

**VLIV TECHNOLOGICKÉHO PŘÍJEDENÍ SPOJE TRUBKA -  
- TRUBKOVNICE PAROGENERÁTORU VVER NA ODOLNOST  
PROTI DLOUHODOBÉMU NAMÁHÁNÍ V PROVOZNÍCH PODMÍNKÁCH**

**Ing. Zdeněk Ř í h a , CSc., Ing. Jaromír**

**L i c h ý**

**VÍTKOVICE, k. p., Ostrava**

1. Úvod

Primární a sekundární systémy v jaderných elektrárnách jsou vzájemně odděleny teplosměnnými trubkami, které jsou upevněny do trubkovic nebo kolektorů v parogenerátorech. Spoje teplosměnných trubek s kolektory jsou z hlediska technologie provedení jednou z nejnáročnějších operací při výrobě parogenerátorů. Zkušenosti výrobců i provozovatelů zařízení jaderných elektráren tlakovodního typu ukazují, že místa upevnění teplosměnných trubek v parogenerátorech a části trubek bezprostředně v blízkosti spoje jsou za provozu značně namáhané. S ohledem na počet spojů v jednom parogenerátoru (až 22 000) a jejich význam, jedná se tak o konstrukční uzel, který významně ovlivňuje provozní spolehlivost a bezpečnost celé jaderné elektrárny. Podle zkušeností však dochází k poruchám spojů, jež jsou vyvolány postupnou degradací jejich výchozích vlastností v kombinovaných provozních podmínkách parogenerátorů, které způsobují vyřazení daného zařízení z provozu a vedou ke značným ekonomickým ztrátám.

2. Konstrukční a technologické provedení spojů

Vysoké požadavky kladené na spolehlivé dosažení stanovených vlastností spojů zahrnuje technologie upevňování trub v kolektorech kombinací dvou vzájemně nezávislých metod, z nichž jedna zajistí vytvoření čelního tavného svaru mezi koncem teplosměnné trubky, umístěné v otvoru trubkovnice a hranou tohoto otvoru a druhá pak upevnění trubky po celé délce otvoru v trubkovnici.

Při upevňování dochází postupně k pružné a k plastické deformaci trubky a tím k vyvození tlaku na plochu otvoru v trubkovnici. Při dostatečné úrovni tlaku dojde k takové deformaci okolí otvoru, že po odlehčení tlaku způsobí zpětná elastická deformace upevnění trubky.

Jakost upevnění trub v trubkovnicích parogenerátorů je opakovaně posuzována podle stanovených kritérií.

U parogenerátorů VVER 440 se jedná o spoje mezi teplosměnnou trubkou o rozměrech  $\phi$  16 x 1,4 mm z oceli jakosti 08Ch18Ni10T a trubkovnici ze stejné oceli o tloušťce 136 mm s otvorem o průměru  $\phi$  16,25  $\begin{matrix} +0,17 \\ -0,0 \end{matrix}$  mm. U bloků VVER 1000 budou spoje vytvořeny mezi trubkou  $\phi$  16 x 1,5 mm uvedené jakosti a trubkovnicí o tloušťce 171 z oceli 10GN2MFA opatřené z primární strany austenitickým korozivzdorným návarem.

Pro upevňování trubek v trubkovnicích jsou v současné době ve světě známy a do stadia průmyslového osvojení vyvinuty prakticky tři metody:

- a) mechanické rozválcování
- b) upevňování výbuchem
- c) hydraulické upevňování

Se zaměřením na zvyšování jakosti a provozní spolehlivosti parogenerátorů byly v podmínkách VÍTKOVIC odzkoušeny všechny uvedené technologie a také ověřovány základní vlastnosti spojů. Poznatky získané z experimentálních zkoušek rozhodly věnovat větší pozornost v dalším ověřování technologií upevňování výbuchem a hydraulického upevňování.

### 3. Důsledky technologického provedení na vlastnosti materiálů a spojů

a) Metoda upevňování výbuchem teplosměnných trub v kolektorech parogenerátorů VVER 440 byla převzatá podle sovětské dokumentace a pro průmyslové využití vyvinutá ve spolupráci s VÚPCH Pardubice.

Charakteristickým znakem této technologie jsou vysoké rychlosti deformace trubky a vysoký deformační tlak. Vlastní proces upevnění trubky proběhne v čase 2 až 3  $\mu$ s při rychlosti srážu stěny trubky na plochu otvoru okolo  $150 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ , což odpovídá rychlosti deformace trubky  $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^4 \cdot \text{s}^{-1}$ . Tyto parametry, které značně převyšují hodnoty jiných tvářecích operací, ovlivňují vlastnosti pozitivních materiálů i vytvořených spojů. Ve skutečnosti dochází při této metodě k deformaci v celé stěně trubky o 5 až 7 % a k zpevnění trubky o cca 50 % v délce spoje. Takto vytvořený spoj má velmi nerovnoměrnou a úzkou mezeru v rozsahu 0,002 až 0,180 mm, viz obr. 1.

U výbuchově upevněných spojů, zvláště heterogenním provedení, dochází po cyklickém tepelním namáhání k jejich rozvolňování a vytvoření štěrbin v oblasti spoje, která umožní vniknutí sekundárního média a vzniku koroze. Rozvolnění spoje je výsledkem fyzikálních vlastností použitých materiálů a nelze tomuto jevu zabránit v podmínkách namáhání při provozu parogenerátoru.

b) V rámci uvedených metod byla ověřována také alternativní technologie upevňování trubek, která spočívá v tom, že kromě čelního tavného svaru a upevnění výbuchem bylo žádoucí docílit vytvoření plošného výbuchového svaru. Vytvoření kvalitního výbuchového svaru je podmíněno vhodnou geometrií spoje s určenou velikostí mezery cca 0,7 mm, použitím vhodné výbušniny, která zaručí nutnou dopadovou rychlost trubky  $v_{td} \text{ min. } 400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  při maximální čistotě ploch. Uvedené podmínky pro vytvoření výbuchového svaru vyvolají v trubce deformaci až 20 % při současně značném zpevnění. V oblasti plošného výbuchového svaru není na rozhraní mezera, ale dochází k výskytu trhlin v přechodové části mezi výbuchovým upevněním a výbuchovým svarem. Výbuchový svar má buď charakteristický turbulentní průběh, který je uveden na obr. 2, nebo mezivrstvu, viz obr. 3.

Plošný výbuchový svar umožňuje uzavření štěrbin ve spoji, zvláště pak v místě výstupu trubky z trubkovnice na sekundární straně, kterým by se mohlo zabránit vzniku koroze ve štěrbině pod napětím. Výbuchové svary jsou odolné proti rozvolňování po cyklickém teplotním namáhání, avšak vzhledem k větší deformaci trubek bude žádoucí ověřit jejich náchylnost na korozní praskání.

c) Hydraulické upevňování trub do trubkovnice je metoda, které se liší od dosud známých technologií tím, že tenosměnná trubka je plasticky deformována vysokým tlakem kapaliny až 380 MPa, při současném použití speciální sondy s těsníci elementy, která umožňuje přívod tlakového média. Rychlost deformace trubky je cca  $\dot{\epsilon} = 10^{-1} \cdot s^{-1}$ . Velikost štěrbin na rozhraní vytvořeného spoje je velmi malá a rovnoměrná - viz obr. 4 a tabulku I. Deformace trubky dosahuje hodnoty max. 4 %. Hloubka deformace u otvoru a u obou povrchů trubky i hodnota zpevnění trubky jsou uvedeny v tabulce I.

Spoje heterogenního provedení upevněné hydraulickou metodou vykazují rovněž rozvolnění po cyklickém teplotním namáhání, podobně jako spoje upevněné výbuchem.

#### 4. Hodnocení chování spojů po dlouhodobých zkouškách

Vzhledem k tomu, že spoje trubka - trubkovnice jsou v provozních podmínkách vystavovány kombinovanému namáhání, vyvstala proto potřeba ověřovat vlastnosti těchto spojů po dlouhodobém namáhání v podmínkách blízkých se podmínkám provozním. Modelové zkoušky byly zaměřeny na studium vlastností spojů v podmínkách, které dovozovaly simulovat pouze některé vlivy provozního namáhání, což bylo ovlivněno dostupností experimentální základny v ČSSR. Byly takto získány výsledky ze spojů po tepelné únavě na vzduchu a z krátkodobých korozních zkoušek v autoklávu při současném působení tepelné únavy v rozmezí teplot 290<sup>o</sup>/110<sup>o</sup> C po 300 cyklech, které potvrdily rozvolnění spojů upevněných výbuchem a trvalou těsnost s výbuchovým svarem bez výrazného korozního poškození trubek a otvorů.

Bylo rovněž ověřováno difúze v heteroenních spojiích, kde výsledky ukázaly, že při teplotách do 350 °C a časech do 10<sup>4</sup> hodin nedochází k výrazné difúzi uhlíku do trubek, avšak s ohledem na projektovanou životnost spojů při malé teplotě nelze vyloučit difúzi při časech do 2.10<sup>5</sup> hodin.

Docílené výsledky i získané poznatky jsou velmi cenné, neboť umožnily zhodnotit výhody i nevýhody jednotlivých ověřovaných metod. Uveňování trubek současně ukázaly, že při provozních podmínkách parogenerátoru může dojít k rozvozu spojů trubka - trubkovnice se všemi důsledky pro souvazovanou těsnost a bezpečnost provozu řídících elektrárken.

#### 5. Možnosti zjišťování vlastností spojů při dlouhodobém namáhání

S ohledem na omezené experimentální možnosti studia vlastností spojů při dlouhodobém namáhání je velmi obtížné v současné době odpovědět na složitý komplex otázek, týkajících se posouzení všech faktorů ovlivňujících vlastnosti spojů, zvláště pak jejich odolnost v korozním prostředí, které by vedlo ke konečnému stanovení optimální technologického a konstrukčního provedení spoje.

Proto je připravován ve VÚHŽ Dobrá výzkum korozní odolnosti spojů trubka - trubkovnice, který by měl experimentálně ověřit dlouhodobé vlastnosti spojů zhotovených v různých technologických variantách a kombinacích materiálů v podmínkách současného působení korozního prostředí sekundární vody, vnitřního tlaku v trubkách, teplotního gradientu ve stěně trubek a změny tepelného příkonu z primárního okruhu. Součástí tohoto výzkumného programu bude rovněž ocenění změn materiálových charakteristik vyvolaných degradačním účinkem kombinovaného namáhání.

Předpokládá se, že získané výsledky a poznatky poskytnou dostatek informací k výběru optimálního konstrukčního a technologického provedení spoje.

6. Literatura

- /1/ Říha Z., Lichý J.: Závěrečná zpráva výzkumné etapy úkolu A-01-123-101-07/16-2 "Výzkum technologie spoje trubka - kolektor pro parogenerátory VVER 1000". Ev. č. zprávy: 940.24/1086/4-83, VÍTKOVICE, září 1983.
- /2/ Kneifl M. a kol. : "Tepelná únava spoje trubka - trubkovi-ce parogenerátoru VVER". Výzkumná zpráva č. Z-82-4682, SVÚM Praha, květen 1982.
- /3/ Břeň J. a kol. : "Výzkum spoje trubka - kolektor JE VVER 1000", Výzkumná zpráva č. 21.0.2460, SVÚOM Praha, květen 1983.
- /4/ Walder V. a kol. : "Výzkum korozní odolnosti spoje trubka - trubkovi-ce parogenerátoru VVER", úvodní studie výzkumného úkolu, VÚHŽ Dobruška, říjen 1982.

Tabulka I. Deformace a zpevnění ve zkušebních spojích trubka - kolektor

Technologie upevnění	Velikost štěrbin mezi trubkou a otvorem / mm /	Hloubka deformace / mm /			Velikost zpevnění / $\frac{x}{R}$ /
		povrch otvoru	vnější $\phi$ trubky	vnitřní $\phi$ trubky	
Výbuchové upevnění - bleskovice DŠ-A+voda	0,002 - 0,120	0,05-0,25	max.0,12	max.0,14	50 až 60
Výbuchové upevnění + výbuchový svar - S35	0,00	max. 0,17	max.0,15	max.0,16	náhodně
Hydraulické upevnění.	0,002 - 0,006	max. 0,17	max.0,16	max.0,05	19 až 23

Poznámky:

x/ R - mez kluzu  $R_{p0,2}$  části trubky vyřazené z upevněného spoje  
 R - mez kluzu  $R_{p0,2}$  této trubky z oblasti, která nepodléhá upevnění spoji

Obv. 1



11-38

x500

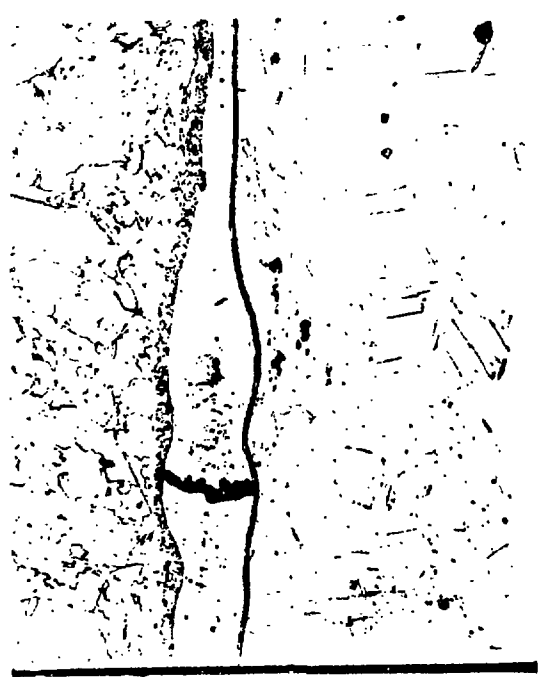
Obv. 2



11-46

x500

Obv. 3



11-49

x500

Obv. 4



12201

x500