

Oponentský posudek disertační práce doktoranda

Ing. Jiřího Buzíka

„Analýza cyklické únavy trubkového svazku vlivem proudění pracovního média“

Předložená disertační práce je věnována studiu vzájemného působení tekutin a uspořádání teplosměnných ploch trubkových výměníků tepla hlavně u výměníků jednotahových se dvěma pevnými trubkovnicemi, viz obr.1 v práci. V místech „koncentrátorů napětí“ může docházet k poškozování jak vlivem statického zatížení, tak i vlivem únavy vyvolané vibrací trubek v trubkovém svazku. Metody předpovědi únosnosti vycházejí ze srovnání vibračních veličin frekvence, amplitudy a rychlosti proudění tekutiny. V práci je pak proveden popis veličin, jako odporová a vztahová síla a jejich součinitele, Reynoldsova a Strouhalova kritéria a jejich vliv na drsnost trubek a vstupní intenzitu turbulence. Nezbytnost popisu těchto veličin zdůvodňuje doktorand jejich využitím pro ověření a kontrolu platnosti zjištěných údajů z numerických analýz simulujících dynamiku tekutin s jejich zhodnocením zejména v publikacích, jako jsou TEMA, Heat Exchanger Design Handbook nebo VDI Heat Atlas, příp. z databází Heat Exchanger Tube Vibration Data Bank.

Pomocí numerických analýz řeší srovnáním způsobů hodnocení únavy. Předpoklady pro získání výsledků jsou sedmi předpoklady pro oboustranné působení proudící tekutiny a trubkového svazku výměníků. V reálném případě podmiňuje toto působení určitými předpoklady, které ovšem ztěžují řešení.

Vibrace vyvolané prouděním se vyskytují v praxi na různých útvarech, např. v hladkých vysokých nebo dlouhých válcových tělesech a stavbách jako televizní věže, komíny, kolony, potrubí, dráty elektrického vedení, ale i mrakodrapy. Pro vyhnutí se nebezpečné oblasti se zde využívá zvýšení odporu u hladkého válce (rušiče vzlaku, navaření kovu na vnější povrch trubky pomocí elektrického oblouku – bez obrábění – viz obr. 1). Kritickou rychlost ovlivňuje průměr válce; čím bude průměr větší, tím menší je kritická rychlost. Menší průměry jsou nebezpečnější, a čím hladší je povrch, tím je větší účinek při dynamickém zatížení. Lepší jsou členitější povrchy, i když se tím zvětšuje statický účinek. To jen pro doplnění. Přispívá to i k aktuálnosti tohoto tématu jak pro chemický a petrochemický průmysl, též pro jadernou energetiku.



Návar pomocí elektrického oblouku z navařovacího stroje fy Gefertec

Doktorand se v hlavní části práce zaměřil na vibrace vyvolané prouděním kolem trubkového svazku a definuje místa, kterým je třeba věnovat zvýšenou pozornost. Ta pak specifikuje na střední oblast na nepodepřené trubce mezi dvěma přepážkami, trubky umístěné na periférii trubkového svazku, na oblasti ohybů U-trubkového svazku, trubky umístěné pod vstupním nebo výstupním hrdlem v mezitrubkovém prostoru a oblast, kde existuje relativní pohyb mezi dvěma částmi výměníku jako trubka-trubka, trubka-přepážka, trubka-stěna válce.

Velmi pečlivě a rozsáhle se věnuje rešerši dostupné literatury, kde se věnuje faktorům, které ovlivňují vibrace vyvolané prouděním. Zde vychází z obtékání tělesa, zejména válcového tvaru, které klade odpor proudu tekutiny. Vírové odtrhávání proudů tekutiny na uvedených tělesech jde pak vyjádřit kritérii Reynoldsovým a Strouhalovým. Jevy spojené s vibracemi jsou řešeny řadou inženýrských postupů pro hodnocení a kontrolu trubkového svazku, založené na srovnání frekvencí vírových vybuzení s vlastními frekvencemi geometrie nebo na srovnání max. amplitudy výchylky s dovolenou výchylkou vztažené na průměr trubky svazku.

Zabývá se bezrozměrnou amplitudou kmitu trubky, analyzuje pohyb trubky pomocí pohybové rovnice a vírovým uvolňováním.

Způsoby, jak potlačit vibrace řeší geometrií přepážek a nepodepřenou délkou trubek, rychlostí proudů tekutiny v hrdlech, nárazovými plechy, prstencovými rozvaděči, možnými úpravami výměníku. Zajímavé jsou způsoby potlačení akustických emisí pevnými, porézními a žebrovanými přepážkami nebo zavedení šroubovicových distančních prvků mezi trubky trubkového svazku uvnitř výměníku.

Vynecháním 3 až 10% trubek svazku lze eliminovat vírové uvolňování a akustickou rezonanci.

Z databáze výměníků, které mohou být poškozeny vibracemi od proudící tekutiny, vybral doktorand výměník s pořadovým číslem 104. Na základě uvedených dat byl pak proveden tepelně-hydraulický výpočet. Součástí tohoto návrhu je proveden grafický návrh výměníku podle vybrané metody, kde predikce vibrací vyvolané prouděním byla rozšířena o grafický návrh v oblasti s omezením zvoleného případu. Analýzy 2D numerických vibrací, vyvolané prouděním v trubkovém svazku, řeší prouděním kolem osamocené trubky, dále v mezitrubkovém prostoru pod vstupním hrdlem bez nárazového plechu a další pod vstupním hrdlem s nárazovým plechem. Tyto partie zprávy jsou provedeny velmi pečlivě a přehledně. Výsledky mezi hodnotami experimentů a hodnotami analýzy jsou shrnuty v tabulkách a obrázcích. Dávají s aplikacemi analýz výpočtové modely pro 3 případy uvažovaných srovnávaných výsledků. Pro popis současného stavu poznání jsou zde použity výpočtové rovnice pro předpověď vibrací vyvolaných prouděním od jevů jako je turbulentní vybuzení, uvolňování vírů, fluidně elastická nestabilita a akustická rezonance.

Z hlediska únavové pevnosti lze pro odhalení míst, které by mohly být poškozeny vibracemi, použít metodu konečných prvků. Numerická analýza je pak zde použita pro získání okrajových silových podmínek. Je použita pro simulaci mezi tekutinou a sledovaných částí výměníku. Analýzu podle počtu směrů vzájemného působení podle MKP-analýzy určují vstupní podmínky pevné struktury nebo tekutiny, což představuje jednosměrné vzájemné působení. Toto jednosměrné působení je využitelné zejména u vysoko cyklové únavy trubkového stavu.

Velmi podrobné zhodnocení problematiky ukázalo, že počítačové analýzy využití sil z 2D MKP modelu a jejich aplikace na 3D MKP model platí jen pro oblast příčného proudění, tedy z jedné strany vetknuté a z druhé strany podepřené trubky.

Předložená práce je velmi rozsáhlá a ukazuje na schopnost doktoranda pracovat systematicky a vyvozovat z vypočtených výsledků potřebné závěry. Práce má dobrou úroveň a mám k obsahu následující dotazy:

- 1) Asi by bylo možné se zmínit o dalších problémech při posuzování vibrací vyvolaných prouděním popsanych v budoucích pracích, ale to by už

vyžadovalo celý tým odborníků a vybavení pro experimentální práce. Odvolávky v publikacích, které řeší problémy empirickými vztahy, jsou obvykle vztaženy pro konkrétní konstrukce výměníku a pro konkrétní tekutiny. Rád bych slyšel, co vše by šlo změřit na experimentálním výměníku podle obr. 69 a co by vyžadovalo experimentální měření.

- 2) Došlo k nějaké konfrontaci s těmito problémy v praxi? Jistě by se našla řešení v Královopolské strojárně ve výměnících, vyrobených pro rafinérie v Iráku nebo i v tuzemsku.
- 3) Bylo by možné použít teorii kumulace poškození a pro jaký případ?

Závěrem je možné konstatovat, že práce splnila stanovený cíl a může být výchozím podkladem pro další rozšíření problematiky v dané oblasti. Úprava práce je na dobré úrovni s dobrou srozumitelností technického jazyka. Konstatuji, že doktorand prokázal odpovídající znalosti v daném oboru a splnil zadané cíle. Práci jsem prostudoval a doporučuji ji k obhajobě a k udělení akademického titulu Ph.D.

V Praze dne 16.01.2018

Doc. Ing. Jiří Lukavský, CSc.

ČVUT v Praze. FS