

ANALÝZA NAPĚTÍ TLAKOVÝCH NÁDOB JADERNÝCH REAKTORŮ TYPU VVER

Josef Vísner, Jan Šneberger, Škoda k. p., závod Energetické strojírenství, 316 00 Plzeň

Anotace

Článek se zabývá metodami analýzy napětí rozpracovanými pro podrobná vyšetření napjatosti tlakových nádob jaderných reaktorů typu VVER, vyráběných v k. p. ŠKODA Plzeň. Tenzometrickým měřením na nádobách při tlakových zkouškách a fotoelasticimetrickým vyšetřováním napjatosti jsou ověřovány výsledky výpočtů, získané moderní matematickou metodou hraničních integrálních rovnic. Jsou uvedeny některé výsledky řešení získané různými metodami.

1. Úvod

Základní údaje o napjatosti tlakových nádob jaderných reaktorů typu VVER poskytuje výpočet, který je prováděn podle schválených norem. V naší praxi je používána sovětská norma a jsou uplatňovány sovětské zkušenosti s jejího používání. Informace získané výpočty slouží jako doklad o spolehlivosti a bezpečnosti konstrukce po celé období předpokládané životnosti. Pro posouzení mimořádných situací však tyto materiály nepostačují především proto, že výpočet podle citované normy neposkytuje vyčerpávající informace.

Pro provedení podrobného posouzení na porušení s ohledem na přechodové a havarijní režimy je nezbytná dodatečná analýza napětí. Tato analýza je prováděna na našich pracovištích především experimentálními metodami a v externích ústavech podle našich požadavků převážně teoretickými metodami.

Určení napjatosti v konstrukci tak složitých tvarů v přechodových a havarijních stavech je obtížně řešitelná dílo jak teoretickou, tak experimentální analýzou. V experimentální analýze je možné měřit napětí tenzometricky

při skutečných průbězích teplot jen při tzv. horkých zkouškách. Za provozu reaktoru se zatím tenzometricky neměří a vyvolání havarijního stavu pro zjištění napětí na reaktoru je riskantní a z hlediska provozovatele nepřipustné. Modelová měření, např. fotoelasticimetrií, umožňují určit teplotní napětí pro určitý okamžik. Metodika měření je však složitá a zjištěná napětí jsou obvykle zatížena značnou chybou.

Současná úroveň matematických metod umožňuje principiálně vyřešit libovolnou úlohu o napjatosti. Úspěchu bylo dosaženo rozpracováním metod konečných prvků a hraničních integrálních rovnic s využitím soudobé výpočetní techniky. Při praktickém řešení obecných úloh se však narůstá na potíže se sestavením matematických modelů a potřebný nárok na výpočetní techniku často překračuje individuální možnosti. Přes uvedené omezení je však perspektiva teoretických metod značná a je nutné je do budoucnosti preferovat.

Pro výpočty napětí v tlakových nádobách jaderných reaktorů VVER především v havarijních situacích byla v našich podmínkách (bez počítačů poslední generace) zvolena méně náročná metoda hraničních integrálních rovnic. Protože se jedná o metodu teoreticky obtížnou, se kterou nebyly žádné zkušenosti, bylo zpočátku rozpracováno řešení rovinných a osově symetrických úloh pro zatížení mechanickými silami.

Po experimentálním ověření věrohodnosti matematického řešení byl v další etapě rozpracován výpočet teplotních napětí vyvolaných libovolným průběhem teplot ve stěně nádoby složené ze dvou materiálů. Předpokládá se, že výpočet bude ověřen tenzometrickým měřením na jaderné elektrárně Temelín při uvádění prvního bloku do provozu. Tomuto náročnému experimentu předchází několikaletá teoretická příprava a příprava experimentální techniky včetně licenční výroby teplotních tenzometrů.

Výsledky takto široce a detailně rozpracované analýzy napětí slouží jako podklad pro posouzení konstrukce tlakových nádob VVER na porušení prostřednictvím součini-

tele intenzity napětí „K“. Stanovení jeho velikosti pro různé trhliny v reaktoru je druhou hlavní úlohou pracoviště Analýza napětí. Součinitel intenzity napětí se zde měří experimentálně metodou fotoelasticimetrie. Smyslem této činnosti je ověřovat souběžně rozpracované teoretické výpočty a řešit úlohy, na které soudobá výpočetní technika nestačí.

Teoretické řešení součinitele K navrhuje na úlohy analýzy napětí metodou hraničních integrálních rovnic prováděné v ÚSTARCHu SAV Bratislava. Právě při aplikaci této metody na výpočet K se nejvíce uplatňují její výhody.

2. Dosahené výsledky

2.1. Teoretická metoda hraničních integrálních rovnic

Tato metoda se intenzivně rozvíjí v ÚSTARCHu SAV v Bratislavě. Výsledky teoretických řešení jsou realizovány při analýze napětí jaderných reaktorů typu VVER. Byl proveden výpočet průběhů napětí v hrdlech reaktorů VVER 440 a 1000 a řešeny úlohy lomové mechaniky. Podle zadání byly počítány součinitele intenzity napětí u eliptických trhlin v místech předpokládaného výskytu na reaktoru VVER 440. V další etapě byl zpracován katalog koeficientů intenzity napětí pro trhliny v tlakových nádobách a potrubí jaderných reaktorů. V posledním období se v ÚSTARCHu zabývali výpočtem teplotních polí a napětí ve válcové stěně s výstelkou a výpočtem koeficientů intenzity napětí u trhlin pro shora řešený problém.

2.2. Metoda tenzometrie

Tato účinná měřicí technika byla zaměřena na:

- a) měření sloužící jako kontrolní během výroby
- b) měření během tlakových zkoušek nádob jaderných reaktorů
- c) měření při utahování přírubového spoje nádob jaderných reaktorů.

Kontrolními měřeními během výroby se především ověřuje na každém víku tlakové nádoby VVER 440 i 1000 spolehlivost přivaření nástavců víka. Měření během tlakových

zkoušek mají ověřit výpočtové předpoklady, určit skutečné hodnoty napětí a jejich maxima v místech složitých tvarových změn. Vzhledem k sériovosti výroby nádob slouží též ke zjištění statistického rozptylu napětí vlivem technologických odchylek. Celkově bylo opakovaně měřeno na 7 nádobách a 3 víkách reaktorů VVER 440. Sledovány byly především oblasti přechodu víka do pevné příruby, hrdlový prstenec a dno.

Obdobně je zaměřena činnost tenzometrie i na reaktor VVER 1000. Během první tlakové zkoušky bylo na nádobě a víku prvního kompletu tenzometricky sledováno 96 míst. Měření při utahování přírubového spoje reaktoru umožnilo stanovit skutečné síly a momenty ve šroubech a stalo se základem pro vypracování postupu utahování a povolování šroubů.

2.3. Metoda fotoelasticimetrie

Práce byly od počátku zaměřeny na získání podrobného průběhu napětí v celém rozsahu konstrukce. Pro reaktor VVER 440 byly vyrobeny 2 modely (obr. 1), v měřítku 1 : 11,6 se všemi důležitými detaily, ve kterých byla zhodnocena napětí vyvolaná vnitřním přetlakem a napětím od přespětí šroubů přírubového spoje. Napjatost na reaktoru VVER 1000 bude rovněž sledována na kontrolním optickém modelu 1 : 14, který je prakticky dokončen a v letošním roce proběhne experiment. Kromě toho bylo ve SVÚSS Běchovice provedeno měření na zjednodušeném modelu hrdla V 1000. Výsledek uvedený ve zprávě (5) je porovnán s výsledky výpočtu metodou HI rovnice (obr. 2).

Při aplikaci fotoelasticimetrie na vyšetřování součinitele intenzity napětí byla činnost zpočátku zaměřena na rozpracování metodiky a ověření stávajících způsobů řešení. Byla vyvinuta nová metoda tzv. smykových napětí, která je používána při výpočtu praktických úloh. Pomocí této metody byl např. měřen koeficient intenzity napětí u trhliny v hrdle reaktoru V 1000. I toto měření prokázalo velmi dobrou shodu s výpočtem metodou hraničních integrálních rovnic. Některé dosažené výsledky jsou popsány v literatuře (6, 7).

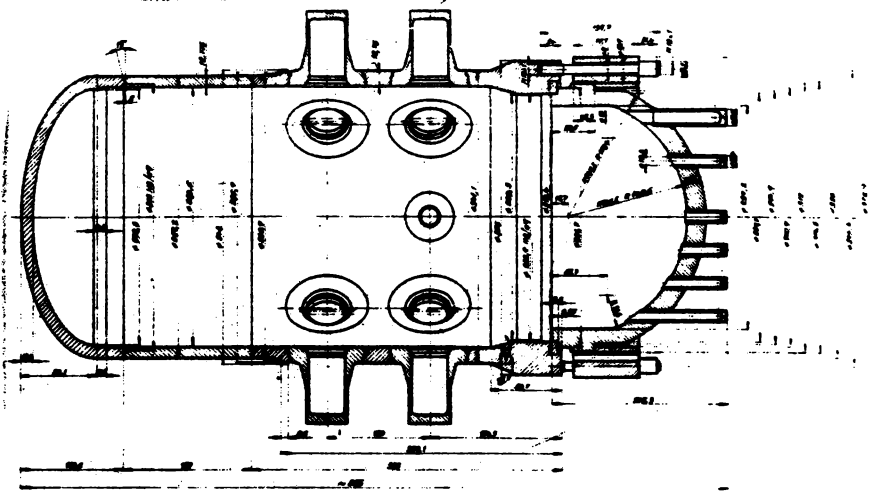
3. Závěr

Širokým uplatněním soudobé měřicí techniky a pomocí prostředků moderní matematické analýzy bylo dosaženo:

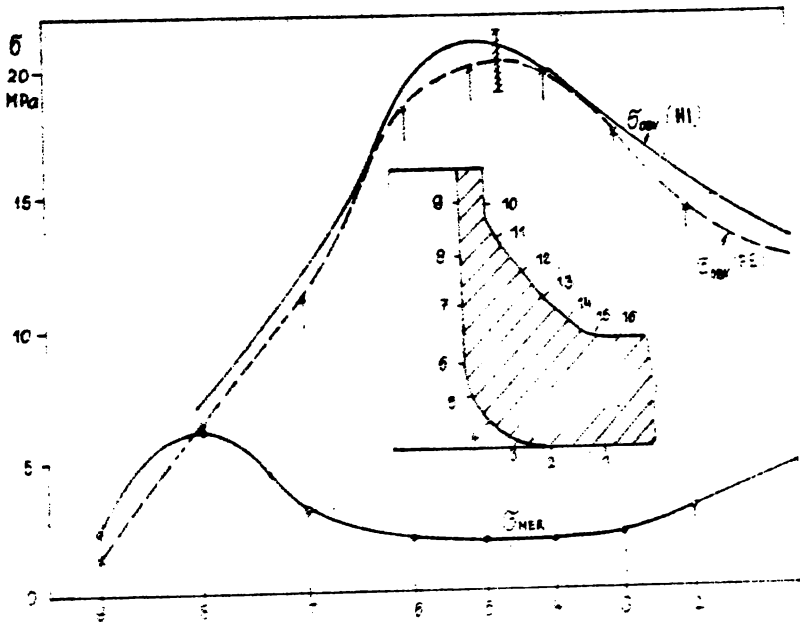
- a) upřesnění hodnot napětí vypočítaných podle normy
- b) doplnění údajů v místech maximálních napětí
- c) zjištění skutečných napětí na vyrobených reaktorech při tlakových zkouškách
- d) rozpracování teorie hraničních integrálních rovnic pro výpočet napětí a koeficientů intenzity napětí a její experimentální ověření
- e) rozpracování experimentální metody fotoelasticimetrie pro měření součinitele intenzity napětí K .

Literatura:

- (1) Výpočet napětí v hrdlách tlakovej nádoby reaktora VVER 440. Výzk. správa ÚSTARCH SAV Bratislava - leden 1986
- (2) Výpočet napětí v hrdlách tlakovej nádoby reaktora VVER 1000. Výzk. správa ÚSTARCH SAV Bratislava - říjen 1986
- (3) Katalóg koeficientov intenzity napětí pre trhliny v tlak. nádobách jadrových reaktorov a potrubí. Výzk. správa ÚSTARCH SAV Bratislava - září 1987
- (4) Výpočet teplotních polí a napětí v tlakových nádobách jadrových reaktorov. Výzk. správa ÚSTARCH SAV Bratislava - květen 1988
- (5) Analýza napjatosti ve vyhrdlení tlakové nádoby VVER 1000. Výzk. správa SVÚSS Běchovice - leden 1989
- (6) Fotoelasticimetrické metody vyšetřování součinitelů intenzity napětí K_I a K_{II} . Výzk. správa k. p. Škoda - ZES Plzeň - listopad 1983
- (7) V. Szabó, J. Vísner: Určovanie K_{III} metódou žykových napětí. Staveb. časopis 36, č. 5. Veda Bratislava 1988



Obr. 1: Fotoelastimetrický model reaktoru VVER 440



Obr. 2: Napětí v hrdle reaktoru VVER 1000