58\text{E}-05\text{mm/mmC}$

Délka trubek mezi čely trubkovnice: $L=926\text{mm}$

Poissonova konstanta pro materiál trubek: $\nu_t=0,3$

PARAMETRY SKOŘEPINY:

Použitý materiál: EN 10028-2:2003, 1.0425 P265GH

Hodnoty při teplotě 150°C: $R_m=410\text{MPa}$, $R_p=265\text{MPa}$, $R_{pt}=223\text{MPa}$, $f_s=148,67\text{MPa}$, $f_{\text{test}}=252,38\text{MPa}$, $f_{20}=170,83\text{MPa}$, $E=202384\text{N/mm}^2$, $\nu=7,85$

Vnitřní průměr skořepiny (zkorodované): $D_s=363\text{mm}$

Tloušťka stěny skořepiny (nezkorodované): $e_s=8\text{mm}$

Modul pružnosti: $E_s=1,9318\text{E}05\text{N/mm}^2$

Poissonova konstanta pro materiál skořepiny: $\nu_s=0,3$

Koeficient tepelné roztažnosti pláště: $\alpha_{sm}=1,2235\text{E}-05\text{mm/mmC}$

PARAMETRY KOMORY:

Materiál: 10028-7:2007, 1.4539 X1NiCrMoCu25-20-5

Materiálové parametry při teplotě 100°C: $R_m=530\text{MPa}$, $R_p=270\text{MPa}$, $R_{pt}=235\text{MPa}$, $f_c=166,67$, $f_{20}=180\text{MPa}$, $f_{test}=265\text{MPa}$, $E=193180\text{N/mm}^2$, $\nu=0,3$

Vnitřní průměr komory: $D_c=371\text{mm}$

Tloušťka stěny komory: $e_c=5\text{mm}$

Modul pružnosti komory: $E_c=1,9318\text{E}05\text{N/mm}^2$

Poissonova konstanta pro materiál komory: $\nu_c=0,3$

PARAMETRY PŘÍRUBY:

Tloušťka stěny příruby: $e=30\text{mm}$

Efektivní dosedací šířka dosedací plochy těsnění: $b=7,56\text{mm}$

Těsnící faktor: $m=2,75$

Počet šroubů: $n=12$

Průměr roztečné kružnice šroubů: $C=445\text{mm}$

Průměr díry pro šrouby: $d=22\text{mm}$

Průměr kružnice reakce zatížení těsnění komory: $G_c=399,88\text{mm}$

Zatížení šroubů příruby ve smontovaném stavu: $W=253,84\text{kN}$

Trubkovnice musí být navržena pro všechny možné způsoby zatížení. Působení tlaku pouze v trubkách, působení tlaku pouze v plášti a jejich kombinace. Další zatížení trubkovnice je od teploty proudících médií. Toto zatížení také musí být vzato v potaz a zkombinováno se způsoby zatížení tlaky.

ZATÍŽENÍ: pouze P_t ($P_s=0$; $dT=0$)

PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET

Analyzovaná tloušťka trubkovnice e_a

$$e_a = e_n - c_t - c_s = 40 - 2 - 1 = 37\text{mm}$$

Určení základní vazbové schopnosti pro stříh

$$m_y = (p - d_t) / p = (32 - 25) / 32 = 0,2188$$

Určení základní vazbové schopnosti na ohyb

Poměr roztažnosti trubek

$$r_o = I_{tx} / e_a = 0 / 37 = 0$$

Efektivní průměr díry pro trubku

$$d_{star} = \text{Max}(d_t - 2 * e_t * (E_t / E) * (f_t / f) * r_o; d_t - 2 * e_t) = \\ = \text{Max}(25 - 2 * 2 * (19318 / 193180) * (156,67 / 166,67) * 7,93; 0,25 - 2 * 2) = 25\text{mm}$$

Efektivní diametr polohy

$$p_{star} = p / \text{Sqr}(1 - 4 * \text{Min}(S; 4 * D_o * p) / (\pi * D_o^2)) = 32 / \text{Sqr}(1 - 4 * \text{Min}(0,4 * 344,96 * 32) / (3,14 * 344,96^2)) = 32\text{mm}$$

$$M_{ystar} = (star - d_{star}) / p_{star} = (32 - 25) / 32 = 0,218$$

Určení základní efektivní konstanty pružnosti

$E_{star} / E = 0,2046$ (pro $e/p = 1,16$)

$$E_{star} = E * 0,2046 = 19318 * 0,2046 = 39518,99\text{N/mm}^2$$

$$\nu_{star} = 0,3938$$

Určení efektivního ohybové tuhosti

$$D_{star} = (E_{star} * e_a^3) / (13 * (1 - \nu_{star}^2)) = (39518,99 * 37^3) / (12 * (1 - 0,3938^2)) = 1,9743 * 10^8\text{Nmm}$$

Maximální dovolené společné napětí trubek v trubkovnici

$$f_{min} = \min(f; f_t) = \min(166,67; 156,67) = 156,67 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{tj} = 0,8 * f_{min} = 0,8 * 156,67 = 125,34 \text{ N/mm}^2$$

Maximální dovolené podélné napětí trubek

$$\sigma_{tp} = (P_s * dt^2 - P_t * (dt - 2 * e_t)^2) / (dt^2 - (dt - 2 * e_t)^2) = (0 * 25^2 - 0,17 * (25 - 2 * 2)^2) / (25^2 - (25 - 2 * 2)^2) = -0,4075 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{tcr} = \pi^2 * E_t / I_{tbk}^2 * (dt^2 + (dt - 2 * e_t)^2) / 15 = 3,14^2 * 193180 / 926^2 * (25^2 + (25 - 2 * 2)^2) / 16 = 148,14 \text{ N/mm}^2$$

$$b_0 = 0,206 * \sqrt{\sigma_{tcr} / R_{pt}} * (1 - 0,2 * \sqrt{\sigma_{tcr} / R_{pt}}) = 0,260 * \sqrt{148,14 / 235} * (1 - 0,2 * \sqrt{148,14 / 235}) = 0,1376$$

$$f_{tbk} = (x * \sigma_{tp} + (R_{pt} - \text{Abs}(x * \sigma_{tp})) / \sqrt{1 + (((1 + b_0) * R_{pt} - \text{Abs}(x * \sigma_{tp})) / \sigma_{tcr})^2}) / x = 1,1 * (-0,4074) + (235 - \text{Abs}(1,1 * (-0,4074))) / \sqrt{1 + (((1 + 0,1376 * 235 - \text{Abs}(1,1 * (-0,4074))) / 148,14)^2)} / 1,1 = 103,08 \text{ N/mm}^2$$

Efektivní průměr trubkovnice D_e

$$D_e = (D_s + G_c) / 2 = (363 + 399,88) / 2 = 381,44 \text{ mm}$$

Součinitel rozvrtání trubkovnice na plášťové straně

$$x_s = 1 - N_t * (dt / D_e)^2 = 1 - 85 * (25 / 381,44)^2 = 0,6349$$

Součinitel rozvrtání trubkovnice na straně trubkové

$$x_t = 1 - N_t * ((dt - 2 * e_t) / D_e)^2 = 1 - 85 * ((25 - 2 * 2) / 381,44)^2 = 0,7424$$

Axiální tuhosti

Axiální tuhost trubky

$$K_t = \pi * e_t * (dt - e_t) * E_t / L = 3,14 * 2 * (25 - 2) * 193180 / 926 = 30148,03 \text{ N/mm}$$

Axiální tuhost pláště

$$K_s = \pi * e_s * (D_s + e_s) * E_s / L = 3,14 * 7 * (363 + 7) * 193180 / 926 = 1,6975 * 10^6 \text{ N/mm}$$

Poměr axiálních tuhostí pláště k axiální tuhosti trubkového svazku

$$K_{st} = K_s / (N_t * K_t) = 1,6975E6 / (85 * 30148,03) = 0,6624$$

Modul pružného podkladu ekvivalentního trubkového svazku

$$K_w = 8 * N_t * K_t / (\pi * D_e^2) = 8 * 85 * 30148,03 / (3,14 * 381,44^2) = 44,85 \text{ N/mm}^3$$

Součinitel tuhosti trubkového svazku k tuhosti trubkovnice

$$X = (K_w / D_{star})^{0,25} * D_e / 2 = (44,85 / 1,9743E8)^{0,25} * 381,44 / 2 = 4,16$$

Okrajový moment potřebný pro natočení pláště o jednotkový úhel

$$k_s = 2 * E_s * (e_s)^{2,5} / ((12 * (1 - \nu_s^2))^{0,75} * (D_s + e_s)^{0,5}) = 2 * 193180 * (7)^{2,5} / ((12 * (1 - 0,3^2))^{0,75} * (363 + 7)^{0,5}) = 4,3348 * 10^5 \text{ N/mm}^2$$

Součinitel vetknutí okraje trubkovnice vzhledem k plášti a komoře

$$Z = (k_s + k_c) / (K_w^{0,25} * D_{star}^{0,75}) = (1,3348E5 + 0) / (44,85^{0,25} * 1,9743E8^{0,75}) = 0,1006$$

Součinitel daný jako funkce X (z obrázku 13.5.4-1a2)

$$F_q = 3,0245$$

Součinitel daný jako funkce X (z obrázku 13.5.5-1a2)

$$H = 3,2560$$

Součinitel daný jako funkce X (z obrázku 13.5.6-1a2)

$$F_i = -0,6714$$

Efektivní tlak působící na trubkovnici P_e

Axiální diferenční teplotní dilatace mezi trubkami a pláštěm

$$\Gamma = (atm * (t_{tm} - 20^\circ\text{C}) - asm * (t_{sm} - 20^\circ\text{C})) * L * M_{dt} = (1,589E-5 * (0 - 20) - 1,223E-5 * (0 - 20)) * 926 * 0 = 0 \text{ mm}$$

$$P_e = (J * K_{st} / (1 + J * K_{st} * F_q)) * (x_s + 2 * \nu_t * (1 - x_s) + (2 * \nu_s / K_{st}) - (1 - J) / (2 * J * K_{st})) * ((D_j + 2 * w_j)^2 - D_s^2) / D_s^2 * P_s - (J * K_{st} / (1 + J * K_{st} * F_q)) * (x_t + 2 * \nu_t * (1 - x_t) + 1 / (J * K_{st})) * P_t + (J * K_{st} / (1 + J * K_{st} * F_q)) * (K_w / 2) * \Gamma = -0,0902 \text{ MPa}$$

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma

$$F_m = 1 / (6 * H) = 1 / (6 * 3,26) = 0,0512$$

$$\sigma = 1,5 * F_m / M_{ystar} * (D_e / (e_a - h_g))^2 * P_e = 1,5 * 0,0512 / 0,2188 * (381,44 / (37 - 0))^2 * (-0,0902) = -3,37 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = 3,37 \text{ N/mm}^2 \leq 1,5 * f = 250 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Smykové napětí v trubkovnici Tau

$$\tau = 0,25 * D_o / (m_y * e_a) * P_e = 0,25 * 344,96 / (0,2188 * 37) * (-0,9202) = -0,9614 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 0,9614 \text{ N/mm}^2 \leq 0,8 * f = 133,34 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Pro všechny uvažované stavy nesmí smykové napětí v trubkovnici překročit 0,8*f.

VÝPOČET TRUBEK

Axiální membránové napětí

Pro vnější řadu trubek

$$\sigma_{to} = ((P_s * x_s - P_t * x_t) - P_e * F_q) / (x_t - x_s) = ((0 * 0,6349 - 0,17 * 0,7424) - (-0,0902) * 3,02) / (0,7424 - 0,6349) = -1,36 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{to} = 1,36 \text{ N/mm}^2 \leq f_{tbk} = 104,06 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Pro vnitřní řadu trubek

$$\sigma_{ti} = ((P_s * x_s - P_t * x_t) - P_e * F_i) / (x_t - x_s) = ((0 * 0,6349 - 0,17 * 0,7424) - (-0,0902) * (-0,6714)) / (0,7424 - 0,6349) = -1,74 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{ti} = 1,74 \text{ N/mm}^2 \leq f_{tbk} = 103,08 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Ekvivalentní napětí

Střední hodnota obvodového napětí v trubkách

$$\sigma_{tteta} = (P_t * (d_t - 2 * e_t) - P_s * d_t) / (2 * e_t) = (0,17 * (25 - 2 * 2) - 0 * 25) / (2 * 2) = 0,8925 \text{ N/mm}^2$$

Střední hodnota radiálního napětí v trubkách

$$\sigma_{tr} = -(P_t + P_s) / 2 = -(0,17 + 0) / 2 = -0,085 \text{ N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí v trubkách

$$\sigma_{teq} = \text{Max}(\sigma_{ti} - \sigma_{tteta}; \sigma_{ti} - \sigma_{tr}; \sigma_{tteta} - \sigma_{tr}; \sigma_{to} - \sigma_{tteta}; \sigma_{to} - \sigma_{tr})$$

$$\sigma_{teq} = 2,63 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{teq} = 2,63 \text{ N/mm}^2 \leq f_t = 156,67 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET PLÁŠTĚ

Axiální membránové napětí v plášti

$$\sigma_{ism} = D_s^2 * (P_t + P_e) / (4 * e_s * (D_s + e_s)) = 362^2 * (0,17 + (-0,0902)) / (4 * 7 * (363 + 7)) = 1,01 \text{ N/mm}^2$$

Ekvivalentní napětí

Střední obvodové napětí v plášti

$$\sigma_{steta} = P_s * D_s / (2 * e_s) = 0 * 363 / (2 * 7) = 0 \text{ N/mm}^2$$

Střední radiální napětí v plášti

$$\sigma_{sr} = -P_s / 2 = -0 / 2 = 0 \text{ N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí

$$\sigma_{ieq} = \text{Max}(\sigma_{ism} - \sigma_{steta}; \sigma_{ism} - \sigma_{sr}; \sigma_{steta} - \sigma_{sr}) = \text{Max}(1,01 - 0; 1,01 - 0; 0 - 0) = 1,01 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{ieq} = 1,01 \text{ N/mm}^2 \leq f_s = 148,67 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ

Axiální ohybové napětí Sig_{sb}

$$I_1 = H_{nek} * (2 * F_{qnek} / (X * Z) + (1 - (1 - v_{star}) / (X * Z))) = 2,02 * (2 * 1,74 / (4,16 * 0,1006) + (1 - (1 - 0,3938) / (4,16 - 0,1006))) = 15,83$$

$$\sigma_{sb} = k_s / (k_s + k_c) * (D_e / (2 * e_s))^2 * P_e / I_1 = 4,3348E5 / (4,3348E5 + 0) * (381,44 / (2 * 7))^2 * (-0,0902) / 15,83 = -4,23 \text{ N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici

$$\text{Sigseq1} = \text{Max}(\text{Sigsm} - \text{Sigsb} + \text{Ps}; \text{Sigsm} + \text{Sigsb}) = \text{Max}(1,01 - (-4,23) + 0; 1,01 + (-4,23)) = \underline{5,24 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Sigseq1} = 5,24 \text{ N/mm}^2 \leq 3 \cdot \text{fs} = 446,01 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

ZATÍŽENÍ: pouze Ps (Pt=0; dT=0)

PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET

Maximální dovolené podélné napětí trubek

$$\text{Sigtp} = (\text{Ps} \cdot \text{dt}^2 - \text{Pt} \cdot (\text{dt} - 2 \cdot \text{et})^2) / (\text{dt}^2 - (\text{dt} - 2 \cdot \text{et})^2) = (0,3 \cdot 25^2 - 0 \cdot (25 - 2 \cdot 2)^2) / (25^2 - (25 - 2 \cdot 2)^2) = 1,02 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{ftbk} = (x \cdot \text{Sigtp} + (\text{Rpt} - \text{Abs}(x \cdot \text{Sigtp})) / \text{Sqr}(1 + (((1 + \text{bo}) \cdot \text{Rtp} - \text{Abs}(x \cdot \text{Sigtp})) / \text{Sigtr})^2)) / x =$$

$$= (1,1 \cdot 1,02 + (235 - \text{Abs}(1,1 \cdot 1,02)) / \text{Sqr}(1 + (((1 + 0,1376) \cdot 235 - \text{Abs}(1,1 \cdot 1,02)) / 148,14^2))) / 1,1 =$$

$$= 104,41 \text{ N/mm}^2$$

Efektivní tlak působící na trubkovnici Pe

$$\text{Pe} = (\text{J} \cdot \text{Kst} / (1 + \text{J} \cdot \text{Kst} \cdot \text{Fq})) \cdot (x_s + 2 \cdot v_t \cdot (1 - x_s) + (2 \cdot v_s / \text{Kst}) - (1 - \text{J}) / (2 \cdot \text{J} \cdot \text{Kst})) \cdot ((\text{D}_j + 2 \cdot w_j)^2 - \text{D}_s^2) / \text{D}_s^2 \cdot \text{Ps} - (\text{J} \cdot \text{Kst} / (1 + \text{J} \cdot \text{Kst} \cdot \text{Fq})) \cdot (x_t + 2 \cdot v_t \cdot (1 - x_t) + 1 / (\text{J} \cdot \text{Kst})) \cdot \text{Pt} + (\text{J} \cdot \text{Kst} / (1 + \text{J} \cdot \text{Kst} \cdot \text{Fq})) \cdot (\text{Kw} / 2) \cdot \text{Gamma} = \underline{0,1164 \text{ MPa}}$$

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma

$$\text{Sigma} = 1,5 \cdot \text{Fm} / \text{Mystar} \cdot (\text{De} / (\text{ea} \cdot \text{hg}))^2 \cdot \text{Pe} = 1,5 \cdot 0,0512 / 0,2188 \cdot (381,44 / (37 - 0))^2 \cdot 0,1164 =$$

$$= \underline{4,34 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Sigma} = 4,34 \text{ N/mm}^2 \leq 1,5 \cdot \text{f} = 250 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Smykové napětí v trubkovnici Tau

$$\text{Tau} = 0,25 \cdot \text{Do} / (\text{my} \cdot \text{ea}) \cdot \text{Pe} = 0,25 \cdot 344,96 / (0,2188 \cdot 37) \cdot 0,1164 = \underline{1,24 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Tau} = 1,24 \text{ N/mm}^2 \leq 0,8 \cdot \text{f} = 133,34 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Pro všechny uvažované stavy nesmí smykové napětí v trubkovnici překročit $0,8 \cdot \text{f}$.

VÝPOČET TRUBEK

Axiální membránové napětí

Pro vnější řadu trubek

$$\text{Sigto} = ((\text{Ps} \cdot x_s - \text{Pt} \cdot x_t) - \text{Pe} \cdot \text{Fq}) / (x_t - x_s) = ((0,3 \cdot 0,6349 - 0 \cdot 0,7424) - (-0,0902) \cdot 3,02) / (0,7424 - 0,6349) =$$

$$= \underline{-1,5 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Sigto} = 1,5 \text{ N/mm}^2 \leq \text{ftj} = 125,34 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Pro vnitřní řadu trubek

$$\text{Sigti} = ((\text{Ps} \cdot x_s - \text{Pt} \cdot x_t) - \text{Pe} \cdot \text{Fi}) / (x_t - x_s) = ((0,3 \cdot 0,6349 - 0 \cdot 0,7424) - 0,1164 \cdot (-0,6714)) / (0,7424 - 0,6349) =$$

$$= \underline{2,5 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Sigti} = 2,5 \text{ N/mm}^2 \leq \text{ftj} = 125,34 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Ekvivalentní napětí

Střední hodnota obvodového napětí v trubkách

$$\text{Sigtteta} = (\text{Pt} \cdot (\text{dt} - 2 \cdot \text{et}) - \text{Ps} \cdot \text{dt}) / (2 \cdot \text{et}) = (0 \cdot (25 - 2 \cdot 2) - 0,3 \cdot 25) / (2 \cdot 2) = -1,87 \text{ N/mm}^2$$

Střední hodnota radiálního napětí v trubkách

$$\text{Sigtr} = -(\text{Pt} + \text{Ps}) / 2 = -(0 + 0,3) / 2 = -0,15 \text{ N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí v trubkách

$$\text{Sigteq} = \text{Max}(\text{Sigti} - \text{Sigtteta}; \text{Sigti} - \text{Sigtr}; \text{Sigtteta} - \text{Sigtr}; \text{Sigto} - \text{Sigtteta}; \text{Sigto} - \text{Sigtr})$$

$$\text{Sigteq} = \underline{4,37 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Sigteq} = 4,37 \text{ N/mm}^2 \leq \text{ft} = 156,67 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET PLÁŠTĚ

Axiální membránové napětí v plášti

$$\text{Sigsm} = \text{D}_s^2 \cdot (\text{Pt} + \text{Pe}) / (4 \cdot \text{es} \cdot (\text{D}_s + \text{es})) = 362^2 \cdot (0 + 0,01164) / (4 \cdot 7 \cdot (363 + 7)) = \underline{1,48 \text{ N/mm}^2}$$

Ekvivalentní napětí

Střední obvodové napětí v plášti

$$\text{Sigsteta} = P_s \cdot D_s / (2 \cdot e_s) = 0,3 \cdot 363 / (2 \cdot 7) = 7,78 \text{ N/mm}^2$$

Střední radiální napětí v plášti

$$\text{Sigsr} = -P_s / 2 = -0,3 / 2 = -0,15 \text{ N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí

$$\text{Sigeq} = \text{Max}(\text{Sigsm} - \text{Sigsteta}; \text{Sigsm} - \text{Sigsr}; \text{Sigsteta} - \text{Sigsr}) = \text{Max}(1,48 - 7,78; 1,48 - (-0,15); 7,78 - (-0,15)) = 7,93 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Sigeq} = 7,93 \text{ N/mm}^2 \leq f_s = 148,67 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ

Axiální ohybové napětí Sig_{sb}

$$\text{Sig}_{sb} = k_s / (k_s + k_c) \cdot (D_e / (2 \cdot e_s))^2 \cdot P_e / I_1 = 4,3348 \text{ E}5 / (4,3348 \text{ E}5 + 0) \cdot (381,44 / (2 \cdot 7))^2 \cdot 0,1164 / 15,83 = 5,46 \text{ N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici

$$\text{Sigeq}_1 = \text{Max}(\text{Sigsm} - \text{Sig}_{sb} + P_s; \text{Sigsm} + \text{Sig}_{sb}) = \text{Max}(1,48 - 5,46 + 0,3; 1,48 + 5,46) = 6,94 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Sigeq}_1 = 6,94 \text{ N/mm}^2 \leq 3 \cdot f_s = 446,01 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

ZATÍŽENÍ: pouze P_s+P_t (dT=0)

PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET

Maximální dovolené podélné napětí trubek

$$\text{Sigtp} = (P_s \cdot dt^2 - P_t \cdot (dt - 2 \cdot et)^2) / (dt^2 - (dt - 2 \cdot et)^2) = (0,3 \cdot 25^2 - 0,17 \cdot (25 - 2 \cdot 2)^2) / (25^2 - (25 - 2 \cdot 2)^2) = 0,6116 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{ftbk} = (x \cdot \text{Sigtp} + (R_{pt} - \text{Abs}(x \cdot \text{Sigtp})) / \text{Sqr}(1 + (((1 + b_o) \cdot R_{tp} - \text{Abs}(x \cdot \text{Sigtp})) / \text{Sig}_{tcr})^2)) / x =$$

$$= 1,1 \cdot 0,6116 + (235 - \text{Abs}(1,1 \cdot 0,6116)) / \text{Sqr}(1 + (((1 + 0,1376 \cdot 235 - \text{Abs}(1,1 \cdot 0,6116)) / 148,14^2)) / 1,1 =$$

$$= 104,06 \text{ N/mm}^2$$

Efektivní tlak působící na trubkovnici P_e

Axiální diferenční teplotní dilatace mezi trubkami a pláštěm

$$P_e = (J \cdot K_{st} / (1 + J \cdot K_{st} \cdot F_q)) \cdot (x_s + 2 \cdot vt \cdot (1 - x_s) + (2 \cdot v_s / K_{st}) - (1 - J) / (2 \cdot J \cdot K_{st})) \cdot ((D_j + 2 \cdot w_j)^2 - D_s^2) / D_s^2 \cdot P_s - (J \cdot K_{st} / (1 + J \cdot K_{st} \cdot F_q)) \cdot (x_t + 2 \cdot vt \cdot (1 - x_t) + 1 / (J \cdot K_{st})) \cdot P_t + (J \cdot K_{st} / (1 + J \cdot K_{st} \cdot F_q)) \cdot (K_w / 2) \cdot \text{Gamma} = 0,0262 \text{ MPa}$$

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma

$$\text{Sigma} = 1,5 \cdot F_m / \text{Mystar} \cdot (D_e / (e_a \cdot h_g))^2 \cdot P_e = 1,5 \cdot 0,0512 / 0,2188 \cdot (381,44 / (37 - 0))^2 \cdot 0,0262 = 0,9774 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Sigma} = 0,9774 \text{ N/mm}^2 \leq 1,5 \cdot f = 250 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Smykové napětí v trubkovnici Tau

$$\text{Tau} = 0,25 \cdot D_o / (m_y \cdot e_a) \cdot P_e = 0,25 \cdot 344,96 / (0,2188 \cdot 37) \cdot (-0,9202) = 0,2792 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Tau} = 0,2792 \text{ N/mm}^2 \leq 0,8 \cdot f = 133,34 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Pro všechny uvažované stavy nesmí smykové napětí v trubkovnici překročit 0,8 · f.

VÝPOČET TRUBEK

Axiální membránové napětí

Pro vnější řadu trubek

$$\text{Sigto} = ((P_s \cdot x_s - P_t \cdot x_t) - P_e \cdot F_q) / (x_t - x_s) = ((0,3 \cdot 0,6349 - 0,17 \cdot 0,7424) - 0,0262 \cdot 3,02) / (0,7424 - 0,6349) = -0,1394 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Sigto} = 0,1394 \text{ N/mm}^2 \leq \text{ftbk} = 104,06 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Pro vnitřní řadu trubek

$$\text{Sigti} = ((P_s \cdot x_s - P_t \cdot x_t) - P_e \cdot F_i) / (x_t - x_s) = ((0,3 \cdot 0,6349 - 0,17 \cdot 0,7424) - 0,0262 \cdot (-0,6714)) / (0,7424 - 0,6349) = 0,7614 \text{ N/mm}^2$$

$\text{Sigti}=0,7614\text{N/mm}^2 \leq \text{ftj}=125,34\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$

Ekvivalentní napětí

Střední hodnota obvodového napětí v trubkách

$$\text{Sigtteta}=(\text{Pt}*(\text{dt}-2*\text{et})-\text{Ps}*\text{dt})/(2*\text{et})=(0,17*(25-2*2)-0,3*25)/(2*2)=-0,9825\text{N/mm}^2$$

Střední hodnota radiálního napětí v trubkách

$$\text{Sigtr}=-\text{Pt}/2=-(0,17+0,3)/2=-0,235\text{N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí v trubkách

$$\text{Sigteq}=\text{Max}(\text{Sigti}-\text{Sigtteta}; \text{Sigti}-\text{Sigtr}; \text{Sigtteta}-\text{Sigtr}; \text{Sigto}-\text{Sigtteta}; \text{Sigto}-\text{Sigtr})$$

$$\text{Sigteq}=\underline{1,74\text{N/mm}^2}$$

$$\text{Sigteq}=1,74\text{N/mm}^2 \leq \text{ft}=156,67\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET PLÁŠTĚ

Axiální membránové napětí v plášti

$$\text{Sigsm}=\text{Ds}^2*(\text{Pt}+\text{Pe})/(4*\text{es}*(\text{Ds}+\text{es}))=362^2*(0,17+0,0262)/(4*7*(363+7))=\underline{2,5\text{N/mm}^2}$$

Ekvivalentní napětí

Střední obvodové napětí v plášti

$$\text{Sigsteta}=\text{Ps}*\text{Ds}/(2*\text{es})=0,3*363/(2*7)=7,78\text{N/mm}^2$$

Střední radiální napětí v plášti

$$\text{Sigsr}=-\text{Ps}/2=-0,3/2=-0,15\text{N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí

$$\text{Sigseq}=\text{Max}(\text{Sigsm}-\text{Sigsteta}; \text{Sigsm}-\text{Sigsr}; \text{Sigsteta}-\text{Sigsr})=$$

$$=\text{Max}(2,5-7,78; 2,5-(-0,15); 7,78-(-0,15))=\underline{7,93\text{N/mm}^2}$$

$$\text{Sigseq}=7,93\text{N/mm}^2 \leq \text{fs}=148,67\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ

Axiální ohybové napětí Sigsb

$$\text{Sigsb}=\text{ks}/(\text{ks}+\text{kc})*(De/(2*\text{es}))^2*\text{Pe}/I1=4,3348\text{E}5/(4,3348\text{E}5+0)*(381,44/(2*7))^2*0,0262/15,83=$$

$$=1,23\text{N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici

$$\text{Sigseq1}=\text{Max}(\text{Sigsm}-\text{Sigsb}+\text{Ps}; \text{Sigsm}+\text{Sigsb})=\text{Max}(2,5-1,23+0,3; 2,5+1,23)=\underline{3,72\text{N/mm}^2}$$

$$\text{Sigseq1}=3,72\text{N/mm}^2 \leq 3*\text{fs}=446,01\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

ZATÍŽENÍ: pouze dT (Ps=0;Pt=0)

PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET

Maximální dovolené podélné napětí trubek

$$\text{Sigtp}=(\text{Ps}*\text{dt}^2-\text{Pt}*(\text{dt}-2*\text{et})^2)/(\text{dt}^2-(\text{dt}-2*\text{et})^2)=0\text{N/mm}^2$$

$$\text{ftbk}=(x*\text{Sigtp}+(\text{Rpt}-\text{Abs}(x*\text{Sigtp}))/\text{Sqr}(1+(((1+\text{bo})*\text{Rtp}-\text{Abs}(x*\text{Sigtp}))/\text{Sigtr})^2))/x=$$

$$=1,1*0+(235-\text{Abs}(1,1*0))/\text{Sqr}(1+(((1+0,1376)*235-\text{Abs}(1,1*0))/148,14^2))/1,1=$$

$$=103,55\text{N/mm}^2$$

Efektivní tlak působící na trubkovnici Pe

Axiální diferenční teplotní dilatace mezi trubkami a pláštěm

$$\text{Gamma}=(\text{atm}*(\text{ttm}-20^\circ\text{C})-\text{asm}*(\text{tsm}-20^\circ\text{C}))*L*\text{Mdt}=(1,589\text{E}-5*(109-20)*-1,223\text{E}-5*(143-20))*926*0=$$

$$=-0,084\text{mm}$$

$$\text{Pe}=(\text{J}*K\text{st}/(1+\text{J}*K\text{st}*Fq))*(\text{xs}+2*\text{vt}*(1-\text{xs})+(2*\text{vs}/K\text{st})-(1-\text{J})/(2*\text{J}*K\text{st}))*((\text{Dj}+2*\text{wj})^2-\text{Ds}^2)/\text{Ds}^2*\text{Ps}-$$

$$(\text{J}*K\text{st}/(1+\text{J}*K\text{st}*Fq))*(\text{xt}+2*\text{vt}*(1-\text{xt})+1/(\text{J}*K\text{st}))*\text{Pt}+(\text{J}*K\text{st}/(1+\text{J}*K\text{st}*Fq))*(Kw/2)*\text{Gamma}=\underline{-0,4154\text{MPa}}$$

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma

$$\text{Sigma}=1,5*\text{Fm}/\text{Mystar}*(De/(\text{ea}-\text{hg}))^2*\text{Pe}=1,5*0,0512/0,2188*(381,44/(37-0))^2*(-0,4154)=$$

$$=-15,5\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigma}=15,5\text{N/mm}^2 \leq 2,25 \cdot f = 375,01\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Smykové napětí v trubkovnici Tau

$$\text{Tau}=0,25 \cdot \text{Do}/(\text{my} \cdot \text{ea}) \cdot \text{Pe}=0,25 \cdot 344,96/(0,2188 \cdot 37) \cdot (-0,4154)=-4,43\text{N/mm}^2$$

$$\text{Tau}=4,43\text{N/mm}^2 \leq 0,8 \cdot f = 133,34\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Pro všechny uvažované stavy nesmí smykové napětí v trubkovnici překročit $0,8 \cdot f$.

VÝPOČET TRUBEK

Axiální membránové napětí

Pro vnější řadu trubek

$$\text{Sigto}=(\text{Ps} \cdot \text{xs}-\text{Pt} \cdot \text{xt})-\text{Pe} \cdot \text{Fq}/(\text{xt}-\text{xs})=((0 \cdot 0,6349-0 \cdot 0,7424)-(-0,4154) \cdot 3,02)/(0,7424-0,6349)=-11,69\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigto}=11,69\text{N/mm}^2 \leq \text{ftj}=125,34\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Pro vnitřní řadu trubek

$$\text{Sigti}=(\text{Ps} \cdot \text{xs}-\text{Pt} \cdot \text{xt})-\text{Pe} \cdot \text{Fi}/(\text{xt}-\text{xs})=((0 \cdot 0,6349-0 \cdot 0,7424)-(-0,4154) \cdot (-0,6714))/(0,7424-0,6349)=-2,59\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigti}=2,59\text{N/mm}^2 \leq \text{ftbk}=103,08\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Ekvivalentní napětí

Střední hodnota obvodového napětí v trubkách

$$\text{Sigtteta}=(\text{Pt} \cdot (\text{dt}-2 \cdot \text{et})-\text{Ps} \cdot \text{dt})/(2 \cdot \text{et})=0\text{N/mm}^2$$

Střední hodnota radiálního napětí v trubkách

$$\text{Sigtr}=-\text{Pt}/2=0\text{N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí v trubkách

$$\text{Sigteq}=\text{Max}(\text{Sigti}-\text{Sigtteta}; \text{Sigti}-\text{Sigtr}; \text{Sigtteta}-\text{Sigtr}; \text{Sigto}-\text{Sigtteta}; \text{Sigto}-\text{Sigtr})$$

$$\text{Sigteq}=11,69\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigteq}=11,69\text{N/mm}^2 \leq 1,5 \cdot \text{ft}=235\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET PLÁŠTĚ

Axiální membránové napětí v plášti

$$\text{Sigsm}=\text{Ds}^2 \cdot (\text{Pt}+\text{Pe})/(4 \cdot \text{es} \cdot (\text{Ds}+\text{es}))=362^2 \cdot (0+(-0,4154))/(4 \cdot 7 \cdot (363+7))=-5,28\text{N/mm}^2$$

$$\text{fsbk}=\text{K} \cdot \text{es} \cdot \text{Es}/(4 \cdot (\text{Ds}+\text{es}))=1 \cdot 7 \cdot 193180/(4 \cdot (363+7))=913,69\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigsm}=5,28\text{N/mm}^2 \leq \text{fsbk}=913,69\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Ekvivalentní napětí

Maximální ekvivalentní napětí

$$\text{Sigeq}=\text{Max}(\text{Sigsm}-\text{Sigsteta}; \text{Sigsm}-\text{Sigstr}; \text{Sigsteta}-\text{Sigstr})=\text{Max}(-5,28-0; -5,28-0; 0-0)=5,28\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigeq}=5,27\text{N/mm}^2 \leq 1,5 \cdot \text{fs}=223\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ

Axiální ohybové napětí Sig_{sb}

$$\text{Sigsb}=\text{ks}/(\text{ks}+\text{kc}) \cdot (\text{De}/(2 \cdot \text{es}))^2 \cdot \text{Pe}/\text{I1}=4,3348\text{E}5/(4,3348\text{E}5+0) \cdot (381,44/(2 \cdot 7))^2 \cdot (-0,4154)/15,83=-19,47\text{N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici

$$\text{Sigseq1}=\text{Max}(\text{Sigsm}-\text{Sigsb}+\text{Ps}; \text{Sigsm}+\text{Sigsb})=\text{Max}(-5,28-(-19,47)+0; -5,28+(-19,47))=24,76\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigseq1}=24,76\text{N/mm}^2 \leq 3 \cdot \text{fs}=446,01\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

ZATÍŽENÍ: Pt+dT (Ps=0)

Efektivní tlak působící na trubkovnici Pe

Axiální diferenční teplotní dilatace mezi trubkami a pláštěm

$$\text{Gamma} = (\text{atm} \cdot (\text{ttm} - 20^\circ\text{C}) - \text{asm} \cdot (\text{tsm} - 20^\circ\text{C})) \cdot L \cdot \text{Mdt} =$$

$$= (1,589\text{E}-5 \cdot (109 - 20) - 1,223\text{E}-5 \cdot (143 - 20)) \cdot 926 \cdot 0 = -0,084\text{mm}$$

$$\text{Pe} = \left(\frac{J \cdot \text{Kst}}{1 + J \cdot \text{Kst} \cdot \text{Fq}} \right) \cdot (\text{xs} + 2 \cdot \text{vt} \cdot (1 - \text{xs}) + (2 \cdot \text{vs} / \text{Kst}) - (1 - J) / (2 \cdot J \cdot \text{Kst})) \cdot ((\text{Dj} + 2 \cdot \text{wj})^2 - \text{Ds}^2) / \text{Ds}^2 \cdot \text{Ps} - \left(\frac{J \cdot \text{Kst}}{1 + J \cdot \text{Kst} \cdot \text{Fq}} \right) \cdot (\text{xt} + 2 \cdot \text{vt} \cdot (1 - \text{xt}) + 1 / (J \cdot \text{Kst})) \cdot \text{Pt} + \left(\frac{J \cdot \text{Kst}}{1 + J \cdot \text{Kst} \cdot \text{Fq}} \right) \cdot (\text{Kw} / 2) \cdot \text{Gamma} = -0,05056\text{MPa}$$

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma

$$\text{Sigma} = 1,5 \cdot \text{Fm} / \text{Mystar} \cdot (\text{De} / (\text{ea} - \text{hg}))^2 \cdot \text{Pe} = 1,5 \cdot 0,0512 / 0,2188 \cdot (381,44 / (37 - 0))^2 \cdot (-0,5056) =$$

$$= -18,86\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigma} = 3,37\text{N/mm}^2 \leq 2,25 \cdot \text{f} = 375,01\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Smykové napětí v trubkovnici Tau

$$\text{Tau} = 0,25 \cdot \text{Do} / (\text{my} \cdot \text{ea}) \cdot \text{Pe} = 0,25 \cdot 344,96 / (0,2188 \cdot 37) \cdot (-0,5056) = -5,39\text{N/mm}^2$$

$$\text{Tau} = 5,39\text{N/mm}^2 \leq 0,8 \cdot \text{f} = 133,34\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET TRUBEK

Axiální membránové napětí

Pro vnější řadu trubek

$$\text{Sigto} = ((\text{Ps} \cdot \text{xs} - \text{Pt} \cdot \text{xt}) - \text{Pe} \cdot \text{Fq}) / (\text{xt} - \text{xs}) = ((0 \cdot 0,6349 - 0,17 \cdot 0,7424) - (-0,5056) \cdot 3,02) / (0,7424 - 0,6349) =$$

$$= 13,05\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigto} = 1,36\text{N/mm}^2 \leq \text{ftbk} = 104,06\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Pro vnitřní řadu trubek

$$\text{Sigti} = ((\text{Ps} \cdot \text{xs} - \text{Pt} \cdot \text{xt}) - \text{Pe} \cdot \text{Fi}) / (\text{xt} - \text{xs}) = ((0 \cdot 0,6349 - 0,17 \cdot 0,7424) - (-0,5056) \cdot (-0,6714)) / (0,7424 - 0,6349) =$$

$$= -4,33\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigti} = 4,33\text{N/mm}^2 \leq \text{ftbk} = 103,08\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Ekvivalentní napětí

$$\text{Sigtr} = -(\text{pt} + \text{Ps}) / 2 = -(0,17 + 0) / 2 = -0,085\text{N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí v trubkách

$$\text{Sigteq} = \text{Max}(\text{Sigti} - \text{Sigtteta}; \text{Sigti} - \text{Sigtr}; \text{Sigtteta} - \text{Sigtr}; \text{Sigto} - \text{Sigtteta}; \text{Sigto} - \text{Sigtr})$$

$$\text{Sigteq} = 13,14\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigteq} = 13,14\text{N/mm}^2 \leq 1,5 \cdot \text{ft} = 235\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET PLÁŠTĚ

Axiální membránové napětí v plášti

$$\text{Sigsm} = \text{Ds}^2 \cdot (\text{Pt} + \text{Pe}) / (4 \cdot \text{es} \cdot (\text{Ds} + \text{es})) = 362^2 \cdot (0,17 + (-0,5056)) / (4 \cdot 7 \cdot (363 + 7)) = -4,27\text{N/mm}^2$$

Ekvivalentní napětí

Maximální ekvivalentní napětí

$$\text{Sigseq} = \text{Max}(\text{Sigsm} - \text{Sigsteta}; \text{Sigsm} - \text{Sigstr}; \text{Sigsteta} - \text{Sigstr}) = \text{Max}(4,27 - 0; -4,27 - 0; 0 - 0) = 4,27\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigseq} = 4,27\text{N/mm}^2 \leq 1,5 \cdot \text{fs} = 223\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ

Axiální ohybové napětí Sigb

$$\text{Sigsb} = \text{ks} / (\text{ks} + \text{kc}) \cdot (\text{De} / (2 \cdot \text{es}))^2 \cdot \text{Pe} / \text{I1} = 4,3348\text{E}5 / (4,3348\text{E}5 + 0) \cdot (381,44 / (2 \cdot 7))^2 \cdot (-0,5056) / 15,83 =$$

$$= -23,7\text{N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici

$$\text{Sigseq1} = \text{Max}(\text{Sigsm} - \text{Sigsb} + \text{Ps}; \text{Sigsm} + \text{Sigsb}) = \text{Max}(4,27 - (-23,7) + 0; -4,27 + (-23,7)) = 27,97\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigseq1} = 27,97\text{N/mm}^2 \leq 3 \cdot \text{fs} = 446,01\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

ZATÍŽENÍ: P_s+dT ($P_t=0$)

Maximální dovolené podélné napětí trubek

$$\text{Sigtp}=1,02\text{N/mm}^2$$

$$\text{ftbk}=104,41\text{N/mm}^2$$

Efektivní tlak působící na trubkovnici P_e

Axiální diferenční teplotní dilatace mezi trubkami a pláštěm

$$\text{Gamma}=-0,084\text{mm}$$

$$P_e=-0,2989\text{MPa}$$

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma

$$\text{Sigma}=-11,15\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigma}=11,15\text{N/mm}^2 \leq 2,25 \cdot f = 375,01\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Smykové napětí v trubkovnici Tau

$$\text{Tau}=-3,19\text{N/mm}^2$$

$$\text{Tau}=3,19\text{N/mm}^2 \leq 0,8 \cdot f = 133,34\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET TRUBEK

Axiální membránové napětí

Pro vnější řadu trubek

$$\text{Sigto}=10,18\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigto}=10,18\text{N/mm}^2 \leq f_{tj}=125,34\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Pro vnitřní řadu trubek

$$\text{Sigti}=-0,0953\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigti}=0,0953\text{N/mm}^2 \leq \text{ftbk}=104,41\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Ekvivalentní napětí

$$\text{Sigtteta}=-1,84\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigtr}=-0,15\text{N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí v trubkách

$$\text{Sigteq}=12,06\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigteq}=12,06\text{N/mm}^2 \leq 1,5 \cdot f_t = 235\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET PLÁŠTĚ

Axiální membránové napětí v plášti

$$\text{Sigsm}=-3,8\text{N/mm}^2$$

Ekvivalentní napětí

$$\text{Sigsteta}=P_s \cdot D_s / (2 \cdot e_s) = 0,3 \cdot 363 / (2 \cdot 7) = 7,78\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigsr}=-P_s/2 = -0,3/2 = -0,15\text{N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí

$$\text{Sigseq}=11,58\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigseq}=11,58\text{N/mm}^2 \leq 1,5 \cdot f_s = 223\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ

Axiální ohybové napětí Sigsb

$$\text{Sigsb}=-14,01\text{N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici

$$\text{Sigseq1}=17,82\text{N/mm}^2$$

$$\text{Sigseq1}=17,82\text{N/mm}^2 \leq 3 \cdot f_s = 446,01\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

ZATÍŽENÍ: Pt+Ps+dT

Maximální dovolené podélné napětí trubek

Sigtp=0,6116/mm²
 Sigtr=148,14N/mm²
 bo=0,1376
 ftbk=104,06N/mm²

Efektivní tlak působící na trubkovnici Pe

Axiální diferenční teplotní dilatace mezi trubkami a pláštěm
 Gamma=-0,084mm
 Pe=-0,3892MPa

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma

Sigma=-14,52N/mm²
 Sigma=14,52N/mm² ≤ 1,5*2,25=375N/mm² => vyhovuje

Smykové napětí v trubkovnici Tau

Tau=-4,15N/mm²
 Tau=4,15N/mm² ≤ 0,8*f=133,34N/mm² => vyhovuje

VÝPOČET TRUBEK

Axiální membránové napětí

Pro vnější řadu trubek
 Sigto=11,55N/mm²
 Sigto=11,55N/mm² ≤ ftj=125,34N/mm² => vyhovuje

Pro vnitřní řadu trubek

Sigti=-1,83/mm²
 Sigti=1,83N/mm² ≤ ftbk=103,08N/mm² => vyhovuje

Ekvivalentní napětí

Sigtteta=-0,9825N/mm²
 Sigtr=0,235N/mm²
 Maximální ekvivalentní napětí v trubkách
 Sigteq=12,53N/mm²
 Sigteq=12,53N/mm² ≤ 1,5*ft=235N/mm² => vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ

Axiální membránové napětí v plášti

Sigsm=-2,79N/mm²

Ekvivalentní napětí

Střední obvodové napětí v plášti
 Sigsteta=7,78N/mm²
 Střední radiální napětí v plášti
 Sigsr=-0,15N/mm²
 Maximální ekvivalentní napětí
 Sigeq=Max(Sigsm-Sigsteta; Sigsm-Sigsr; Sigsteta-Sigsr)=10,57N/mm²
 Sigeq=10,57N/mm² ≤ 1,5*fs=223N/mm² => vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ

Axiální ohybové napětí Sigsb

$$\text{Sigsb} = -18,24 \text{ N/mm}^2$$

Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici

$$\text{Sigseq1} = \text{Max}(\text{Sigsm} - \text{Sigsb} + \text{Ps}; \text{Sigsm} + \text{Sigsb}) = 21,03 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Sigseq1} = 21,03 \text{ N/mm}^2 \leq 3 \cdot \text{fs} = 446,01 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

6.5 ČSN EN 13445: 13.10 Výpočet přírubového okraje trubkovnice s úzkým těsněním.

Celkový moment působící na trubkovnici v podmínkách montáže

$$\text{MA} = W \cdot (C - G) / 2 = 253840 \cdot (445 - 399,88) / 2 = 5,7266 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Analyzovaná tloušťka přírubového okraje

$$\text{eflA} = \text{Sqr}(\text{MA} \cdot \text{Tmp} / (\text{PI} \cdot A \cdot \text{fa})) = \text{Sqr}(5,7266 \cdot 10^6 \cdot 6,96 / (3,14 \cdot 485 \cdot 235)) = 10,55 \text{ mm}$$

Celkový moment působící na trubkovnici při provozních podmínkách

$$\text{Mop} = 9,1266 \cdot 10^5 \text{ Nmm (dle 13.10.5-4)}$$

Požadovaná tloušťka pro provozní podmínky

$$\text{eflop} = 5 \text{ mm (dle 13.10.5-3)}$$

ZKUŠEBNÍ TLAK

TRUBKOVNICE

$$\text{Ptmin} = \text{Max}(1,43 \cdot 0,17; 1,25 \cdot 0,14 \cdot 173,33 / 166,67) = 0,2431 \text{ MPa}$$

$$\text{Ptmin} = 0,2431 \leq \text{Ptmax} = 8,22 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

PLÁŠŤ

$$\text{Ptsmin} = \text{Max}(1,43 \cdot \text{Ps}; 1,25 \cdot \text{Ps} \cdot f_{20}/f) = \text{Max}(1,43 \cdot 0,3; 1,25 \cdot 0,3 \cdot 173,33 / 166,67) = 0,4290 \text{ MPa}$$

$$\text{Ptsmin} = 0,4290 \leq \text{Ptsmax} = 10,5 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Výpočet byl proveden pouze pro jednu trubkovnici při výpočtu druhé trubkovnice se postupuje stejným způsobem. Rozdílné jsou pouze střední teplota trubek 150°C a střední teplota skořepiny 114°C. Výpočet byl proveden pro všechny možné způsoby zatížení a jejich kombinace. Trubkovnice vyhovuje, žádné napětí nepřekračuje dovolené napětí pro daný materiál při zatížení.

Obě trubkovnice jsou integrální s pláštěm. Jsou k němu přivařeny.

VÝPOČET TRUBEK

Materiál: 10216-5:2004/AC:08, 1.4539 X1NiCrMoCu25-20-5

Materiálové parametry: $R_m = 520 \text{ MPa}$, $R_p = 250 \text{ MPa}$, $R_{pt} = 235 \text{ MPa}$, $f_{20} = 166,67$, $f_t = 156,67 \text{ MPa}$, $f_{test} = 238,1 \text{ MPa}$, $E = 193180 \text{ N/mm}^2$, $\text{ro} = 7,93$

Parametry trubek:

Vnější průměr trubek: $dt = 25 \text{ mm}$

Tloušťka stěny trubky: $et = 2 \text{ mm}$

Poloha trubky: $p = 32 \text{ mm}$

Průměr díry v trubkovnici: $dh = 25,2 \text{ mm}$

Průměr otrubkované plochy trubkovnice: $Do = 344,96$

Počet trubek v trubkovnici: $N_t = 85$ trubek

Koeficient tepelné roztažnosti trubek: $\text{atm} = 1,58 \cdot 10^{-5} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$

Délka trubek mezi čely trubkovnice: $L = 926 \text{ mm}$

Tloušťka trubkovnice (nezkorodované): $en = 40 \text{ mm}$

Negativní tolerance: 12,5%

Bezpečnostní faktor: 1,25

VÁLCOVÝ PLÁŠŤ POD VNITŘNÍM TLAKEM

Minimální tloušťka stěny trubek

$$e_{\min} = D_e \cdot P / (2 \cdot f \cdot z + P) = 25 \cdot 0,17 / (2 \cdot 156,67 \cdot 1 + 0,17) = \underline{0,0136 \text{ mm}}$$

$$e_{\min a} = (e_{\min} + c + t_h) \cdot (1 + \text{trend} / 100) = (0,0136 + 0 + 0,25) \cdot (1 + 0 / 100) = \underline{0,2636 \text{ mm}}$$

Analýzovaná tloušťka

$$e_a = e_n / (1 + \text{trend} / 100) - c - t_h = 2 / (1 + 0 / 100) - 0 - 0,25 = 1,75 \text{ mm}$$

$$e_{\min a} = 0,2636 \text{ mm} \leq e_n = 2 \text{ mm} \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÝ PRACOVNÍ TLAK MAWP

Vnitřní průměr trubky

$$D_i = d_t - 2 \cdot e_a = 25 - 1,75 = 21,5 \text{ mm}$$

Střední průměr trubky

$$D_m = (D_e + D_i) / 2 = (25 + 21,5) / 2 = 23,25 \text{ mm}$$

Zkorodovaný a zatížený teplotou

$$MAWPHC = 2 \cdot f \cdot z \cdot e_a / D_m = 2 \cdot 156,67 \cdot 1 \cdot 1,75 / 23,25 = \underline{23,58 \text{ MPa}}$$

Nezkorodovaný a studený

$$MAWPNC = 2 \cdot f_{20} \cdot z \cdot (e_a + c) / D_m = 2 \cdot 166,67 \cdot 1 \cdot (1,75 + 0) / 23,25 = \underline{25,09 \text{ MPa}}$$

MAXIMÁLNÍ ZKUŠEBNÍ TLAK

$$P_{t\max} = 2 \cdot f_{\text{test}} \cdot (e_a + c) / D_m = 2 \cdot 238,1 \cdot (1,75 + 0) / 23,25 = \underline{35,84 \text{ MPa}}$$

ČSN EN 13445-5 10.2.3.3 MINIMÁLNÍ POŽADOVANÝ ZKUŠEBNÍ TLAK $P_{t\min}$

$$P_{t\min} = 1,25 \cdot P_d \cdot f_{20} / f = 1,25 \cdot 0,17 \cdot 166,67 / 155,67 = \underline{0,2261 \text{ MPa}}$$

$$P_{t\min} = 1,43 \cdot p_d = 1,43 \cdot 0,17 = \underline{0,2431 \text{ MPa}}$$

$$P_{t\min} = 0,2261 \leq P_{t\max} = 35,84 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

VÁLCOVÝ PLÁŠŤ POD EXTERNÍM TLAKEM

NOMINÁLNÍ MEZNÍ ROZTAŽENÍ

$$S_{\text{ige}} = R_{\text{pr}} / (1,3 \cdot s) = 235 / (1,3 \cdot 1,25) = 144,62 \text{ N/mm}^2$$

PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET

$$R = D_m / 2 = 23,25 / 2 = 11,63 \text{ mm}$$

$$Z = \pi \cdot R / L = 3,14 \cdot 11,625 / 926 = 0,0394$$

$$\Delta = 1,28 / \sqrt{R \cdot e_a} = 1,28 / \sqrt{0,2838}$$

$$\gamma = 0$$

URČENÍ ϵ_{ps}

ϵ_{ps} je nejmenší když $n=2$

$$\epsilon_{ps} = 0,006231$$

MEMBRÁNOVÝ ZISK p_y

$$p_y = S_{\text{ige}} \cdot e_a / (R \cdot (1 - \gamma)) = 144,62 \cdot 175 / (11,625 \cdot (1 - 0)) = \underline{21,77 \text{ MPa}}$$

ELASTICKÁ NESTÁLOST p_e

$$p_m = E \cdot e_a \cdot \epsilon_{ps} / R = 193180 \cdot 1,75 \cdot 0,0062 / 11,625 = \underline{181,19 \text{ MPa}}$$

MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÝ TLAK P_{\max}

$$p_r = \text{Value1} \cdot p_y = 0,9585 \cdot 21,77 = \underline{20,87 \text{ MPa}}$$

$$P_{\max} = p_r / k = 20,87 / 1,5 = \underline{13,91 \text{ MPa}}$$

$$\text{Externí tlak } P_{\max} = 13,91 \text{ MPa} \geq P_{\text{ext}} = 0,3 \text{ MPa} \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Maximální tlak působící na vnější stranu trubek je 0,3MPa maximální možný tlak činí 13,91Mpa. Trubky na vnější tlak vyhovují.

Maximální vnější zkušební tlak

$$P_{t\max} = P_r / 1,1 = 22,2 / 1,1 = \underline{20,18 \text{ MPa}}$$

6.6 Návrh patek

Vnější průměr pláště: $De=377\text{mm}$

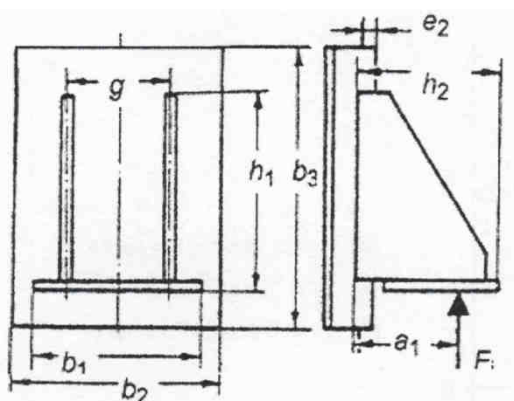
Tloušťka stěny (nezkorodovaný): $en=8\text{mm}$

Negativní tolerance: $th=0,5\text{mm}$

Použitý materiál: EN 10028-2:2003/AC:06, 1.0425 P265GH

Hodnoty při teplotě 150°C : $R_m=410\text{MPa}$, $R_p=265\text{MPa}$, $R_{pt}=223\text{MPa}$, $f_s=148,67\text{MPa}$, $f_{\text{fest}}=252,38\text{MPa}$, $f_{20}=170,83\text{MPa}$, $E=202384\text{N/mm}^2$, $\rho_0=7,85$

GEOMETRIE PATEK



Obr.14: Geometrie patek

Type A

Použitý materiál: EN 10028-2:2003/AC:06, 1.0425 P265GH

Hodnoty při teplotě 150°C : $R_m=410\text{MPa}$, $R_p=265\text{MPa}$, $R_{pt}=223\text{MPa}$, $f_s=148,67\text{MPa}$, $f_{\text{fest}}=252,38\text{MPa}$, $f_{20}=170,83\text{MPa}$, $E=202384\text{N/mm}^2$, $\rho_0=7,85$

$b_1=120\text{mm}$; $g=92\text{mm}$; $h=0\text{mm}$; $h_1=190\text{mm}$; $h_2=120\text{mm}$; Počet patek: $n=2$; $a_1=91,5\text{mm}$; $er=ec=8\text{mm}$; $a_2=50\text{mm}$

HODNOTY SVARU

Svarový součinitel: $z=0,5$

Svar mezi padkou a pláštěm: $ab=ag=4\text{mm}$

Popis	Značka	Zkouška	Provoz	Jednotka
Celková vertikální síla	FV	4,908	4,53	kN
Celková horizontální síla	FH	0	0	kN
Ohybový moment	MA	0	0	kNm
Vnitřní tlak	Pi	0,43	0,3	Mpa
Korozní přírůstek	c	1	1	mm

tab.4 zatížení působící na patku

PŮSOBÍCÍ NAPĚTÍ: TLAKOVÁ ZKOUŠKA

Analyzovaná tloušťka pláště

$ea=en-c-th=8-1-0,5=6,5\text{mm}$

Vnitřní průměr pláště

$Di=De-2*(en-c)=377-2*(8-1)=363\text{mm}$

Ekvivalentní průměr pláště

$Deq=Di=363\text{mm}$

Podmínky platnosti

$0,001 \leq en/Deq = 0,022 \leq 0,05 \Rightarrow$ vyhovuje

$0,2 \leq g/h1 = 0,4842 \leq 1 \Rightarrow$ vyhovuje

PŮSOBÍCÍ SÍLY

Vertikální síla

$$F_{vi} = (FV + 4 * MA / (D_i + 2 * (a1 + ea))) / n = (4,908 + 4 * 0 / (363 + 2 * (91,5 + 6,5))) / 2 = \underline{2,45kN}$$

Horizontální síla

$$F_{hi} = FH / n = 0 / 2 = \underline{0kN}$$

ZÁTĚŽNÉ LIMITY PLÁŠTĚ

$$\lambda = h1 / \sqrt{D_{eq} * ea} = 190 / \sqrt{363 * 6,5} = 3,91$$

$$K16 = 1 / \sqrt{0,36 + 0,4 * \lambda + 0,02 * \lambda^2} = 1 / \sqrt{0,36 + 0,4 * 3,91 + 0,02 * 3,91^2} = 0,6696$$

$$N_{y1} = \text{Min}(0,08 * \lambda; 0,3) = \text{Min}(0,08 * 3,91; 0,3) = 0,3$$

$$\sigma = P * D_{eq} / (2 * ea) = 0,43 * 363 / (2 * 6,5) = 12,01 \text{N/mm}^2$$

$$N_{y2} = \sigma / (K2 * f_s) = 12,01 / (1,05 * 252,38) = 0,0453$$

$$\sigma_{ball} = k1 * K2 * f_s = 1,24 * 1,05 * 252,38 = 328,36 \text{N/mm}^2$$

$$a_{eq} = a1 + F_{hi} * h / F_{vi} = 91,5 + 0 / 2,454 = 91,5 \text{mm}$$

$$F_{imax} = (\sigma_{ball} * ea^2 * h1 / (k16 * a_{eq})) * \text{Min}(1; 0,5 + g/h1) = (238,36 * 6,5^2 * 190 / (0,6696 * 91,5)) * \text{Min}(1; 0,5 + 92/190) = \underline{42,35kN}$$

$$F_{vi} = 2,454 \text{kN} \leq F_{imax} = 42,53 \text{kN} \Rightarrow$$
vyhovuje

Minimální tloušťka patky

Vliv tlaku

$$P_b = F_{vi} / (b1 * a2) = 2,454 / (120 * 50) = 0,4090 \text{N/mm}^2$$

Plát se dvěma klíny

$$t_{bBending} = \sqrt{F_{vi} * g / ((h2 - dh) * f_b)} = \sqrt{2,454 * 92 / ((120 - 0) * 252,38)} = 2,73 \text{mm}$$

$$t_{bBearing} = \sqrt{\beta * P_b * h^2 / f_b} = \sqrt{0,25 * 0,409 * 120^2 / 252,38} = 2,42 \text{mm}$$

$$t_{bmin} = \text{Max}(t_{bBending}; t_{bBearing}) = \underline{2,73 \text{mm}}$$

$$t_{bmin} = 2,73 \text{mm} \leq e_c = 8 \text{mm} \Rightarrow$$
vyhovuje

Minimální požadovaná tloušťka plátu je 2,73mm, tloušťka plátu je 8mm. Podpěry tedy vyhovují.

Napětí v klínu/žebří

Axiální napětí

$$F_{ga} = F_{vi} * \sin(\alpha) + F_{hi} * \cos(\alpha) = 2,454 * \sin(57,5) + 0 * \cos(57,5) = 2,07 \text{kn}$$

Ohybový moment

$$M_{gb} = F_{vi} * \cos(\alpha) * (a1 - h2/2) * \sin(\alpha) + F_{hi} * h = 34,9 \text{kNmm}$$

Požadované tloušťka

$$t_{rmin} = 2 / (\gamma * f_{bc}) * (F_{ga} / (h2 * \sin(\alpha)) + 6M_{gb} / (h2 * \sin(\alpha)))^2 = \underline{0,3233 \text{mm}} \leq 8 \text{mm} \Rightarrow$$
vyhovuje

MÍSTO SVAŘENÍ ZÁKLADNÍ DESKY A KLÍNU

Oblast svaření

$$A_w = 4 * a_g * h1 = 4 * 4 * 190 = 3040 \text{mm}^2$$

Momenty

$$I_{xx} = 2 * a_g * h1^3 / 6 = 2 * 4 * 190^3 / 6 = 9,1453 * 10^6 \text{mm}^4$$

$$I_{yy} = 2 * a_g * h1^2 * b1 / 2 = 2 * 4 * 190^2 * 120 / 2 = 1,7218 * 10^7 \text{mm}^4$$

Polární moment

$$J_{xy} = 2 * a_g * h1 * (3 * b1^2 + h1^2) / 6 = 2 * 4 * 190 * (3 * 120^2 + 190^2) / 6 = 2,0089 * 10^7 \text{mm}^4$$

Primární stříhové napětí ve svaru

$$\tau_{uw} = F_{vi} / A_w = 2,454 / 3040 = 0,8075 \text{N/mm}^2$$

Normální napětí ve svaru

$$\text{Sigwx}=(fvi*a1+Fhi*h)*ry/Ixx=(2,454*91,5+0*0)*95/9,1453*10^6=2,33\text{N/mm}^2$$

Celkové napětí ve svaru A

$$\text{SigwTotx}=\text{Sqr}(\text{Sigwx}^2+3*\text{Tauw}^2)=\text{sqr}(2,33^2*0,8072^2)=\underline{2,72\text{N/mm}^2} \leq z*fb=126,18\text{N/mm}^2$$

=>vyhovuje

Horizontální napětí v příčném směru

$$\text{Tauyw}=\text{Abs}(Fhi/Aw)=\text{Abs}(0/3040)=0\text{N/mm}^2$$

Normální napětí ve svaru X-X

$$\text{SigwyTw}=Fhi*a1*rx/Iyy=0*91,5*60/1,7328\text{E}7=0\text{N/mm}^2$$

Normální napětí ve svaru Y-Y

$$\text{SigwyB}=Fgi*a1*rx/Iyy=0*91,5*60/1,7328\text{E}7=0\text{N/mm}^2$$

Střihové napětí od kroutícího Momentu y-y

$$\text{TauyTw}=Fhi*h*ry/Jxy=0\text{N/mm}^2$$

Celkové střihové napětí

$$\text{TauTot}=\text{Sqr}((\text{Tauw}+\text{TauxTw})^2+(\text{Tauw}+\text{TauyTw})^2)=1,14\text{N/mm}^2$$

Celkové napětí ve svaru B

$$\text{SigwTotb}=\text{Sqr}(\text{Sigwx}^2+\text{SigwyB}^2+3*\text{TauTot}^2)=\underline{3,06\text{N/mm}^2} \leq z*fb=126,19\text{N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

PŮSOBÍCÍ NAPĚTÍ: PROVOZNÍ STAV

PŮSOBÍCÍ SÍLY

Vertikální síla

$$Fvi=(FV+4*MA/(Di+2*(a1+ea)))/n=(4,53+4*(0/(363+2*(91,5+6,5))))/2=\underline{2,27\text{kN}}$$

Horizontální síla

$$Fhi=FH/n=0/2=\underline{0\text{kN}}$$

ZÁTĚŽNÉ LIMITY PLÁŠTĚ

$$\text{Sigm}=\text{P}*Deq/(2*ea)=0,3*363/(2*6,5)=8,38\text{N/mm}^2$$

$$\text{Ny}2=\text{Sigm}/(K2*fs)=8,38/(1,05*252,38)=0,0451$$

$$\text{Sigball}=k1*K2*fs=1,24*1,05*252,38=328,36\text{N/mm}^2$$

$$\text{Fimax}=(\text{Sigball}*ea^2*h1/(k16*aleq))*\text{Min}(1; 0,5+g/h1)=$$

$$=(230,31*6,5^2*190/(0,6696*91,5))*\text{Min}(1; 0,5+92/190)=\underline{29,7\text{kN}}$$

$$Fvi=2,265\text{kN} \leq \text{Fimax}=29,7\text{kN} \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Minimální tloušťka patky

Vliv tlaku

$$\text{Pb}=Fvi/(b1*a2)=2,265/(120*50)=0,3775\text{N/mm}^2$$

Plát se dvěma klíny

$$\text{tbBendink}=\text{Sqr}(Fvi*g/((h2-dh)*fb))=\text{Sqr}(2,265*92/((120-0)*148,67))=3,42\text{mm}$$

$$\text{tbBearing}=\text{Sqr}(\text{beta}*Pb*h^2/fb)=\text{Sqr}(0,25*0,3775*120^2/148,67)=3,02\text{mm}$$

$$\text{tbmin}=\text{Max}(\text{tbBending}; \text{tbBearing})=\underline{3,42\text{mm}}$$

$$\text{tbmin}=3,42\text{mm} \leq \text{ec}=8\text{mm} \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Minimální požadovaná tloušťka plátu pro provozní stav je 3,42mm, tloušťka plátu je 8mm.

Podpěry tedy vyhovují.

Napětí v klínu/žeburu

Axiální napětí

$$\text{Fga}=Fvi*\text{Sin}(\text{teta})+Fhi*\text{Cos}(\text{teta})=1,92\text{kN}$$

Ohybový moment

$$\text{Mgb}=Fvi*\text{Cos}(\text{teta})*(a1-h2/2)*\text{Sin}(\text{teta})+Fhi*h=32,21\text{kNmm}$$

Požadované tloušťka

$$t_{\min} = 2 / (\sigma_{\text{fbc}} * (F_{\text{ga}} / (h_2 * \sin(\alpha)) + 6M_{\text{gb}} / (h_2 * \sin(\alpha)))^2 = 0,5065 \text{ mm} \leq 8 \text{ mm} \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

MÍSTO SVAŘENÍ ZÁKLADNÍ DESKY A KLÍNU

Primární sřihové napětí ve svaru

$$\tau_{\text{uw}} = F_{\text{vi}} / A_{\text{w}} = 2,265 / 3040 = 0,7451 \text{ N/mm}^2$$

Normální napětí ve svaru

$$\sigma_{\text{wx}} = (f_{\text{vi}} * a_1 + F_{\text{hi}} * h) * r_{\text{y}} / I_{\text{xx}} = 2,15 \text{ N/mm}^2$$

Celkové napětí ve svaru A

$$\sigma_{\text{wTotx}} = \sqrt{(\sigma_{\text{wx}}^2 + 3 * \tau_{\text{uw}}^2)} = 2,51 \text{ N/mm}^2 \leq z * f_{\text{b}} = 74,335 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Horizontální napětí v příčném směru

Normální napětí ve svaru X-X

$$\tau_{\text{Tot}} = \sqrt{(\tau_{\text{uw}} + \tau_{\text{uxTw}})^2 + (\tau_{\text{uw}} + \tau_{\text{uyTw}})^2} = 1,05 \text{ N/mm}^2$$

Celkové napětí ve svaru B

$$\sigma_{\text{wTotb}} = \sqrt{(\sigma_{\text{wx}}^2 + \sigma_{\text{wy}}^2 + 3 * \tau_{\text{Tot}}^2)} = 2,82 \text{ N/mm}^2 \leq z * f_{\text{b}} = 74,335 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

7. Zhodnocení výpočtu

Kontrola všech tlakem zatížených částí byla provedena dle ČSN EN 13445. Jedná se o trubkový výměník s pevnými integrálními trubkovnicemi s pláštěm. Trubkovnice jsou spojeny s pláštěm svarem. Nejdříve se u každé zatížené části výměníku určí maximální hodnoty přípustného namáhání pro daný materiál a teplotu. Dále se určí skutečné namáhání jednotlivých částí a tyto hodnoty se porovnají. Pokud je dovolené namáhání menší než namáhání skutečné, součást vyhovuje.

Návrh součástí se provádí zvlášť pro provozní podmínky a zvlášť pro podmínky tlakové zkoušky. Parametry podmínek tlakové zkoušky a provozní se značně liší. Tlaková zkouška se provádí při teplotě 20°C a zkušebním tlaku, který je vyšší než provozní.

Hlavní zatížené části výměníku:

Plášť:

Při výpočtu pláště se nejdříve vypočítá minimální tloušťka stěny, která se následovně porovná se zvolenou tloušťkou. Dále se určí hydrostatické tlaky.

Torosférické dno:

Provede se výpočet tloušťky stěny dna a maximálních tlaků pro všechny možné stavy. Jedná se o stavy jak pro nový tak i zkorodovaný výměník zatížený teplotou a bez teploty. Následuje výpočet průměru největšího nevyztuženého otvoru. Pokud by některý otvor ve skořepině překročil maximální rozměr nevyztuženého otvoru bylo by nutné otvor vyztuzit. Následuje návrh příruby, těsnění a šroubů. Výpočet šroubů zahrnuje zjištění velikosti jednotlivých sil na nich. Pro největší sílu se vypočítá potřebná plocha šroubového spoje a podělí počtem šroubů. Příruba je zatěžována ohybovými momenty od šroubového spoje.

Těsnění:

Jako těsnění bylo použito těsnění typu TEMACARB. Jedná se o těsnění ze speciálního materiálu na bázi uhlíkových vláken a speciálních přísad spojených kvalitním NBR. Tato těsnění se používají převážně pro vyšší teploty a tlaky, hlavně pro přehřátou páru. Těsnění temacarb jsou vhodná i pro zásaditá média. Maximální pracovní teplota se pohybuje do 250°C a krátkodobě snesou i teplotu 450°C. Maximální pracovní tlak je 140Barů.

Hrdlo:

Výpočet hrdla se provádí pro všechny možné způsoby zatížení, jak vnější tak vnitřní. Jsou to smyková napětí a jejich kombinace s vnitřním tlakem.

Trubkovnice:

Trubkovnice jsou integrální s pláštěm a utěsněná přírubovým okrajem ke komoře. Výpočet trubkovnice musí být proveden pro všechny možné způsoby zatížení. Působení vnějšího, vnitřního tlaku a teploty. Výpočet byl proveden pro každé zatížení zvlášť a následně pro všechny možné stavy. Nejprve se tento výpočet provede pro provozní stav a následně pro stav zkušební.

Patky:

Výpočet patek byl proveden pro zatížení vzniklé provozním a zkušebním stavem. Určuje se napětí ve svarech a porovnává se s dovoleným napětím pro daný materiál násobený svarovým součinitelem.



Obr.15: Fotografie výměníku z montáže z Královopolské Brno

8. Závěr

V práci byla zpracována problematika výměníků tepla a návrh nového trubkového rekuperačního výměníku tepla s pevnými trubkovnicemi pro dané vstupní parametry přiváděného média. Teplonosným médiem je v tomto výměníku voda.

V úvodní části byl rozebrán princip funkce výměníku jakožto zařízení zprostředkovávajícího přestup tepla mezi proudícími médii.

Další část práce je zaměřena na rozdělení výměníku z různých hledisek. Zabýval jsem se hlavně trubkovými rekuperačními výměníky. Tyto výměníky nacházejí širokou míru uplatnění v chemii, petrochemii, energetických zařízeních, průmyslových provozech, potravinářství, atd.

Životnost výměníků ovlivňují mechanické poruchy, můžeme je rozdělit na poruchy vzniklé při výrobě a poruchy způsobené proudícím médiem. Poruchy způsobené proudícím médiem jsou: koroze, abraze a zanášení výměníku. Tyto jednotlivé poruchy lze ovlivnit čistotou média, konstrukcí výměníku a užitím kvalitnějších materiálů. Druhou skupinou poruch jsou vady vzniklé při výrobě. Mezi tyto vady nejčastěji patří: netěsnosti v zaválcování trubek, špatné svary, trhliny v trubkách, kavitační poškození. Těmto vadám lze předejít vhodnějším konstrukčním řešením výměníku a zjištěním vad nedestruktivními zkouškami, nebo jejich zjištěním při tlakové zkoušce.

Pro zjištění případných vad ve svarech tlakových nádob se provádí zkoušky svarového spoje. Zkoušky jsou nedestruktivní a destruktivní. Mezi nedestruktivní zkoušku pro zjištění povrchových vad patří vizuální kontrola svarového spoje. Pro kontrolu skrytých povrchových vad se provádí zkouška ultrazvukem, prozářením a penetrační zkouška. Zkoušky se používají podle určení tlakové nádoby. Destruktivní zkoušky jsou: tahem, ohybem a rázem v ohybu. Údaje z provedených zkoušek jsou součástí pasportu tlakové nádoby.

Kontrola všech tlakem zatížených částí byla provedena dle normy ČSN EN 13445. Nejdříve u každé zatížené části výměníku byly určeny maximální hodnoty dovoleného namáhání pro daný materiál a teplotu. Dovolená namáhání se pro různé teploty stejného materiálu liší. Dále bylo určeno skutečné namáhání jednotlivých částí a tyto hodnoty se porovnály. Pokud je menší dovolené namáhání než namáhání skutečné součást vyhovuje.

Výpočet součástí byl proveden zvlášť pro provozní podmínky a zvlášť pro podmínky tlakové zkoušky. Parametry podmínek tlakové zkoušky a provozní se značně liší. Tlaková zkouška se provádí při teplotě 20°C a zkušebním tlaku, který je vyšší než provozní.

Veškeré části výměníku tepla pro dané parametry vyhovují. Hlavní zatížené části výměníku jsou dna, plášť, hrdla, trubkovnice a patky.

9. Použité zdroje

- [1]Baláš, M.:Kotle a výměníky tepla, CERM Brno 2009.
- [2]Norma ČSN EN 13445 Netopené tlakové nádoby
- [3] Rekuperace tepla. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 15. 9. 2008, 23:19, last modified on 18. 5. 2006, 11:32 [cit. 2010-05-25]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Rekuperace_tepla>.
- [4]obr.1 převzat z: <http://www.atrea.cz/cz/rekuperace-tepla>
- [5]obr.2 převzat z: <http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3688>
- [6]obr.3,4,5 převzaty z:
http://www.zvuengineering.cz/files/cz/brozury/Tepelne_vymeniky_brozura_revize_0.pdf
- [7]obr.6 převzat z: <http://www.bcb-plzen.eu/alfalaval/rozebiratelne.htm>
- [8]obr.7 převzat z: http://www.yulacorp.com/downloads/tema_nomenclature1.pdf
- [9]obr.9,10 převzat z: <http://www.worldwidemetric.com/pdf/flangesjoints.pdf>
- [10]obr.11 převzat z:
[http://www.tracepartsonline.net/\(S\(ydvqaj45x10sts45ou2tnv55\)\)/global/part.aspx?PartID=10-26122001-129861&sk_Reference=](http://www.tracepartsonline.net/(S(ydvqaj45x10sts45ou2tnv55))/global/part.aspx?PartID=10-26122001-129861&sk_Reference=)
- [11] SITTECH [online]. [cit. 2010-05-25]. SITTECH. Dostupné z WWW: <<http://www.sittech.cz/ploche/temacarb.htm>>.

10. Seznam příloh

- [1] Výkres sestavy výměníku
- [2] Výrobní výkres trubkovnice