

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 458

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Richard Nekvasil

Řešení problematiky
extrémního tepelného
a teplotního zatížení aparátu

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav procesního a ekologického inženýrství

Ing. Richard Nekvasil

**ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY EXTRÉMNÍHO TEPELNÉHO
A TEPLOTNÍHO ZATÍŽENÍ APARÁTŮ**

**SOLUTION OF THE PROBLEM OF EXTREME THERMAL AND
HEAT LOAD EQUIPMENT**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukce procesních zařízení
Školitel: prof. Ing. Stanislav Vejvoda, CSc.
Oponenti: prof. Ing. Jaroslav Purmanský, DrSc.
prof. Ing. Ctirad Kratochvíl, DrSc.
Ing. Dušan Vincour, Ph.D.
Datum obhajoby: 29. 2. 2008

KLÍČOVÁ SLOVA

Termo-hydraulická analýza, pevnostní analýza, tepelné poškozování, kumulace poškození, směšování proudů, nátrubky, T-kusy, potrubí, proudově-napěťové interakce, CFD, MKP.

KEY WORDS

Thermo-hydraulic analysis, stress analysis, thermal fatigue, damage cumulation, steams mixing, nobles, T-junctions, pipe, fluid structure interaction, CFD, FEM.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně

OBSAH

OBSAH.....	3
1 ÚVOD.....	5
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
2.1 Možné typy proudění při směšování proudů.....	6
2.2 Obecné závislosti experimentálně ověřené	6
2.3 Případy závažných havárií	7
2.4 Postižené oblasti.....	8
3 CÍL PRÁCE.....	8
4 POUŽITÝ POSTUP ŘEŠENÍ PROBLÉMU	9
5 PODROBNOSTI K ŘEŠENÍ NUMERICKÝMI METODAMI.....	11
5.1 Analyzovaná geometrická provedení.....	11
5.2 Okrajové podmínky proudění	12
5.3 Okrajové podmínky napěťových analýz	12
5.4 Multifield analýza	12
5.5 Analyzované případy	13
6 SOUHRN ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ A NAVRHOVANÁ DOPORUČENÍ ...	13
6.1 Analýza vlivu světlosti potrubí na charakter proudění	13
6.2 Analýza vlivu rychlosti proudů médií na poškození potrubí	14
6.3 Analýza vlivu geometrie napojení potrubí na poškození potrubí	15
6.4 Analýza vlivu teplotní difference na poškození potrubí	18
6.4.1 Směšování plynných médií v nátrubku s košílkou	18
6.4.2 Směšování kapalných médií v nátrubku s antikoročním návarem	19
6.5 Analýza vlivu materiálu na poškození potrubí	20
7 ZÁVĚR.....	20
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	22
ŽIVOTOPIS.....	23
ABSTRACT	24

1 ÚVOD

Doposud publikované práce na celém světě řešily jeden zásadní problém týkající se poškozování materiálu nátrubků (napojení potrubích větví) při směšování médií rozdílných parametrů, vyvolaných v důsledku přívodu chladného média do rozehráté větve hlavního potrubí či obráceně. Zkoumány byly děje od okamžiku náhlého vstupu média, průběhu procesu směšování až po opětovné ustálení teplotních polí v potrubí. Tyto studie byly prováděny pomocí numerických metod a v některých případech experimentálně ověřeny. Většina publikací byla věnována nátrubkům vyskytujících se v jaderné energetice, kde byl tento problém nejdříve identifikován.

Jak již bylo zmiňováno, zásadním problémem je náhlý vstup chladného (horkého) média do rozehráté (chladné) větve, které může být způsobeno jak technologií výroby, tak funkcí havarijních systémů. V důsledku ochlazování (ohřívání) stěn potrubí dochází k šokovým změnám teplot v povrchových vrstvách materiálu potrubí a k vyvolávání vysokých hodnot napětí. Ta se pak podílejí na čerpání životnosti součásti nebo vzniku únavových trhlin, které se dále šíří a mohou způsobit dosažení mezního stavu porušení potrubí.

Problém tepelného poškozování potrubí vlivem směšování proudů médií rozdílných teplot je značně komplikovanou záležitostí. V první řadě je nutné provést termo-hydraulické analýzy, jejichž hlavním cílem je určení rozložení teplotních polí v materiálu součástí. Simulace jsou prováděny pomocí CFD (Computational Fluid Dynamics). Teplotní pole vstupují do napěťových analýz jako okrajové podmínky a cílem je dosažení rozložení napjatosti v materiálu součástí. K těmto simulacím je využíváno FEM (Finite Element Method). Aby bylo možné provádět napěťové analýzy z výsledků termo-hydraulických analýz, je nutné využít vzájemného propojení CFD a FEM software. To je zvládnuto již řadu let a metoda vzájemných interakcí termo-hydraulických a strukturálních analýz je nazývána Fluid Structure Interaction (FSI). Díky neustálenému pokroku ve výpočetní technice je možné řešit řadu složitých problémů, které doposud nebylo možné řádně analyzovat.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

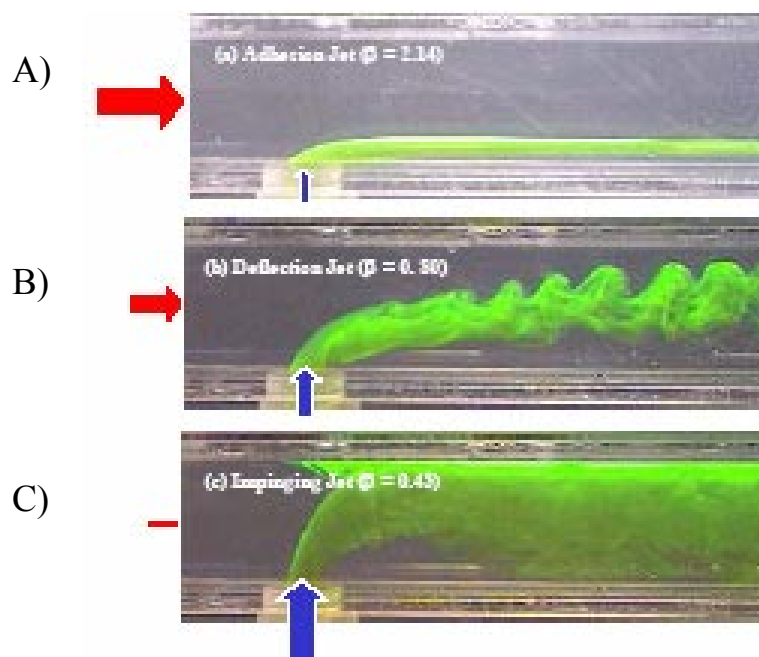
Nepříznivým účinkům teplotního ovlivňování při směšování proudů jsou vystaveny oblasti napojení chladné a horké potrubní větve, přičemž každá větev může mít různý průměr a rychlost proudění. Nejčastějším typem je napojení pod úhlem 90° , které je běžně označováno jako T-kus. Z důkladného rozboru získaných poznatků obsažených v literatuře [1, 2] vyplývá, že v inkriminované oblasti mísení dvou proudů médií o rozdílných teplotách a rychlostech proudění dochází ke značnému víření tekutiny, které způsobuje cyklické změny teploty na vnitřním povrchu stěny potrubí. Naproti tomu teplota venkovní stěny se mění jen pozvolna v důsledku tepelné setrvačnosti materiálu. Opakovaný průběh teplotního gradientu po tloušťce stěny potrubí generuje amplitudy napětí o velkém počtu cyklů zatížení v oblasti vysokocyklové únavy, které způsobují poškození vnitřního povrchu potrubí.

V práci [3] byl proveden podrobný rozbor proudění při směšování médií různých rychlostí a byly odvozeny obecné vztahy pro různé průměry potrubí a průtoky médií. Řešení skýtalo simulace pomocí numerických metod a ověření výsledků na experimentálním zařízení. Práce byla provedena pouze pro kapalné médium (vodu), proto nebude možné převzetí výsledků pro mísení plynných médií, ale bude převzat postup řešení.

2.1 MOŽNÉ TYPY PROUDĚNÍ PŘI SMĚŠOVÁNÍ PROUDŮ

Při vstupu chladného média do rozehřáté větve mohou nastat tři základní typy proudění [3], které jsou závislé na průměrech připojovaných potrubí a na průtoku média. Do jisté míry může být ovlivněno proudění geometrickým provedením napojení potrubí na hlavní větev.

Na obr. 2.1 jsou znázorněny základní typy proudění vstupujícího média v hlavním potrubí. V případě A) dochází ke strhávání proudu média z napojené větve hlavním proudem, v případě B) se proud ustálí uprostřed média v hlavní větvi a v případě C) dochází k narážení proudu média na protější stěnu hlavního potrubí.



Obr. 2.1 Možné typy proudění při mísení proudů

2.2 OBECNÉ ZÁVISLOSTI EXPERIMENTÁLNĚ OVĚŘENÉ

Při zpracování experimentu [3] byly zavedeny některé obecné funkce, aby bylo možné popsat všechny případy mísení přicházející v úvahu. Jednou z veličin je součinitel α , který představuje poměr průměrů hlavního potrubí a potrubí napojené větve

$$\alpha = \frac{D_m}{D_b}, \quad (2.1)$$

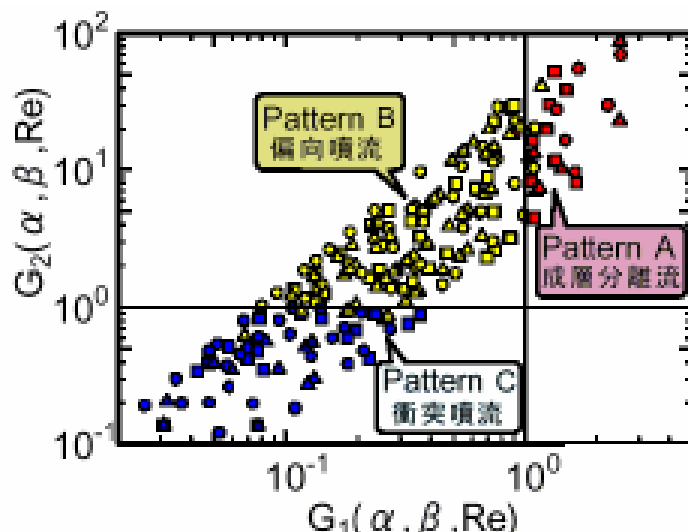
kde spodní index m označuje hlavní potrubí a index b napojenou větev. Součinitel β představuje poměr průtoku v hlavní větvi a ve větvi napojené

$$\beta = \frac{V_m}{V_b}. \quad (2.2)$$

Pomocí těchto součinitelů a Reynoldsova čísla lze určit, o který typ proudění se jedná. Na obr. 2.2 je znázorněno rozložení všech tří oblastí, které bylo určeno na základě experimentu. Příslušné vztahy experimentálně ověřených proměnných G_1 a G_2 jsou dány následujícími výrazy:

$$G_1 = 20,8 \alpha \beta^{1,26} Re^{-0,737} \quad (2.3)$$

$$G_2 = 2,01 \alpha \beta^{1,86} Re^{-0,138} \quad (2.4)$$



Obr. 2.2 Mapa proudění pro experiment provedený s vodou

2.3 PŘÍPADY ZÁVAŽNÝCH HAVÁRIÍ

V roce 1979 byly ve finské elektrárně Olkiluoto 1 a 2 nalezeny krátké trhliny v potrubí blízko napájecího nátrubku [4]. Během standardního provozu docházelo ke stálému směšování napájecí vody a vody ze systému pro výrobu páry v T-kusu. Rozdíl teplot (ΔT) byl standardně $100\text{ }^\circ\text{C}$, při najíždění a odstavování reaktoru $220\text{ }^\circ\text{C}$. Podobně byly nalezeny velmi krátké trhliny na parním potrubí při $\Delta T = 30\text{ }^\circ\text{C}$ za běžného provozu ($\Delta T = 85\text{ }^\circ\text{C}$ při zvýšeném výkonu). V roce 1979 došlo k porušení potrubí s následkem středně velkého úniku média opět na parním okruhu (po 4000 h provozu, $\Delta T = 150\text{ }^\circ\text{C}$).

Již v roce 1977 byla tepelná únava způsobená směšováním teplé a studené vody příčinou celé série porušení nátrubků nádob reaktorů v japonských elektrárnách

(Fukushima Daiichi 1 a 3, Shimane 1, Tsuruga 1, Hamaoka 1) [4]. V roce 1983 byla objevena netěsnost pláště cirkulačního čerpadla v Tsuruga 1.

Jedním z nejznámějších incidentů spojených s problematikou směšování proudů byl únik média ve francouzské elektrárně Civaux 1 (1998), kde byl zjištěn výskyt více trhlin na potrubí pro odvod zbytkového tepla [5]. Trhliny byly iniciovány na základě vysokocyklové tepelné únavy, jejíž příčinou bylo mísení médií v T-kusu při vysokém rozdílu teplot (až 150 °C) po více než 1500 hodinách provozu.

2.4 POSTIŽENÉ OBLASTI

K poškození dochází nejčastěji v materiálech svarových spojů nebo v základním materiálu poblíž svaru, zejména v tepelně ovlivněných oblastech, které zkřehly v průběhu svařování. V této kapitole bude věnována pozornost popisu příčin vzniku trhlin, jejich růstu a kvantifikaci nejvíce postižených oblastí. Jednotlivé problémy byly v pracích řešeny užitím numerických metod a výsledky verifikovány prostřednictvím experimentů.

Práce [6] byla zaměřena na vyskytující se trhliny na hranici základního a svarového materiálu, zejména poblíž podélného svaru kolena potrubí a oblasti obvodového svaru. Důležitou oblastí z hlediska tepelného poškození materiálu při mísení médií rozdílných teplot je oblast napojení přívodního potrubí na hlavní větev [7]. Ty jsou v některých případech vyrobeny kováním s ostrou přechodovou hranou, v které dochází k vysokým koncentracím napětí a tudíž k velmi častým výskytům iniciací trhlin. Dalším možným zhotovením napojení je pouhým svařením potrubí, což je mnohem nebezpečnější z hlediska ovlivnění materiálu v oblasti svaru a mechanických vlastností svařovaných materiálů. V práci [3] bylo poukázáno na skutečnost, že k výskytu trhlin dochází taktéž na hranici ovlivněného a neovlivněného materiálu médiem. Iniciace trhlin se objevují na vnitřním povrchu potrubí.

Závěrem této kapitoly lze tedy konstatovat, že k místům častých poruch dochází na rozhraní dvou materiálů (ve svarových spojkách a jejich okolí), na rozhraní horkého a chladného média, na rozhraní turbulentního a laminárního proudění a v místě tvarové změny [1].

3 CÍL PRÁCE

Disertační práce byla zaměřena na řešení otázky tepelného poškození nátrubků vyskytujících se v průmyslové praxi, v kterých dochází ke směšování médií rozdílných teplot a rychlostí. Jelikož existuje nepřehledné množství nátrubků, je pozornost věnována pouze nátrubkům s kolmým napojením a jejich různým geometrickým provedením. Konkrétní případy analyzovaných nátrubků byly značně závislé na dostupnosti jejich geometrie a provozních podmínek.

Jelikož není možné při numerických analýzách zohlednění konkrétních pracovních látek a jejich vliv na poškození materiálu nátrubků, budou simulace prováděny pouze pro kapalnou a plynnou látku, kdy kapalným médiem bude voda

a plynným vzduch. Pro obě látky bude užito tabelovaných hodnot (ρ , λ , c_p , ν), které jsou součástí databáze použitého CFD software. Pro zohlednění stlačitelnosti plynného média budou vypočteny hodnoty termofyzikálních vlastností. Korozní vliv směřovaných médií nebude v této práci zohledněn.

Cílem práce je provést analýzy různých případů směřování médií v několika geometrických provedeních nátrubků pro kapalná i plynná média. Výsledky analýz pomohou více porozumět probíhajícím dějům a bude znám vliv konkrétních parametrů na poškozování materiálu nátrubků. Snahou bude určení přijatelné teplotní difference směřovaných proudů, která má z hlediska poškozování materiálu nátrubků zásadní význam. Hodnota difference je značně závislá na rychlostech proudění, druhu směřovaných médií (plynné či kapalně) a v neposlední řadě na geometrickém provedení nátrubku. Všechny tyto aspekty budou brány v úvahu a podrobeny řádným rozborům, aby získané výsledky měly význam pro průmyslovou praxi a bylo možné podle nich navrhovat či upravovat již stávající zařízení s vyšší bezpečností. Analyzován bude také vliv materiálu potrubí na jeho poškozování.

4 POUŽITÝ POSTUP ŘEŠENÍ PROBLÉMU

Pro dva konkrétní případy napojení potrubí a jejich provozní podmínky byly vytvořeny výpočtové modely pro získání rozložení teplotních a napěťových polí. Díky měření jednoho z nátrubků termovizí a druhého termočlánky bylo možné verifikovat výsledky a výpočtové modely upravit tak, aby bylo dosahováno uspokojivé shody výsledků numerických analýz s experimentem. Na základě takto ověřených výpočtových modelů byly tvořeny řady dalších geometrických variant a důkladně analyzovány vlivy provozních podmínek na poškozování potrubí.

Při vytváření výpočtových modelů byly dle získaných výkresových dokumentací konkrétních druhů nátrubků zhotovovány 3D modely napojení potrubí. Ty byly vytvářeny v programu SolidWorks. Pro termo-hydraulické analýzy bylo nutné modely nátrubků vyplnit pracovním médiem. K tomuto byl využíván software Workbench, který je součástí základního balíku software CFX. Výpočtová síť pracovního média byla zhotovována výhradně z tetraedrických a prismatických prvků (nahrazujících mezní vrstvu), neboť nebyl dostupný pokročilejší meshovací program. Před generací sítě byly vybrány oblasti, na které byly aplikovány okrajové podmínky, aby pak v samotném programu byla možná jejich snadnější selekce.

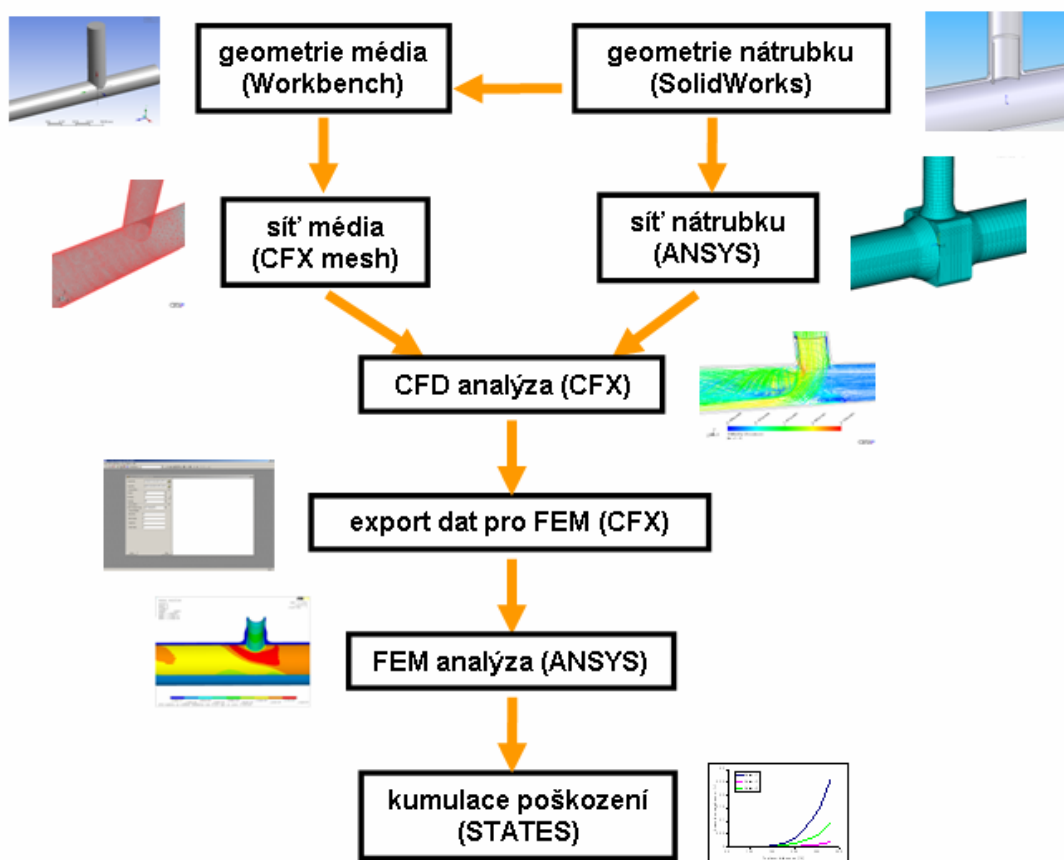
Síť potrubí byla tvořena přímo v programu ANSYS pomocí dělení objemů, čímž bylo možné dosáhnout kvalitnější výpočtové sítě tvořené šestistěnnými elementy. Taktéž bylo nutné pro další práce selektovat skupiny uzlů pro možnost zadávání okrajových podmínek. Model byl exportován ve formátu cdb (textový soubor) a společně se sítí média importován do programu CFX. Zde byly oba modely vzájemně provázány a zadány veškeré okrajové podmínky, tedy rychlosti, teploty a tlaky. Bylo nutné provést nastavení výpočtu tak, aby bylo možné sledovat změny v průběhu směřování proudů médií. Simulace bylo nutné analyzovat nestacionárně,

tedy časově proměnné a informace v jednotlivých okamžicích byly průběžně ukládány.

Termo-hydraulickou analýzou bylo získáno rozložení teplotních a rychlostních polí, která jsou velmi důležitá pro další posouzení z hlediska pevnosti. Hodnoty teplot ve všech uzlových bodech výpočtového modelu potrubí a tlaky na vnitřní stěnu byly vyexportovány pro vybrané časové okamžiky ve formě textových souborů (*.cdb), aby bylo možné provést napěťové analýzy. Na tentýž model, který byl použit pro CFD analýzu, byly aplikovány exportované okrajové podmínky (teplota, tlak). Dále bylo potrubí v jednom z průřezů pevně uchyceno a na další dva konce zadáno osové zatížení vyvolané vnitřním přetlakem. Jelikož nebyl řešen konkrétní případ, u kterého jsou známi silové a momentové účinky na jednotlivé konce potrubí, nebylo již nic dalšího zadáváno.

Z FEM analýzy byla získána rozložení napětí v materiálu potrubí pro konkrétní časové okamžiky. Díky tomu bylo možné určit nejvíce zatížená místa a ta podrobit kontrole na únavu. Zátěžné cykly byly stanoveny z rozboru časových průběhů změn napětí. Počítána byla vždy hodnota kumulace poškození pro jeden děj směšování proudů médií rozdílných parametrů.

Na obr. 4.1 je možné vidět celkové schéma postupu řešení termo-hydraulických analýz s následnými napěťovými analýzami a posouzení na nízkocyklovou únavu. Tyto postupy jsou ve světě hojně využívány a jsou aplikovány na řady průmyslových problémů, které nebylo možné doposud důkladně zanalyzovat.



Obr. 4.1 Schéma výpočtového postupu

5 PODROBNOSTI K ŘEŠENÍ NUMERICKÝMI METODAMI

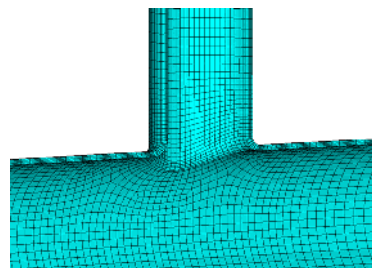
5.1 ANALYZOVANÁ GEOMETRICKÁ PROVEDENÍ

Počet geometricky odlišných provedení napojení potrubí bylo do jisté míry ovlivněno dostupností výkresových dokumentací, jejichž získání nebylo vůbec snadné. V analyzovaných případech se nacházejí reálné případy nátrubků zejména z chemického, ale i z energetického odvětví průmyslu. Jejich geometrii je možné rozčlenit na jednoduché (základní), kdy se jedná pouze o napojení dvou potrubí a na složitější, kdy je v místě napojení použito přechodového prvku, který svým provedením snižuje špičky napětí nebo má význam z hlediska technologie procesu.

V disertační práci byly řešeny následující geometrie a jejich různé modifikace:

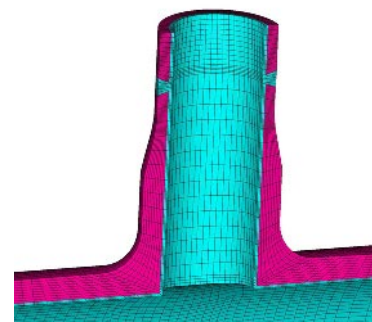
- Jednoduché napojení potrubí

Jedná se nejjednodušší způsob napojení potrubí, kdy v místě svarového spoje jsou hrany opracovány tak, aby bylo možné provedení svarového spoje ve tvaru V (U). Jelikož nejsou potrubí v okolí místa napojení nikterak vyztužena, lze usuzovat, že je tento způsob napojení potrubí určen pouze pro případy nižších pracovních tlaků.



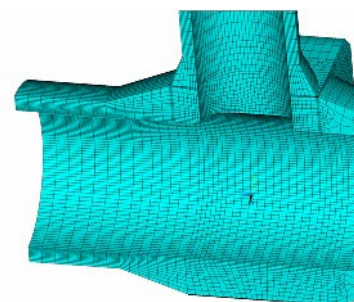
- Jednoduché napojení potrubí s antikoročním návarem či vložkou

Tento způsob je výrobně podstatně náročnější, neboť potrubí musí být opatřeno antikoročním návarem (světlo modrá barva) nebo vložkou z austenitického materiálu. Nejprve se vytvoří ochranný návar, po té jsou svařeny hlavní části potrubí feritickým materiálem (červená barva) a jako poslední se dovaří antikorozní vrstva, aby byla celistvá a nepřerušovaná. Navazující potrubí je pak s nátrubkem svařeno antikorozním svarem, aby nedošlo k narušení ochranné vrstvy. Jelikož je nátrubek vyztužen, lze usuzovat, že je určen pro vyšší pracovní tlaky a do agresivního prostředí.



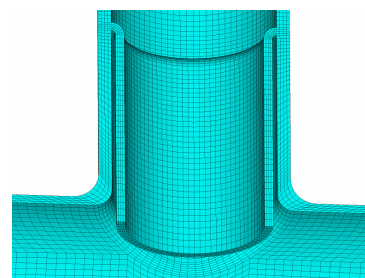
- Napojení potrubí prostřednictvím kovaného bloku

Spojení potrubí užitím kovaného bloku je speciálním případem nátrubků pro velmi vysoké tlaky, který není běžně používán. Napojení potrubí je v krátké vzdálenosti od kuželových výstupů z bloku. Svařované hrany jsou sraženy pro vytvoření svarového spoje ve tvaru U nebo V. Hrana, která tvoří kolmé napojení potrubí, není zaoblená, což lze přisuzovat technologii výroby výkovku.



- Napojení potrubí prostřednictvím T-kusu s košilkou

Posledním analyzovaným případem byl nátrubek, který měl střední část vytvořenou jako celek a na ní byl shora navařen prstenec s košilkou. Až k této vzniklé sestavě je možné připojit další potrubí. Tento typ nátrubků je určen pro vyšší pracovní přetlaky.



5.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY PROUDĚNÍ

Při přípravě složeného výpočtového modelu pro termo-hydraulické analýzy bylo zásadní vzájemné provázání obou sítí, aby byly předávány informace o změnách teplot a působících tlacích na stykových plochách. Dalšími okrajovými podmínkami bylo zadání vstupních rychlostí média a jejich teplot. Na výstupu z potrubí byl zadán nulový tlak, což znamená, že hodnoty teplot, rychlostí a tlaků budou dopočítávány ze vstupních hodnot. Jelikož byla modelována pouze polovina napojení potrubí, bylo nutné zadat na plochu řezu (média i potrubí) podmínku symetrie. Dále byl použit model turbulence rozšířený RNG k- ϵ model, z hlediska výměny tepla byl zadán zákon zachování energie a k výměně tepla s okolním docházet nebude, neboť jsou veškeré řešené případy tepelně izolovány. Aby bylo možné sledovat průběhy změn při směšování proudů a určovat, pro libovolné časové okamžiky, rozložení napjatosti v potrubí, byly úlohy počítány nestacionárně. Bylo však nutné správně nastavit velikost časových kroků.

5.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY NAPĚŤOVÝCH ANALÝZ

Zadávané okrajové podmínky při multifield analýzách byl vnitřní tlak působící na vnitřní stěnu, teplota v objemu materiálu potrubí a osová zatížení potrubí. Dále byl jeden z konců hlavního potrubí uchycen tak, že bylo zamezeno posuvu ve směru osy potrubí a dovoleny posuvy v radiálním a axiálním směru. Jelikož bylo velmi často využíváno podélné osy symetrie, byla na vzniklou plochu zadána podmínka nulového posuvu ve směru osy kolmé na rovinu symetrie.

5.4 MULTIFIELD ANALÝZA

Je založena na sloučení několika textových souborů do jediného (výsledkového souboru). Velmi důležitý je postup načítání jednotlivých souborů a jejich navazování na výpočtový model, který musí být taktéž načten jako textový soubor. Po jeho načtení jsou zadána materiálová data, uchycení a zatížení konců potrubí. Dalším textovým souborem, který je načten, jsou údaje o tlacích působících na vnitřní povrch potrubí. Toto je realizováno vytvořením plošných elementů na daném povrchu a jejich zatížením, aby prostřednictvím elementů bylo možné přenést zatížení do uzlových bodů výpočtového modelu. Aby mohl být realizován přenos zatížení, musela být sjednocena vnitřní plocha modelu s načtenou

do jediné. Této ploše byla přiřazena minimální tloušťka a odpovídající materiálové vlastnosti.

Při načítání souboru s daty o teplotním rozložení v materiálu potrubí je nutné přiřadit tomuto vzniklému objemu materiálová data a sloučit je s výpočtovým modelem, aby byl zajištěn přenos údajů o zatížení teplotami. V řešiči programu je nutné stanovit, které typy elementů představují objemové zatížení (teplotou) a které povrchové (tlakem). Dále je nutné upřesnit, který ze souborů je hlavním (výpočtový model) a který externím (zatížení tlakem a teplotou). Aby byl zřejmý postup řešení, je nutné nastavit vzájemné provázání, tedy nejprve bude aplikováno zatížení tlakem (plošné), po té teplotou (objemové) a výsledným souborem bude soubor se strukturálními výsledky.

5.5 ANALYZOVANÉ PŘÍPADY

V disertační práci bylo analyzováno několik vlivů provozních parametrů na charakter proudění nebo poškození potrubí. Zejména se jednalo o vliv světlosti potrubí na charakter proudění. Dále byl analyzován vliv rychlosti směšovaných proudů médií, vliv geometrie provedení napojení, vliv teplotní difference proudů a vliv použitého materiálu na poškození potrubí. Veškeré tyto analyzované případy budou více rozebrány v následující kapitole.

6 SOUHRN ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ A NAVRHOVANÁ DOPORUČENÍ

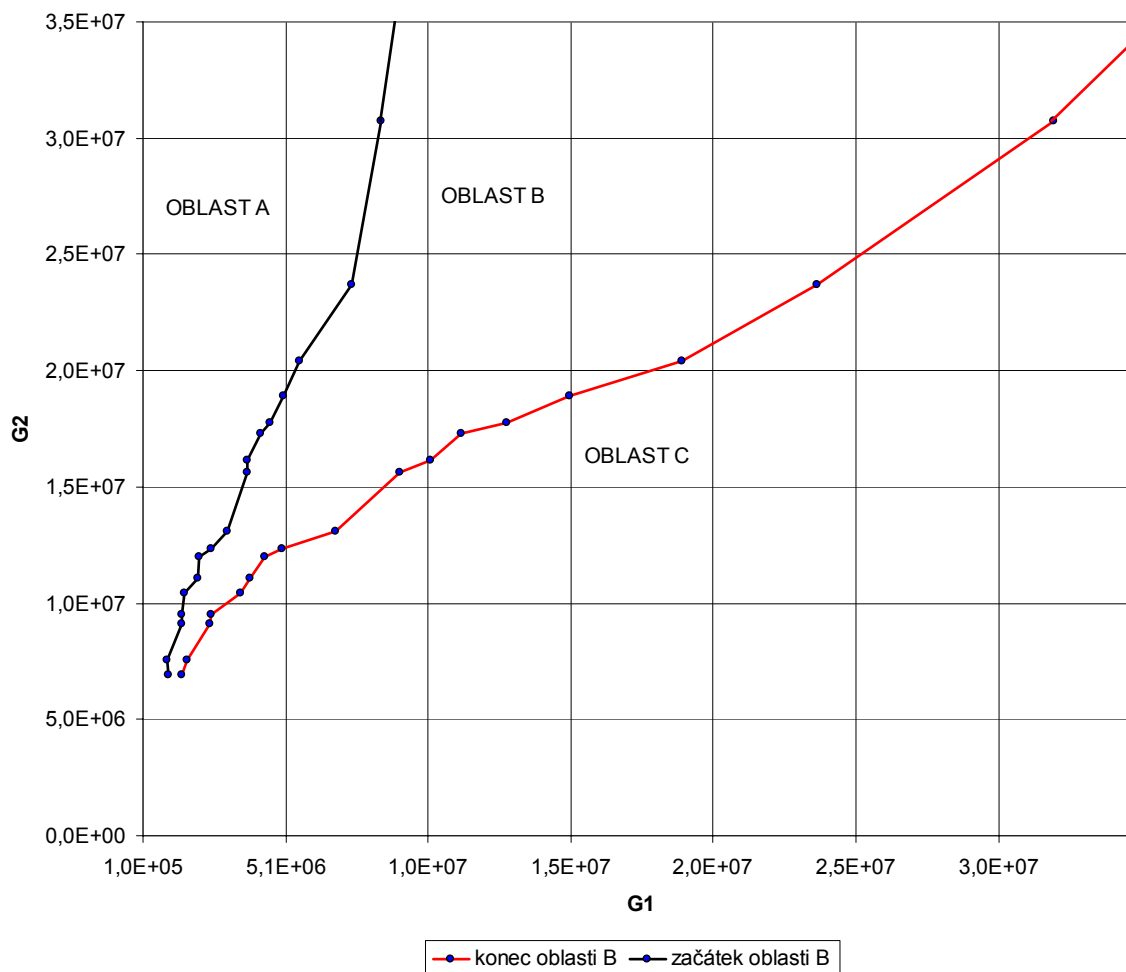
6.1 ANALÝZA VLIVU SVĚTLOSTI POTRUBÍ NA CHARAKTER PROUDĚNÍ

Cílem provedených analýz bylo stanovení grafické závislosti velikosti potrubí a provozních podmínek na charakteru směšování proudů médií. Při analýzách byly měněny oba součinitelé α i β , což tedy představuje velký počet analyzovaných případů. Vnitřní průměr hlavního potrubí byl měněn v rozmezí od 200 do 300 mm a průměr napojené větve v rozmezí od 100 do 270 mm. Rychlost v hlavním potrubí byla ponechána konstantní 5 m/s a v napojené větvi byla měněna od 2 do 30 m/s. Jako pracovní médium byl zvolen suchý vzduch o tlaku 17,8 MPa. Při analýzách bylo užito jednoduchého napojení potrubí.

Provedené analýzy byly vyhodnoceny prostřednictvím grafické závislosti dle vzoru z kapitoly 2.2. Jelikož nebylo možné vytvořit hranice jednotlivých oblastí pomocí svislých a vodorovných čar, byl vytvořen detailnější graf (obr. 6.1), který znázorňuje jednotlivé oblasti prostřednictvím přímkových spojnic hraničních bodů. Z následujícího grafického vyjádření bude možné snadno určit, o jaký typ směšování proudů se jedná a tím známy ovlivňované oblasti, aniž by byly prováděny jakékoli numerické simulace.

V některé z následujících kapitol bude proveden rozbor nejvíce nebezpečných oblastí potrubí při různých rozložení teplotních polí. Pokud jsou tato pole konstantní

a dochází k jejich pozvolnému vyvolání, nehrozí nebezpečí ze strany únavového poškození materiálu potrubí. Pokud však dochází k častým nebo k šokovým změnám, hrozí výraznější poškození v důsledku cyklického zatěžování.



Obr. 6.1 Grafická závislost součinitelů G_1 a G_2

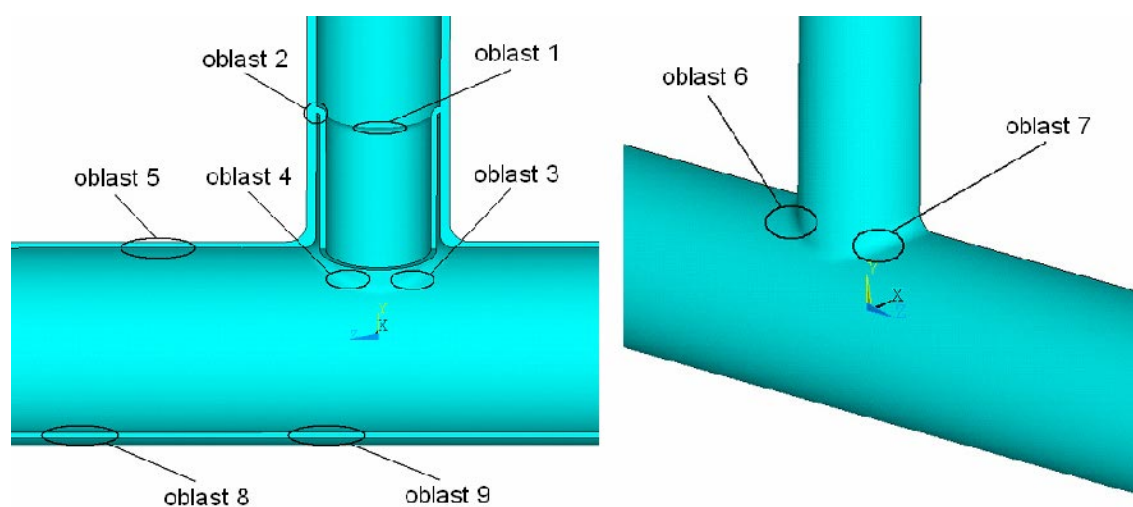
6.2 ANALÝZA VLIVU RYCHLOSTI PROUDŮ MÉDIÍ NA POŠKOZENÍ POTRUBÍ

Vliv rychlosti proudů byl důkladně zanalyzován v předchozí kapitole, nebyla však posuzována napjatost v potrubí a určována míra kumulace poškození, která je důležitá z hlediska monitorování životnosti takto provozovaných potrubních větví. Analyzováno bylo napojení potrubí prostřednictvím T-kusu s košílkou. Určovány byly hodnoty poměrů rychlostí proudů vzduchu, při kterých dochází ke změně charakteru směšování (viz kapitola 6.1) a tím k tepelnému ovlivňování odlišných částí potrubí. Rychlost proudění v hlavním potrubí byla zvolena 5 m/s a teplota 300 °C. V napojeném potrubí byla rychlost měněna v rozmezí 0,7 až 23 m/s a teplota 0 °C. Termo-fyzikální vlastnosti reálného plynu pro daný tlak byly zadány, neboť používaný software obsahuje pouze databázi některých látek v ideálním stavu. Konstantními veličinami při termo-hydraulických analýzách byla teplotní diference směšovaných proudů ($\Delta T = 300$ °C) a poměr vnitřních průměrů potrubí ($\alpha = 1,54$).

Měněn byl pouze poměr průtoků β od hodnoty 0,26 do 8,13 a zjišťována jeho závislost na typu proudění při směšování proudů

Nejvíce zatíženým místem byla zaoblená část košilky poblíž místa napojení na vedlejší potrubí. Podstatně nižších (zhruba polovičních) hodnot bylo dosahováno v místě přechodu potrubí, v horní a spodní ochlazované části hlavního potrubí a v napojeném potrubí od místa přivaření košilky směrem vzhůru. V těchto místech byla napětí zhruba 400 MPa.

U těchto oblastí a několika vytipovaných (viz obr. 6.2) byly vyhodnoceny časové průběhy napětí a stanoveny zátěžné cykly, které byly použity při určování velikostí kumulací poškození. Nejvyšších hodnot bylo dosahováno v oblastech 1, 2, 3 a to v jednotkách procent. V ostatních oblastech byly hodnoty kumulací řádově nižší (viz tab 6.1 a 6.2).



Obr. 6.2 Posuzované oblasti

Oblast	1	2	3	4	6	7	8
D [-]	0,0078	0,0032	0,0061	0,0009	0,0001	0,0003	-

Tab. 6.1 Hodnoty kumulace poškození pro rychlost média v napojeném potrubí 2,3 m/s (hraniční hodnota)

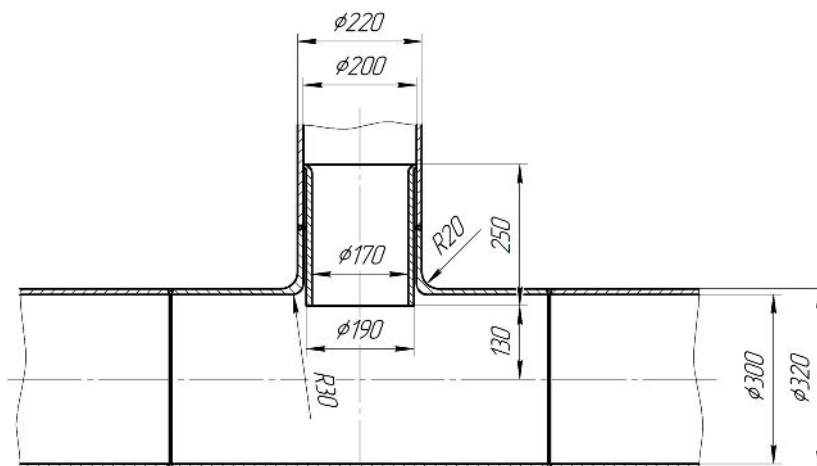
Oblast	1	2	3	4	6	7	8
D [-]	0,0076	0,0001	0,0001	0,00003	-	0,0004	0,0001

Tab. 6.2 Hodnoty kumulace poškození pro rychlost média v napojeném potrubí 6,7 m/s (hraniční hodnota)

6.3 ANALÝZA VLIVU GEOMETRIE NAPOJENÍ POTRUBÍ NA POŠKOZENÍ POTRUBÍ

Vhodná úprava nebo návrh nové geometrie provedení napojení potrubí má zásadní vliv z hlediska poškozování a životnosti nátrubků. Hlavní snahou je eliminovat tepelné ovlivňování míst napojení potrubí (svarové spoje a tepelně

ovlivněné oblasti), které jsou nejvíce nebezpečné. Při komplexním rozboru bylo vycházeno z již dříve uvedených několika základních geometrických variant (kap. 5.1), kdy způsob spojení potrubí prostřednictvím T-kusu s vložkou byl modifikován ve dvou variantách. Aby bylo možné jednotlivé geometrické varianty porovnat, byly použity shodné světlosti potrubí napojených větví a totožné provozní podmínky. Na následujícím obrázku je znázorněna jedna z analyzovaných variant.

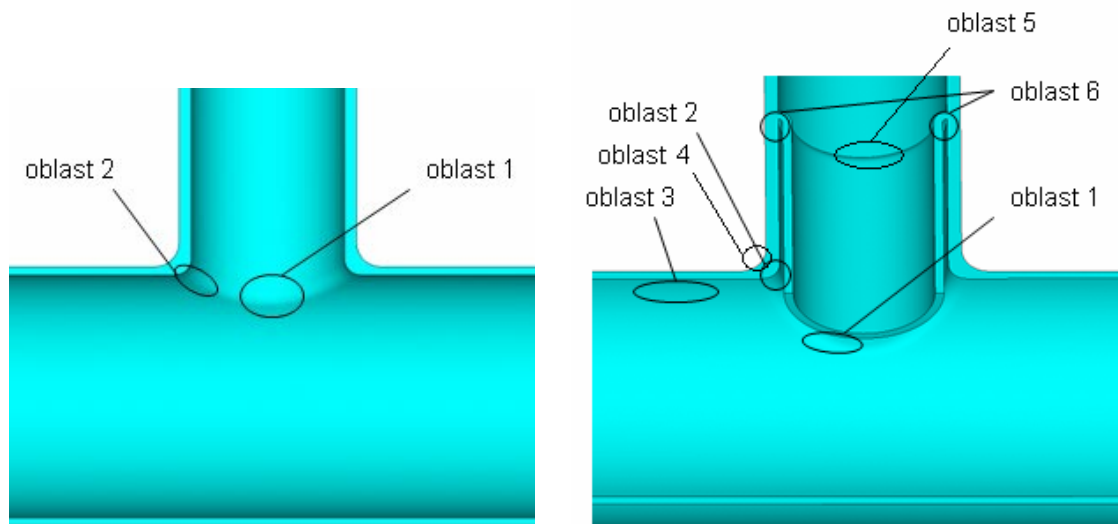


Obr. 6.3 Geometrické provedení varianty 2

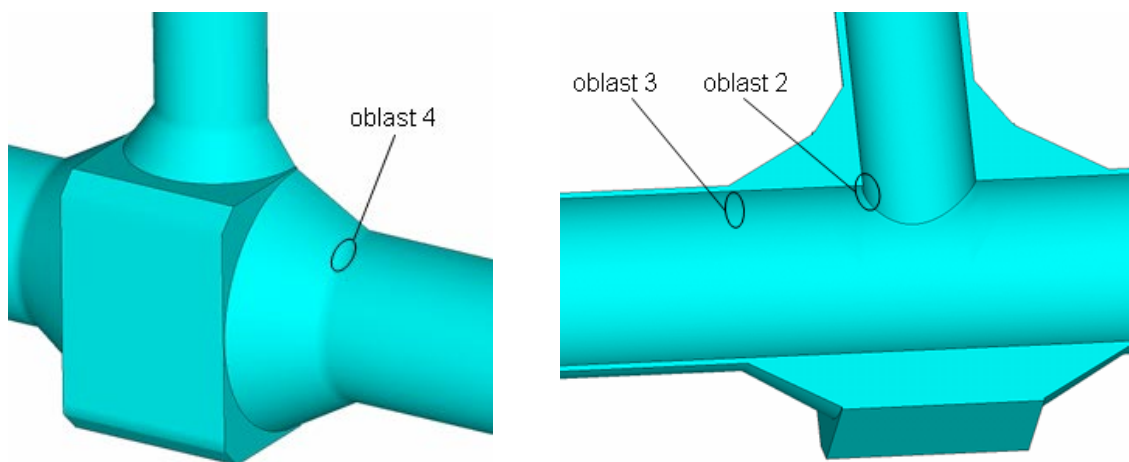
Geometrická varianta 4 je modifikací varianty 2, pouze má konec košilky vybrán rádiusem 130 mm, čímž bude snížena tlaková ztráta. Varianta 5 vznikla přivařením pásu z austenitické oceli k vnější straně vložky varianty 4.

V hlavním potrubí proudila pracovní látka rychlostí 5 m/s o teplotě 400 °C. V napojené větvi rychlostí 1,4 m/s o teplotě 20 °C. Dle zadaných hodnot rychlostí se jednalo o variantu směšování proudů A, tedy teplotně ovlivňována byla horní část hlavního potrubí. Pracovním médiem byl vzduch o tlaku 17,8 MPa.

Nejvíce zatíženými místy jsou oblasti napojení potrubí, ovlivněné části hlavního potrubí proudem chladného média, zaoblení košilky u místa napojení na potrubí a u varianty s kovaným blokem ostrá přechodová hrana. Veškeré oblasti jsou znázorněny na obr. 6.4 a 6.5. U variant 4 a 5 je oblast 3 více vzdálena od místa napojení potrubí.



Obr. 6.4 Nejvíce zatěžované oblasti, vlevo – varianta 1, vpravo – varianta 2, 4, 5



Obr. 6.5 Nejvíce zatěžované oblasti – varianta 3

Ze získaných výsledků kumulací poškození obsažených v tab. 6.3 je zřejmé, že jako nejvhodnější se ukázala poslední varianta, a to přidání lemu na spodní část košilky. Díky košilce jsou minimalizována poškození v oblasti napojení potrubí a přidáním lemu je do jisté míry eliminováno ovlivňování hlavního potrubí. Největší kumulace poškození (1,45%) bylo dosaženo na ostré hraně kovaného bloku, který slouží k vzájemnému napojení potrubních sítí.

D [-] / oblast	oblast 1	oblast 2	oblast 3	oblast 4	oblast 5	oblast 6
varianta 1	0,0092	0,0037	-	-	-	-
varianta 2	0,0059	0,0019	0,0012	0,0020	-	0,0034
varianta 3	-	0,0145	0,0054	0,0062	-	-
varianta 4	-	0,0002	0,0016	0,0001	0,0012	0,0042
varianta 5	-	-	0,0009	-	0,0013	0,0041

Tab. 6.3 Kumulace poškození pro jednotlivé varianty

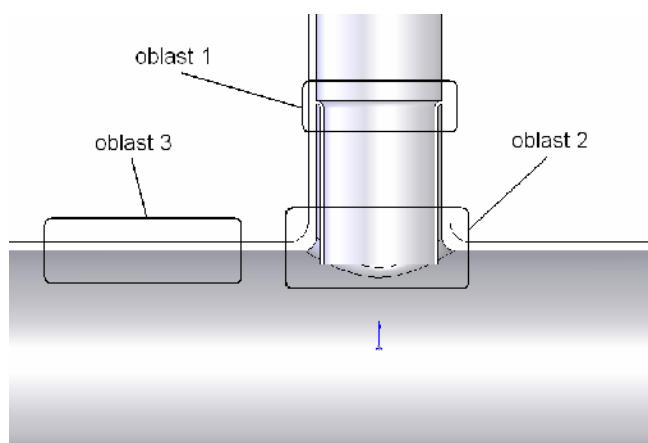
6.4 ANALÝZA VLIVU TEPLOTNÍ DIFERENCE NA POŠKOZENÍ POTRUBÍ

Velikost teplotní difference směšovaných proudů je jedním z nejvýznamnějších aspektů mající zásadní vliv na poškozování materiálu potrubí. Provozní teploty jsou však závislé na výrobních technologiích konkrétních jednotek v průmyslové praxi a není možné je výrazně měnit.

6.4.1 Směšování plynných médií v nátrubku s košilkou

Analyzovanou geometrií byl nátrubek s košilkou (viz obr. 6.3). V hlavním potrubí byla rychlost pracovní látky 5 m/s a konstantní teplota 0 °C. V napojené větvi proudilo médium rychlostí 1,4 m/s a teplota byla měněna v rozmezí od 50 do 500 °C, vždy s konstantním teplotním krokem jednotlivých simulací 50 °C. Jednalo se o variantu směšování proudů A. Pracovním médiem byl vzduch o tlaku 17,8 MPa.

Z rozborů napjatosti potrubí v průběhu procesu ochlazování byly určeny tři nejvíce zatěžované oblasti (viz obr. 6.6).



Obr. 6.6 Nejvíce zatěžované oblasti

Určené kumulace poškození jsou uvedeny v tab. 6.4 a byly získány shodným způsobem jako v předchozích kapitolách. Z výsledků je zřejmé, že velikost teplotní difference má zásadní (řádový) vliv na poškozování materiálu potrubí. V nejvíce zatížených oblastech je kumulace poškození při maximální teplotní diferencí (500 °C) v desítkách procent, což je nepřijatelné vzhledem k neznalosti počtu cyklů opakování procesů vstřikování, v tomto případě, horkého média do chladné větve.

Teplota / D [-]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
oblast 1	0,0020	0,0035	0,0043	0,0055	0,0063	0,0075	0,0091	0,0106	0,0130	0,0158
oblast 2	0,0010	0,0014	0,0019	0,0027	0,0032	0,0041	0,0053	0,0068	0,0091	0,0121
oblast 3	0,0003	0,0007	0,0014	0,0018	0,0027	0,0049	0,0084	0,0134	0,0201	0,0272

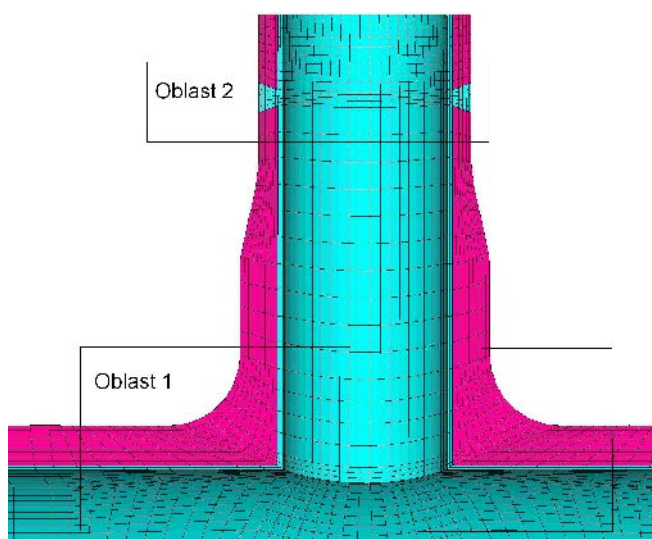
Tab. 6.4 Kumulace poškození pro jednotlivé varianty

6.4.2 Směšování kapalných médií v nátrubku s antikoročním návarem

Při analýze vlivu teplotní difference byla použita geometrie znázorněná v kapitole 5.1. Jedná se o normální způsob napojení vedlejšího potrubí, které je opatřeno vložkou a hlavní potrubí vnitřním antikoročním návarem.

Okrajovými podmínkami byla rychlost proudu pracovní látky v hlavním potrubí 8,3 m/s a teplota byla měněna v rozmezí od 70 do 320 °C, vždy s konstantním teplotním krokem 50 °C. V napojené větvi proudilo médium rychlostí 3,7 m/s o konstantní teplotě média 20 °C. Z poměrů rychlostí je zřejmé, že se jedná o variantu směšování A. Pracovním médiem byla voda o tlaku 2,36 MPa.

Z rozborů napjatosti potrubí v průběhu procesu ochlazování byly zjištěny dvě nejvíce zatěžované oblasti (viz obr. 6.7).



Obr. 6.7 Nejvíce zatěžované oblasti

Pro nejvíce zatížené oblasti byly stanoveny kumulace poškození (viz tab. 6.5). Použité podmínky byly shodné s předchozími kapitolami. Nejvíce zatíženým místem pro všechny řešené teplotní difference proudů je oblast 1, kde byla zjištěna pro teplotní rozdíl 300 °C kumulace poškození 2,5 %. Tato vysoká hodnota se vyskytuje v místě austenitického návaru, který je velmi kritickým místem. Rozdíl mezi poškozením při minimálním a maximálním teplotním rozdílu je vyšší než jeden řád.

Teplota / D [-]	50	100	150	200	250	300
oblast 1	-	0,0001	0,0004	0,0023	0,0102	0,0258
oblast 2	-	-	0,002	0,0009	0,0037	0,0098

Tab. 6.5 Kumulace poškození pro jednotlivé varianty

Z určených kumulací obou případů je zřejmé, že za přijatelnou teplotní diferencí lze považovat 100 °C. Tento závěr by však bylo nutné ověřit v průmyslové praxi.

6.5 ANALÝZA VLIVU MATERIÁLU NA POŠKOZENÍ POTRUBÍ

Předmětem analýzy bylo zjištění rozdílu napjatosti při užití feritického a austenitického materiálu potrubí. Rozbor byl prováděn u třech základních geometrií a to u normálního napojení potrubí, napojení pomocí kovaného bloku a napojení potrubí s použitím vnitřní košilky. Veškeré rozměry a okrajové podmínky byly převzaty z kapitoly 6.3. Použitým médiem byla voda i vzduch.

Před porovnáním výsledků analýz obou materiálů je nutno připomenout, že použitý austenitický materiál má zhruba 1,5krát vyšší hodnotu součinitele roztažnosti oproti feritické oceli. Z hlediska vedení tepla má naopak hodnotu součinitele 2,5krát nižší. Modul pružnosti v tahu austenitického materiálu je nepatrně nižší.

Důkladným rozbohem bylo zjištěno, že hodnoty napětí jsou pro potrubí z austenitického materiálu vyšší u obou médií. Nárůsty jsou patrné pouze v průběhu ustalování teplotních polí, dále jsou rozdíly pouze minimální. Na počátku děje není téměř žádný rozdíl, postupně se rozdíl zvyšuje a po dosažení maximální hodnoty napětí plynule klesá. U kapalných médií dosahuje maximální rozdíl zhruba 20 % a ke stejným napětím dochází po okamžiku 100 s. Plynná média se projevují nižšími hodnotami rozdílu napětí (zhruba 15 %). K vyrovnání hodnot však dojde po okamžiku 200 s. Tedy z hlediska tepelného poškozování jsou na tom hůře potrubí vyrobená z austenitické oceli.

7 ZÁVĚR

Disertační práce byla zaměřena na podrobnou analýzu tepelného poškozování materiálu napojení potrubí, kde dochází ke směšování horkých a chladných proudů médií rozdílných teplot a rychlostí. Pozornost byla věnována stanovení vlivu difference teplot, rychlostí, vlivu geometrie provedení napojení a vlivu použitého materiálu. Zároveň zde byla identifikována nejvíce nebezpečná místa, která byla předmětem posouzení na únavu.

Díky důkladným analýzám byla určena přijatelná teplotní difference směšovaných proudů, která byla stanovena na 100 °C. Jestliže jsou hodnoty teplotních rozdílů proudů médií nižší, lze považovat kumulaci poškozování za nulovou. Tento závěr by bylo nutné ověřit v průmyslové praxi, neboť není známa přípustná míra poškozování pro jeden případ vstřiku média do potrubí.

V kapitole 2.1 byl uveden postup stanovení základních veličin pro možnost určení charakteru směšování médií. Na obr. 2.2 byla znázorněna grafická závislost proměnných G_1 a G_2 pro kapalně médium (vodu). Obdobně v kapitole 6.1 byla uvedena grafická závislost pro plynné médium (vzduch), která byla získána na základě numerických simulací (obr. 6.1). Jelikož fyzikální vlastnosti kapalných a plynných médií jsou značně rozdílné, bylo nutné hodnoty proměnných pro případ plynného média vynásobit hodnotou 10^6 .

Vliv rychlostí směšovaných proudů byl taktéž řádně podroben důkladné analýze a bylo zjištěno, že nejvhodnějším charakterem směšování proudů je typ B, kdy

nedochází k ovlivňování hlavního potrubí. Pro účely určování byl vytvořen jednoduchý program, který snadno, bez použití numerických simulací, určí typ směšování proudů, což může významně pomoci průmyslové praxi. Doposud obsahuje data pouze pro kapalně médium – vodu a plynně médium – vzduch. V budoucnu se počítá s doplněním databáze i o nejvíce využívané látky v průmyslové praxi a o kombinované směšování kapalin a plynů.

Nejvhodnějším způsobem napojení potrubí je užití vnitřní košilky, díky které lze odstranit nejvíce poškozenou oblast v místě spojení potrubí. Nejvíce nebezpečnou se pak stane oblast přivaření košilky k potrubí, ale hodnoty kumulací poškození jsou podstatně nižší.

Pro snížení poškození hlavního potrubí (pro typ proudění A) byla navržena geometrie, která je modifikací varianty napojení potrubí s vnitřní košilkou. Díky ní je možné významně ovlivnit charakter proudění při směšování proudů a tím i rozložení teplotních polí, což má za následek vyvolání nižších hodnot napětí.

Dále bylo zjištěno, že potrubí z austenitických materiálů jsou z hlediska tepelného poškození více poškozována. Jako nejméně vhodné napojení potrubí se ukázal případ nátrubku s antikoročním návarem, kde se v místě návaru vyskytovaly nejvyšší hodnoty kumulací poškození.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FAIDY, C. Thermal Fatigue in Nuclear Power Plants French Experience and On-going Program. In *3rd International Conference on Fatigue of Reactor Components (MRP-151)*, Seville, Spain, 3. – 6. october 2004. [CD-ROM]. 2004.
- [2] BENHAMADOUCHE, S., SAKI, M., PÉNIGUEL, C., STÉPHAN, J. M. Presentation of a New Methodology of Chained Computations using Instationary 3D Approaches for the Determination of Thermal Fatigue in a T-Junction of a PWR Nuclear Plant, In *17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17)*, Prague, 17. – 22. august 2003. [CD-ROM]. 2003. ISBN 80-214-2413-3
- [3] MURAMATSU, T. Generation Possibilities of Lower Frequency Components in Fluid Temperature Fluctuations Related to Thermal Striping Phenomena, In *17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17)*, Prague, 17. – 22. august 2003. [CD-ROM]. 2003. ISBN 80-214-2413-3
- [4] CHAPULIONT, S., PAYEN, T. Proposed under the Auspice of the OECD/NEA/CSNI/ Integrity and Ageing Working Group, In *OECD Benchmark on ThermalFatigue*, Paris, France: 2004. [CD-ROM]
- [5] FAIDY, C., LE Courtois, T., DE FRAGUIER, E., DECHELOTTE, J., LEDUFF, J. A., LEFRANCOIS, A. Thermal Fatigue in French RHR system, In *International Conference on Fatigue of Reactor Components*, Napa, CA: 2000.
- [6] GOURDIN, C., CHAPULIOT, S., MAGNAUD, J. P., PAYEN, T., MONAVON, A. Hydro-Thermo-Mechanical Analysis of Thermal Fatigue in a Mixing Tee, In *3rd International Conference on Fatigue of Reactor Components (MRP-151)*, Seville, Spain, 3. – 6. october 2004. [CD-ROM]. 2004.
- [7] VEHKANEN, S., HYTÖNEN, Y., PAUSSU, R., VIRKKUNEN, I., PÄTTIKANGAS, T, TIMPERI, A., CALONIUS, K., SOLIN, J. Analysis of Thermal Mixing in T-joint, Testing and Assesment of a Mock-up, In *3rd International Conference on Fatigue of Reactor Components (MRP-151)*, Seville, Spain, 3. – 6. october 2004. [CD-ROM]. 2004.

ŽIVOTOPIS

Jméno a příjmení: Ing. Richard Nekvasil
Datum narození: 26. 1. 1980
Bydliště: Nad Příhořím 944, 675 71 Náměšť nad Oslavou
Telefon: + 420 541 14 23 75 (pracoviště)
E-mail: nekvasil@upei.fme.vutbr.cz

Vzdělání

2003 – 2008 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, doktorandské studium v oboru Konstrukční a procesní inženýrství
1998 – 2003 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, magisterské studium v oboru Konstrukční a procesní inženýrství
1994 – 1998 Střední průmyslová škola E. Beneše v Břeclavi

Pedagogická činnost

2003 – současnost cvičení z předmětu Stavba procesních zařízení
2005 – současnost garant nepovinného předmětu Základy modelování 3D
garant nepovinného předmětu Praktické aplikace MKP
2003 – 2007 cvičení z předmětu Konstrukce procesních zařízení I
cvičení z předmětu Konstrukce procesních zařízení II

Zaměstnání

2004 – 2006 zaměstnán v Ústavu aplikované mechaniky Brno na pozici vědeckého pracovníka, zaměření na hydraulické, tepelné a napěťové analýzy nátrubků, stanovování životnosti a posuzování konstrukcí vůči mezním stavům, korozní poškozování zařízení
2006 – současnost zaměstnán na Ústavu procesního a ekologického inženýrství, Fakulty strojního inženýrství, Vysokého učení technického na pozici odborného asistenta

Jazykové znalosti

Německý jazyk velmi dobře
Anglický jazyk mírně pokročilý

Softwarové znalosti

MS Office, Maple, AutoCAD, SolidWorks, Workbench, ANSYS, CFX, PVESS, Sant´Ambrogion

ABSTRACT

Chemical and petrochemical industries often face the problem of equipment failure caused by a thermal damage of a material. This happens because of high working temperatures, which are much higher than those, for instance, in nuclear energetic. In some cases the temperatures are so high that materials are damaged by creep. People in the whole world solve the problem of thermal damage and make appropriate conclusions. The study is devoted to elimination of equipment failures caused by this type of damage.

The work offered here is focused on thermal damage of a piece of an equipment. The work studies connection of pipes, in which media are mixed, thus decreasing lifetime of a neck jointed to a pipe. The problem was underestimated earlier. The attention was paid to the problem after a series of failures caused by nonuniform distribution of a thermal load induced by nonstationary thermal field. The changes appear when hot pipe walls are cooled. The worst case is when a cold stream flows into a heated pipe thus causing shock thermal changes in its surface layers. As time flows, cracks appear and grow under the influence of further loads. The process goes on until ultimate failure state is achieved. The described effects are continuously studied and the problem is being solved on OECD meetings.