

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T013 Stavba energetických strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Příspěvek k výpočetnímu hodnocení přírubového spoje sevřené
trubkovnice výměníku tepla

Autor: **Bc. Patrik Müller**

Vedoucí práce: **Doc. RNDr. Josef Voldřich, CSc.**

Akademický rok 2015/2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Katedra energetických strojů a zařízení

Akad. rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení:	Bc. Patrik Müller
Rodné číslo:	881026/2417
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba energetických strojů a zařízení

Téma diplomové práce:

**Příspěvek k výpočetnímu hodnocení přírubového spoje sevřené trubkovnice
výměníku tepla**

Osnova diplomové práce:

1. *Technické podmínky pro návrh přírubového spoje sevřené trubkovnice (PSST).*
2. *Konstrukční řešení a utěsnění PSST.*
3. *Zátěžové režimy a namáhání PSST.*
4. *Efektivní šířka plochého těsnění mezi dvěma přírubami a rozložení přenášeného svěrného tlaku.*
5. *Vybrané upřesňující výpočty metodou konečných prvků.*
6. *Hodnocení technologie utěsnění PSST*

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Doc. RNDr. Josefovi Voldřichovi, CSc. za jeho odborné vedení, cenné rady a připomínky týkající se vypracování této diplomové práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Müller	Jméno Patrik	
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. RNDr. Voldřich, CSc.	Jméno Josef	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Příspěvek k výpočetnímu hodnocení přírubového spoje sevřené trubkovnice výměníku tepla.		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	60	TEXTOVÁ ČÁST	49	GRAFICKÁ ČÁST	11
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce je zaměřena na pevnostní výpočet přírubového spoje sevřené trubkovnice. Analytický výpočet je porovnán s výpočtem MKP, který je proveden pomocí programu Ansys. Výpočet zahrnuje rovněž teplotní stav spoje. Dále je proveden výběr vhodného těsnění s určením jeho efektivní šířky. Součástí přílohy je skript pro výpočet v Ansys Mechanical.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Přírubový spoj, trubkovnice, těsnění, ČSN EN 1591, deformace, napětí, utěsnění, MKP analýza, pevnostní výpočet, Ansys Mechanical.

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Müller	Name Patrik
FIELD OF STUDY	N2301 “ Department of Power System Engineering“	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. RNDr. Voldřich,CSc.	Name Josef
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Contribution to analytical assesment of the flanged joint-tight tubesheet of the heat regenerator.	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power System Engineering	SUBMITTED IN	2016
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	60	TEXT PART	49	GRAPHICAL PART	11
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis is focused on strength calculation of the flanged joint-tight tubesheet. Analytical calculation is compared with FEM analysis that has been carried out in Ansys software. This calculation also includes thermal state of the joint. Furthermore, the selection of suitable gasket specifying the effective width has been carried out. Part of the Annex includes the script for calculation in Ansys Mechanical.
KEY WORDS	Flanged joint, tubesheet, gasket, ČSN EN 1591, deformation, stress, sealing, FEM analysis, strength calculation, Ansys Mechanical.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Typy trubkových výměníků	10
2.1	Způsoby provedení trubkovnice	10
3	Technické podmínky pro návrh přírubového spoje sevřené trubkovnice (PSST)	13
4	Konstrukční řešení a utěsnění PSST	14
4.1	Návrh základních rozměrů.....	15
4.1.1	Příruba	15
4.1.2	Trubkovnice	19
4.2	Poddajnosti	21
4.2.1	Těsnění	21
4.2.2	Podložky.....	22
4.2.3	Trubkovnice	22
4.2.4	Příruby	24
4.2.5	Svorníky	26
4.2.6	Spoj.....	26
4.3	Tepelná roztažnost.....	27
4.4	Těsnost přírubového spoje.....	28
4.5	Typy těsnění [4].....	29
4.5.1	Vláknitopryžová těsnění.....	29
4.5.2	Těsnění z PTFE	29
4.5.3	Expandovaný grafit	29
4.5.4	Kovová těsnění	29
4.5.5	Kombinovaná těsnění	30
5	Vybrané upřesňující výpočty metodou MKP	31
5.1	Výpočetní model MKP	31
5.1.1	Okrajové podmínky.....	33
6	Efektivní šířka plochého těsnění mezi dvěma přírubami a rozložení svěrného tlaku.....	33
6.1	Těsnění z expandovaného grafitu	33
6.2	Těsnění z expandovaného grafitu s kovovým jádrem	37
7	Zátěžové režimy a namáhání PSST.....	40
7.1	Tlaková zkouška mezitrubkového prostoru.....	40
7.2	Tlaková zkouška trubkového prostoru	43
7.3	Provozní stav	45
8	Hodnocení technologie utěsnění PSST	47

9	Závěr.....	48
10	Citovaná literatura	49
11	Přílohy	50

Základní použité zkratky a symboly

*_n - dolní index "n" značí hodnotu pro mezitrubkový prostor

*_v - dolní index "v" značí hodnotu pro trubkový prostor

*_{zk} - hodnota pro zkušební režim

BASF - Badische Anilin & Soda-Fabrik

NBR - Nitril Butadien Rubber

NDT - Nondestructive Testing (nedestruktivní zkoušení materiálu)

PSST - přírubový spoj sevřené trubkovnice

PTFE - Polytetrafluorethylen

A - plocha [mm²]

b - šířka [mm]

D - průměr [mm]

E - modul pružnosti [MPa]

h - výška [mm]

m - součinitel těsnění

p - tlak [°C]

R_m^T - mez pevnosti materiálu [MPa]

R_{p0,2}^T - mez kluzu [MPa]

s - šířka krku příruby [mm]

t - teplota [MPa]

Y - měrný tlak na těsnění [MPa]

Další uváděné značení je doprovázeno schematickým znázorněním a blíže vysvětleno při jeho použití

1 Úvod

Cílem této diplomové práce je návrh, posouzení pevnosti a těsnosti svěrného přírubového spoje s trubkovnicí. Pro zadané technické podmínky jsou napočteny základní rozměry spoje, je navrženo konstrukční řešení příruby a způsob jejího utěsnění. To zahrnuje rovněž výběr vhodného materiálu těsnění. V dalších kapitolách je namáhání spoje upřesněno výpočty provedenými metodou konečných prvků s pomocí softwaru ANSYS Mechanical.

Svěrný přírubový spoj je navržen jako součást trubkového výměníku tepla. Úkolem trubkového výměníku je co nejúčinnější výměna tepla mezi dvěma médii, a to při rozdílných tlacích. Z tohoto vyplývá, že je možné provádět tepelnou výměnu rovněž mezi různými fázemi jako např. voda - pára nebo třeba pára - spaliny. Na stejném principu - oddělených médií - fungují i deskové výměníky tepla, které jsou však vhodné pro menší tepelné výkony a jsou použity spíše pro tepelnou výměnu mezi dvěma kapalnými látkami. Těsností přírubového spoje se zajistí, aby nedocházelo k mísení médií, k únikům látek do atmosféry a současně ke ztrátám tlaku.

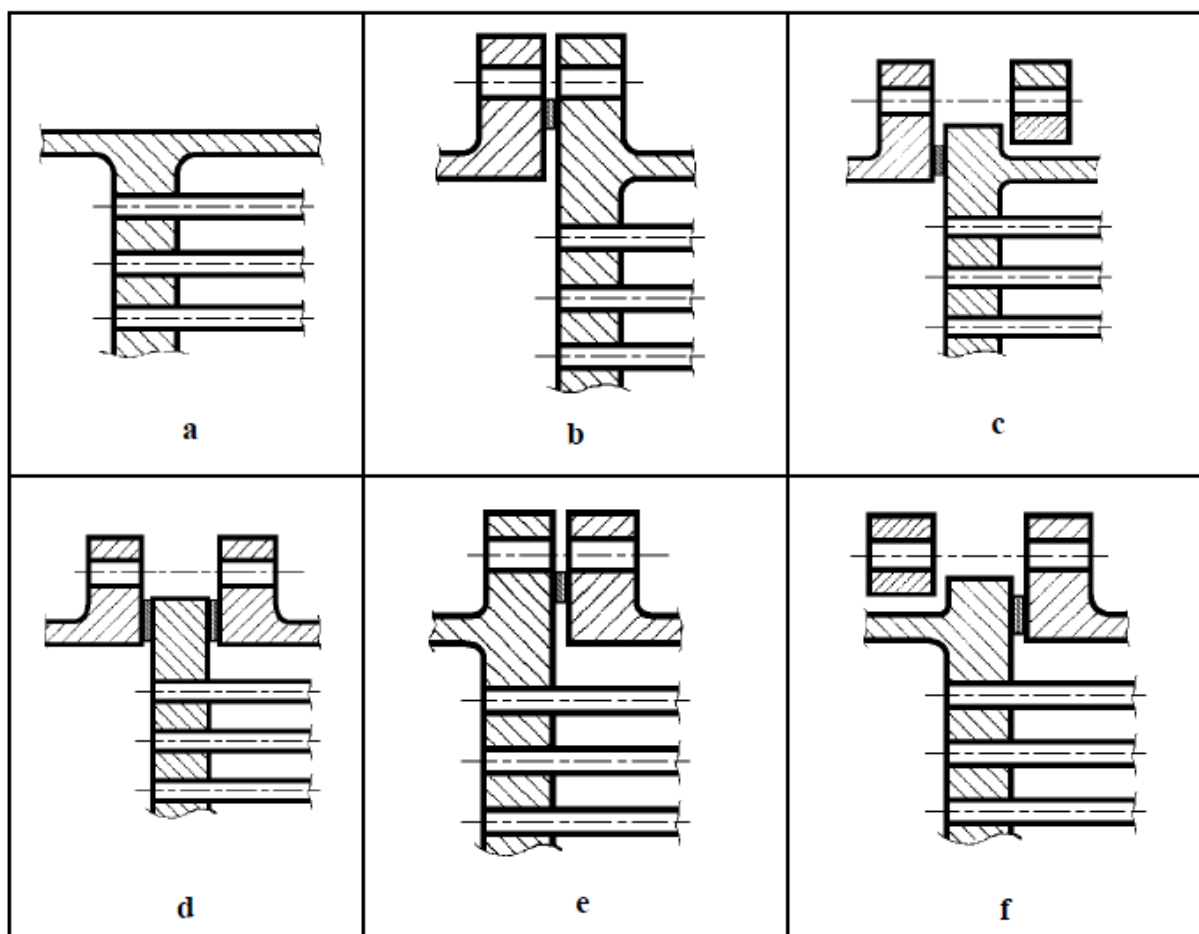
Náš posuzovaný spoj sestává ze třech hlavních částí. Zjednodušeně řečeno, největší komponentou je válcová tlaková nádoba s otvorem v podélném směru, který je osazený přírubou. Do tohoto otvoru jsou zasunuty teplosměnné trubky z obou stran zaválcované do trubkovnice a přivařené. Důvodem závaru je jednak zvýšení těsnosti a zvýšení odolnosti proti šterbinové korozi, jednak zvýšení pevnosti spoje trubkovnice - teplosměnná trubka. Třetí částí je komora - rozváděcí kanál, kterou se přivádí médium do teplosměnných trubek. Příruba komory je přitažena pomocí svorníků k hlavní nádobě, přičemž mezi těmito dvěma přírubami je sevřená trubkovnice. Tento popis trubkového výměníku je značně zjednodušen. Komora i samotná nádoba mají vstupní a výstupní hrdla pro pracovní médium. Dále je nádoba většinou opatřena výstupy pro pojistná zařízení, pro měření tlaku, případně hladiny, odkalování a další.

2 Typy trubkových výměníků

Použití trubkových výměníků je různé a stejně tak i jejich provedení se může lišit. Z pohledu našeho přínosu může být výměník použit jak pro získávání tepla - ohřev, tak v případě kondenzátorů pro odvod tepla - chlazení. V každém z případů je možné použít jednotahového uspořádání a dvoutahového uspořádání. Pro jednotahové platí, že trubky v nádobě vedou jedním směrem, kdežto u dvoutahových je proud otočený a vystupuje na téže straně, na které do výměníku vstupuje. Dále je možné mít proud do trubek usměrněný, tím je možnost proudění přes výměník rozdělit do oblastí nebo mít proud nedělený. Způsob provedení trubkového výměníku se volí v závislosti na dispozici stroje, na technických parametrech jako třeba teplotní roztažnost trubek nebo velikost teplosměnné plochy nebo na dostupnosti materiálu (délka teplosměnných trubek).

2.1 Způsoby provedení trubkovnice

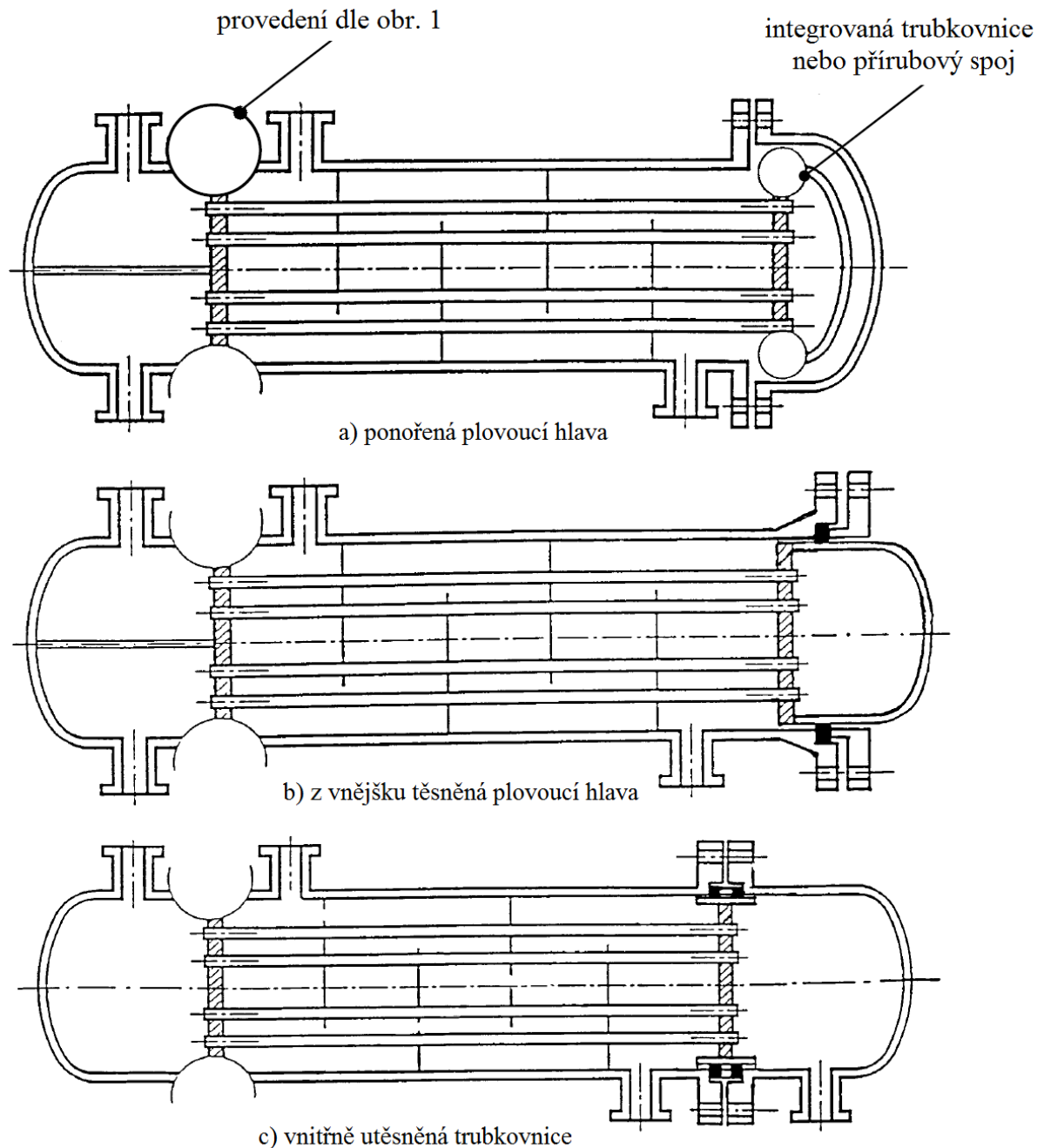
Trubkový výměník je možno rozdělit na dvě části z pohledu média. Buď médium proudí z komory trubkami, pak se jedná o trubkový prostor a nebo je médium v nádobě, kterou teplosměnné trubky prochází, pak se jedná o mezitrubkový prostor. Na následující obrázku jsou schematicky znázorněny různé způsoby provedení trubkovnice a nádoby.



Obr. 1 Konstrukční možnosti provedení trubkovnic

Pozice "a" vyobrazuje integrovanou trubkovnici do nádoby a současně do rozváděcí komory. Případ "b" popisuje stav, kdy trubkovnice je integrovaná do nádoby a zároveň je protažena do příruby, která je sešroubována s přírubou rozváděcí komory (víka). V tomto případě se zde již vyskytuje přířubový spoj, který je nutno utěsnit. Třetí schéma je obdobné, jen trubkovnice není protažena v přírubu, ale je stažena k víku pomocí volné (točivé) příruby. Pozice "d" popisuje náš případ, kdy je trubkovnice sevřena přírubou trubkového a přírubou mezitrubkového prostoru. V tomto provedení jsou dva spoje které je nutno utěsnit. Schéma, na obrázku dole uprostřed zachycuje stav trubkovnice integrované do rozváděcí komory protažené v přírubu. Ta je dotažena svorníky k přírubě nádoby. Poslední případ "e" je opět trubkovnice, která je součástí rozváděcí komory, ale je stažena pomocí volné (točivé) příruby k přírubě mezitrubkového prostoru.

Posuzovaný spoj výměníku tepla v této práci je pro výměník dvoutahový. Pokud by druhá strana teplosměnných trubek končila v trubkovnici pevně sevřené nebo by byla jednou ze součástí výměníku, v závislosti na délce trubek by docházelo k teplotním roztažnostem, což by mohlo mít neblahý vliv na těsnost přířubových spojů nebo vůbec na pevnost trubek. Proto je využívána možnost trubkovnice s plovoucí hlavou, kdy jedna trubkovnice je pevně sevřená a druhá je uložena pohyblivě. Toto konstrukční řešení eliminuje namáhání způsobené teplotními roztažnostmi trubek. Typy výměníků s plovoucí hlavou jsou uvedeny na následujícím schématu.



Obr. 2 Typy výměníků s plovoucí hlavou

Způsob provedení ad a) spočívá v tom, že plovoucí hlava je uvnitř mezitrubkového prostoru. Trubkovnice může být buď integrovaná do rozváděcí komory a nebo je možné použití přírubového spoje. Stejně jako v případě provedení b) se jedná o dvoutahový výměník, kde rozváděcí komora je dělená. V druhém případě je plovoucí hlava mimo mezitrubkový prostor a je jí umožněn posuv vlivem teplotních roztažností. Mezi pláštěm nádoby a plovoucí hlavou je těsnění, které tento pohyb umožňuje. Třetí způsob provedení znázorňuje jednotahový výměník. Levá trubkovnice je uchycena pevně a pravá je uložena pohyblivě. Mezi pohyblivou trubkovnicí a pláštěm nádoby je těsnění, oddělující trubkový a mezitrubkový prostor [1].

3 Technické podmínky pro návrh přírubového spoje sevřené trubkovnice (PSST)

Před prvním uvedením tlakové nádoby do provozu se dle předpisů provádí tlaková zkouška pro ověření provozuschopnosti nádoby. Velikost přetlaku při tlakové zkoušce se může dle různých norem lišit. Pro náš případ je hodnota přetlaku stanovena jako 1,5 násobek provozního tlaku. Je-li provozní tlak $p = 2,1 \text{ MPa}$, pak tlak zkušební je $p_{zk} = 1,5 \cdot p$, tedy $p_{zk} = 1,5 \cdot 2,1 = 3,15 \text{ MPa}$. Zkušební přetlak je vyvozován hydrostaticky při teplotě okolí, uvažuje se tedy s teplotou $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Není-li možné tlakovou zkoušku provést kapalinou nebo je to nevhodné, mohou být provedeny jiné rovnocenné zkoušky. Je však nutné před jejich provedením uskutečnit doplňková opatření jako jsou nedestruktivní zkoušky (NDT). Zvýšená bezpečnost při tlakové zkoušce plynným médiem je způsobena jeho stlačitelností. Kdyby při tlakové zkoušce došlo k inicializaci trhliny, následky by mohly být fatální. Je to způsobeno tím, že tlak média při porušení pláště nádoby rychle neklesne jako v případě hydrostatické zkoušky a působí tak dál na šíření trhliny.

Výchozí hodnoty pro navrhovaný spoj výměníku tepla jsou uvedeny v následující tabulce.

Provozní podmínky a některé základní rozměry			
	označení	hodnota	jednotky
tlak v teplosměnných trubkách (víko)	p_v	0,6	Mpa
zkušební tlak v teplosměnných trubkách (víko)	p_{v_zk}	0,9	MPa
tlak v mezitrubkovém prostoru (nádoba)	p_n	2,1	MPa
zkušební tlak v mezitrubkovém prostoru (nádoba)	p_{n_zk}	3,15	MPa
výpočtová teplota v trubkovém prostoru	t_v	75	$^\circ\text{C}$
výpočtová teplota v mezitrubkovém prostoru	t_n	150	$^\circ\text{C}$
vnitřní průměr nádoby	D	1390	mm
vnější průměr těsnění	D'	1440	mm
provedená tloušťka pláště nádoby	s_n	24	mm
provedená tloušťka pláště komory	s_v	22	mm
měrný tlak na těsnění	Y	35	MPa
součinitel těsnění	m	3	-

Tabulka 1 - Provozní podmínky a některé základní rozměry

Další věc, kterou je potřeba pro výpočet stanovit, jsou materiály jednotlivých komponent. Každý materiál má odlišné mechanické vlastnosti. U větších celků je nutné brát v úvahu cenu materiálu vzhledem k jeho vlastnostem. Druh materiálu se volí v závislosti na pracovním tlaku, teplotě a většinou může být rozhodující i pracovní médium. Od vybraného materiálu se očekává chemická odolnost proti působení pracovního média. Výběr materiálů je převzatý od jiných návrhů sevřených přírubových spojů. Konkrétně vycházíme ze zkušeností Královopolské Brno s výměníkem na havarijní dochlazování (HSCHZ) pro JE Temelín. Pro návrh trubkovnice je zvolen stejný materiál jako v případě Královopolské Brno. Přehled materiálů a jejich mechanických vlastností je uvedeno v tabulce 2.

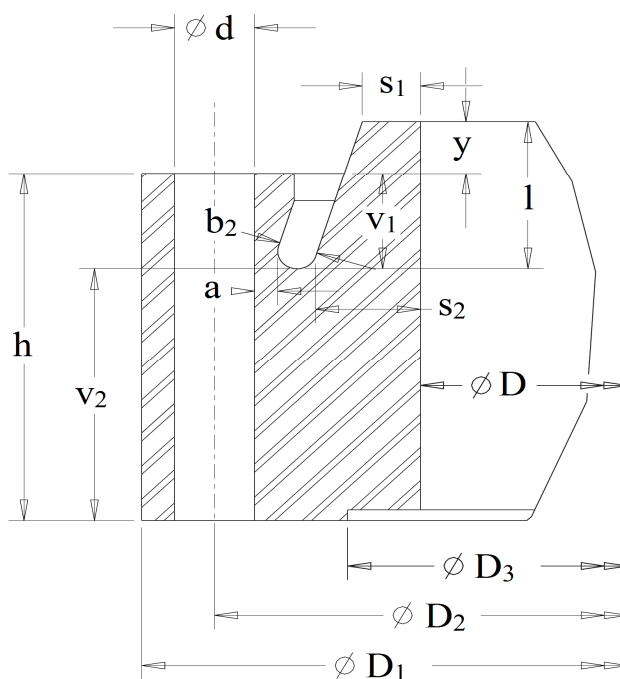
Mechanické vlastnosti použitých materiálů					
	označení materiálu	mez pevnosti R_m^T [MPa]	mez kluzu $R_{p0,2}^T$ [MPa]	mez kluzu při 20°C [MPa]	modul pružnosti E [MPa]
příruba nádoby	08CH18N10T	436	181	196	195 500
příruba komory	11416.1	380	209	215	202 250
šrouby	15236.7	785	552,6	588	196 000
trubkovnice	17381	600	335	410	185 000
podložky a matice	CHN35VT-VD	785	451	491	195 000

Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti použitých materiálů

Uvedené hodnoty mechanických vlastností odpovídají výpočetním hodnotám z tabulky 1.

4 Konstrukční řešení a utěsnění PSST

Pro lepší názornost jsou počítané rozměry znázorněny v následujícím obrázku.



Obr. 3 Schéma příruby se základními rozměry

V první části jsou vypočteny základní rozměry, z kterých se odvozují dříve výpočty, konkrétně výpočet výšky listu obou přírub, tloušťky trubkovnice a potřebného průměru šroubů. Pro jejich stanovení je potřeba znát projektový stav, tedy provozní podmínky, jako jsou vnitřní přetlaky a provozní teploty. Přehled návrhových parametrů je uveden v tabulce 1.

4.1 Návrh základních rozměrů

4.1.1 Příruba

4.1.1.1 Dovolená namáhání

Hodnota dovoleného napětí příruby mezitrubkového prostoru (materiál 08CH18N10T) pro výpočtovou teplotu je

$$[\sigma_{dn}] = \min \left\{ \frac{R_{p0,2}^T}{x_1}; \frac{R_m^T}{x} \right\} = \min \left\{ \frac{186}{1,5}; \frac{436}{2,6} \right\} = \min\{124; 167,7\} = 124 \text{ [MPa]},$$

kde značí $R_{p0,2}^T$ - mez kluzu,
 R_m^T - mez pevnosti,
 x - bezpečnostní součinitel daný normou, $x = 2,6$,
 x_1 - bezpečnostní součinitel, $x_1 = 1,5$.

Obdobně se stanoví dovolené napětí materiálu příruby komory (materiál 11416.1)

$$[\sigma_{dv}] = \min \left\{ \frac{R_{p0,2}^T}{x_1}; \frac{R_m^T}{x} \right\} = \min \left\{ \frac{209}{1,5}; \frac{380}{2,6} \right\} = \min\{139,3; 146,2\} = 139,3 \text{ [MPa]}$$

Značení je stejné jako v předchozím případě.

Před výpočty základních rozměrů provedeme kontrolu převzaté tloušťky pláště nádoby a víka. Ze znalosti, že v osovém směru nádoby je namáhání poloviční, použijeme vztah pro výpočet napětí v obvodovém směru a pro nádobu bude při zkušební tlaku 3,15 MPa platit

$$s_{n_min} = \frac{p_{n_zk} \cdot D}{2 \cdot [\sigma_{dn}] - p} = \frac{3,15 \cdot 1390}{2 \cdot 124 - 3,15} = 17,9 \text{ [mm]}.$$

Pro trubkový prostor je maximální, tedy zkušební, tlak 0,9 MPa. Minimální tloušťka stěny pláště je tak

$$s_{v_min} = \frac{p_{v_zk} \cdot D}{2 \cdot [\sigma_{dv}] - p} = \frac{0,9 \cdot 1390}{2 \cdot 139,3 - 0,9} = 4,5 \text{ [mm]}.$$

Pro další výpočty potřebujeme znát výpočtový průměr těsnění, který vychází z jeho vnějšího průměru, shodného s průměrem trubkovnice D' a z výpočtové šířky těsnění b_v , která je předmětem pozdějších výpočtů této práce. V prvním návrhu je zvolená šířka těsnění $b_v = 7$ mm. Výpočtový průměr těsnění je tedy

$$D_t = D' - 2b_v = 1440 - 2 \cdot 7 = 1426 \text{ [mm]}.$$

Tloušťka krku u listu je daná součinem tloušťky stěny a součinitelem úměrnosti α , který se mění v závislosti na tlaku a je uveden v tabulce 3. Pro zkušební tlak 3,15 MPa a 0,9 MPa jsou hodnoty součinitele α určeny interpolací. Tloušťka krku u listu mezitrubkového prostoru bude tedy

$$s_{2n} = s_n \cdot \alpha = 24 \cdot 1,887 = 45,28 \text{ [mm]},$$

a pro tloušťku krku u listu příruby pro víko výměníku

$$s_{2v} = s_v \cdot \alpha = 22 \cdot 1,475 = 32,45 \text{ [mm]}.$$

Součinitel úměrnosti α									
p [MPa]	0,1 - 0,25	0,6	1	1,6	2,5	4	6,4	10	20
α	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,8

Tabulka 3 - Součinitel úměrnosti α

Dále určíme délku krku l , která je dána vztahem

$$l_n = \beta \sqrt{D \cdot s_1} = 0,37 \sqrt{1390 \cdot 24} = 67,6 \text{ [mm]},$$

kde značí β - koeficient, $\beta = 0,37$,
 D_0 - vnitřní průměr nádoby.

Délka krku zároveň nemá být větší než 4. ($s_2 - s_1$) což je pro nádobu

$$4(45,28 - 24) = 84 \text{ [mm]}.$$

Pro výšku krku příruby víka budou platit tytéž vztahy

$$l_v = \beta \sqrt{D \cdot s_1} = 0,37 \sqrt{1390 \cdot 22} = 64,7 \text{ [mm]},$$

a omezující podmínka 4. ($s_2 - s_1$) = $4(32,45 - 22) = 41,8 \text{ [mm]}$.

Z celkové výšky krku je pak možné dopočítat hloubku odlehčujícího zápichu příruby nádoby i víka

$$v_{1n} = l - y = 67,6 - 24 = 43,6 \text{ [mm]},$$

$$v_{1v} = l - y = 41,8 - 22 = 19,8 \text{ [mm]}.$$

Hodnota y je výška krku nad listem příruby a pro její určení platí $y = s_1$. Hloubku zápichu je však do jisté míry možno volit. Pro provedení zápichu příruby musí být stanovena ještě šířka zápichu. Její hodnota pro zápich příruby nádoby je zvolena $b_{zn} = 8 \text{ mm}$ a pro zápich příruby víka je $b_{zv} = 6 \text{ mm}$.

4.1.1.2 Roztečná kružnice šroubů

Dalším navrhovaným rozměrem je průměr roztečné kružnice pro šrouby, který musí být z důvodu smontovatelnosti obou přírub shodný. Jeho stanovení je možné za pomoci dvou rovnic

$$D_{2n} = D + 2s_1 + 2a + c = 1390 + 2 \cdot 24 + 2 \cdot 12 + 53 = 1515 \text{ [mm]},$$

$$D_{2n} = D + 2(s_2 + b_{zn} + a) + d = 1390 + 2(45,28 + 8 + 9) + 33 = 1547,56 \text{ [mm]}.$$

Pro část víka pak tyto rovnice budou mít podobu

$$D_{2v} = D + 2s_1 + 2a + c = 1390 + 2 \cdot 22 + 2 \cdot 12 + 53 = 1511 \text{ [mm]},$$

$$D_{2v} = D + 2(s_2 + b_{zv} + a) + d = 1390 + 2(32,45 + 6 + 7) + 33 = 1513,9 \text{ [mm]}.$$

Jako společná hodnota roztečné kružnice pro otvory šroubů je zvoleno $D_2 = 1560 \text{ [mm]}$

kde značí a - vzdálenost zápichu od otvoru pro šroub,
 c - průměr vnějšího obrysu matice,
 d - průměr otvoru pro šroub.

Z průměru roztečné kružnice můžeme spočítat vnější průměr listu přírub a to pro nádobu i víko společně

$$D_1 = D_2 + c + 2a_1 = 1560 + 53 + 10 = 1\,623 \text{ [mm]}.$$

Po zaokrouhlení dostaneme $D_1 = 1630 \text{ [mm]}$.

4.1.1.3 Působící síly v přírubě

V dalším kroku určíme působící síly na přírubu a ramena, na nichž působí silové dvojice. První počítanou silou je síla F_1 působící v ose krku příruby. Jelikož prostory nádoby a víka jsou trubkovicí tlakově odděleny, je nutné počítat pro dimenzování svorníků s vyšší silou. Výpočet sil se odvíjí od vnitřního přetlaku a tedy síly působící od strany nádoby jsou vzhledem k vyššímu přetlaku rovněž vyšší. Vůbec nejvyšších sil, na které musí být spoj sevržené trubkovicí dimenzován se dosahuje při tlakové zkoušce. Velikost síly F_1 při provozním stavu, při tlakové zkoušce a rameno e_1 , na kterém síla působí, jsou tedy stanoveny vztahem

$$F_1 = 0,25 \cdot \pi \cdot D_t^2 \cdot p_n = 0,25 \cdot \pi \cdot 1426^2 \cdot 2,1 = 3\,353\,885 \text{ [N]},$$

$$F_{1_zk} = 0,25 \cdot \pi \cdot D_t^2 \cdot p_{n_zk} = 0,25 \cdot \pi \cdot 1426^2 \cdot 3,15 = 5\,030\,828 \text{ [N]},$$

$$e_1 = 0,5 \cdot (D_2 - D - s_1) = 0,5 \cdot (1560 - 1390 - 24) = 73 \text{ [mm]}.$$

Další silou je síla F_2 působící na rameni e_2 . Je to síla vyvozená od tlaku těsnění. Tedy rameno e_2 je vzdálenost od roztečné kružnice šroubů ke střednímu průměru těsnění.

$$F_2 = \pi \cdot D_t \cdot b_v \cdot m \cdot p_n \cdot x = \pi \cdot 1426 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 2,1 \cdot 1,25 = 246\,955 \text{ [N]},$$

$$F_{2_zk} = \pi \cdot D_t \cdot b_v \cdot m \cdot p_{n_zk} \cdot x = \pi \cdot 1426 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 3,15 \cdot 1,25 = 370\,433 \text{ [N]},$$

$$e_2 = 0,5 \cdot (D_2 - D_t) = 0,5 \cdot (1560 - 1426) = 67 \text{ [mm]}.$$

Novým parametrem je x a je to koeficient zohledňující relaxaci těsnění. Pro kovové materiály by bylo $x = 1$. Pro naše těsnění uvažujeme s relaxací na 80 % a pak bude hodnota $x = 1,25$.

Třetí uvažovanou silou je síla označená jako F_3 , která působí na plochu příruby, na kterou ještě nedosadá těsnění. Síla a její rameno e_3 jsou dány vztahy

$$F_3 = 0,25 \cdot \pi \cdot (D'^2 - D_t^2) \cdot p_n = 0,25 \cdot \pi \cdot (1440^2 - 1426^2) \cdot 2,1 = 66\,178 \text{ [N]},$$

$$F_{3_zk} = 0,25 \cdot \pi \cdot (D'^2 - D_t^2) \cdot p_{n_zk} = 0,25 \cdot \pi \cdot (1440^2 - 1426^2) \cdot 3,15 = 99\,267 \text{ [N]},$$

$$e_3 = 0,5 \cdot (D_2 - 0,5 \cdot (D_t + D)) = 0,5 \cdot (1560 - 0,5 \cdot (1426 + 1390)) = 76 \text{ [mm]}.$$

Každá z těchto sil je dána vnitřním přetlakem, tedy výsledná síla od vnitřního přetlaku je dána součtem všech sil, rozepsáno pro provozní stav a stav tlakové zkoušky

$$F_w = F_1 + F_2 + F_3 = 3\,353\,885 + 246\,955 + 66\,178 = 3\,667\,019 \text{ [N]},$$

$$F_{w_zk} = F_{1_zk} + F_{2_zk} + F_{3_zk} = 5\,030\,828 + 370\,433 + 99\,267 = 5\,500\,528 \text{ [N]}.$$

Z minimálního měrného tlaku na těsnění určíme minimální sílu, která musí působit na těsnění, aby bylo schopno přírubový spoj dobře utěsnit

$$F_{0b} = \pi \cdot D_t \cdot b_v \cdot Y = \pi \cdot 1426 \cdot 7 \cdot 35 = 1\,097\,578 \text{ [N]},$$

kde značí Y - minimální měrný tlak daný materiálem těsnění, pro nás $Y = 35 \text{ MPa}$.

Máme-li spočtené síly, můžeme dopočítat momenty, kterými působí na list příruby. Jeden z momentů vyvozuje síla na otláčení těsnění, tedy síla F_{0b} . Moment je definován tedy jako součin síly a jejího ramena

$$M_d = F_{0b} \cdot e_2 = 1097578 \cdot 67 = 73\,537\,741 [N \cdot mm] = 73\,538 [N \cdot m].$$

Moment působící od sil v provozním stavu a ve stavu tlakové zkoušky je pak

$$M_p = F_1 \cdot e_1 + F_2 \cdot e_2 + F_3 \cdot e_3 = 3353885 \cdot 73 + 246955 \cdot 67 + 66178 \cdot 76 \\ = 266\,409\,156 [N \cdot mm] = 266\,409 [N \cdot m],$$

$$M_{p_zk} = F_{1_zk} \cdot e_1 + F_{2_zk} \cdot e_2 + F_{3_zk} \cdot e_3 = 5030828 \cdot 73 + 370433 \cdot 67 + 99267 \cdot 76 \\ = 399\,613\,734 [N \cdot mm] = 399\,614 [N \cdot m].$$

4.1.1.4 Výpočet šroubů

Tento moment, potažmo celkovou sílu F_{w_zk} musíme vyvodit utážením všech šroubů. Lze tedy dopočítat potřebnou předepínací sílu jednoho šroubu. Počet šroubů se volí tak, aby byl pokud možno dělitelný čtyřmi. To nám pak umožní rovnoměrnější rozložení sil při dotahování příruby. Zvolíme-li počet šroubů $n = 64$, pak síla na jeden šroub je dána

$$F_{\S} = \frac{F_{w_zk}}{n} = \frac{5500528}{64} = 85\,946 [N].$$

K určení rozměru šroubu potřebujeme znát ještě hodnotu dovoleného napětí, které spočteme z meze kluzu pro daný materiál. Pro tlakovou zkoušku a provozní stav se uvažují i pro šrouby jiné teploty, tudíž dostaneme dvě hodnoty dovoleného napětí. Pro nás určující bude hodnota nižšího dovoleného napětí:

$$\sigma_{d_s} = \frac{R_{p0,2_s}}{x_{1s}} = \frac{552,6}{2} = 276,3 [MPa], \quad \sigma_{d20_s} = \frac{\sigma_{kt20_s}}{x_{1s}} = \frac{588}{2} = 294 [MPa].$$

Průměr šroubu vychází z plochy jeho minimálního průřezu, tedy

$$S_{\S} = \frac{F_{\S}}{\sigma_{d_s}}, \quad d_{1_min} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\S}}{\pi \cdot \sigma_{d_s}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 85946}{\pi \cdot 276,3}} = 19,9 [mm].$$

Dle výpočtu by měl podmínky splňovat šroub M 24, zvolíme raději šroub M 30 z důvodu dodatečných teplotních namáhání, případně při ne zcela přesném utahovacím momentu a nerovnoměrném rozložení sil při dotahování.

4.1.1.5 Pomocné hodnoty

Pro určení tloušťky listu příruby je potřeba určit ještě některé pomocné hodnoty

$$A_n = (D + s_2) \cdot (s_2^2 - 0,25 \cdot s_1^2) = (1390 + 45,28) \cdot (45,28^2 - 0,25 \cdot 24^2) = 2\,736\,043,$$

$$A_v = (D + s_2) \cdot (s_2^2 - 0,25 \cdot s_1^2) = (1390 + 32,45) \cdot (32,45^2 - 0,25 \cdot 22^2) = 1\,325\,727,$$

$$B_n = D_1 - D - 2 \cdot d = 1630 - 1390 - 2 \cdot 33 = 174,$$

$$B_v = B_n.$$

Kdyby velikost navrhovaných šroubů příruby byla větší než M 30, do vzorce pro pomocnou hodnotu B by se místo "2.d" dosazovalo "d".

$$Z_n = 1,275 \cdot \left(\frac{M \cdot \kappa}{[\sigma_d] \cdot \vartheta} \right) = 1,275 \cdot \left(\frac{4 \cdot 10^8 \cdot 1,2}{120,7 \cdot 1} \right) = 6\,496\,058,$$

$$Z_v = 1,275 \cdot \left(\frac{M \cdot \kappa}{[\sigma_d] \cdot \vartheta} \right) = 1,275 \cdot \left(\frac{4 \cdot 10^8 \cdot 1}{132 \cdot 0,65} \right) = 5\,938\,316.$$

Jak již bylo uvedeno, v tomto vztahu figuruje utahovací moment, který stejně jako silové působení šroubů působí na obou přírubách stejně a který proto je pro trubkový i mezitrubkový prostor stejný. Kdyby $A_n \geq Z_n$ a současně $A_v \geq Z_v$ potom by pro minimální tloušťku platilo $v_2 = s_2 = s$ a příruba se zápichem by nebyla nutná.

Poslední pomocnou hodnotou je

$$\delta_n = 1 - \frac{2 \cdot (s_2 - b_v)}{D_1 - D} = 1 - \frac{2(45,28 - 7)}{1630 - 1390} = 0,5643,$$

$$\delta_v = 1 - \frac{2 \cdot (s_2 - b_v)}{D_1 - D} = 1 - \frac{2(32,45 - 7)}{1630 - 1390} = 0,67125.$$

4.1.1.6 Tloušťka listu příruby

Vzhledem ke specifickému provedení přírub se zápichem budeme postupovat dle metodiky používané ve firmě Královopolská, Brno. Minimální tloušťka listu příruby, je definovaná

$$s_{id_n} = \eta \sqrt[3]{\frac{Z_n - A_n}{B_n}} = 0,82 \cdot \sqrt[3]{\frac{6496058 - 2736043}{174}} = 120,54 \text{ [mm]},$$

$$s_{id_v} = \eta \sqrt[3]{\frac{Z_v - A_v}{B_v}} = 0,82 \cdot \sqrt[3]{\frac{5938316 - 1325727}{174}} = 133,51 \text{ [mm]},$$

kde značí η - konstanta; $\eta = 0,82$

Jednou z posledních počítaných veličin na přírubě je výška těla příruby (viz obrázek 2). Ta je dána vztahem

$$v_{2n} = \sqrt{v_{1n}^2 \cdot \delta_n^2 + s_{id_n}^2 - v_{1n}^2 \cdot (\delta_n - \delta_n^2)} = \\ = \sqrt{43,58^2 \cdot 0,56^2 + 120,54^2 - 43,58^2 \cdot (0,56 - 0,56^2)} = 121,11 \text{ [mm]},$$

$$v_{2v} = \sqrt{v_{1v}^2 \cdot \delta_v^2 + s_{id_v}^2 - v_{1v}^2 \cdot (\delta_v - \delta_v^2)} = \\ = \sqrt{19,8^2 \cdot 0,67^2 + 133,51^2 - 19,8^2 \cdot (0,67 - 0,67^2)} = 133,84 \text{ [mm]}.$$

Celková tloušťka příruby je pak daná jako součet výšky těla příruby a hloubky jejího zápichu

$$h_n = v_{1n} + v_{2n} = 43,58 + 121,11 = 164,69 \text{ [mm]},$$

$$h_v = v_{1v} + v_{2v} = 19,8 + 133,84 = 153,65 \text{ [mm]},$$

po zaokrouhlení dostaneme hodnoty $h_n = 165 \text{ [mm]}$ a $h_v = 155 \text{ [mm]}$.

4.1.2 Trubkovnice

V této části je rozepsán postup výpočtu tloušťky trubkovnice, která je sevřena mezi přírubami. Výpočet je proveden dle normy tlakových nádob stabilních, tedy ČSN 69 0010, část 4.13, pro výměníky s plovoucí hlavou. Trubkovnice je vyrobena z materiálu 17 381, ze kterého jsou

vyrobeny také trubky do této trubkovnice. Hodnota dovoleného napětí pro tento materiál za provozních podmínek je $[\sigma]_p = 223 \text{ [MPa]}$, jestliže vycházíme z materiálových parametrů tabulky 2. K výpočtům potřebujeme dále znát hodnotu výpočtového přetlaku. Tlaky a další, již použité související charakteristiky jsou značeny stejně jako v předchozí kapitole.

$$p_R = p_{zk_v} - p_{zk_n} = 3,15 - 0,9 = -2,25 \text{ [MPa]}.$$

Potřebujeme dále znát redukované dovolené zatížení trubek. Je-li výpočtový přetlak $p_R \geq 0$, platí vztah [1], když $p_R < 0$, počítá se redukované dovolené zatížení dle vztahu (2)

$$[q]_0 = [q^+] + p_E \quad (1),$$

$$[q]_0 = [q^-] - p_E \quad (2),$$

kde značí $[q^+]$ - dovolené zatížení trubek v tahu [MPa],
 $[q^-]$ - dovolené zatížení trubek v tlaku [MPa],
 p_E - efektivní přetlak [MPa].

Pro hodnotu dovoleného napětí je jak pro tah, tak i pro tlak, brána hodnota 223 [MPa] . Hodnota efektivního přetlaku je určena jako rozdíl provozních tlaků v trubkovém a mezitrubkovém prostoru, tedy

$$p_E = p_n - p_v = 2,1 - 0,6 = 1,5 \text{ [MPa]},$$

pro zápornou hodnotu výpočtového přetlaku pak bude podle vzorce (2)

$$[q]_0 = [q^-] - p_E = 223 - 1,5 = 221,5 \text{ [MPa]}.$$

Pro určení tloušťky trubkovnice potřebujeme ještě znát součinitel únosnosti trubek

$$\Omega = 0,4 \cdot \frac{|p_R|}{[q]_0} = 0,4 \cdot \frac{2,25}{221,5} = 0,004063.$$

Součinitel neotrubkovaného okraje

$$\phi = 3 \cdot \lambda_B \cdot (1 + \lambda_B) = 3 \cdot 0,036 \cdot (1 + 0,036) = 0,111795,$$

kde λ_B je bezrozměrná šířka neotrubkovaného okraje. Stanoví se vztahem

$$\lambda_B = \frac{2 \cdot b}{D_R} = \frac{2 \cdot 30}{1380} = 0,0435,$$

kde značí b - šířka neotrubkovaného okraje,
 D_R - výpočtový průměr otrubkované plochy.

Součinitel okrajového účinku

$$\psi = \frac{24 \cdot M_0}{p_R \cdot D_R^2} \cdot (1 + \lambda_B) = \frac{24 \cdot 0}{-2,25 \cdot 1380^2} = 0,$$

kde značí M_0 - ohybový moment je dle tab.1 v této části normy pro případ sevřené trubkovnice $M_0 = 0$.

Výpočtová tloušťka trubkovnice se pak určí vztahem

$$s_{PR} = 0,41 \cdot D_R \cdot \sqrt{\frac{|p_R|}{|\sigma|_p}} \cdot \max \left\{ \sqrt{\frac{|\Omega| + |\Omega + \phi + \psi|}{\varphi_p + \lambda_B} + \frac{|p_R|}{|\sigma|_p \cdot \varphi_p^2}}; \sqrt{\frac{|\Omega|}{\varphi_p}} \right\} =$$

$$= 0,41 * 1380 * \sqrt{\frac{2,25}{223} \cdot \max \left\{ \frac{0,004063 + |0,004063 + 0,111795 + 0|}{0,2143 * 0,0435} \right.}$$

$$\left. + \frac{2,25}{223 * 0,2143^2}; \sqrt{\frac{0,004063}{0,2143}} \right\} = 56,83 * \max\{0,8828; 0,797\} = 50,17 \text{ [mm]}.$$

Jedinou neznámou v rovnici je φ_p což je součinitel pevnosti trubkovnice. Ten je dán vztahem

$$\varphi_p = 1 - \frac{d_E}{t} = 1 - \frac{16,5}{21} = 0,2143,$$

kde značí d_E - průměr otvoru pro trubku,
t - rozteč trubek.

Předběžná tloušťka trubkovnice je

$$s_p = \sqrt{0,25 \cdot D_t^2 \frac{|p_R|}{[\sigma]_p} + \frac{F_{Wzk} \cdot (D_2 - D_t)}{[\sigma]_p \cdot D_t}} =$$

$$= \sqrt{0,25 * 1426^2 * \frac{2,25}{223} + \frac{5500528 * (1560 - 1426)}{223 * 1426}} = 86,3 \text{ [mm]}.$$

4.2 Poddajnosti

Poddajnost materiálu, nejen toho kovového, vyjadřuje podvolení se materiálu vnějšímu zatížení. Vyjadřuje tedy hodnotu stlačení, případně natočení materiálu pod zatížením. Poddajnost je převrácenou hodnotou tuhosti materiálu a závisí na modulu pružnosti materiálu a na průřezu součásti. Základní poddajnost tělesa ve tvaru zobecněného válce je dána vztahem

$$\lambda = \frac{h}{A \cdot E},$$

kde značí h - výška tělesa [mm],
A - plocha řezu kolmého k ose tělesa (zobecněného válce) [mm²],
E - modul pružnosti [MPa].

4.2.1 Těsnění

Asi nejjednodušší určení poddajnosti ve svěrném přírubovém spoji je pro těsnění a bereme-li podložku pod šroubem a pod maticí jako plochou, tak i pro podložku. Obě uvažované jsou ve spoji dvakrát, proto čitatel bude násoben dvěma. Zvolené těsnění je 3 mm vysoké a dle předchozího tedy poddajnost těsnění bude

$$\lambda_{pr} = \frac{2 \cdot h_{pr}}{A_{pr} \cdot E_{pr}} = \frac{2 * 3}{31513 * 1500} = 1,27 \cdot 10^{-7} \left[\frac{mm}{N} \right].$$

A_{pr} je dána jako plocha mezikruží mezi vnitřním a vnějším průměrem, přičemž známe vnější průměr D' a šířku těsnění b_v . Modul pružnosti těsnění z expandovaného grafitu je přibližně $E_{pr} = 1\,500$ [MPa].

$$A_{pr} = \frac{\pi \cdot D'^2}{4} - \frac{\pi \cdot (D' - 2 \cdot b_v)^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1440^2}{4} - \frac{\pi \cdot (1440 - 2 \cdot 7)^2}{4} = 31\,513,32 \text{ [mm}^2\text{]}.$$

4.2.2 Podložky

Pro podložky bude platit stejný vztah, jen s jinými hodnotami

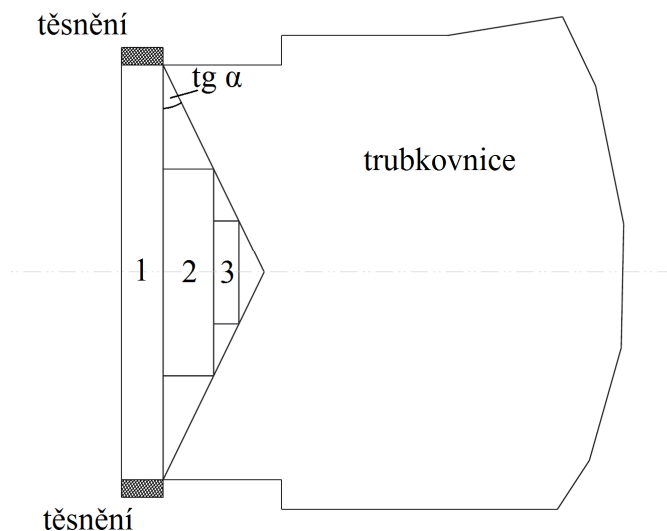
$$\lambda_p = \frac{2 \cdot h_p}{A_p \cdot E_p \cdot n} = \frac{2 \cdot 3,7}{1708 \cdot 195000 \cdot 64} = 3,5 \cdot 10^{-10} \left[\frac{\text{mm}}{\text{N}} \right].$$

Ve jmenovateli přibylo n , tedy počet zvolených svorníků po obvodu příruby. Výška h je volena přibližně jako 1/3 celkové výšky kulové podložky a obdobně jako u těsnění, pro plochu jedné podložky platí

$$A_p = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 56^2}{4} - \frac{\pi \cdot 31^2}{4} = 1\,708,24 \text{ [mm}^2\text{]}.$$

4.2.3 Trubkovnice

Stejným způsobem je počítána poddajnost trubkovnice, která ale není stlačená celá, nýbrž jen ta část pod těsněními. Ve stlačované části se vytváří kužel, který je ovlivněn svěrným zatížením. Kužel je znázorněn na obrázku 4. Úhel tohoto kužele je uváděn v rozmezí $\text{tg } \alpha \approx 0,4$ až $0,5$ a počítaná poddajnost je pro zjednodušení řešena pro tři jednotlivé oblasti (uvažováno $\text{tg } \alpha = 0,5$).



Obr. 4 Řešení poddajností pro trubkovnici

4.2.3.1 Oblast 1

Plocha řezu, počítané oblasti 1, kolmé k ose spoje, leží pod těsněním, a tudíž je stejně velká jako plocha řezu těsnění

$$A_{t1} = A_{pr} = 31\,513,3 \text{ [mm}^2\text{]}.$$

Napočítaná tloušťka trubkovnice je 90 mm a tak poddajnost oblasti 1 je

$$\lambda_{t1} = \frac{h_{t1}}{A_{t1} \cdot E_t} = \frac{90}{31513 \cdot 185000} = 1,54 \cdot 10^{-8} \left[\frac{mm}{N} \right].$$

4.2.3.2 Oblast 2

Plocha řezu oblasti 2 je definovaná obdobně a je spočtena následovně

$$\begin{aligned} A_{t2} &= \frac{\pi \cdot (D' - 2 \cdot b_v)^2}{4} - \frac{\pi \cdot \left(D' - 2 \cdot b_v - \frac{h_{t1}}{4} \right)^2}{4} = \\ &= \frac{\pi \cdot (1440 - 2 \cdot 7)^2}{4} - \frac{\pi \cdot \left(1440 - 2 \cdot 7 - \frac{90}{4} \right)^2}{4} = \\ &= 50\,001,4 \text{ [mm}^2\text{]}. \end{aligned}$$

Poddajnost oblasti 2, trubkovnice

$$\lambda_{t2} = \frac{h_{t2}}{A_{t2} \cdot E_t} = \frac{45}{50001 \cdot 185000} = 4,86 \cdot 10^{-9} \left[\frac{mm}{N} \right].$$

4.2.3.3 Oblast 3

Plocha oblasti 3, trubkovnice

$$\begin{aligned} A_{t3} &= \frac{\pi \cdot \left(D' - 2 \cdot b_v - \frac{h_{t1}}{4} \right)^2}{4} - \frac{\pi \cdot \left(D' - 2 \cdot b_v - \frac{h_{t1}}{4} + \frac{h_{t1}}{8} \right)^2}{4} = \\ &= \frac{\pi \cdot \left(1440 - 2 \cdot 7 - \frac{90}{4} \right)^2}{4} - \frac{\pi \cdot \left(1440 - 2 \cdot 7 - \frac{90}{4} + \frac{90}{8} \right)^2}{4} = \\ &= 24\,702,5 \text{ [mm}^2\text{]} \end{aligned}$$

a její poddajnost

$$\lambda_{t3} = \frac{h_{t3}}{A_{t3} \cdot E_t} = \frac{22,5}{24702 \cdot 185000} = 4,92 \cdot 10^{-9} \left[\frac{mm}{N} \right].$$

Celková poddajnost trubkovnice pak bude dána součtem tuhostí, tedy součtem převrácených hodnot poddajností jednotlivých oblastí

$$\frac{1}{\lambda_t} = \frac{1}{\lambda_{t1}} + \frac{1}{\lambda_{t2}} + \frac{1}{\lambda_{t3}} = \frac{1}{1,54 \cdot 10^{-8}} + \frac{1}{4,86 \cdot 10^{-9}} + \frac{1}{4,92 \cdot 10^{-9}} = 4,73 \cdot 10^8 \left[\frac{N}{mm} \right],$$

a pak je tedy celková poddajnost

$$\lambda_t = \frac{1}{4,73 \cdot 10^8} = 2,11 \cdot 10^{-9} \left[\frac{mm}{N} \right].$$

4.2.4 Příruby

Poddajnost přírub je řešena na zjednodušeném modelu rozděleném do 2 oblastí, znázorněném na následujícím obrázku 5 a to obdobnou rovnicí, která by ale sama o sobě byla přibližná. Proto je rozšířena o příspěvek poddajnosti příruby od ohybu λ_f ,

$$\lambda_r = \frac{h_r}{A_r E_r} + \lambda_f = \frac{h_r}{A_r E_r} + \frac{R \cdot e_2^2}{2\pi E_r J},$$

kde značí R - vzdálenost těžiště řešené příruby [mm],

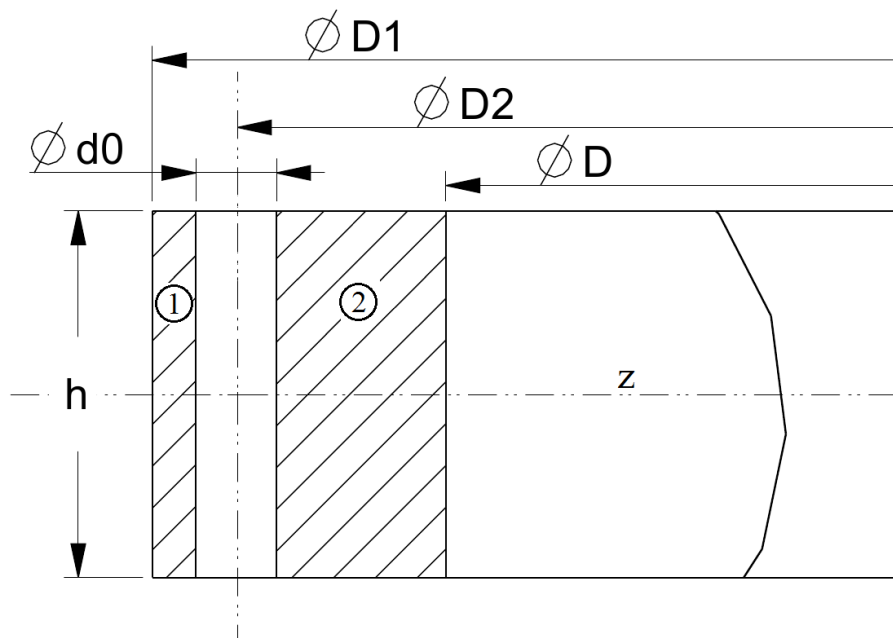
J - kvadratický moment plochy [mm⁴].

Kvadratický moment průřezu k dané ose je dán jako součin velikosti plochy a druhé mocniny vzdálenosti plochy od osy. Součtem elementárních kvadratických momentů obdélníku k ose z dostaneme kvadratický moment ve tvaru

$$J_z = \frac{b \cdot h^3}{12},$$

kde značí h - dříve spočtenou výšku listu příruby,

b - šířka počítané oblasti.



Obr. 5 Zjednodušená příruba pro výpočet kvadratického průřezu

Kdyby osa z neprocházela těžištěm tělesa, kvadratický moment by se počítal pomocí Steinerovy věty a ke kvadratickému momentu J_z by se připočetl součin plochy oblasti a kvadrát

vzdálenosti těžiště této oblasti od osy. Kvadratické momenty jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce spolu s plochou oblasti a vzdáleností těžiště od osy rotační symetrie.

Vzdálenost těžiště stejně jako šířka každé z oblastí je pro obě příruby shodná a pro oblast značenou jako 1 bude

$$r_1 = \frac{\frac{D_1}{2} - \left(\frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2} - \frac{d}{2}\right)}{2} = \frac{\frac{1630}{2} - \left(\frac{1630}{2} - \frac{1560}{2} - \frac{33}{2}\right)}{2} = 805,75 \text{ [mm]},$$

šířka b pak

$$b_1 = \frac{(D_1 - D_2)}{2} - \frac{d}{2} = \frac{1630 - 1560}{2} - \frac{33}{2} = 18,5 \text{ [mm]}.$$

Od šířky je pak dovozena plocha oblasti A a její kvadratický průřez J_z

$$A_{1n} = b_1 \cdot h_n = 18,5 * 165 = 3052,5 \text{ [mm}^2\text{]},$$

$$J_{z1} = \frac{b \cdot h_n^3}{12} = \frac{18,5 * 165^3}{12} = 6\,925\,359,38 \text{ [mm}^4\text{]}.$$

Budeme-li vycházet z tabulky, jako první z uvedených poddajností pro oblast 1 je počítána takto

$$\lambda = \frac{h_n}{A \cdot E} = \frac{165}{3052,5 * 195500} = 2,76 * 10^{-7} \left[\frac{\text{mm}}{\text{N}}\right].$$

Další počítanou je příspěvek poddajnosti příruby od ohybu a je spočten následovně

$$\lambda_f = \frac{r_1 \cdot e_2^2}{2 \cdot \pi \cdot E \cdot J_{z1}} = \frac{805,75 * 67}{2 * \pi * 195500 * 6925359,38} = 4,25 * 10^{-7} \left[\frac{\text{mm}}{\text{N}}\right].$$

Konečně poddajnost oblasti 1 zjednodušené příruby je dána součtem obou předchozích poddajností

$$\lambda_{r1} = \lambda + \lambda_f = 2,76 * 10^{-7} + 4,25 * 10^{-7} = 7,02 * 10^{-7} \left[\frac{\text{mm}}{\text{N}}\right].$$

Stejným způsobem jsou počítány poddajnosti druhé oblasti a to i pro přírubu trubkového prostoru, která se liší nejen svou výškou, ale i modulem pružnosti. Celková poddajnost jedné příruby je dána součtem převrácených hodnot poddajností každé oblasti. Tedy pro přírubu mezitrubkového prostoru je celková poddajnost

$$\lambda_n = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{r1}} + \frac{1}{\lambda_{r2}}} = \frac{1}{\frac{1}{7,02 * 10^{-7}} + \frac{1}{1,79 * 10^{-7}}} = 1,424 * 10^{-7} \left[\frac{\text{mm}}{\text{N}}\right].$$

Příruba mezitrubkového prostoru								
oblast	šířka	plocha	vzdálenost těžiště	kvadratický průřez	poddajnosti			
i	b [mm]	S [mm ²]	r [mm]	J _z [mm ²]	λ [mm/N]	λ _f [mm/N]	λ _{ri} [mm/N]	λ _n [mm/N]
1	18,5	3052,5	805,75	6925359,4	2,76E-07	4,25E-07	7,02E-07	1,424E-07
2	68,5	11302,5	729,25	25642546,9	7,47E-08	1,04E-07	1,79E-07	

Tabulka 4 Poddajnost příruby mezitrubkového prostoru

Příruba trubkového prostoru								
oblast	šířka	plocha	vzdálenost těžiště	kvadratický průřez	poddajnosti			
i	b [mm]	S [mm ²]	r [mm]	J _z [mm ²]	λ [mm/N]	λ _f [mm/N]	λ _{ri} [mm/N]	λ _v [mm/N]
1	18,5	2867,5	805,75	5740974,0	2,67E-07	4,96E-07	7,63E-07	1,543E-07
2	68,5	10617,5	729,25	21257119,8	7,22E-08	1,21E-07	1,93E-07	

Tabulka 5 Poddajnost příruby trubkového prostoru

4.2.5 Svorníky

Pro určení poddajnosti celého spoje zbývá určit ještě poddajnost svorníků a matic. Tato poddajnost je určována rovnicí pro válcový dřík šroubu a rovněž pro závitový spoj šroubu a matice. Proto se doporučuje dle normy PNAE použít upravenou rovnici ve tvaru

$$\lambda_w = \frac{h_w + 0,6 \cdot d_w}{A_w \cdot E_w \cdot n} = \frac{410 + 0,6 \cdot 30}{706,9 \cdot 196000 \cdot 64} = 4,82 \cdot 10^{-8} \left[\frac{mm}{N} \right],$$

kde značí d_w - průměr šroubu [mm],
 h_w - aktivní délka šroubu [mm] (počítáno od dosedacích ploch šroubu k trubkovnici).

Plocha šroubu A_w je dána násobkem aktivní délky šroubu a malým průměrem šroubu, tedy

$$A_w = \frac{\pi \cdot d_w^2}{4} = \frac{\pi \cdot 30^2}{4} = 706,9 [mm^2].$$

4.2.6 Spoj

Z výše spočtených poddajností je možné určit celkovou poddajnost spoje a to prostým sečtením

$$\begin{aligned} \Lambda &= \lambda_{pr} + \lambda_p + \lambda_t + \lambda_n + \lambda_v + \lambda_w \\ \Lambda &= 1,27 \cdot 10^{-7} + 3,5 \cdot 10^{-10} + 2,11 \cdot 10^{-9} + 1,42 \cdot 10^{-7} + 1,54 \cdot 10^{-7} + 4,82 \cdot 10^{-8} \\ &= 4,74 \cdot 10^{-7} \left[\frac{mm}{N} \right] \end{aligned}$$

Tato celková poddajnost tedy určuje, o kolik se sestava pod zatížením stlačí (natáhne). Dotahovací síla od všech šroubů pro tlakovou zkoušku je $F_{w_zk} = 5\,500\,528$ [N] a tak stlačení sestavy je rovno

$$\Delta h = \Lambda \cdot F_{w_zk} = 4,74 \cdot 10^{-7} \cdot 5500528 = 2,61 [mm]$$

Tato hodnota je počítána pro provozní stav, kdy jsou jednotlivé součásti zahřáté na provozní teplotu. Poddajnost materiálu totiž závisí na modulu pružnosti a ten se s teplotou mění a proto pro stav montáže (při 20 °C) bude hodnota stlačení jiná. V následující tabulce jsou uvedeny moduly pružnosti použitých materiálů při provozním stavu a při montáži.

	označení materiálu	modul pružnosti (prov. t.) [MPa]	modul pružnosti při 20 °C [MPa]	teplotní roztažnost α [m/°C]
materiál příruby nádoby	08CH18N10T	195 500	201 000	1,70E-06
materiál příruby víka	11416.1	202 250	206 000	1,10E-05
materiál šroubů	15236.7	196 000	206 000	1,24E-05
materiál trubkovnice	17381	185 000	200 000	1,32E-05
podložky a matice	CHN35VT-VD	195 000	205 000	1,68E-05

Tabulka 6 Vybrané materiálové vlastnosti

Kdybychom výpočet poddajnosti soustavy opakovali s hodnotami modulů pružnosti při teplotě 20 °C, dostali bychom poddajnost sestavy $\Lambda_{20} = 4,69 * 10^{-7} \left[\frac{mm}{N} \right]$ a při stejné velké síle sevření přírub bychom dostali stlačení $\Delta h_{20} = 2,58 [mm]$.

4.3 Tepelná roztažnost

Vlivem změny teploty nedochází pouze ke změně modulu pružnosti, ale dochází též k teplotní roztažnosti materiálu. Je tedy nutné posoudit spoj smontovaný při okolní teplotě 20 °C a za teploty provozní, která je o více jak 100 °C vyšší. Hodnoty tepelných roztažností dle typu materiálu jsou uvedeny v předcházející tabulce. Ty nám poslouží k určení změny rozměrů součástí vlivem teploty dle základní rovnice

$$\Delta h = h \cdot \alpha \cdot \Delta T [mm].$$

Výšky napočtených součástí odpovídají výškám při počítání poddajností. Pro spoj jsou zanedbány teplotní roztažnosti těsnění a podložek, jež v celkovém součtu hrají zanedbatelnou roli. Provozní teplota příruby trubkového prostoru je uvažována 75 °C a proto, budeme-li brát teplotu prostředí 20 °C, celkový teplotní rozdíl pro tuto přírubu je

$$\Delta T = t_p - t_o = 75 - 20 = 55 \text{ } ^\circ\text{C},$$

kde značí t_p - teplotu provozní ($t_p = 75 \text{ } ^\circ\text{C}$),
 t_o - teplotu okolí ($t_o = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Vypočtená výška listu příruby trubkového prostoru je 155 [mm] a teplotní roztažnost jejího materiálu je $1,1 \cdot 10^{-5} [m/^\circ\text{C}]$. Po uvedení do provozu se tato příruba roztáhne v ose šroubu o

$$\Delta h = h_v \cdot \alpha_v \cdot \Delta T_v = 155 * 55 * 1,1 * 10^{-5} = 0,0938 [mm].$$

Pro další části přírubového spoje jsou velikosti tepelné roztažnosti uvedeny v tabulce.

	výška [mm]	$\Delta T [^\circ\text{C}]$	$\alpha [m/^\circ\text{C}]$	$\Delta h [mm]$
trubkovnice	90	130	1,32E-05	0,1544
příruba trubkového pr.	155	55	1,10E-05	0,0938
příruba nádoby	165	130	1,70E-05	0,3647
šroub	410	90	1,24E-05	0,4557
celková tepelná roztažnost spoje				-0,1571

Tabulka 7 Tepelné roztažnosti

Ze získaných hodnot prodloužení je nutné udělat úvahu. Prodlouží-li se nám šroub, spoj se povolí. Absolutní velikost prodloužení šroubu bude o to menší, čím větší bude prodloužení těles svíraných. Tedy, od velikosti prodloužení šroubu (svorníku) se odečtou velikosti prodloužení ostatních těles. Dostali jsme hodnotu $-0,1571$ [mm], což nám říká, že spoj se nám utáhne. Velikost povolení je nutné propočítat pro provozní stav.

V předchozí kapitole jsme spočítali poddajnost spoje a pro provozní stav jsme získali hodnotu

$\Lambda = 4,74 * 10^{-7} \left[\frac{mm}{N} \right]$. Podělíme-li touto hodnotou velikost prodloužení přírubového spoje. Dostaneme velikost síly, o kterou se zmenší původní hodnota utažení spoje při 20°C .

$$F_t = \frac{\Delta h}{\Lambda} = \frac{-0,1571}{4,74 * 10^{-7}} = -127\,642 \text{ [N]}$$

Síla utažení je $F_{w_zk} = 5500528$ [N] a ohřátím spoje na provozní teplotu síla vzroste

$$F_c = 5500528 - (-127642) = 5\,628\,170 \text{ [N]}$$

4.4 Těsnost přírubového spoje

Potrubní přírubové spoje a přírubové spoje tlakových nádob jsou definovány jako plošné spoje a nahlíží se na ně jako na zdroje emisí. Snaha omezení úniků přichází v 70. letech minulého století koncernem BASF ve spolupráci s technickou univerzitou města Bochum v Německu. Další návazná měření přicházejí v letech 1993 - 95 ve velkém evropském výzkumném projektu dotovaným Evropskou unií, kterého se účastní výrobci tlakových zařízení, výrobci těsnění, uživatelé i výzkumná pracoviště. Vznikla např. německá norma DIN 28090, která sjednotila měření vlastností nových měkkých těsnících materiálů v souvislosti se zákazem používání azbestových těsnění známých jako klingeritová. Dále tato norma zavádí třídy netěsnosti ve třech kategoriích a nahrazuje první kritérium netěsnosti z normy DIN 3535. Ta uváděla netěsnost pro rozměr těsnění $\varnothing 90 / \varnothing 50 \times 2$ mm, těsnící tlak dusíku 40 bar při utahovacím tlaku 32 MPa a při teplotě 20°C , 1 ml/min. To se ukázalo pro sledovaný objem jako nevhodné a proto v DIN 28090 je množství emise převedeno na hmotnostní jednotku mg/s, takže 1 ml/min po přepočtu na střední průměr těsnění dává zhruba 0,1 mg/(m.s). Od toho je odvozené označení třídy netěsnosti - třída 0,1. Je vhodná pro posouzení utěsnění par a plynů s vyšším přetlakem a teplotou a pro utěsnění kapalin s nízkým povrchovým napětím. Třída 1 (1 mg/m.s) je pro požadavky utěsnění většiny kapalin a plynů o nízkém přetlaku, např. rozvodů tlakového vzduchu. Třída 0,01 (0,01 mg/m.s) je určena pro utěsnění nebezpečných látek, které jsou definovány jako toxické, jedovaté, výbušné, a nebo hořlavé.

Pro třídy netěsnosti 1 a 0,1 se používají vláknitopryžová těsnění nebo těsnění z expandovaného grafitu o průmyslové čistotě 98 %. Pro třídu 0,01 je používáno teflonových těsnění (PT-FE), těsnění z expandovaného grafitu o jaderné čistotě až 99,8 %, kombinovaných těsnění nebo kovový těsnění, která jsou schopna dosáhnout ještě vyšší těsnosti. Tyto 3 řádově odstupňované třídy netěsnosti vznikly s ohledem jednak na netěsnost mezi těsnícím materiálem a dosedací plochou, jednak s ohledem na netěsnost způsobenou pórovitostí těsnícího materiálu.

Dříve se pro dimenzování přírubových spojů postupovalo dle ČSN 69 0010. Výpočty byly řešeny pouze z pevnostního hlediska a pro stanovení těsnosti spoje byly odhadnuty hodnoty utahovacího tlaku a součinitele těsnění. V současnosti se na přírubový spoj nahlíží jako na soustavu tří různých konstrukčních prvků (příruby, svorníky, těsnění) a musí se posuzovat jako jeden celek. Dále je uvažováno s různými provozními stavy, do kterých se přírubový spoj za provozu může dostat. Tyto postupy výpočtů jsou popsány v normě ČSN EN 1591.

Přírubové spoje již tedy nejsou posuzovány pouze z pevnostního hlediska. Je posuzováno také celkové deformační chování a těsnost spoje, tudíž i vhodnost vybraného těsnění. Požadovaná těsnící síla se posuzuje pro každý uvažovaný případ zatížení, tedy nejen pro provozní stav, ale i pro tlakovou zkoušku nebo pro stav teplotního zatížení při najíždění [2], [3].

4.5 Typy těsnění [4]

Volba těsnění se odvíjí od provozní teploty, od tlaku, který je potřeba zatěsnit a od chemické odolnosti těsnění vůči těsněnému médiu. S tím souvisí i výše zmíněné třídy netěsnosti a pro utěsnění např. toxických látek je nutné splňovat třídu netěsnosti 0,01. Mezi nejpoužívanější měkká těsnění patří těsnění vláknitopryžová, PTFE a těsnění z expandovaného grafitu. Speciálně bývají používána rovněž pryžová těsnění třeba ve vodárenství.

4.5.1 Vláknitopryžová těsnění

Tato těsnění jsou vyrobena buď z aramidových nebo uhlíkových vláken a vláken celulózy s NBR pojivem. Jsou vhodná pro vodu, vzduch, organické a slabé anorganické kyseliny nebo také pro chladicí kapaliny. Těsnění jsou vyráběna ve formě desek, které mohou být zesíleny kovovým pletivem.

4.5.2 Těsnění z PTFE

Každý typ těsnění má své přednosti a v případě těsnění z PTFE je to vysoká chemická odolnost. Proti tomu, jako každý termoplast, je i PTFE těsnění charakteristické vysokým tokem pod zatížením, které se s teplotou zvyšuje. Aby se zabránilo úniku média, musela se těsnění často přetahovat. To se však podařilo potlačit také jiným způsobem výroby a to výrobou expandovaného PTFE. Těsnění lze expandovat do jednoho směru a tak dostane jednosměrně orientovanou vláknitou mikrostrukturu nebo do více směrů s výsledkem vícesměrně orientované vláknité mikrostruktury. Podstatou je, že těsnění s jednosměrně orientovanou strukturou je pevné pouze v jednom směru a tedy při stlačování dochází k velkému nárůstu šířky a délky. Výhodou PTFE těsnění je kromě již zmíněné chemické odolnosti rovněž dobrá stlačitelnost a přizpůsobivost povrchu a je tak vhodné pro křehké příruby. Díky své chemické odolnosti je možné tento materiál použít i jako obálku klasických těsnění.

4.5.3 Expandovaný grafit

Výroba expandovaného grafitu spočívá v působení kyseliny sírové na namletý přírodní grafit za zvýšené teploty. Grafitové částice vyexpandují až na 200 násobek původní velikosti. Výsledný materiál se dále zbaví nečistot a válcuje se do fólií o hustotě 0,7 až 1 g/cm³ s tloušťkami do 1 mm. Tyto fólie jsou sami o sobě měkké a velmi křehké a proto těsnící desky z nich vyrobené jsou vyztužené kovovými nebo umělohmotnými foliemi. Při dotahování těsnění dochází ke stlačení až na polovinu původní tloušťky na hustotu 1,7 g/cm³. Hlavní předností těchto těsnění je jejich odolnost proti vysokým teplotám a vůbec odolnost vůči teplotním změnám. Těsnění se dobře přizpůsobuje těsněnému povrchu a v průběhu času nemění své vlastnosti. V porovnání s těsněními z PTFE je málo stlačitelné a vykazuje vysokou hodnotu zpětného odpružení. Nejčastěji je expandovaný grafit použit v kombinaci s ocelovou výztuhou.

4.5.4 Kovová těsnění

Používá se různých kovů (Cu, Ni, Al,...), většinou měkčích, aby se mohly trochu spojit poddat. I přesto se na těsnící povrch předepisuje drsnost typicky do 2 μm. Výhodou kovových těsnění

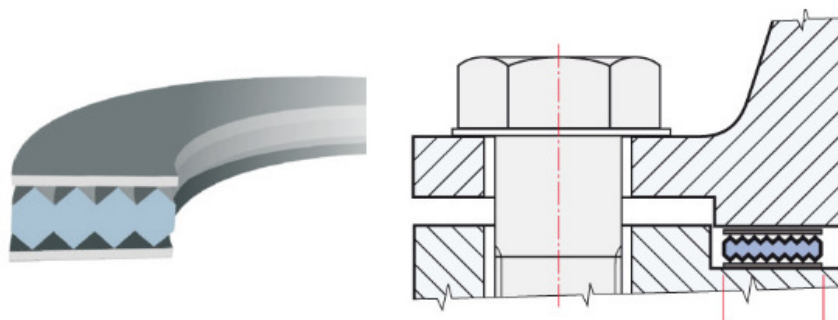
je jejich malá poróznost a oblast utěsnění je až o dva řády menší než oblast tzv. "difúzního proudění netěsností", která se pohybuje v rozmezí mezi $1 \cdot 10^{-4}$ až $1 \cdot 10^{-8}$ mg/(m.s). Je tak možné dosáhnout nejvyšší třídy netěsnosti 0,0001. Vedle toho jsou těsnění vhodná od oblastí kryogenních teplot až po teploty kolem 1000 °C a pro tlaky převyšující 1000 bar.

4.5.5 Kombinovaná těsnění

Nečastějším případem těsnění je kombinace předchozích materiálů, a tedy kombinace jejich vlastností.

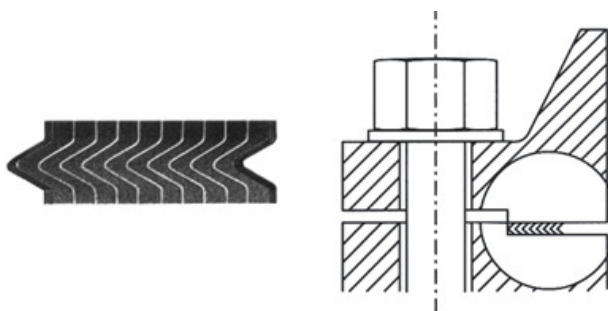
Desky z expandovaného grafitu bývají zpevněny kovovou fólií (např. fólií z nerezové oceli tl. 0,05 mm) nebo perforovaným plechem tl. 0,1 mm. Kovové výztuhy bývá občas použito i v případě vláknitopryžových těsnění, u kterých však zpevnění pro běžné aplikace nebývá potřeba.

Dalším případem mohou být hřebíkové těsnění, která jsou tvořena kovovým jádrem s oboustranným drážkováním (většinou z nerez oceli) a měkkou těsnicí vrstvou z expandovaného grafitu. Pro velmi agresivní média se místo grafitu používá měkkých těsnících vrstev z PTFE. Výhodou těchto těsnění je jejich možnost opakovaného použití s tím, že se vymění pouze vrchní těsnící vrstva.



Obr. 6 Hřebíkové těsnění

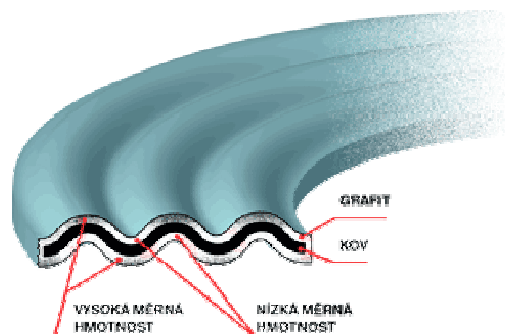
Kombinaci kovu a měkkého těsnícího materiálu využívají i spirálově vinutá těsnění. Jsou vyrobená z profilovaného, nerezového pásku a měkké těsnící výplně (expandovaný grafit, PTFE, pro vyšší teploty keramika, slída). Tato těsnění jsou schopna přenášet značné ohybové momenty a v určitém rozsahu jsou necitlivá na utahovací moment. Používají se např. pro utěsnění produktovodů nebo v rafinériích. Těsnění mohou být opatřena vnitřním kroužkem, většinou ze stejného materiálu, jako je nerezový pásek a chrání těsnící materiál proti přehřátí. V případě použití vnějšího kroužku se těsnění v přírubě lépe centruje a zvyšuje odolnost proti "vyfouknutí" těsnění.



Obr. 7 Spirálově vinutá těsnění

Pro utěsnění tepelných výměníků se v dnešní době používají těsnění obdobné hřebíkovým těsněním. Nosnou částí je zvlněné kovové jádro, na které je nanesen pružný grafit o různé

tloušťce a o rozdílné hustotě. Zvlněné kovové jádro umožňuje větší odpružení těsnění a zároveň není třeba velkého dosedacího tlaku pro funkční utěsnění. To způsobuje stabilnější zatížení šroubů a stálý měrný tlak na těsnění při teplotních změnách.



Obr. 8 Těsnění pro tepelné výměníky

Pro správný návrh utěsnění přírubového spoje je třeba znát všechny provozní stavy, pro které musí být těsnění vyhovující. Za další je potřeba znát fyzikální vlastnosti těsnění, které poskytuje výrobce těsnění nebo které poskytují databáze, např. na internetové adrese www.gasketdata.org. Součástí specifikace těsnění jsou grafy popisující velikost netěsnosti v závislosti na měrném tlaku vyvozeném na těsnění. [4]

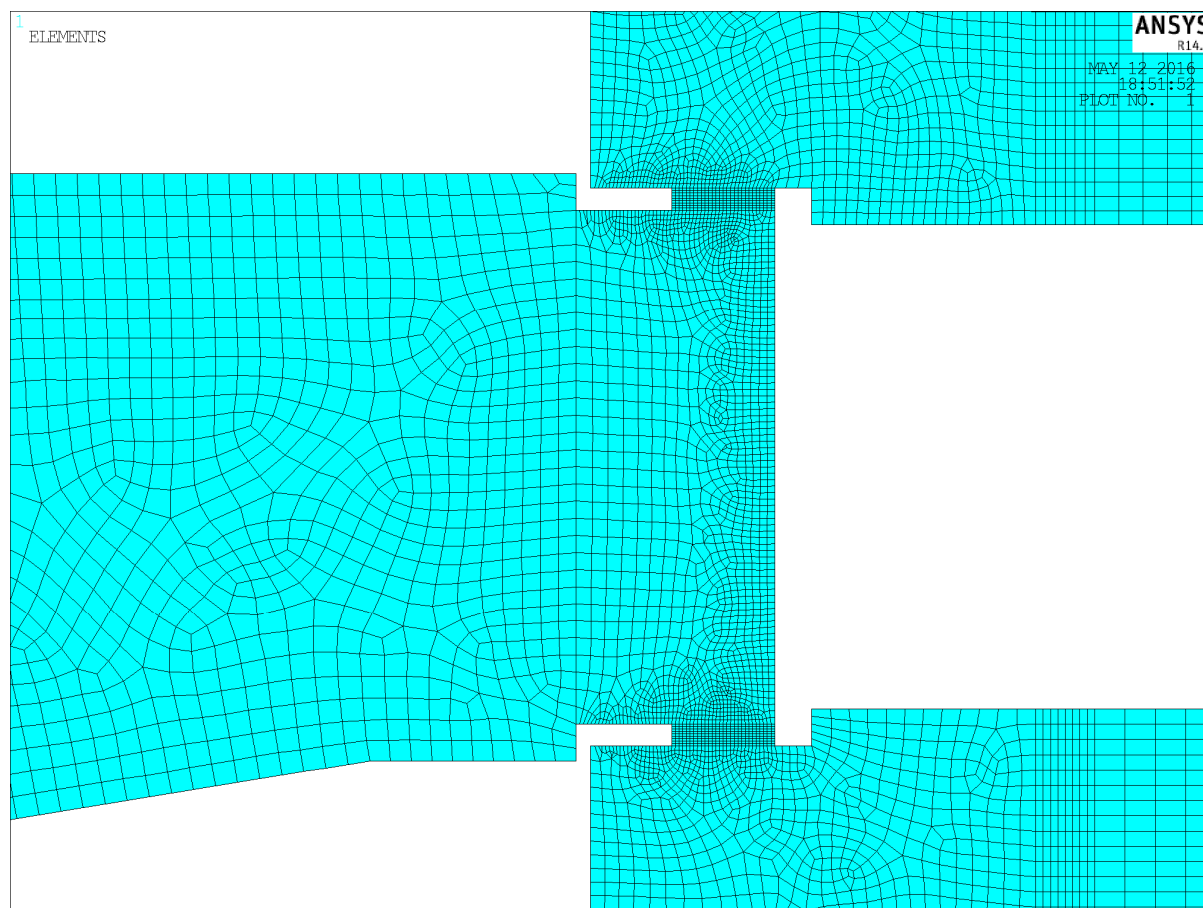
5 Vybrané upřesňující výpočty metodou MKP

Metoda konečných prvků je výpočtová metoda, která spočívá v diskretizaci geometrie konstrukce (konstrukčního uzlu, zařízení) konečnými prvky. Hustější síť konečných prvků je vhodné vytvořit v těch oblastech, kde se očekává větší koncentrace napětí a kde gradient napětí je největší. Síť sestává z čtyřstěnů, v tvarově složitějších případech i z trojúhelníků. Vrcholy těchto prvků tvoří tzv. uzly, ve kterých jsou jako stupně volnosti úlohy hledány posuvy (v případě např. nosníkových prvků rovněž natočení). Ve 2D úloze jsou pro jeden uzel řešeny posuvy ve dvou směrech. V případě použití kvadratických prvků pro síťování jsou další uzly ve středu každé hrany a výpočet se tím zpřesňuje. Kvadratické prvky lépe vystihují lokální koncentraci napětí. Stejný přístup je potřebné uplatnit při řešení problémů vedení tepla.

Náležitou pozornost je potřeba věnovat zadání okrajových podmínek výpočetního modelu, které musí postihovat fyzikální podmínky na hranici a povrchu modelu. Jedná se především o předepsání posuvů (teploty) na částech hranice (povrchu) diskretizované oblasti, nebo o předepsání působících sil a tlaků (toků tepla).

5.1 Výpočetní model MKP

Při řešení problému namáhání a problému stanovení teplotního pole přírubového spoje vycházíme z jeho idealizace na rotačně symetrickou úlohu. Geometrie přírubového spoje byla importována z konstrukčního programu Creo, a to tak, aby osa rotačně symetrického modelu procházela počátkem souřadného systému. Geometrický model je diskretizován 18 769 prvky, přičemž největší zhuštění sítě je v oblasti těsnění. Jedno těsnění o rozměru $3 \times 7 \text{ mm}$ je tvořeno 126 elementy. Síťování těsnění je provedeno parametricky stejně jako jeho šířka, tzn. že při změně šířky těsnění se změní rovněž počet elementů těsnění a okolí s ním související.



Obr. 9 Výpočetní model přírubového spoje v oblasti těsnění

Náhradní ortotropní materiál s přepočtenými moduly pružnosti je uvažován v těch místech přírub, které obsahují otvory pro svorníky. Pro směr "x" se náhradní modul pružnosti příruby mezitrubkového prostoru určí ze vztahu

$$E_{x_ort} = E_x \cdot \frac{\pi \cdot D_2 - n \cdot d}{\pi \cdot D_2} = 195\,500 \cdot \frac{\pi \cdot 1560 - 64 \cdot 33}{\pi \cdot 1560} = 111\,251 \text{ [MPa]}.$$

Modul pružnosti ve směru "y" se spočítal jako poměr rozdílu plochy mezikruží, do něž jsou otvory vepsány, a plochy všech otvorů, k ploše mezikruží.

$$\begin{aligned} E_{y_ort} &= E_y \cdot \frac{S_{\text{mezikr.}} - S_{\text{otvorů}}}{S_{\text{mezikr.}}} = E_y \cdot \frac{(\pi \cdot D_2 \cdot d) - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n}{\pi \cdot D_2 \cdot d} = \\ &= 195\,500 \cdot \frac{(\pi \cdot 1560 \cdot 33) - \frac{\pi \cdot 33^2}{4} \cdot 64}{\pi \cdot 1560 \cdot 33} = 129\,330 \text{ [MPa]}. \end{aligned}$$

Pro vlastnosti ortotropního materiálu příruby trubkového prostoru se bude postupovat obdobně s rozdílem jejího jiného modulu pružnosti.

Další modelovanou částí spoje je trubkovnice. Ta je z výpočetního hlediska kruhovou deskou s otvory. Do ní jsou zavařeny teplosměnné trubky na jejichž druhém konci je opět trubkovnice. Toto spojení má značný vliv na tuhost naší modelované trubkovnice. Z toho důvodu byla do výpočetního modelu k trubkovnici přidána poddajná vrstva reprezentující svazek trubek a na ní ještě jedna vrstva, simulující tuhost plovoucí hlavy. Pro výpočet vlastností poddajné

vrstvy jsou uvažovány teplosměnné trubky $\varnothing 16 \times 1,5$ mm o délce 4 metry a celkovém počtu 3780 ks. Poddajnost jedné trubky je podle dříve použitých vzorců

$$\lambda_1 = \frac{l}{A \cdot E} = \frac{l}{\frac{\pi(d_{tr}^2 - (d_{tr} - 2 \cdot t)^2)}{4} \cdot E} = \frac{4000}{\frac{\pi(16^2 - (16 - 2 \cdot 1,5)^2)}{4} \cdot 185000} =$$

$$= 3,16 \cdot 10^{-4} \left[\frac{mm}{N} \right],$$

a pro celý svazek teplosměnných trubek platí

$$\lambda_s = \frac{\lambda_1}{n} = \frac{3,16 \cdot 10^{-4}}{3780} = 8,37 \cdot 10^{-8} \left[\frac{mm}{N} \right].$$

5.1.1 Okrajové podmínky

Pro náš geometrický model jsou zadány 3 okrajové podmínky. První je zadaná na hranu, prezentující tloušťku pláště mezitrubkového prostoru a jsou pro ni předepsané nulové posuvy ve směru "y". Další okrajová podmínka je předepsaná pro trubkovnici v místě osy rotačně symetrického modelu a zadává nulové posuvy ve směru "x", což vychází z principu rotačně symetrického modelu. A poslední podmínkou je definování rovinnosti po tloušťce stěny rozváděcí komory v místě řezu, kde končí výpočetní model. Tedy je předepsáno, že v tomto místě nedojde k žádnému natočení. Tato vlastnost je v Ansysu definovaná příkazem CP,1,UY, a čísla uzlových bodů.

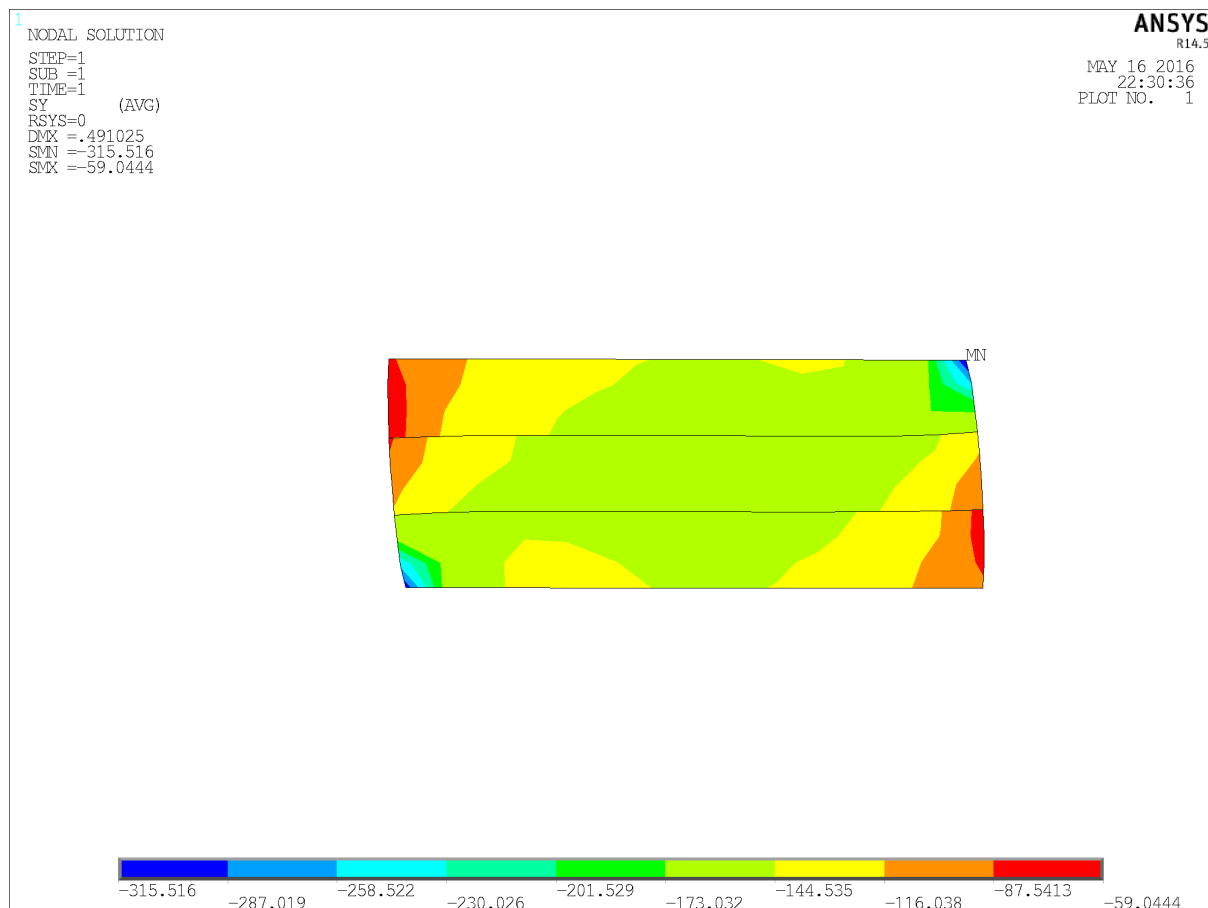
6 Efektivní šířka plochého těsnění mezi dvěma přírubami a rozložení svěrného tlaku

Vypočtená síla utahení přírubového spoje, aby vyhovoval podmínkám tlakové zkoušky, byla definována jako $F_{w_zk} = 5\,500\,528$ [N]. Působí-li tato síla na těsnění, které je široké pouze 7 mm a jeho plocha je $A_{pr} = 31\,513$ [mm²], tlak, který by působil rovnoměrně je dán podílem

$$p_{7mm} = \frac{F_{w_zk}}{A_{pr}} = \frac{5500528}{31513} = 174,5 \text{ [MPa]}.$$

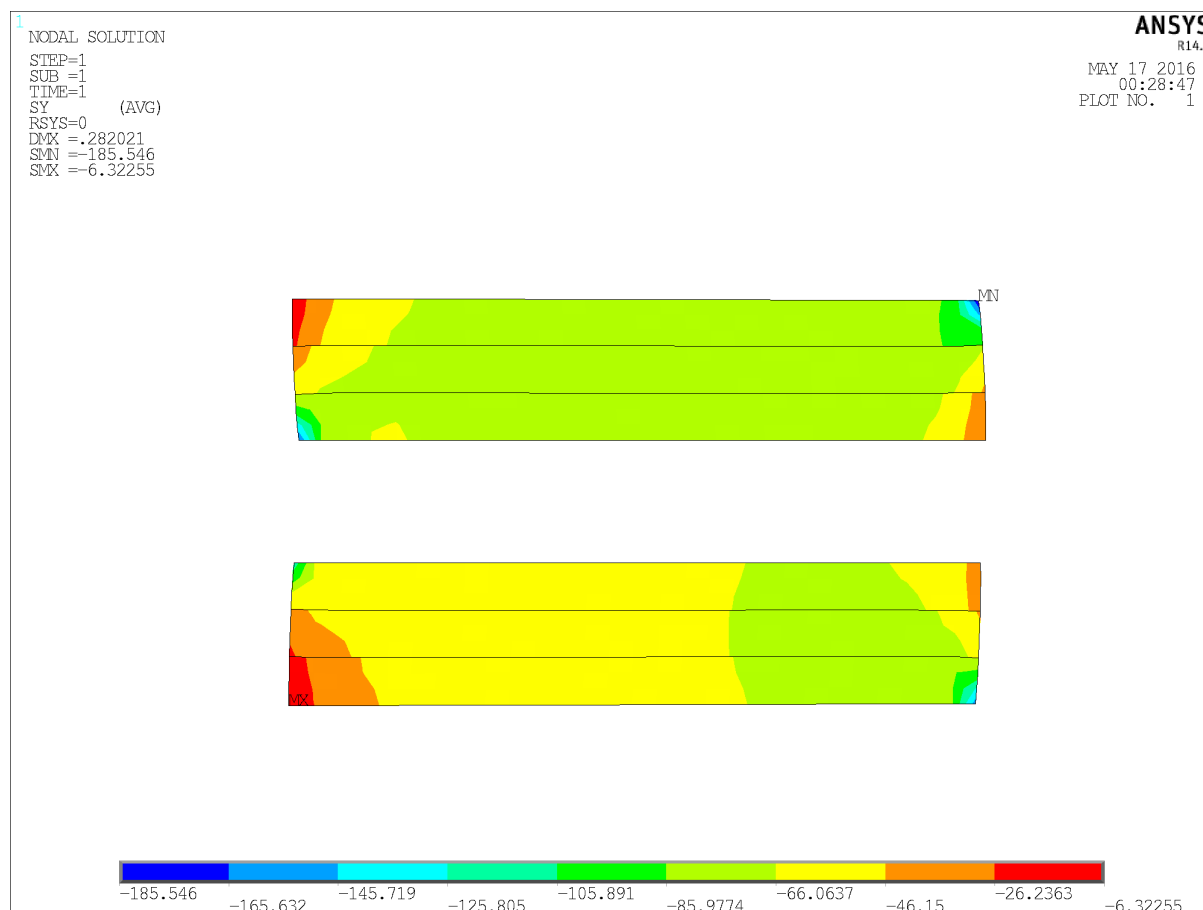
6.1 Těsnění z expandovaného grafitu

Vlivem natočení přírub a stlačením těsnění není tlak rovnoměrný, jak ukazují výsledky z programu Ansys. Na obrázku níže je vidět grafické znázornění průběhu tlaku od síly v osovém směru příruby - ve směru "y". Modelové těsnění je z expandovaného grafitu o počátečním modulu pružnosti 1500 MPa. Tvar těsnění je deformován avšak toto vyobrazení odpovídá skutečné velikosti deformace. Kromě lokálních maximálních tlaků je vidět, že velká část těsnění bude vystavena tlaku v rozmezí od 115 do 175 MPa. Výrobci grafitových těsnění uvádějí jako maximální přípustnou velikost napětí vyvozenou na těsnění 180 MPa. To znamená, že šířka těsnění je taková, že tlak na těsnění se blíží maximální přípustné hodnotě.



Obr. 10 Průběh napětí v grafitovém těsnění širokém 7 mm.

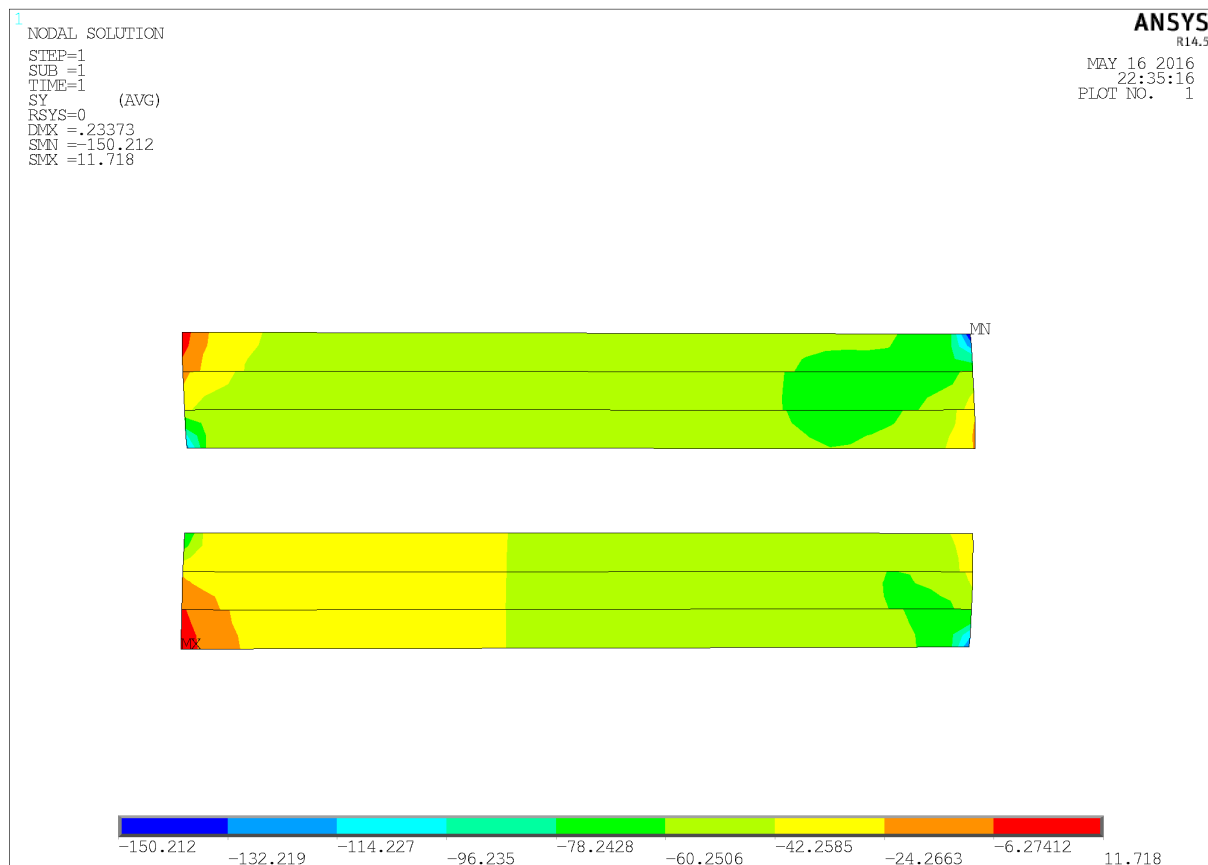
Při zadání těsnění z expandovaného grafitu šířky 14 mm dostáváme hodnoty napětí nejvytíže-
nější části do 85 MPa. Když ale porovnáme těsnění v mezitrubkovém prostoru a těsnění
v trubkovém prostoru, dostáváme různé velikosti napětí (viz následující obrázek). To je způ-
sobeno tím, že v mezitrubkovém prostoru je vyšší provozní tlak (2,1 MPa), který tlačí trub-
kovnici na těsnění trubkového prostoru a vytváří v něm vyšší napětí. Pro utěsnění mezitrub-
kového prostoru z hlediska povolené velikosti napětí volíme těsnění široké 19 mm.



Obr. 11 Shora grafitové těsnění trubkového a těsnění mezitrubkového prostoru široké 14 mm

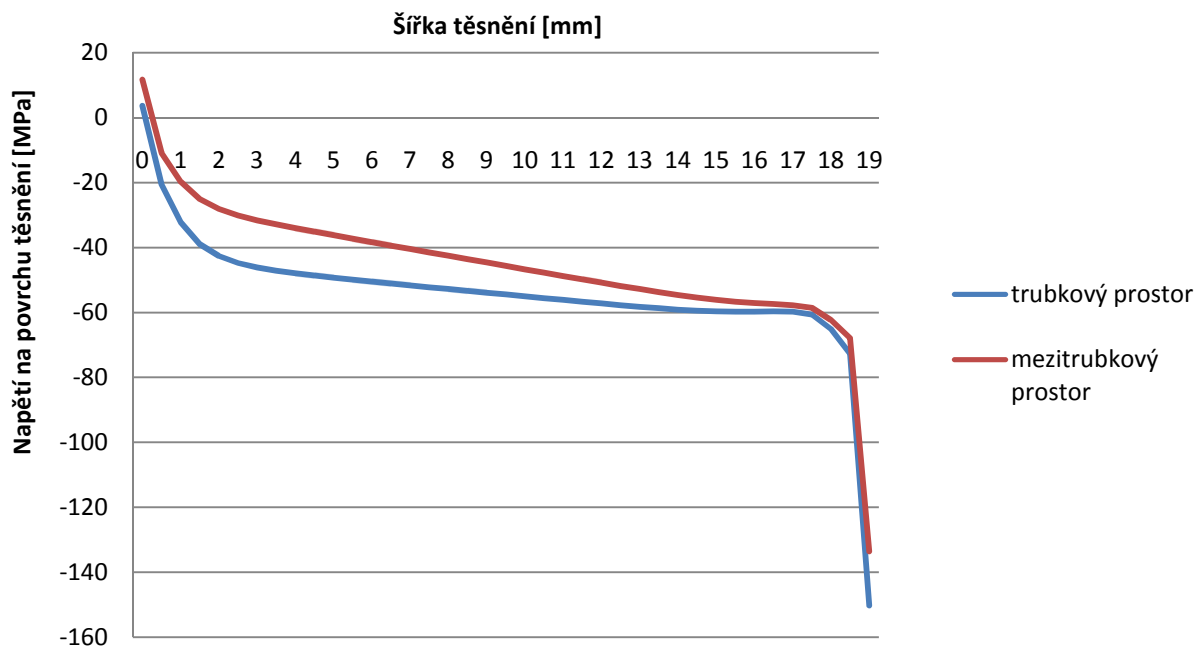
Průběh napětí v těsnění širokém 19 mm je opět zachycen v řezu na obrázku pod textem. Jak je vidět na barevném měřítku ve spodní části obrázku, maximální hodnoty v nejvytíženějším průřezu takto širokého těsnění dosahují zhruba 70 MPa. Hodnoty napětí odečteme také z povrchu těsnění a dostaneme 4 křivky prezentující dosedací plochu těsnění - příruba a těsnění - trubkovnice a to pro těsnění trubkového a mezitrubkového prostoru. Křivky by byly podobné rovněž pro těsnění široké 14 mm, jen by se hodnoty napětí pohybovaly v jiných rozmezích.

Vždy jsou podobné dvě dosedací plochy podle toho, k čemu dosedají (pro lepší názornost je vysvětleno později na těsnění s kovovou vložkou). Z grafického porovnání je patrná větší působící síla na těsnění trubkového prostoru, jak již bylo vysvětleno. Zvláště v povrchové vrstvě je v krajních polohách těsnění dosahováno větších odchylek od středního napětí působící na těsnění. Částečně to může být způsobeno hrubou sítí, ale především je to dáno okrajovou vlastností, kdy se těsnění vyvalí. Největšího tlaku je dosahováno na vnějším průměru těsnění, k čemuž dochází natočením přírub. Naopak na vnitřním průměru těsnění dochází k pozorovatelnému odlehčení. Pokud se lokální extrémů pohybují pouze v malé části povrchové vrstvy, je možné je zanedbat. V následujících dvou grafech jsou porovnány hodnoty napětí působící na povrchu těsnění. Značení šířky je od vnitřního průměru. Tedy vnitřní průměr těsnění je pod hodnotou 0 mm a 19 mm značí vnější průměr těsnění.



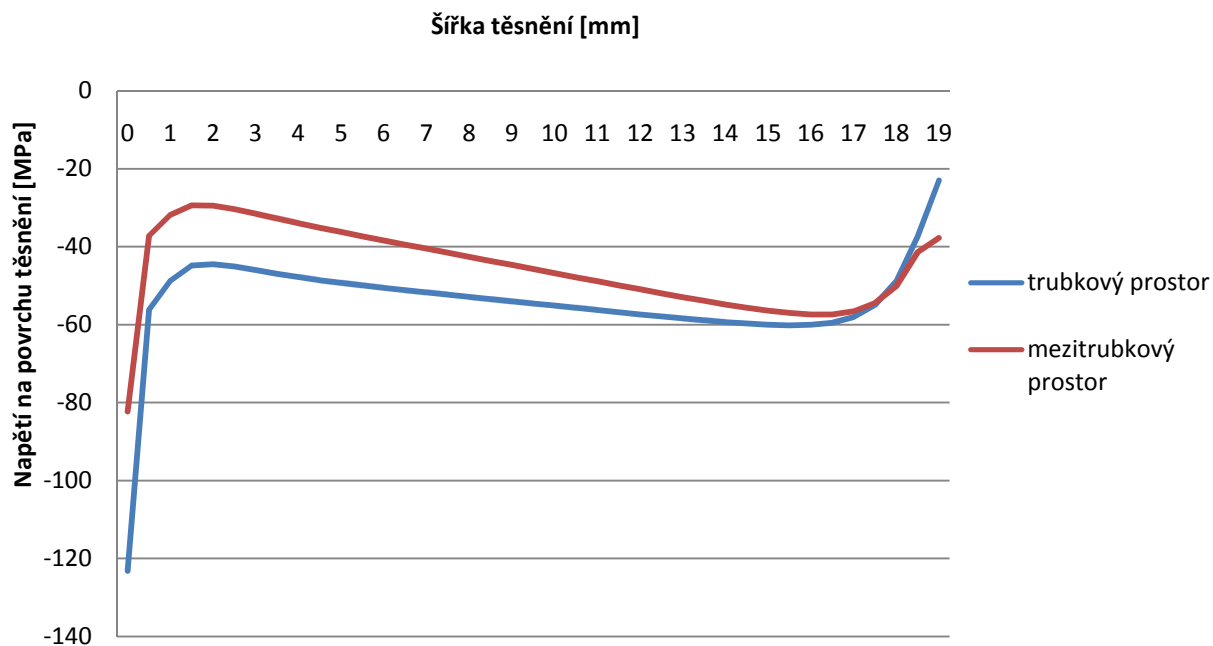
Obr. 12 Průběh napětí v osovém směru v těsnění z expandovaného grafitu širokém 19 mm shora pro trubkový a mezi-trubkový prostor

Styčné plochy těsnění s přírubou



Graf 1 Rozložení napětí po šířce grafitového těsnění ve styku s přírubou

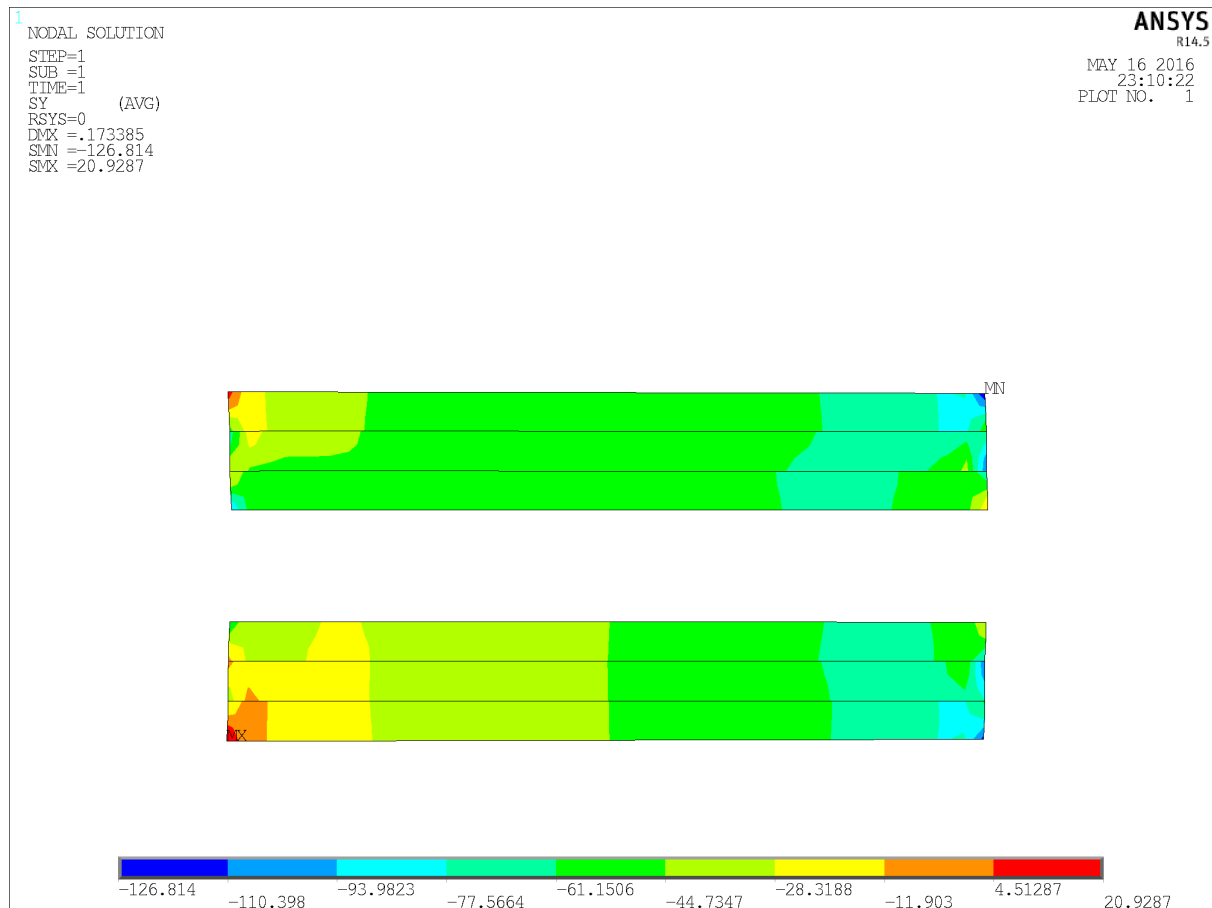
Styčné plochy těsnění s trubkovnicí



Graf 2 Rozložení napětí po šířce grafitového těsnění ve styku s trubkovnicí

6.2 Těsnění z expandovaného grafitu s kovovým jádrem

Jako další případ utěsnění je bráno v úvahu těsnění, které je tvořeno kovovou výztuhou - kovovým jádrem jako je tomu u hřebínkového těsnění nebo u těsnění výměníků, jejichž kovové jádro je zvlněné. Pro zjednodušení případu je kovové jádro uvažováno rovné a tvoří střední třetinu těsnění. Kovovému jádru jsou předepsány vlastnosti nerezového materiálu.

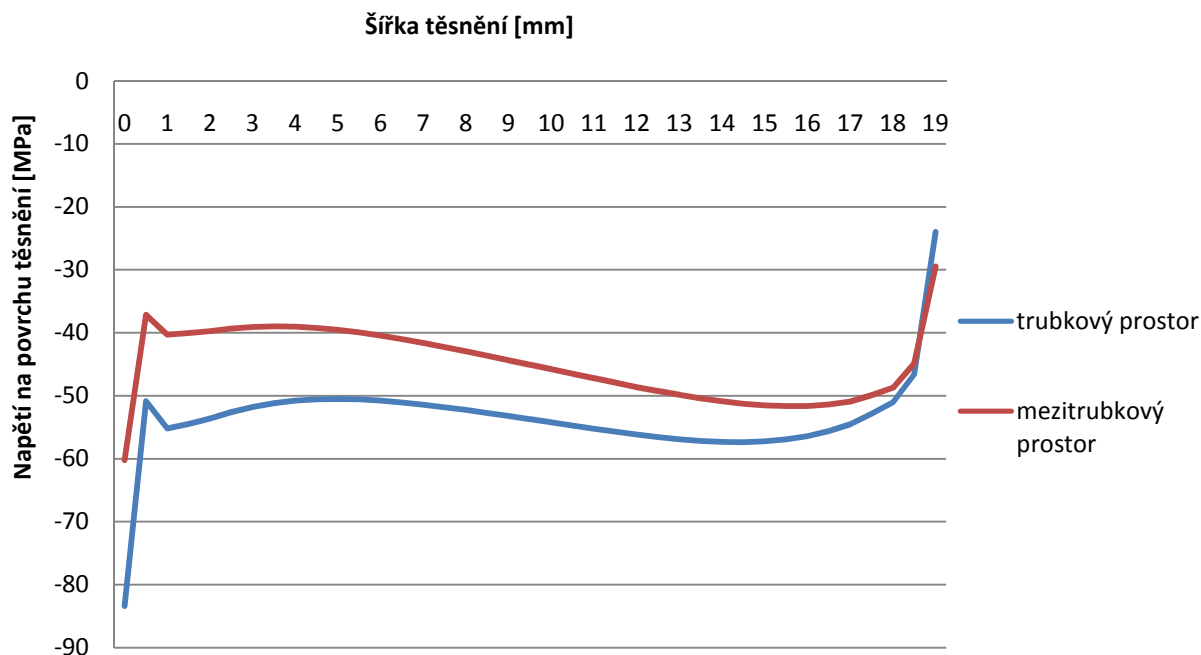


Obr. 13 Těsnění z expandovaného grafitu s kovovým jádrem široké 19 mm shora pro trubkový a mezitrubkový prostor

Kovové jádro samozřejmě nemá zásadní vliv na střední hodnotu velikosti napětí v těsnění a proto při šířkách 7 a 14 mm jsou hodnoty stále dost vysoké. Pro těsnění široké 19 mm je vyobrazen průběh napětí. V největší části těsnění, a to hlavně pro trubkový prostor, se dosahuje hodnot do 60 MPa, což je méně než v případě těsnění bez kovového jádra. Pouze lokálně se zde vykytuje napětí až 95 MPa.

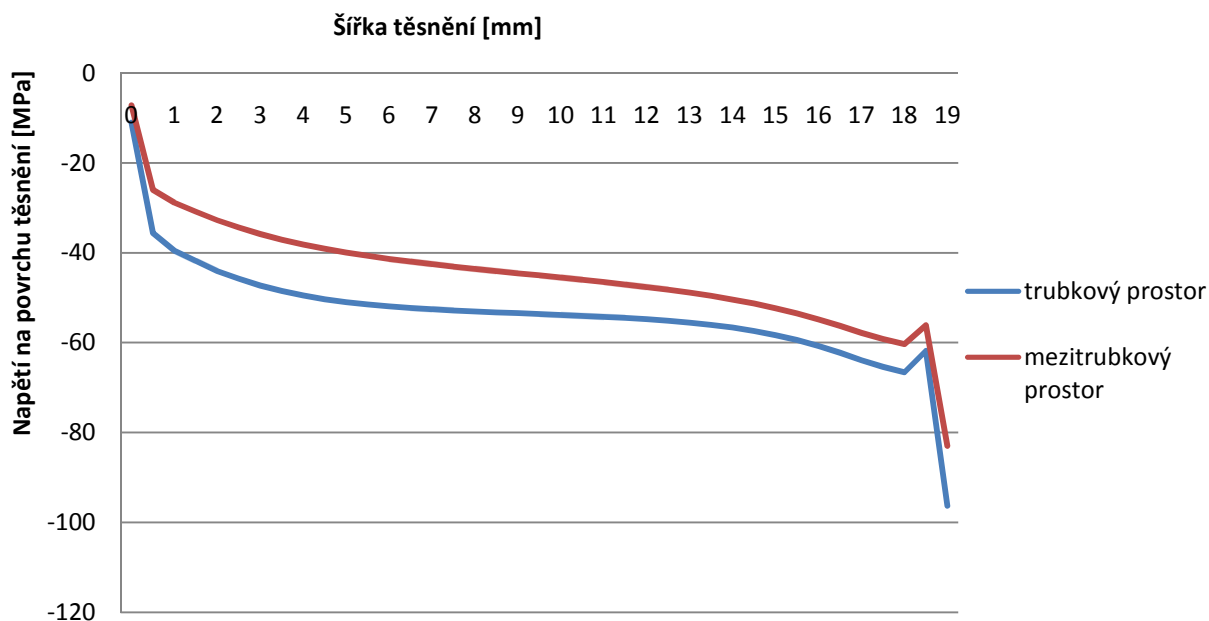
Při vyobrazení napětí na povrchu těsnění jako v případě těsnění bez kovového jádra je zde více patrný rozdíl ve styku s přírubou a ve styku s trubkovnicí. Při styku s přírubou napětí směrem od středu lineárně roste, kdežto napětí ve styku těsnění a trubkovnice kolísá kolem určité hodnoty. Je to dané tím, že při utažení přířubového spoje se poloha trubkovnice výrazně nemění a nemění se ani její natočení. V případě přírub, které trubkovnici svírají, dochází k mírnému natočení a to se projevuje rostoucím tlakem na těsnění směrem od středu. Kovová vrstva těsnění tento jev částečně eliminuje a na vrstvu expandovaného grafitu přiléhající k trubkovnici přenáší tlak rovnoměrněji.

Styčné plochy těsnění s trubkovnicí



Graf 3 Rozložení napětí po šířce grafitového těsnění s kovovým jádrem ve styku s trubkovnicí

Styčné plochy těsnění s přírubou



Graf 4 Rozložení napětí po šířce grafitového těsnění s kovovým jádrem ve styku s přírubou

7 Zátěžové režimy a namáhání PSST

Přírubový spoj je navržen pro provozní režim, ale rovněž aby vyhověl podmínkám tlakové zkoušky, kdy tlaky jsou 1,5 násobkem tlaku provozního. Zkušební natlakování je provedeno na smontovaném celku, při teplotě okolí 20°C a to tak, že trubkový a mezitrubkový prostor se tlakují zvlášť.

7.1 Tlaková zkouška mezitrubkového prostoru

Jako první posuzujeme případ s největším vyvozeným tlakem. Je zadaný tlak v mezitrubkovém prostoru 3,15 MPa a na straně trubkového prostoru je tlak nulový. Vzhledem k tomu, že ve výpočtovém modelu nejsou vytvořeny teplosměnné trubky, musí se působící tlak mezitrubkového prostoru přepočítat na skutečnou plochu. Plocha trubkovnice, v níž jsou teplosměnné trubky umístěny činí

$$S_t = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1390^2}{4} = 1,52 \cdot 10^6 [\text{mm}^2].$$

Plocha kterou zaujímají teplosměnné trubky v počtu 3780 ks je

$$S_{tr} = n \cdot \frac{\pi \cdot d_{tr}^2}{4} = 3780 \cdot \frac{\pi \cdot 16^2}{4} = 7,6 \cdot 10^5 [\text{mm}^2].$$

Potom přepočtený tlak na trubkovnici ze strany mezitrubkového prostoru udává vztah

$$p_{tr} = p_{n.zk} \cdot \frac{S_t - S_{tr}}{S_t} = 3,15 \cdot \frac{1,52 \cdot 10^6 - 7,6 \cdot 10^5}{1,52 \cdot 10^6} = 1,575 [\text{MPa}]$$

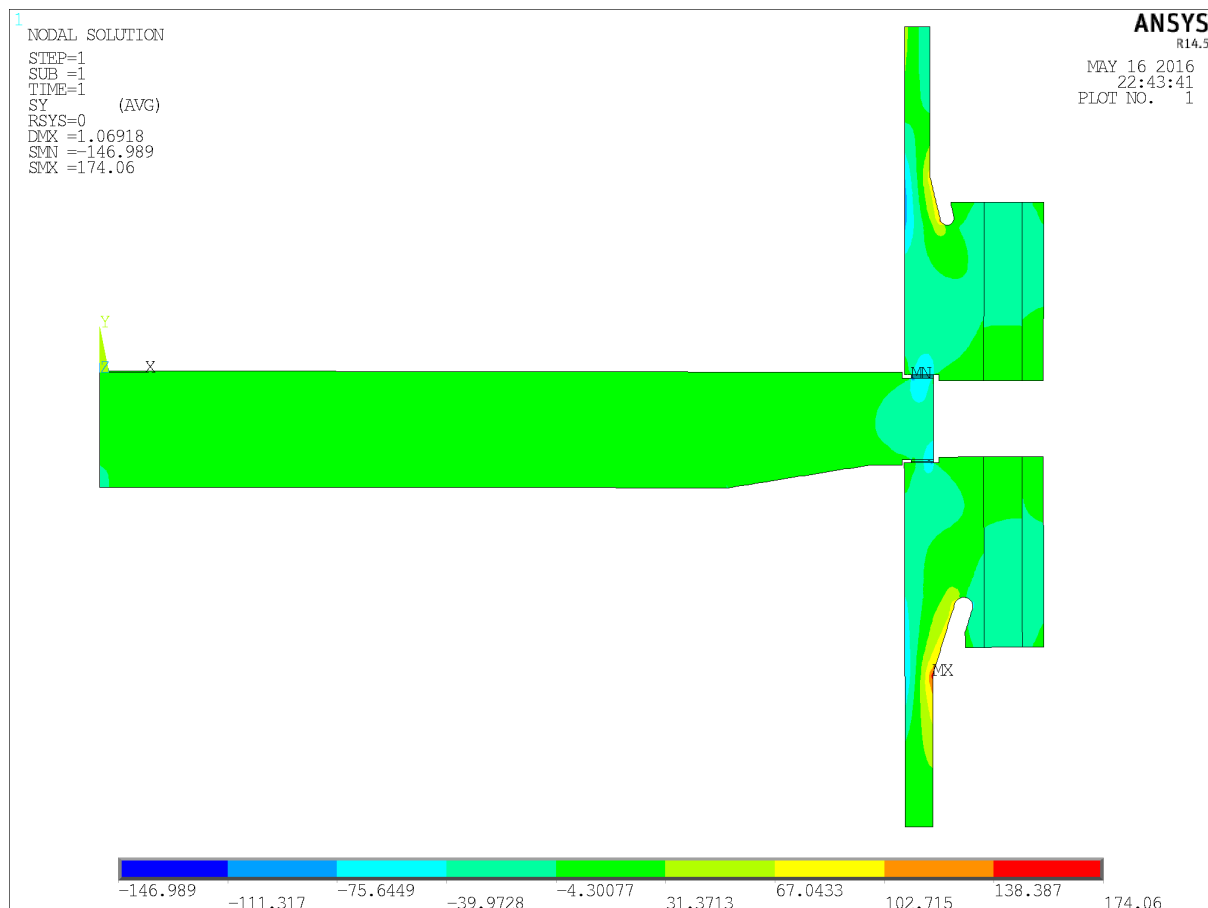
Síla ve svorníku zůstává ta, která byla napočtena v odstavci Výpočet šroubů, tedy $F_{\xi} = 85946 [\text{N}]$, pro všech 64 šroubů $F_{w.zk} = 5500528 [\text{N}]$. Pro zadání do výpočetního modelu MKP je síla přepočtena na tlak, působící na mezikruží odpovídající podložkám, v tomto případě na plochu

$$S_o = \frac{\pi((D_2 + d_p)^2 - (D_2 - d_p)^2)}{4} = \frac{\pi \cdot ((1560 + 49)^2 - (1560 - 49)^2)}{4} = 240143 [\text{mm}^2].$$

Působící tlak je

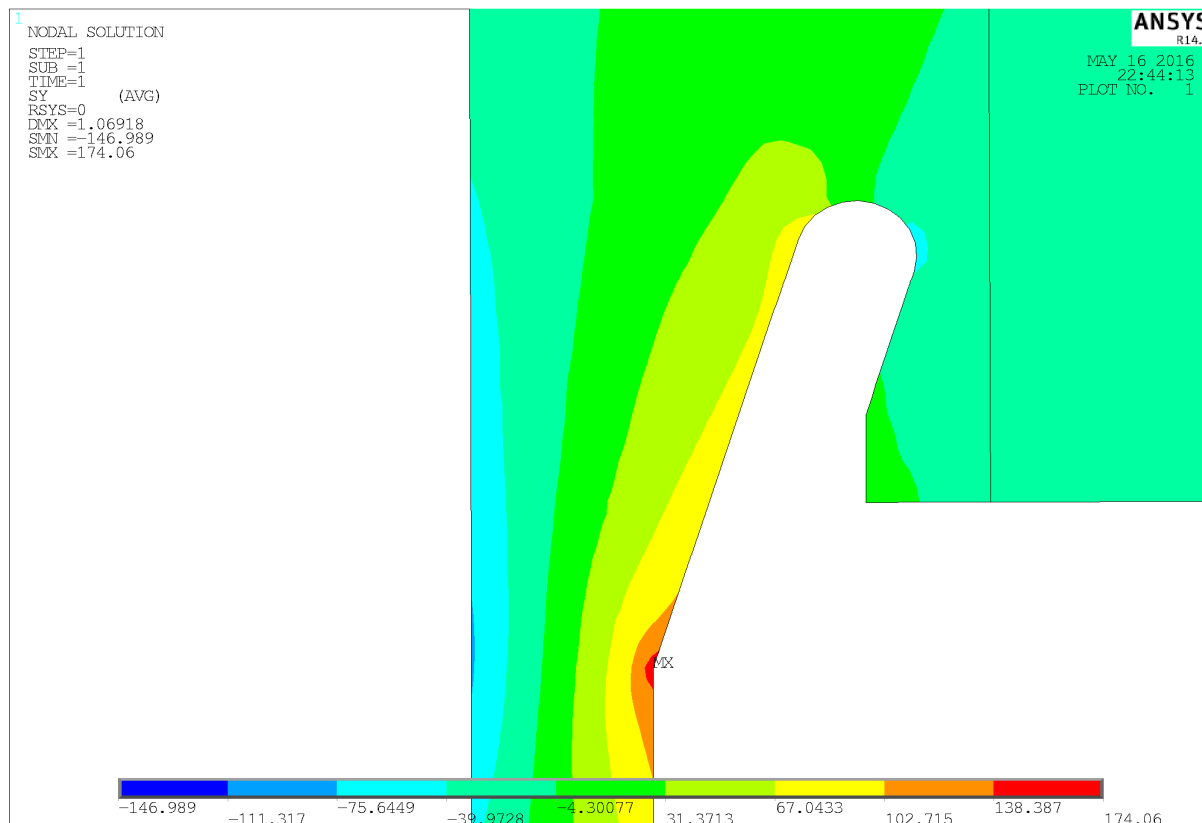
$$p_p = \frac{F_{w.zk}}{S_o} = \frac{5500528}{240143} = 22,9 [\text{MPa}].$$

Pro režim tlakové zkoušky mezitrubkového prostoru je vytvořen obrázek znázorňující průběh napětí v y-ovém směru pro celý přírubový spoj. Je patrné, že nejnamáhanější jsou krky přírub a to v oblasti odlehčujícího zápichu a v místě přechodu na válcovou část. Pro lepší názornost je vytvořen detail.

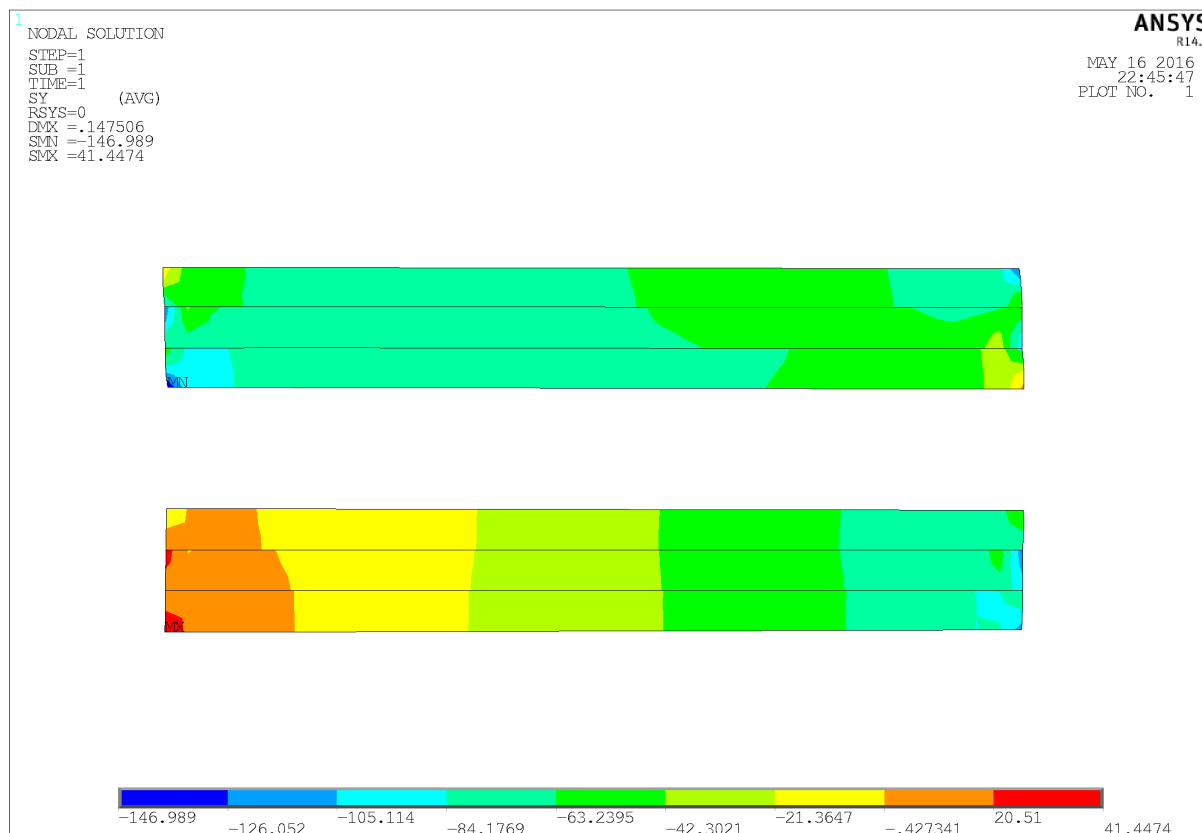


Obr. 14 Zatížení přírubového spoje při tlakové zkoušce mezitrubkového prostoru - osové napětí

V detailním pohledu krku příruby je vidět koncentrace napětí, které dosahuje hodnoty až 174 MPa . Dalším koncentrátorem napětí jsou těsnění, kde však nedochází k tahu, nýbrž k tlaku. Jejich stav je znázorněn níže. Je opět patrné, že těsnění trubkového prostoru je zatíženo více než těsnění z druhé strany trubkovnice. Co je pro nás důležité, že velikosti napětí nepřekračují hodnoty stanovené výrobcem, tedy 180 MPa a že v případě těsnění mezitrubkového těsnění nedochází k jeho odlehčení a spoj zůstává těsný. Jako minimální hodnota měrného tlaku, při kterém je těsnění funkční byla stanovena výrobcem na $Y=35 \text{ MPa}$



Obr. 15 Koncentrátor napětí příruby trubkového prostoru pro tlakovou zkoušku mezitrubkového prostoru



Obr. 16 Stav napětí v těsnění s kovovým jádrem širokým 19 mm shora pro trubkový a mezitrubkový prostor

7.2 Tlaková zkouška trubkového prostoru

Za běžných podmínek provozního stavu je v trubkovém prostoru tlak 0,6 MPa. Při tlakové zkoušce je tlak zvýšen na 1,5 násobek a dosahuje hodnoty 0,9 MPa. V mezitrubkovém prostoru je tlak nulový. Tlak působící v trubkovém prostoru vyvozuje tahovou sílu ve stěně rozváděcí komory. Síla je rovna tlaku působícího na plochu, v našem případě danou vnitřním průměrem příruby a je tedy rovna

$$F_t = p_{v_zk} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0,9 \cdot \frac{\pi \cdot 1390^2}{4} = 1,37 \cdot 10^6 [N]$$

Plocha, na kterou je síla vztažena je daná plochou mezikruží o vnitřním průměru shodném s vnitřním průměrem příruby a šířkou mezikruží shodnou s tloušťkou stěny rozváděcí komory.

$$S_m = \frac{\pi(D + 2 \cdot s_1)^2}{4} - \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (1390 + 2 \cdot 22)^2}{4} - \frac{\pi \cdot 1390^2}{4} = 97\,590 [mm^2]$$

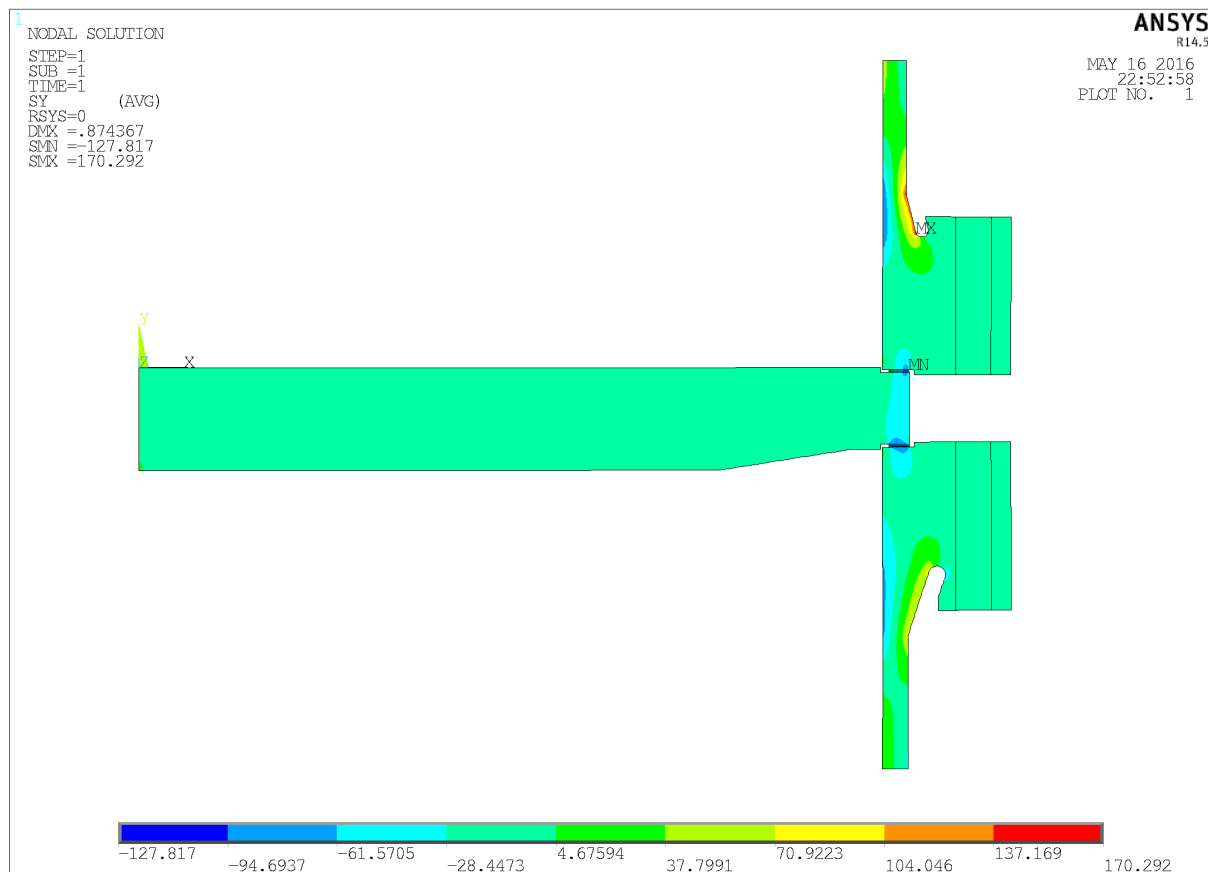
Tlak je pak dán podílem síly a plochy

$$p_t = \frac{F_t}{S_m} = \frac{1,37 \cdot 10^6}{97590} = 14 [MPa]$$

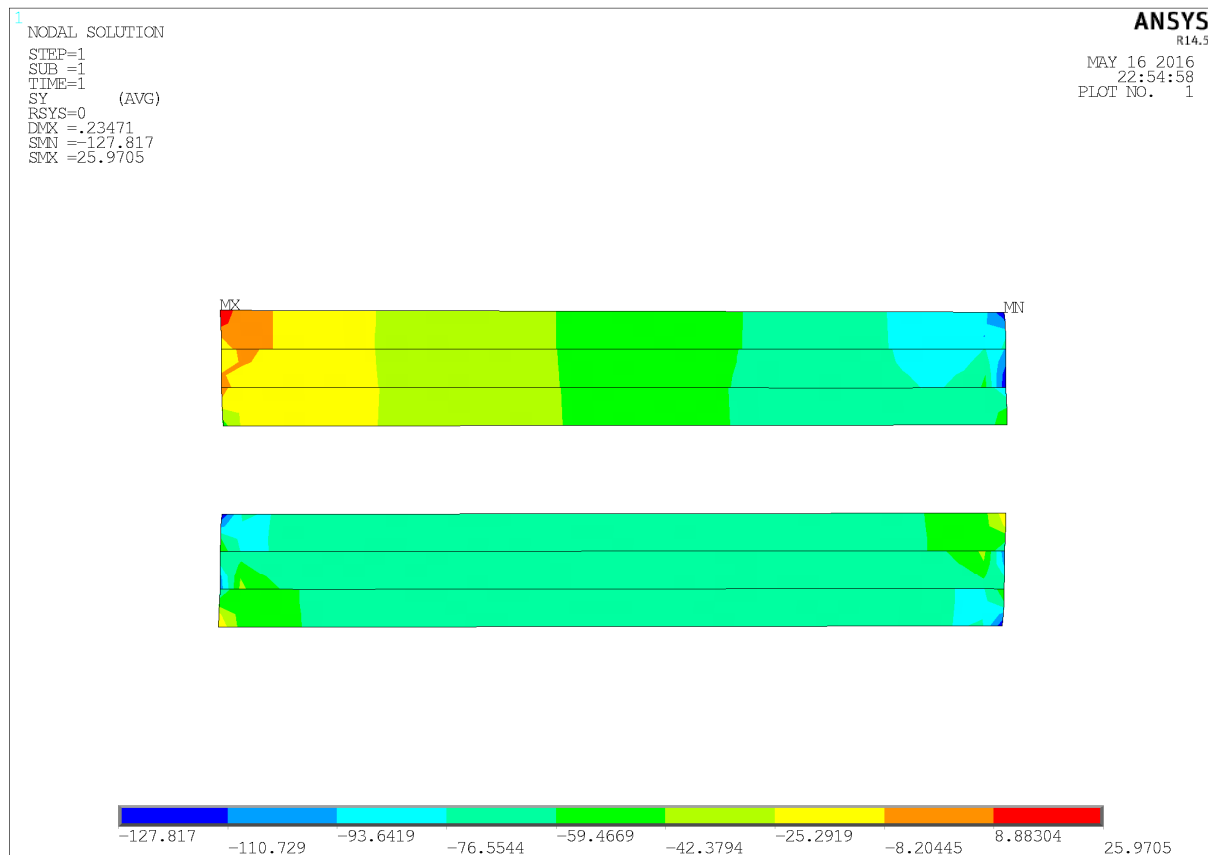
Pro provozní stav se tlak přepočte stejně s tím rozdílem, že jeho hodnota nebude 0,9, nýbrž 0,6 MPa.

Na obrázku je vidět, že namáhání přírubového spoje je obdobné s případem namáhání při tlakové zkoušce mezitrubkového prostoru. Ze škály rozsahu napětí lze odečíst vyšší hodnoty jež jsou koncentrovány opět pouze v oblasti odlehčovacího zápichu.

Pro případ zatížených těsnění se stav obrátil a nyní je více zatížené těsnění mezitrubkového prostoru. Tlak v trubkovém prostoru tlačí na trubkovnici a ta tak vyvíjí větší tlak na těsnění mezitrubkového prostoru. Hodnoty napětí jsou opět v přijatelných mezích.



Obr. 17 Zatížení přírubového spoje při tlakové zkoušce trubkového prostoru

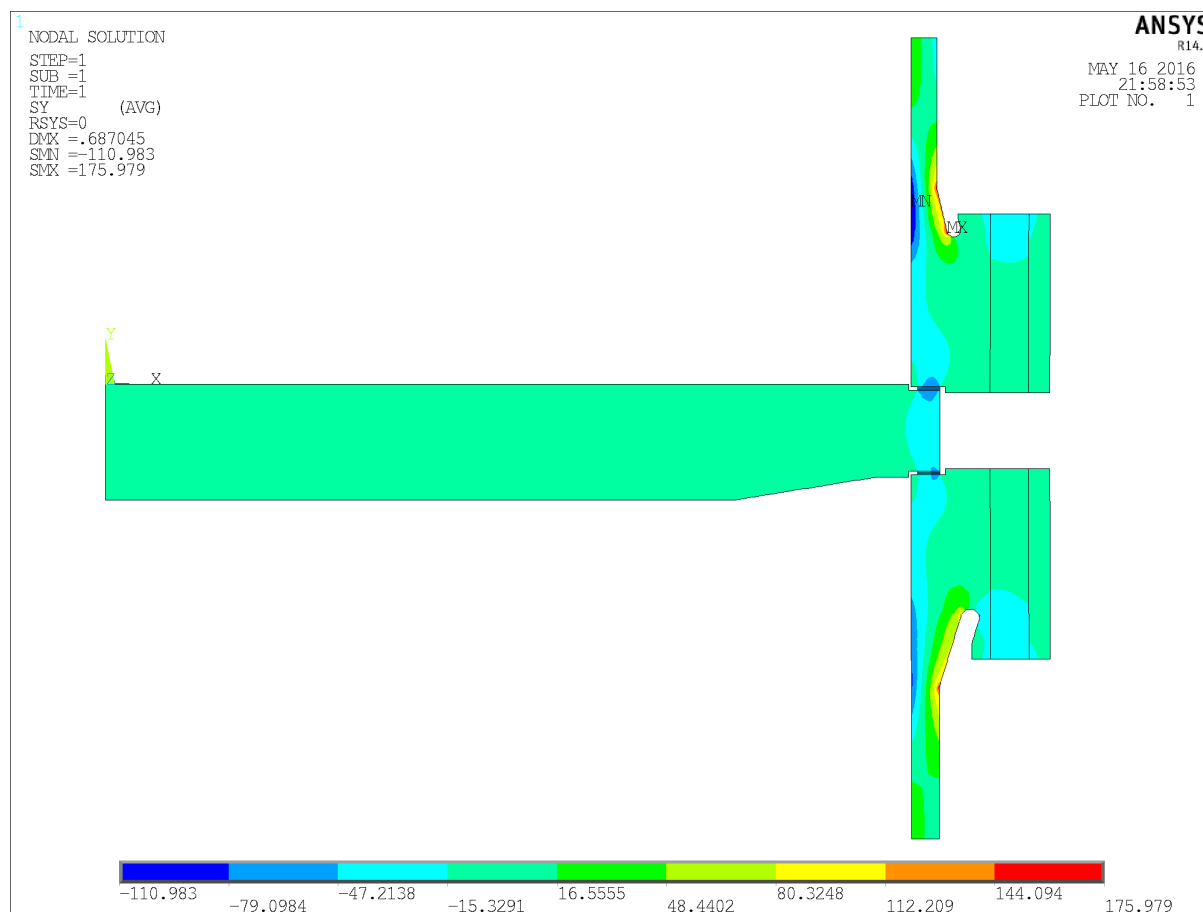


Obr. 18 Stav napětí v těsnění s kovovým jádrem širokým 19 mm shora pro trubkový a mezitrubkový prostor

7.3 Provozní stav

Provozní stav je takový stav, ve kterém se zařízení bude nacházet po většinu doby jeho využívání. Je to stav, kdy zařízení bude zahřáté a to je třeba brát při výpočtech v úvahu. Dle zadání bude v mezitrubkovém prostoru teplota kolem $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a do trubkového prostoru bude přiváděna chladicí voda o teplotě v zimním období $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a až $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ v letním období. Proto jsou pro stav najíždění zařízení vytvořeny křivky ohřevu jak pro stranu trubkového, tak pro stranu mezitrubkového prostoru. (Tyto křivky jsou uvedeny v příloze.) Ohřev je tak plynulejší. Dále je pro hrany modelu, kde dochází k přestupu tepla nastaven součinitel přestupu tepla $2\,500\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, vyjímaje hrany v blízkosti těsnění, kde nebude přestup tepla tak vysoký. Je pro ně nastavena hodnota $500\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Nejprve je napočtena úloha prostupu tepla pro čas do 1800 vteřin (tj. 30 minut). Průběh teploty v modelu je uložen do souboru. Je spuštěn program pro výpočet silového namáhání a v části preprocesoru je nahrán dříve uložený soubor sprůběhy teplot. Je důležité, aby oba modely měli totožnou síť, neboť teplotní průběhy jsou uloženy pro jednotlivé elementy. Následně je spuštěn řešič a úloha je přepočtena pro zadané teplotní pole.

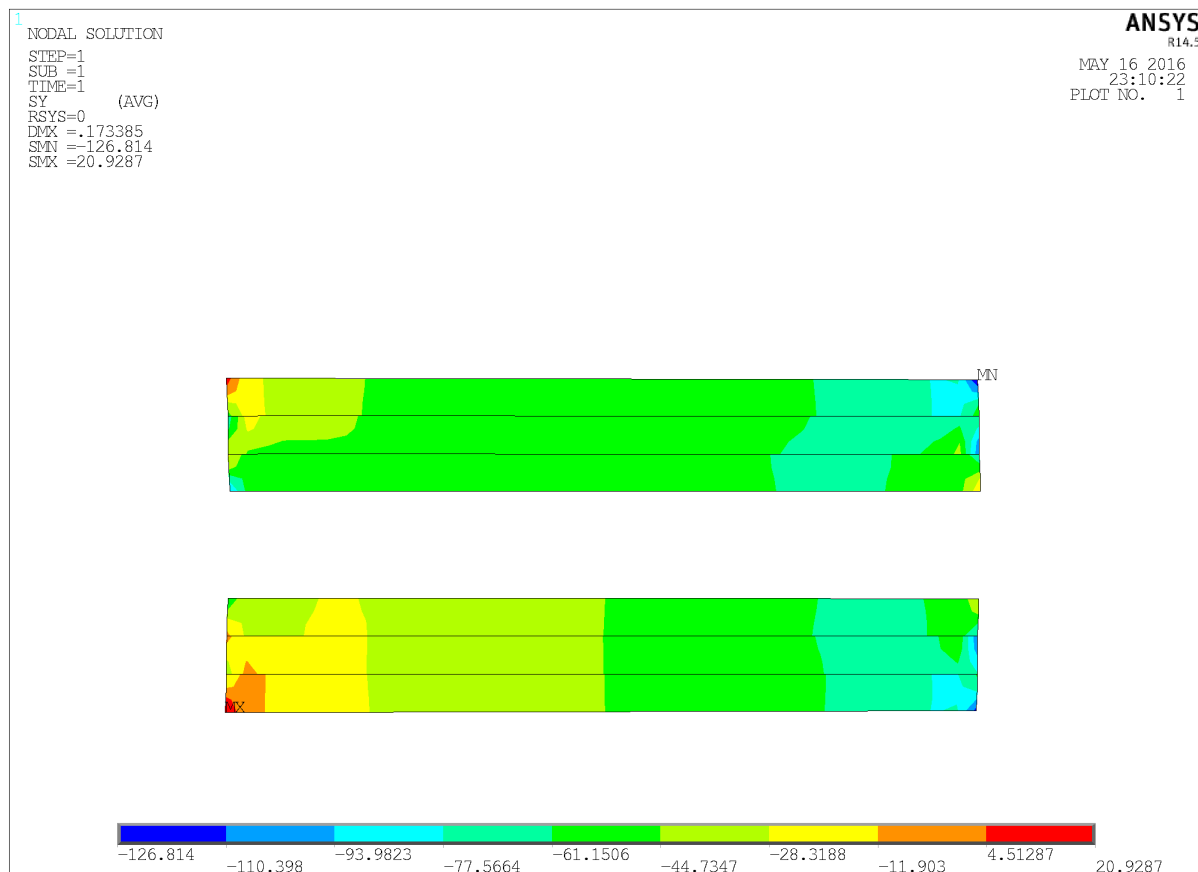
Průběh napětí v přírubovém spoji je podobný stavům napětí při tlakových zkouškách. V čase 30 minut od začátku ohřevu ještě nejsou příruby rovnoměrně prohřáté a zejména v přírubě mezitrubkového prostoru jsou velké teplotní gradienty. To způsobí přesunutí maximálního napětí z příruby trubkového prostoru na přírubu mezitrubkového prostoru, kde se vyskytuje v oblasti přechodu krku příruby ve válcovou část. Dojde k lokálnímu zplastizování.



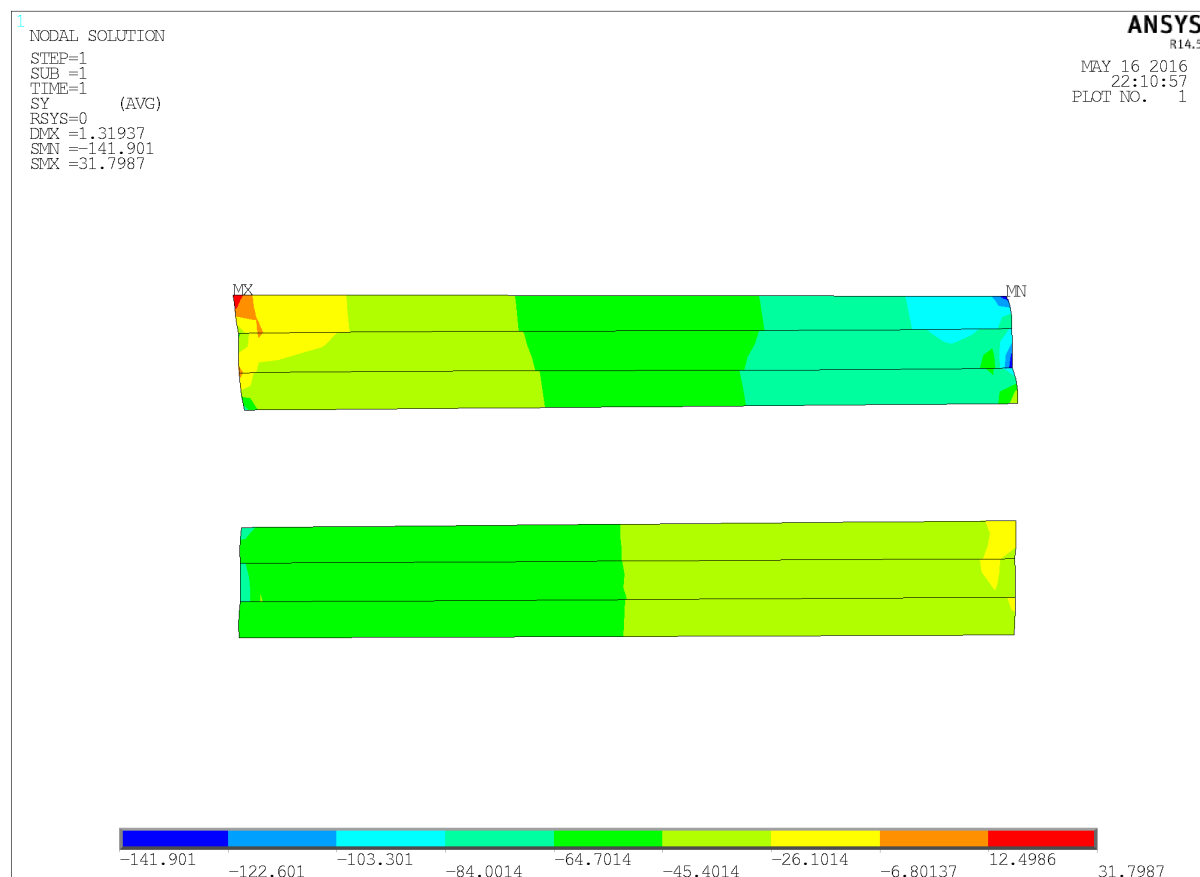
Obr. 19 Průběh napětí v přírubovém spoji za provozního stavu

Vlivem teplotních změn dojde také ke změnám napětí v těsnění. Na následujících dvou obrázcích je zobrazen stav bez uvažování ohřátí a s uvažováním ohřátí (stav po 30 minutách). Jak již

bylo uvedeno v kapitole Tepelná roztažnost, vlivem ohřátí dojde ke změnám rozměrů částí přírubového spoje a to tak, že dojde k utažení spoje. Velikost síly od teploty však není taková, aby měla vliv na pevnost svorníků nebo nadměrné zvýšení tlaku vyvíjeného na těsnění. Přesto je však pozorovatelné, že ohřevem dojde k většímu stlačení těsnění trubkového prostoru a to zejména na vnější části. Naopak těsnění mezitrubkového prostoru se oproti stavu bez uvažování ohřevu stlačí více na vnitřním průměru. Z toho je možné odvodit, že dojde k jiné deformaci přírub a trubkovnice.



Obr. 20 Průběh napětí za podmínek provozního stavu bez uvážení ohřevu shora pro těsnění trubkového a mezitrubkového prostoru



Obr. 21 Průběh napětí za podmínek provozního stavu s uvažování ohřevu shora pro těsnění trubkového a mezitrubkového prostoru

8 Hodnocení technologie utěsnění PSST

Dle výsledků získaných ze softwaru Ansys, zjednodušený model těsnění s nerezovým jádrem o šířce 19 mm vyhovuje zadaným provozním podmínkám. Není však bráno v úvahu přesnost, tedy rovinnost dosedacích ploch, ani vliv nerovnoměrného dotažení spoje, což může být způsobeno neodbornou montáží. Těsnění se zvlněným kovovým jádrem částečně řeší nízkou elasticitou expandovaného grafitu a zabraňuje netěsnostem i při nižším svěrném tlaku. Je tak vhodné na místech, kde dochází k častému ochlazování a zahřívání přírubového spoje.

Pro eliminaci rizik, způsobených lidským faktorem je doporučeno vést ke každému přírubovému spoji dokumentaci a montážní personál mít pro školen. Tato opatření jsou rovněž uvedena v normě ČSN EN 1591-4.

Asi nejrozšířenějším způsobem dotahování přírubového spoje je momentové utahování. Je-li šroub suchý, dochází k velkým ztrátám ve formě tření a to jak pod hlavou šroubu, tak třením v závitech. Tomu se předchází mazáním závitů a dosedacích ploch šroubu (matice) nebo použitím kluzných laků, které se vypálí do povrchové struktury šroubu. Další možností dotažení přírubového spoje je hydraulicky vyvozené předpětí ve svorníku. Tím odpadá problém s třecími ztrátami. Ještě přesnějšího dotažení se docílí, budeme-li dotahovat svorníky na stanovené prodloužení. Každý ze způsobů utahování se provádí v několika krocích. Před prvním dotažením svorníků je třeba zajistit vyrovnání přírub

9 Závěr

V této zprávě je navržen přírubový spoj sevřené trubkovnice s ohledem na zadané technické podmínky, které jsou uvedeny v kapitole 3. Tyto podmínky jsou obdobné podmínkám výměníku HSCHZ na JE Temelín, ovšem s poněkud menším předepsaným vnitřním průměrem. Spoj je navržen v souladu s normou Normativní technická dokumentace Asociace strojních inženýrů, kterou je možné použít pro návrh a kontrolu konstrukčních uzlů tlakových obálek primárních okruhů JE typu VVER.

Nejprve je v kapitole 4 proveden návrh základních rozměrů především obou přírub (mezitrubkového a trubkového prostoru) a svorníků. Materiály jsou voleny obdobně jako pro zmíněný výměník, tedy příruba mezitrubkového prostoru je z nerezové oceli 08CH18N10T, trubkovnice je z materiálu 17381. Příruba komory trubkového prostoru je navržena z materiálu 11416.1. Obě příruby jsou navrženy se zápichem, aby se snížil koncentrátor napětí v místě připojení krku k listu příruby. Využita je metodika používaná firmou Královopolská, Brno. Pro návrh základních rozměrů je v kapitole 4 proveden výpočet působících sil a momentů namáhajících jednotlivé zmíněné příruby (v případě sil rovněž svorníky). Dostatečná pozornost proto byla věnována poddajnostem jednotlivých částí spoje. Dále je proveden návrh dimenzování trubkovnice, tentokrát podle normy ČSN 69 0010, část 4.13. Výkresová dokumentace navrženého spoje je přiložena.

Vzhledem k předepsaným technickým požadavkům, působícím teplotám, stálosti předepnutí spoje je navrženo hřebínkové těsnění, těsnícím materiálem je pak expandovaný grafit. Diskuse, která vedla k tomuto výběru, je provedena v odstavci 4.5. Šířka těsnění 19 mm je navržena tak, aby nedošlo k příliš vysokému namáhání expandovaného grafitu.

Pro kontrolu namáhání přírub a pro nalezení průběhu tlaku působícího po šířce těsnění byl sestaven numerický výpočetní model založený na metodě konečných prvků. Vzhledem na požadavek postižení koncentrátorů napětí navržených přírub byl zvolen rotačně symetrický model spoje. Je možné konstatovat, že navržené dimenzování spoje je dostatečné. Výpočty teplotních polí a teplotní namáhání spoje od ohřevu však ukazují (viz obrázky příloh), že rychlost „najíždění“ výměníku, tj. rychlost ohřevu spoje, má své meze. Uvažovaný graf ohřevu z přílohy 1 se ukazuje prakticky nepřekročitelný. Doporučuji proto dobu ohřevu vyšší než uvažovaných 10 minut.

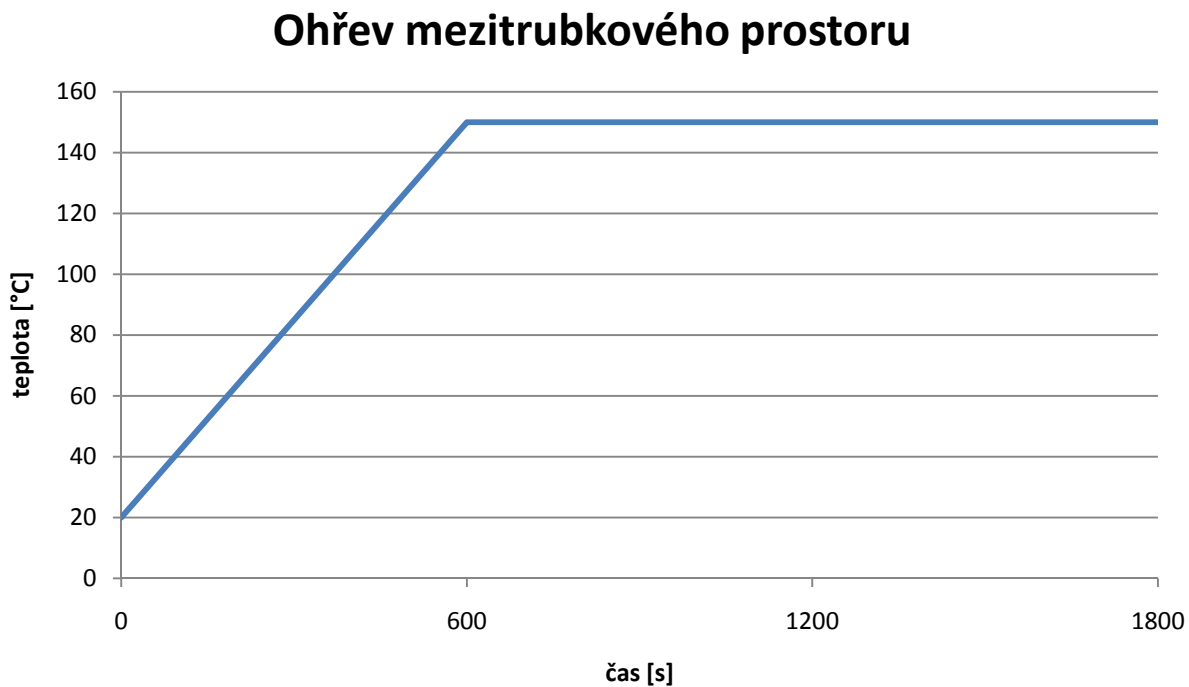
Vzhledem k časovému omezení a rozsahu prací již nebylo možné provést další upřesňující výpočty, které jsem ovšem nenašel publikovány pro uvedený typ spoje ani v odborné literatuře. Jedná se především o to, že tuhost (modul pružnosti) expandovaného grafitu je rovněž závislá na působícím tlaku, a tedy rozložení tlaku po šířce těsnění je možné oproti mnou uvedenému výsledku dále upřesnit. Výpočet pomocí metody konečných prvků ale již bude vyžadovat nelineární model materiálu těsnění. Dále je vhodné provést výpočty dopřesňující namáhání spoje pro více variant jeho ohřevu a ochlazení.

10 Citovaná literatura

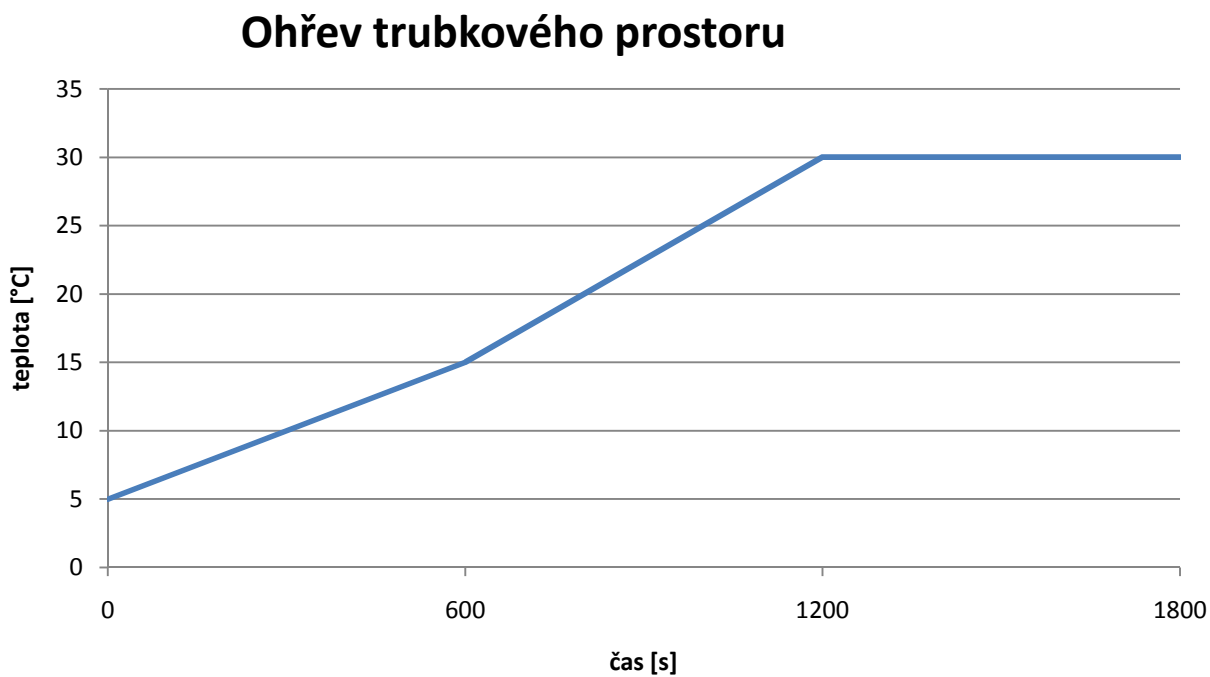
- [1] Baylac, G., a další. Unfired pressure vessels. EN 13445. Courbevoie, France : Union de Normalisation de la Mécanique, 2004. 2.
- [2] J. Lukavský, J. Tomáš. Cesty k dosažení větší spolehlivosti utěsnění přírubových spojů. Chemagazín. [Online] březen 2009. http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin_2010/file/chxix_3_cl5.pdf.
- [3] Lukavský, J. Přírubové spoje - dosažení požadované těsnosti. Tlakinfo .cz. [Online] 26. srpen 2008. <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1618>.
- [4] Pokorný. [Online] 2016. www.tesneni.cz.

11 Přílohy

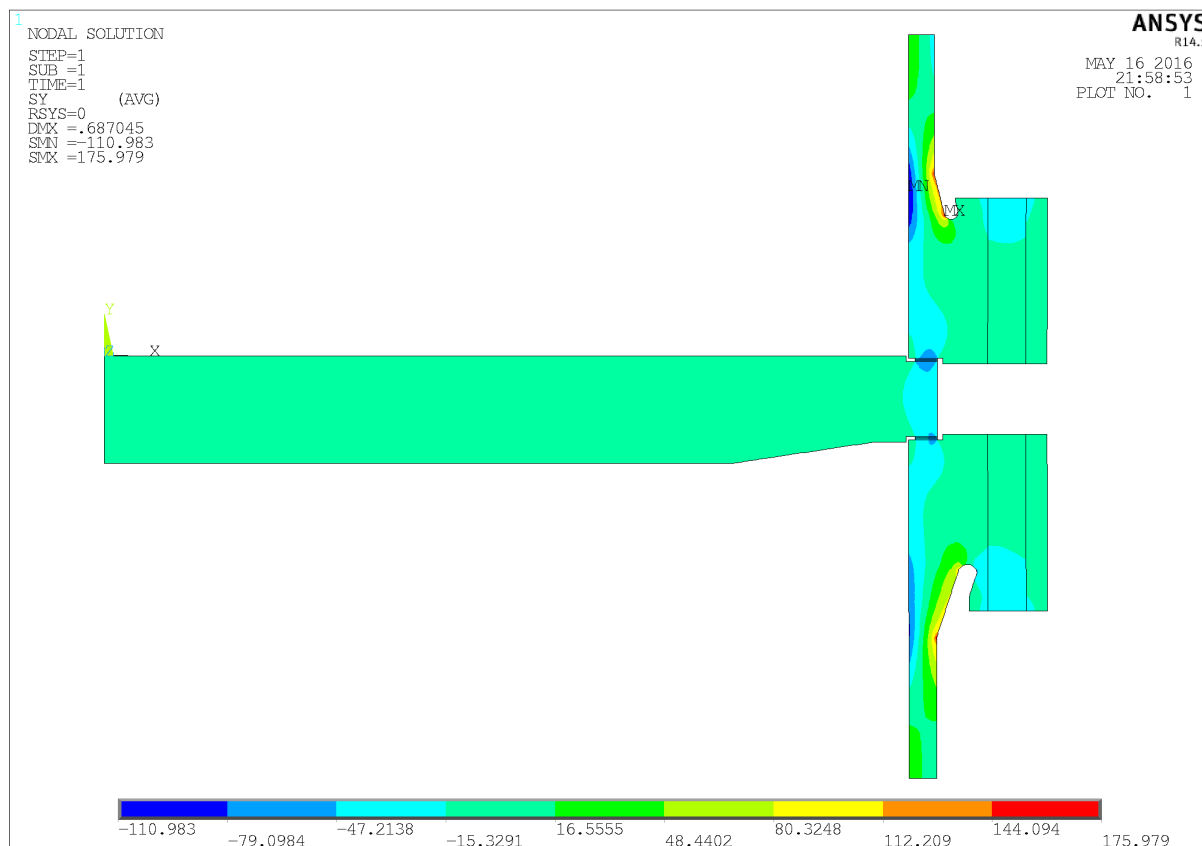
Příloha 1 Graf předepsaného ohřevu mezitrubkového prostoru



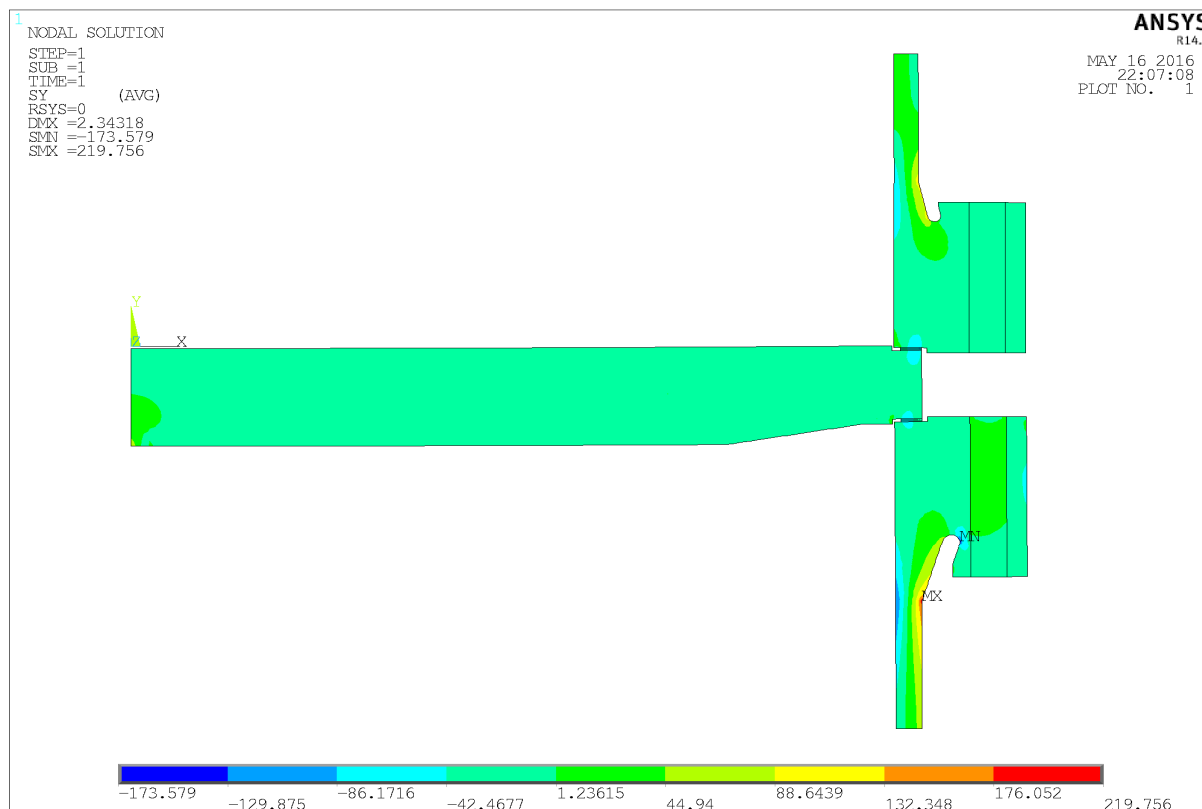
Příloha 2 Graf předepsaného ohřevu trubkového prostoru



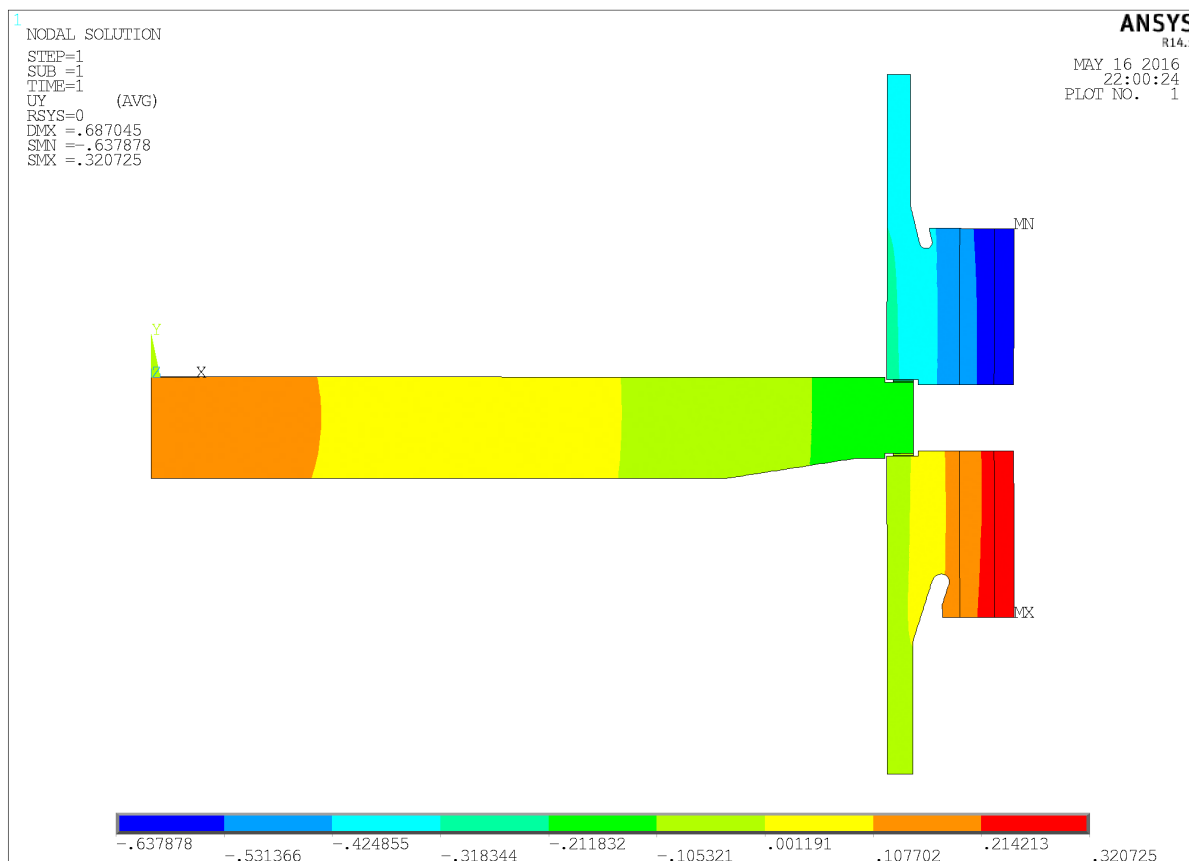
Příloha 3 Napětí v přírubovém spoji za provozního stavu bez uvážení ohřevu



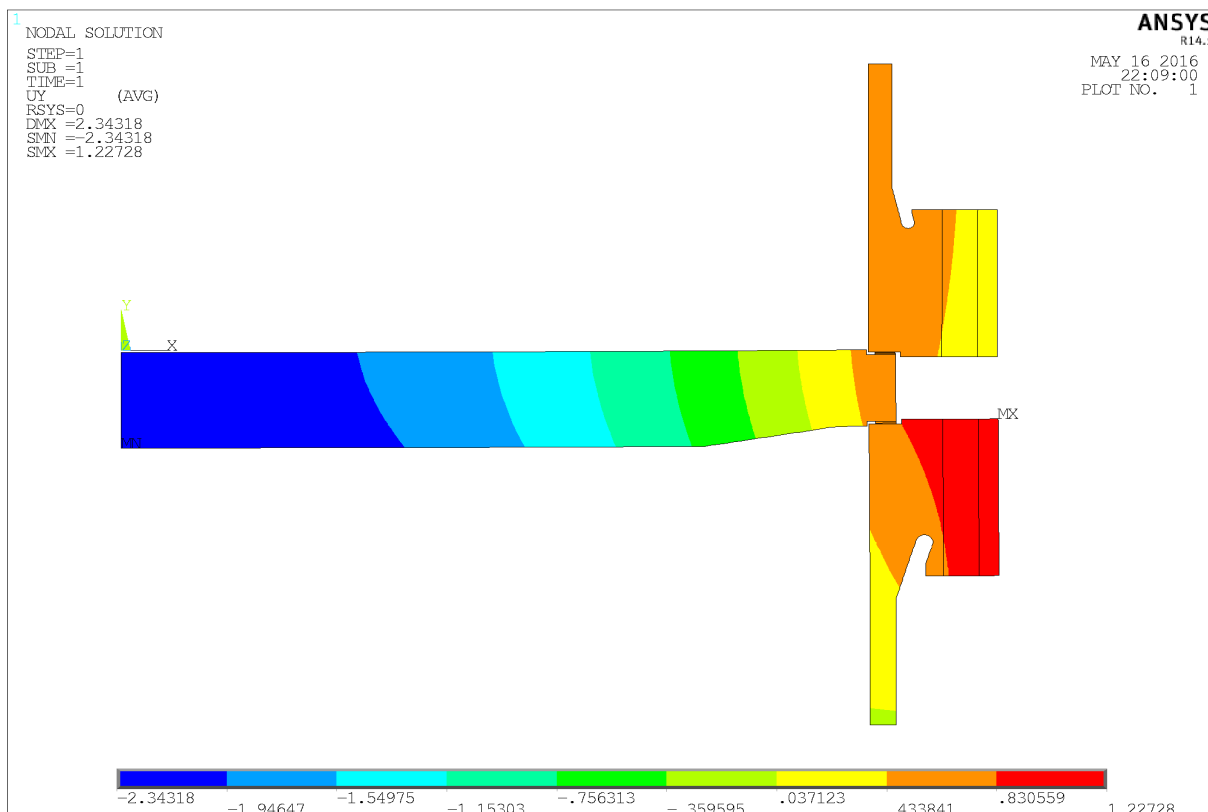
Příloha 4 Napětí v přírubovém spoji za provozního stavu s uvážení ohřevu

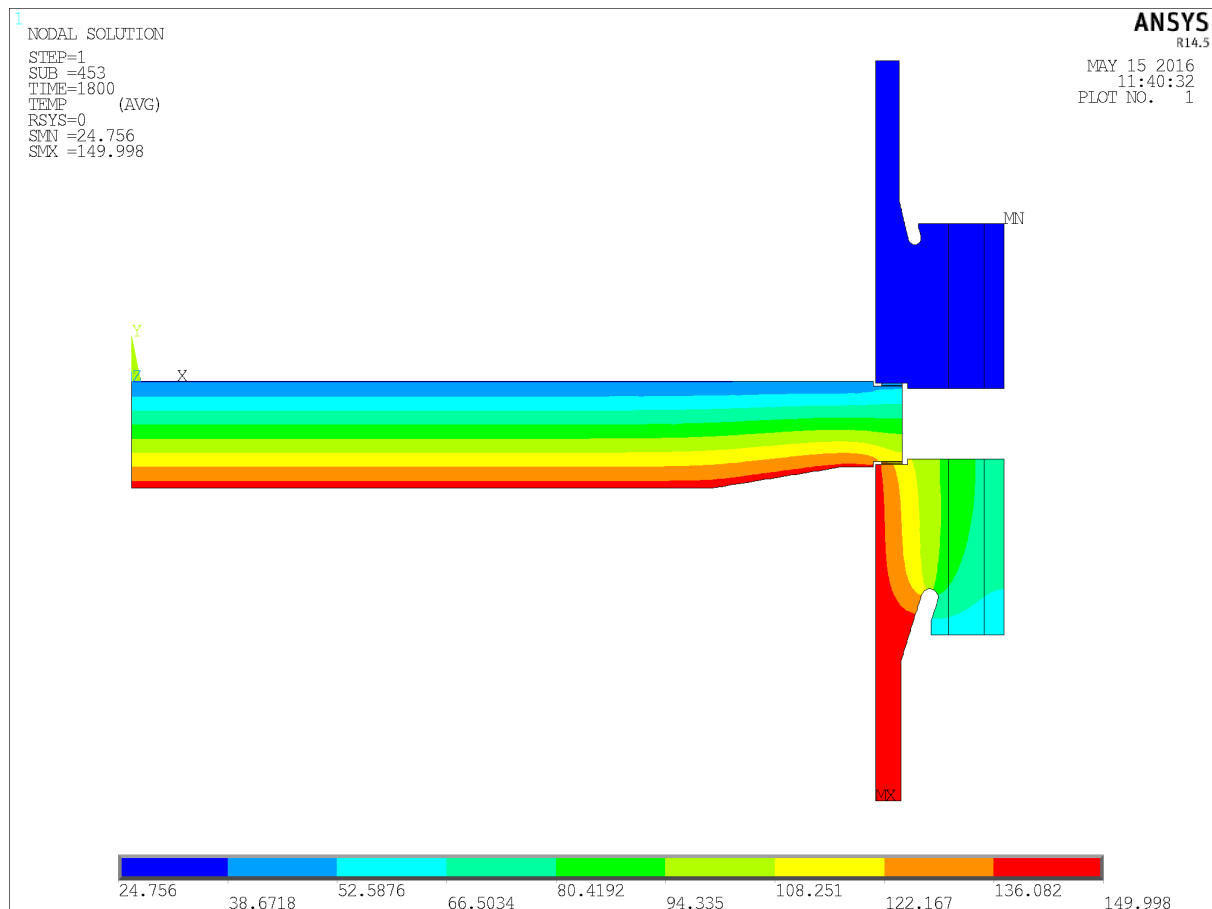


Příloha 5 Posuvy ve směru "y" pro provozní stav bez uvažování ohřevu



Příloha 6 Posuvy ve směru "y" pro provozní stav s uvažováním ohřevu



Příloha 7 Teplotní pole v přírubovém spoji v čase $t = 1800$ [s]

Příloha 8 Kód pro zadání výpočtu napětí do programu Ansys Mechanical

```
/COM, příklad modelu příruby
/PREP7
```

```
!!!! parametrizace !!!!
```

```
*SET,D,720.0 !vnejsi prumer tesneni [mm]
*SET,b,19. !sirka tesneni [mm]
*set,c,693 !polomer osazeni příruby [mm]
*set,a,695 !vnitri polomer příruby [mm]
*SET,p_mtn,2.1 !tlak mezitrubkoveho prostoru [MPa]
*SET,p_mt,1.05 !tlak mezitrubkoveho prostoru prepocteny [MPa]
*SET,p_t,0.6 !tlak trubkoveho prostoru [MPa]
*SET,sw,22.9 !prepocteny tlak od sroubu [MPa]
*SET,tah,9.63 !prepocteny tlak pro stenu nadoby od vnitřní tlaku [MPa]
```

```
!!!! keypoints !!!!
```

```
k, 1,725.0000,-73.00000,0.0
k, 2,725.0000,-78.00000,0.0
k, 3,695.0000,-78.00000,0.0
k, 4,695.0000,-262.0000,0.0
k, 5,719.0000,-262.0000,0.0
k, 6,738.2584,-199.6394,0.0
k, 7,753.5460,-204.3606,0.0
k, 8,747.0756,-225.3125,0.0
k, 9,747.0756,-238.0000,0.0
k,10,815.0000,-238.0000,0.0
k,11,815.0000,-73.00000,0.0
k,12, D-b,-78.00000,0.0
k,13, D,-78.00000,0.0
k,14, D,-75.00000,0.0
k,15, D-b,-75.00000,0.0
k,16,693.0000, 0.00000,0.0
```

k,17, 0.0000, 0.00000,0.0
 k,18, 0.0000,-100.0000,0.0
 k,19,542.0000,-100.0000,0.0
 k,20,665.0000,-80.0000,0.0
 k,21,693.0000,-80.0000,0.0
 k,22,693.0000,-75.0000,0.0
 k,24,665 ,0
 k,25,693.0000,-5.00000,0.0
 k,26, D,-2.00000,0.0
 k,27, D-b,-2.00000,0.0
 k,28, D-b,-5.00000,0.0
 k,29, D,-5.00000,0.0
 k,30,725.0000,-2.00000,0.0
 k,31,725.0000,-7.00000,0.0
 k,32,815.0000,-7.00000,0.0
 k,33,815.0000, 148.0000,0.0
 k,34,735.2293, 148.0000,0.0
 k,35,735.2293, 145.3771,0.0
 k,36,737.5692, 135.5960,0.0
 k,37,725.8986, 132.8040,0.0
 k,38,717.0000, 170.0000,0.0
 k,39,695.0000, 170.0000,0.0
 k,40,695.0000,-2.00000,0.0
 k,41,796.5, 148
 k,42,763.5, 148
 k,43,796.5, -7
 k,44,763.5, -7
 k,45,796.5,-238
 k,46,763.5,-238
 k,47,796.5, -73
 k,48,763.5, -73
 k,49,804.5, 148
 k,50,755.5, 148
 k,51,804.5, -7
 k,52,755.5, -7
 k,53,804.5,-238
 k,54,755.5,-238
 k,55,804.5, -73
 k,56,755.5, -73
 k,59, 542, -80
 k,60,717.0000, 300.0000,0.0
 k,61,695.0000, 300.0000,0.0
 k,62,695.0000,-392.0000,0.0
 k,63,719.0000,-392.0000,0.0
 k,64,115, 0
 k,65,230, 0
 k,66,345, 0
 k,67,460, 0
 k,68,575, 0
 k,70,115,-100
 k,71,230,-100
 k,72,345,-100
 k,73,460,-100

!!!!!!!!!!!!!!! tesneni s kovovou vložkou !!!!!!!!!!!!!!!!

k,88, D-b,-3.00000,0.0
 k,89, D-b,-4.00000,0.0
 k,90, D,-3.00000,0.0
 k,91, D,-4.00000,0.0
 k,92, D-b,-76.00000,0.0
 k,93, D-b,-77.00000,0.0
 k,94, D,-76.00000,0.0
 k,95, D,-77.00000,0.0

!!!! line !!!!

lstr, 2, 1 !1
 lstr, 2,13 !2
 lstr, 4, 3 !3
 lstr, 5, 4 !4
 lstr, 5, 6 !5
 lstr, 8, 7 !6
 lstr, 9, 8 !7
 lstr,10,11 !8
 lstr,13,12 !9

lstr,14,15 !10
 lstr,16,17 !1
 lstr,18,17 !2
 lstr,19,18 !3
 lstr,19,20 !4
 lstr,21,20 !5
 lstr,21,22 !6
 lstr,15,22 !7
 lstr,14,29 !8
 lstr,28,25 !9
 lstr,25,16 !20
 lstr,26,27 !1
 lstr,29,28 !2
 lstr,30,31 !3
 lstr,33,32 !4
 lstr,34,35 !5
 lstr,35,36 !6
 lstr,38,37 !7
 lstr,38,39 !8
 lstr,39,40 !9
 lstr,27,40 !30
 lstr,38,60 !1
 lstr,39,61 !2
 lstr,12, 3 !3
 lstr,26,30 !4
 lstr,60,61 !5
 lstr,62,63 !6
 lstr, 4,62 !7
 lstr, 5,63 !8

KL, 14, 0.26829268292682926829268292682927 !bod na line 14 ve vzdalenosti 26.83%

larc,36,37,38,6 !40

! oblouk zapichu tr. priruby R6

larc,6,7,4,8.00001 !1

! oblouk zapichu mezitr. priruby R8

lstr,49,51 !2
 lstr,41,43 !3
 lstr,42,44 !4
 lstr,50,52 !5
 lstr,55,53 !6
 lstr,47,45 !7
 lstr,48,46 !8
 lstr,56,54 !9
 lstr,59,19 !50
 lstr,59,20 !1
 lstr,27,88 !2
 lstr,88,89 !3
 lstr,89,28 !4
 lstr,26,90 !5
 lstr,90,91 !6
 lstr,91,29 !7
 lstr,15,92 !8
 lstr,92,93 !9
 lstr,93,12 !60
 lstr,14,94 !1
 lstr,94,95 !2
 lstr,95,13 !3

!!!! urceni ploch - areas !!!!

a,1,2,13,12,3,4,5,6,7,8,9,54,56

!priruba mezitrubkoveho prostoru

a,53,10,11,55

a, 4, 5,63,62

a,48,56,54,46

a,55,47,45,53

a,15,92,94,14

!tesneni

a,93,12,13,95

!tesneni

a,27,88,90,26

a,89,28,29,91

!kovova vložka

a,88,89,91,90

a,92,93,95,94

a,16,25,22,21,20,23,68

!trubkovnice

a,68,23,19,73,67

a,67,73,72,66

a,66,72,71,65

a,65,71,70,64

a,64,70,18,17

a,25,22,15,14,29,28
a,30,31,52,50,34,35,36,37,38,39,40,27,26 !priruba trubkoveho prostoru
a,51,49,33,32
a,39,38,60,61
a,44,42,50,52
a,49,41,43,51
a,45,46,48,47 !OTVOR PRO SROUB TR
a,43,44,42,41 !OTVOR PRO SROUB MTR

!!!! poddajna vrstva trubkovnice !!!!

k,74,693,-400
k,75,575,-400
k,76,460,-400
k,77,345,-400
k,78,230,-400
k,79,115,-400
k,80, 0,-400

!!!! tuha vrstva trubkovnice !!!!

k,81,693,-500
k,82,575,-500
k,83,460,-500
k,84,345,-500
k,85,230,-500
k,86,115,-500
k,87, 0,-500

a,18,80,79,70
a,70,79,78,71
a,71,78,77,72
a,72,77,76,73
a,73,76,75,23,19
a,23,75,74,21,20

a,80,87,86,79
a,79,86,85,78
a,78,85,84,77
a,77,84,83,76
a,76,83,82,75
a,75,82,81,74

!!!!!!!!!!!!!! DEFINOVANI MATERIALU !!!!!!!!!!!!!!!

ET,1,PLANE42 !typ prvku cislo 1 je prvek PLANE42
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,1 !AXISYMMETRIC
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,8,0
KEYOPT,1,9,0
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20,50,75,100,150

! *** 08CH18N10T - mezitrubkovy prostor

MPDATA,EX,1,,201e3,199e3,198500,198e3,195.5e3 !Younguv modul pruznosti
MPDATA,PRXY,1,,0.3 !Poissonvo cislo
MPDATA,ALPX,1,,16.6e-6,16.75e-6,16.875e-6,17e-6,17.1e-6 !tepelna roztaznost ve smeru x
MPDATA,ALPY,1,,16.6e-6,16.75e-6,16.875e-6,17e-6,17.1e-6 !tepelna roztaznost ve smeru y

! *** 11416.1 - trubkovy prostor

MPDATA,EX,2,,206e3,203500,202250 !Younguv modul pruznosti
MPDATA,PRXY,2,,0.3 !Poissonvo cislo
MPDATA,ALPX,2,,11e-6,11e-6,11e-6 !tepelna roztaznost ve smeru x
MPDATA,ALPY,2,,11e-6,11e-6,11e-6 !tepelna roztaznost ve smeru y

! *** 17381 - trubkovnice

MPDATA,EX,3,,2e5,196e3,193e3,19e4,185000 !Younguv modul pruznosti
MPDATA,PRXY,3,,0.3 !Poissonvo cislo
MPDATA,ALPX,3,,13e-6,13e-6,13e-6,13e-6,13.2e-6 !tepelna roztaznost ve smeru x
MPDATA,ALPY,3,,13e-6,13e-6,13e-6,13e-6,13.2e-6 !tepelna roztaznost ve smeru y

! *** ortotropni material pro prirubu trubkoveho prostoru

MPDATA,EX,4,,115091.85
MPDATA,EY,4,,133796.15
MPDATA,EZ,4,,2000
MPDATA,PRXY,4,,0.3
MPDATA,PRXZ,4,,0.3
MPDATA,PRYZ,4,,0.4
MPDATA,GXY,4,,45500
MPDATA,GYZ,4,,2000
MPDATA,GXZ,4,,2000
MPDATA,ALPX,4,,12e-6,12e-6,12e-6,12e-6,12.35e-6 !tepelná roztažnost ve směru x
MPDATA,ALPY,4,,12e-6,12e-6,12e-6,12e-6,12.35e-6 !tepelná roztažnost ve směru y

! *** ortotropní materiál pro přírubu mezitrubkového prostoru

MPDATA,EX,5,,111250.71
MPDATA,EY,5,,129330.76
MPDATA,EZ,5,,2000
MPDATA,PRXY,5,,0.3
MPDATA,PRXZ,5,,0.3
MPDATA,PRYZ,5,,0.4
MPDATA,GXY,5,,45500
MPDATA,GYZ,5,,2000
MPDATA,GXZ,5,,2000
MPDATA,ALPX,5,,12e-6,12e-6,12e-6,12e-6,12.35e-6 !tepelná roztažnost ve směru x
MPDATA,ALPY,5,,12e-6,12e-6,12e-6,12e-6,12.35e-6 !tepelná roztažnost ve směru y

! *** tesnění

MPDATA,EX,6,,1500 !Youngův modul pružnosti
MPDATA,PRXY,6,,0.3 !Poissonovo číslo
MPDATA,ALPX,6,,2e-6 !tepelná roztažnost ve směru x
MPDATA,ALPY,6,,2e-6 !tepelná roztažnost ve směru y

! *** kovové jádro tesnění
!MPDATA,EX,7,,1500 !Youngův modul pružnosti
!MPDATA,PRXY,7,,0.3 !Poissonovo číslo
!MPDATA,ALPX,7,,2e-6 !tepelná roztažnost ve směru x
!MPDATA,ALPY,7,,2e-6 !tepelná roztažnost ve směru y

MPDATA,EX,7,,185000 !Youngův modul pružnosti
MPDATA,PRXY,7,,0.3 !Poissonovo číslo
MPDATA,ALPX,7,,17e-6 !tepelná roztažnost ve směru x

! *** poddajná vrstva
MPDATA,EX,8,,2332.5
MPDATA,EY,8,,23.325
MPDATA,EZ,8,,23.325 !Youngův modul pružnosti
MPDATA,PRXY,8,,0.3
MPDATA,PRYZ,8,,0.4
MPDATA,PRXZ,8,,0.3 !Poissonovo číslo
MPDATA,ALPX,8,,0.0000017 !tepelná roztažnost ve směru x
MPDATA,ALPY,8,,0.0000017 !tepelná roztažnost ve směru y
MPDATA,GXY,8,,45500
MPDATA,GYZ,8,,2000
MPDATA,GXZ,8,,2000

! *** tuhá vrstva

MPDATA,EX,9,,185000 !Youngův modul pružnosti
MPDATA,PRXY,9,,0.3 !Poissonovo číslo
MPDATA,ALPX,9,,13e-6,13e-6,13e-6,13e-6,13.2e-6 !tepelná roztažnost ve směru x
MPDATA,ALPY,9,,13e-6,13e-6,13e-6,13e-6,13.2e-6 !tepelná roztažnost ve směru y

!!!!!!!!!!!!!! PRIRAZENI MATERIALU !!!!!!!!!!!!!!!

ASEL,S,,,25,25,1 !dira sroubu v přírubě trubkového prostoru
aatt,4,,1
asel,all

ASEL,S,,,24,24,1 !dira sroubu v přírubě mezitrubkového prostoru
aatt,5,,1
asel,all

```

asel,s,,,6,9,1      !tesneni
aatt,6,,1
asel,all

asel,s,,,19,23,1   !priruba trubkoveho prostoru
aatt,2,,1
asel,all

asel,s,,,1,5,1     !priruba mezitrubkoveho prostoru
aatt,1,,1
asel,all

asel,s,,,12,18,1   !trubkownice
aatt,3,,1
asel,all

asel,s,,,10,11,1   !kovove jádro
aatt,7,,1
asel,all

asel,s,,,26,31,1   !podajna vrstva
aatt,8,,1
asel,all

asel,s,,,32,37,1   !tuha vrstva
aatt,9,,1
asel,all

```

!!!!!!!!!!!!!! MESH SESTAVY !!!!!!!!!!!!!!!

!!! predepsani poctu prvku pro line !!!

```

lesize, 1,,,5
lesize, 2,,,5
lesize, 3,,,100
lesize, 5,,,40
lesize, 6,,,9
lesize, 7,,,7
lesize, 8,,,80
lesize, 9,,,b*2
lesize, 12,,,20
lesize, 15,,,10
lesize, 17,,, (D-b-c)*2
lesize, 18,,,80
lesize, 19,,, (D-b-c)*2
lesize, 22,,,b*2
lesize, 24,,,80
lesize, 26,,,8
lesize, 27,,,24
lesize, 29,,,100
lesize, 30,,, (D-b-a)*2
lesize, 31,,,80
lesize, 32,,,80
lesize, 33,,, (D-b-a)*2
lesize, 35,,,14
lesize, 36,,,14
lesize, 37,,,80
lesize, 38,,,80
lesize, 39,,,20
lesize, 43,,,80
lesize, 47,,,80
lesize, 64,,,12
lesize, 65,,, 6
lesize, 67,,, 8
lesize, 69,,, 8
lesize, 75,,,30
lesize, 76,,,30
lesize, 77,,,30
lesize, 78,,,40
lesize, 79,,,8
lesize, 80,,,20
lesize, 82,,,30
lesize, 84,,,20
lesize, 85,,,20
lesize, 88,,,20
lesize, 91,,,20
lesize, 93,,,20

```

```
lesize,94,,,20
lesize,95,,,30
lesize,96,,,6
lesize,97,,,6
lesize,99,,,6
lesize,101,,,8
lesize,103,,,8
lesize,104,,,10
lesize,105,,,10
lesize,106,,,60
lesize,107,,,20
lesize,108,,,60
lesize,116,,,60
lesize,117,,,20
lesize,118,,,65
lesize,119,,,20
lesize,120,,,20
lesize,121,,,20
lesize,128,,,20

mshape,2,2d      !definuje 2D mesovani ctyr uhelniky
mshkey,2        !pouzije mapped meshing, kdyz je to mozne, jinak free meshing
amesh,1,40,1    !situje (meshing) plochu (area) cislo 1 az 40 s krokem 1

DL,36, ,UY,0,0  !specifikuje posuvy UY=0 na line 36
DL,12, ,UX,0,0  !specifikuje posuvy UX=0 na line 12
CP,1,UY,16174,16187,16186,16185,16184,16183,16182,16181,16180,16179,16178,16177,16176,16175,16094  !19

!!!! uzlove body pro pripad volby jineho rozmeru tesneni

! 16274,16287,16286,16285,16284,16283,16282,16281,16280,16279,16278,16277,16276,16275,16194  !24
!
! 15998,16011,16010,16009,16008,16007,16006,16005,16004,16003,16002,16001,16000,15999,15918  !14
! 15779,15792,15791,15790,15789,15788,15787,15786,15785,15784,15783,15782,15781,15780,15699  !7

!!!! definovani predpeti sroubu!!!!
SFL,98,pres,sw,sw
SFL,105,pres,sw,sw
SFL,100,pres,sw,sw
SFL,68,pres,sw,sw
SFL,102,pres,sw,sw
SFL,70,pres,sw,sw

!!!! definovani tahove sily v krku priruby!!!!
SFL,35,pres,-tah,-tah

!!!! definovani pretlaku mezitrubkoveho prostoru !!!!!
SFL,120,pres,p_mt,p_mt
SFL,122,pres,p_mt,p_mt
SFL,124,pres,p_mt,p_mt
SFL,126,pres,p_mt,p_mt
SFL,128,pres,p_mt,p_mt
SFL,130,pres,p_mt,p_mt
SFL,16,pres,p_mtn,p_mtn
SFL,17,pres,p_mtn,p_mtn
SFL,57,pres,p_mtn,p_mtn
SFL,58,pres,p_mtn,p_mtn
SFL,59,pres,p_mtn,p_mtn
SFL,33,pres,p_mtn,p_mtn
SFL,3,pres,p_mtn,p_mtn
SFL,37,pres,p_mtn,p_mtn

!!!! definovani pretlaku trubkoveho prostoru !!!!!
SFL,93,pres,p_t,p_t
SFL,91,pres,p_t,p_t
SFL,88,pres,p_t,p_t
SFL,85,pres,p_t,p_t
SFL,82,pres,p_t,p_t
SFL,78,pres,p_t,p_t
SFL,20,pres,p_t,p_t
SFL,19,pres,p_t,p_t
SFL,53,pres,p_t,p_t
SFL,52,pres,p_t,p_t
SFL,51,pres,p_t,p_t
SFL,30,pres,p_t,p_t
SFL,29,pres,p_t,p_t
```

SFL,32,pres,p_t,p_t

```
!  
/SOL          !spousti program resice  
ANTYPE,0     !specifikuje typ analyzy, 0=statika  
SOLVE       !start reseni  
FINISH  
SAVE        !uklada databazi ulohy do Jobname.db  
/POST1      !start programu postprocessingu obecnych vysledku  
/EFACET,1  
PLNSOL, S,Z, 0,1.0  !zobrazuje (obvodovou) slozku napeti SZ  
png         !vyvolani MAKRA pro vytvoreni obrazku  
PLNSOL,S,Y  
png  
PLNSOL,S,INT  
png
```