

**STRAIN GAUGE MEASUREMENT AS A PART OF THE COMPLEX PRE-SERVICE TESTS
OF THE HEAT FEEDER PIPELINE MĚLNÍK-PRAHA****TENZOMETRICKÁ MĚŘENÍ JAKO SOUČÁST KOMPLEXNÍCH PŘEDPROVOZNÍCH
ZKOUŠEK HORKOVODU MĚLNÍK-PRAHA**

P. Jaroš

The paper summarizes essence and results of the experimental strain-stress analysis of 5-pieces 90° mitter which is a part of the hughest U- compensator in heat feeder Mělník-Praha. The measurements of strain and shifts during pre-service tests enabled forecast of stress state under operating conditions, further verification of it and comparison of the results with FEM computer analysis. Finally, some recommendations for pre-stressing of compensators and operation procedures for changing of temperature and pressure in the system are done.

ÚVOD

Tepelný napáječ Mělník-Praha je jednou z nejvýznamnějších ekologických staveb poslední doby, jelikož umožňuje odstavení 3 velkých pražských tepláren po většinu roku a tím i snížení škodlivých emisí (SO_2 o 60%, prach o 75%). Zdrojem energie je odpadní teplo dvou bloků elektrárny Mělník I, které představuje v současné době příkon až 600 MW, přičemž vlastní napáječ je dimenzován až na dvojnásobné zvýšení.

Přenos této tepelné energie do výměňkové stanice v Třeboradicích provádí 34 km dlouhý potrubní systém 2 x DN 1200 s uzavřeným cirkulačním okruhem upravené vody s teplotou v napájecí větvi až 150°C a ve vratné 70 až 110°C. S těmito parametry těsně souvisí nutnost dimenzování na provozní tlak 2,5 MPa, což zvyšuje nároky na provozní spolehlivost. Cestou k jejímu zajištění není předimenzování, jelikož významnou složkou namáhání jsou i posuvy od dilatací, u nichž se zvýšení tuhosti projevuje negativně. Dále je třeba uvážit, že přírůstek pouhého 1 mm na tloušťce stěny představuje zvýšení materiálových nákladů o přibližně 1000 t kvalitní konstrukční oceli.

Přes veškerou kvalifikovanost projektu byly generálním dodavatelem Potrubí Praha objednány v průběhu výstavby doplňující výpočty MKP jakož i ověřovací a kontrolní měření při předprovozních zkouškách, které se zaměřily na pevnostně nejexponovanější prvky celé soustavy za účelem zaručení co nejvyšší provozní bezpečnosti. Z rozsáhlé experimentální činnosti zúčastněné firmy TECHLAB byla pro tento příspěvek vybrána experimentálně-výpočtová analýza segmentového oblouku 90°, který se na obou větvích horkovodu opakovane vyskytuje jako součást U-, L-, a Z- kompenzátorů teplotní dilatace.

CÍL EXPERIMENTU

Hlavním cílem experimentu bylo ověření správnosti předpokladů zadání pro výpočty MKP [1] a zjištění skutečného chování jednoho ze segmentových oblouků, který je součástí největšího U-kompenzátoru celé stavby. V konečné fázi budou výsledky experimentu využity jako podklad k hodnocení pevnostní životnosti horkovodu, jehož doba provozování je plánována na nejméně 30 let.

SPECIFIKACE SEGMENTOVÉHO OBLOUKU A JEHO ZATÍŽENÍ

Analýzován byl 5-dílný oblouk 90° s poloměrem $R = 2400$ mm svařerný ze segmentů roury DN 1200 x 10 převýšenými V-svary s provařeným kořenem při předepsané úplné

defektoskopické kontrole (obr. 2). Roura je vyrobena z konstrukční oceli 11 523 se zaručenou mezí kluzu $R_m \geq 360$ MPa. Tento oblouk (lomené koleno) je umístěn v mohutném U–kompenzátoru umístěného v napájecí větvi, jehož hlavní rozměry jsou patrné z obr. 1. Posláním kompenzátoru je vyrovnávání teplotních dilatací přilehlých úseků potrubí mezi pevnými body. Tyto úseky mají délky 95 m (k Mělníku) a 217 m (ku Praze) a teplotní rozdíl může být až 160°C. Příslušná dilatační změna činí

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l = 1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 160(95 + 20 + 217) \approx 0,60 \text{ m} \quad (1)$$

a vyvolává při ohřevu stlačování kompenzátoru, které se deformačně uplatňuje především v oblasti kolen, jejichž ohybová tuhost na 1 m délky střednice je zhruba 20 až 25x nižší, než u přímé roury. Tento způsob namáhání je jednoznačně spjat s osovým posuvem konců U–kompenzátoru.

Druhým hlavním zatěžujícím parametrem je vnitřní přetlak vodní náplně, který má projektovou hodnotu 2,5 MPa. Jeho dominantním účinkem je po segmentech periodická, membránově–ohybová napjatost, která byla již dříve předmětem mnoha experimentů i výpočtů. Vedlejším účinkem je však i posuv konců kompenzátoru, který je charakteristický pro daný potrubní úsek.

U výrazně tenkostěnných potrubí přispívají k celkové napjatosti i gravitační účinky od váhy vlastního potrubí (asi 300 kg/m), izolace a vodní náplně (asi 1200 kg/m), které se velmi obtížně počítají zejména v případech, kdy se uplatňuje rozvalování („ovalizace“).

Pro pevnostní posouzení díla je podstatná superpozice uvedených účinků ve skutečném chronologickém sledu zejména v nelineárních případech, tj. při vzniku elastoplastických stavů. Proto bylo prováděno měření přírůstků pro následující zatěžující stimuly:

- montážní předeprnutí ($u = 314$ mm při 5°C),
- tlaková zkouška ($p = 2,45$ MPa),
- postupný náběh na provozní parametry ($T = 150^\circ\text{C}$, $p = 2,4$ MPa)

POPIS MĚŘENÍ

S ohledem na nutnost použití speciálních přivařovacích tenzometrů umožňujících dlouhodobé měření při teplotě až 150°C byla velká péče věnována efektivní volbě měřicích míst. Byly využity výsledky měření MKP [1] i zkušenosti z dřívějších vlastních experimentů [2] k tomu, aby tenzometry pokryly nejexponovanější místa při všech zatěžovacích stimulech i při jejich očekávaných kombinacích. Vzhledem k periodicitě a symetrii segmentů bylo konečně rozmístění tenzometrů provedeno podle schématu na obr. 1.

Tenzometry Hottinger 6/120 LY11 přitmlené na nerezové fólii tl. 0,1 mm vypalovacím tmelem EP 250 byly zapojeny dvoudrátově s důslednou teplotní kompenzací dvěma shodnými tenzometry na výřezu z roury umístěném v přímém kontaktu se segmentem. Měřeno bylo digitální aparaturou Hottinger DMD 20A opatřenou přepínačem UMK 10.

Současné s tenzometrickým měřením bylo určováno natažení (stlačení) celého U–kompenzátoru jako součet posuvů jeho konců, jejichž měření bylo prováděno milimetrovým měřítkem mezi pevnou a suvnou částí axiálních vedení.

VÝSLEDKY MĚŘENÍ, PREDIKCE PROVOZNIHO STAVU A JEJÍ OVĚŘENÍ

Za účelem analýzy uvedeného kombinovaného zatížení je účelné provést separaci účinků jednotlivých stimulů. Přehled výsledků je podán v následujících tabulkách, ve kterých jsou vždy uvedeny přírůstky deformací ϵ na jednotlivých tenzometrech

(indexy a–osový, t–obvodový směr), úhel φ většího hlavního napětí od axiálního směru (v kladném smyslu růžice 1–2–3), hlavní napětí σ_1 , σ_2 a redukované napětí σ_{red} podle hypotézy H–M–H. V případě, že nastane $\sigma_{red} > R_p = 360$ MPa, není přepočet deformací na napětí korektní a hodnota σ_{red} je označena znakem *

Tab.1: Vliv montážního předpětí při usazení kompenzátoru na kluzákové podpěry, $T = 8^{\circ}\text{C}$

MÍSTO	ϵ_a	ϵ_{45}	ϵ_t	φ_1°	σ_1	σ_2	σ_{red}	u(mm)
1, 2, 3	172	571	-141	37	97	-88	160	314
4, 5	974	-	392	0	245	152	214	
6, 7	395	-	225	0	104	76	93	
8, 9	371	-	206	0	97	71	87	

Tab.2: Změna napjatosti po naplnění vodou s malým přetlakem $p = 0,3 \text{ MPa}$

MÍSTO	ϵ_a	ϵ_{45}	ϵ_t	φ_1°	σ_1	σ_2	σ_{red}	u(mm)
1, 2, 3	-141	-136	-119	-76	-36	-40	38	2
4, 5	-59	-	-92	0	-19	-25	22	
6, 7	-145	-	-85	90	-29	-38	34	
8, 9	-178	-	-101	90	-34	-46	42	

Tab.3: Napjatost od přetlaku při tlakové zkoušce při $p = 2,4 \text{ MPa}$, $T = 7^{\circ}\text{C}$

vyhodnocená ze zatěžovací větve

MÍSTO	ϵ_a	ϵ_{45}	ϵ_t	φ_1°	σ_1	σ_2	σ_{red}	u(mm)
1, 2, 3	216	-193	772	-56	262	25	250	-61
4, 5	1203	-	1368	90	390	361	376 *	
6, 7	908	-	1498	90	396	302	358	
8, 9	699	-	1347	90	349	245	310	

Tab.4: Napjatost od přetlaku při tlakové zkoušce při $p = 2,4 \text{ MPa}$, $T = 7^{\circ}\text{C}$

vyhodnocená z odlehčovací větve

MÍSTO	ϵ_a	ϵ_{45}	ϵ_t	φ_1°	σ_1	σ_2	σ_{red}	u(mm)
1, 2, 3	328	-61	745	-55	257	55	234	-51
4, 5	651	-	1030	90	274	214	249	
6, 7	689	-	1280	90	333	238	297	
8, 9	454	-	1232	90	307	182	267	

Tab.5: Superpozice všech účinků při maximu tlakové zkoušky $p = 2,4 \text{ MPa}$, $T = 7^{\circ}\text{C}$

MÍSTO	ϵ_a	ϵ_{45}	ϵ_t	φ_1°	σ_1	σ_2	σ_{red}	u(mm)
1, 2, 3	247	242	512	-67	141	80	122	256
4, 5	2118	-	1686	0	586	517	555 *	
6, 7	1158	-	1638	90	444	367	411 *	
8, 9	892	-	1452	90	383	289	345	

Se znalostí výše uvedených dat bylo nutné již v této fázi zkoušek provést odhad namáhání pro výsledný porovozní stav za účelem minimalizace všech potenciálních rizik poruchy s ohledem na blížící se topné období. Splnění tohoto požadavku umožnila provedená separace účinků:

- vnitřního přetlaku, jehož účinky jsou nejlépe vystiženy odlehčovacím půlcyklem (tab. 4),
- gravitace (tab. 2),

- teplotní dilatace $u = \Delta l = -600$ mm podle rov. (1), která v superpozici s montážním předpětím $u = 314$ mm vyvolá konečný posuv konců $u \cong -300$ mm, což odpovídá opačným hodnotám deformací uvedených v tab. 1. Výslednou superpozici jsou tudíž hodnoty obsažené v tab. 6.

Tab.6: Predikce napjatosti při provozním stavu $p = 2,4$ MPa, $T = 150^\circ\text{C}$
[superpozice (4) + (2) - (1)]

MÍSTO	ϵ_a	ϵ_{45}	ϵ_l	φ_1''	σ_1	σ_2	σ_{red}	u(mm)
1, 2, 3	15	-768	767	-54	308	-81	356	-300
4, 5	-382	-	546	90	98	-50	131	
6, 7	149	-	970	90	228	97	198	
8, 9	-95	-	925	90	202	39	185	

Kontrolní měření této predikce mohlo být uskutečněno až po ~ 3 měsíční přestávce, ve které proběhly nezbytné dokončovací práce na napajeci a byl uskutečněn postupný nárůst teploty spojený s rozsáhlou revizní činností na celém díle. Výsledky tohoto měření na poněkud nižších parametrech než předpokládaných v tab. 6 obsahuje tab. 7.

Tab. 7: Výsledek kontrolního měření při parametrech $p = 1,2$ MPa, $T = 138^\circ\text{C}$

MÍSTO	ϵ_a	ϵ_{45}	ϵ_l	φ_1''	σ_1	σ_2	σ_{red}	u(mm)
1, 2, 3	-27	-687	953	-57	334	-62	369*	-243
4, 5	242	-	1028	90	249	125	216	
6, 7	263	-	1129	90	273	136	237	
8, 9	113	-	950	90	223	90	194	

SHRNUTÍ POZNATKŮ A ZÁVĚR

Navzdory náročnosti tenzometrického měření, zejména požadavku několikaměsíční stability údajů při teplotách nad 120°C , byla ověřena správnost konstrukčního návrhu segmentového oblouku podrobeného složitěmu víceparametrickému zatěžování tlakem a teplotní dilatací.

Při samostatném působení dilatace (nebo předepínání) leží nejvíce namáhané místo na hraně segmentu v poloze $\varphi = 35^\circ$ (obr. 2).

Při působení vnitřního přetlaku bylo stejné jako v minulých experimentech [2] nejexponovanější místo nalezeno na hraně při $\varphi = 80^\circ$, tedy nikoli v rovině symetrie na $\varphi = 90^\circ$, jak vychází z výpočtu. Jedná se o nezanedbatelné zvýšení ~ 10%.

Při kombinaci obou uvedených stimulů dochází k výraznému zvýšení napjatosti tehdy, je-li kompenzátor natažený (studené potrubí) a zároveň působí vnitřní přetlak. Tento případ nastal při tlakové zkoušce a byl příčinou vzniku malých plastických deformací. Obvyklý provozní stav, při němž je vnitřní přetlak provázen dilatací stlačující kompenzátor, je celkově příznivější a nejexponovanější místo se přesouvá do pole segmentu na $\varphi = 20^\circ$ ve vzdálenosti asi 0.1 průměru roury od hrany (poloha růžice v obr. 2).

Hlavním praktickým přínosem uvedených měření je návrh zjednodušeného postupu pro montážní předepínání velkých U-kompenzátorů a doporučení způsobu najíždění a odstavování horkovodu s minimalizací čerpání únavové životnosti materiálu segmentových kolen, které se tak nestanou limitujícím prvkem dlouhodobého využití celého horkovodu.

Ing Petr Jaroš, CSc

TECHLAB, s.r.o. Sokolovská 207, 190 03 Praha 9, tel. (02) 684 2400 I.124

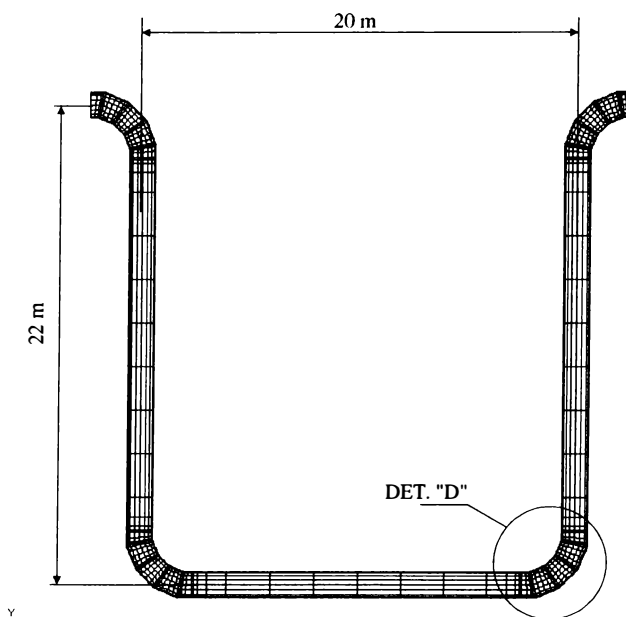
Literatura

[1] A. Kanócz:

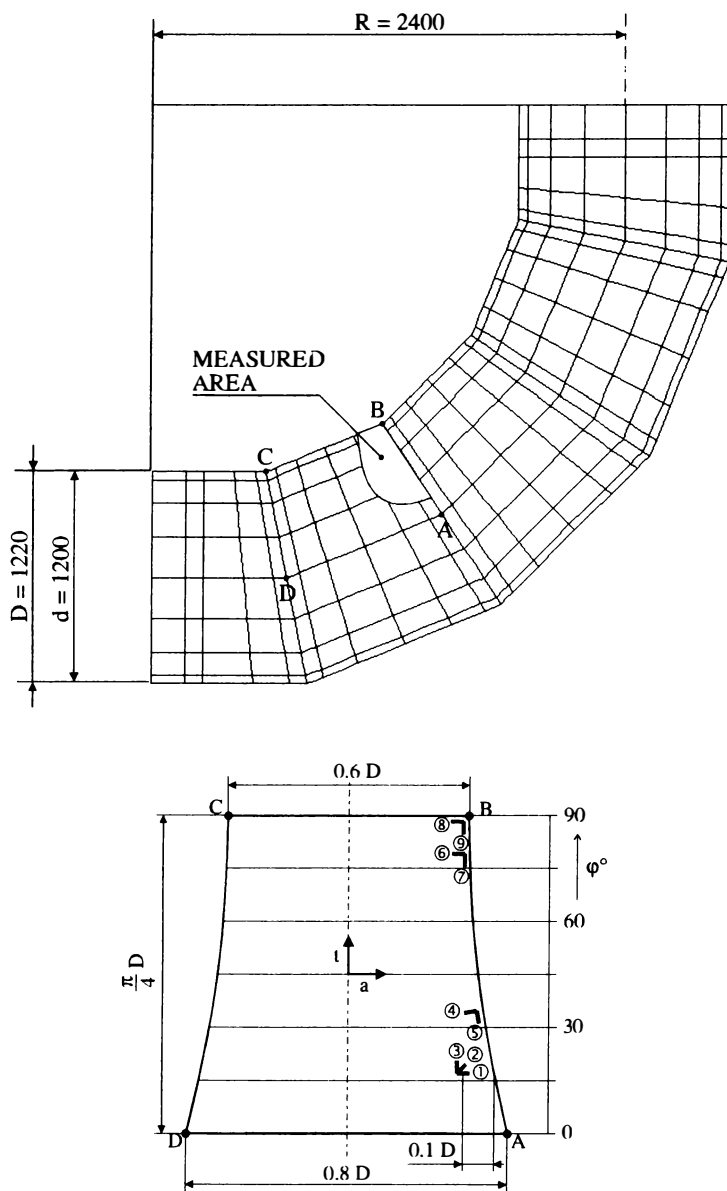
Posouzení prováděcího projektu tepelného napaječe
Mělník–Praha z hlediska korozních úbytků
(Interní zpráva Potrubí s.r.o. KA–03–94, březen 1994)

[2] P. Jaroš:

Experimentální stanovení nízkocyklové životnosti
segmentových kolen a T–kusů namáhaných
vnitřním přetlakem
(Výzkumná zpráva č. SVÚSS 86–02022, 1986)



Obr. 1: Geometrické rozměry analyzovaného U–kompenzátoru



Obr. 2: Segmentový oblouk (detail „D“) a jeho část podrobená tenzometrické analýze.