

Josef VÍŠNER  
Zdeněk REGNER

Škoda k.p. Plzeň, závod Energetické strojírenství

## FOTOELASTICIMETRICKÉ VYŠETŘOVÁNÍ NAPJATOSTI NA PROSTOROVÉM ZMRAZOVANÉM MODELU TLAKOVÉ NÁDOBY JADERNÉHO REAKTORU

Pro zajištění bezpečného provozu tlakových nádob jaderných reaktorů po celou dobu životnosti je nezbytné mít k dispozici podrobnou mapu napjatosti při různých provezech zařízení. Předepsaný teoretický výpočet podle normy není natolik podrobný, aby určil zvýšená napětí v místech náhlých tvarových změn a u otvorů. Ani nejmodernější metoda konečných prvků nemůže problém vyřešit, protože v ČSSR nejsou k dispozici počítače potřebné kapacity. Proto musí být pro řešení napjatosti použity experimentální metody především tenzometrie a fotoelasticimetrie. Tenzometrická měření jsou navíc předepsána při tlakové zkoušce. Nejúčinnější metodou ve stadiu projektových příprav je prostorová zmrazovací fotoelasticimetrie jak uvádí řada příkladů v lit. [1], [2], [3]. Experiment je většinou prováděn na tzv. kontrolním modelu, který je co nejpřesnější zmenšenou kopií skutečné tlakové nádoby a zatíženém jedním z vybraných režimů (vnitřní přetlak, předpětí přírubového spoje).

Požadavek na přesnost měřených údajů se musí odrazit již při návrhu tohoto složitého experimentu, jehož jednotlivé etapy počínaje volbou modelového měřítka a konče zhodnocením měřených veličin musí být řádně připraveny.

Hlavními etapami experimentu jsou: stanovení modelového měřítka, projekt experimentu včetně způsobu zatížení, technologie výroby modelu a způsob zmrazování, dále projekt měření zahrnující způsob rozřezání modelu, metodika měření a vyhodnocování naměřených údajů.

Velikost modelového měřítka je ovlivněna snahou po maximální přesnosti měřených veličin. To vede k minimál-

nímu zmenšení i vzhledem k okolnosti, že větší model umožnuje přesnější zhotovení detailů. V daném případě při řešení napjatosti na zkráceném modelu tlakové nádoby VVER 440 bylo zvoleno měřítko 1 : 11, 16 a model měl tvar podle obr. 1. Oproti skutečné nádobě je model zkrácen vynecháním hrdlové sekce a hladké části nádoby.

Na výrobu modelu byla použita epoxidová pryskyřice GHS Epoxi 110 vytvrzovaná za tepla směsí anhydridů kyselin maleinové a ftalové ve váhovém poměru 100:20:20. Bloky jednotlivých částí modelu byly odlity do separovaných plechových forem. Po ohrubování a vyžihání byly bloky připraveny k opracování na konečný tvar. Po zhotovení modelu včetně slepení jednotlivých dílů bylo před závěrečnou montáží provedeno utěsnění otvorů ve víku nanesením slabé vrstvy silikonového kaučuku na jeho vnitřní povrch. V místech otvorů byla vrstva zesílena hliníkovou folií tl. 0,1, která se zakryla druhou vrstvou silikonového kaučuku.

Zmrazování a zatěžování modelu proběhlo v termostatu s regulovaným průběhem teplot s rychlostí ohřevu  $2^{\circ}\text{C}/\text{hod}$ . Po dosažení zmrazovací teploty  $T_z = 142^{\circ}\text{C}$  byl model zatížen vnitřním přetlakem  $p = 30,27 \text{ kPa}$  a pak ochlazován rychlostí  $2^{\circ}\text{C}/\text{hod}$ . Zatěžovací systém je znázorněn na obr. 2. Tlakový vzduch z lahve 3 je přiveden přes hrubý redukční ventil 4 a jemný regulátor tlaku do modelu. V termostatu je tlakový vzduch ohříván v měděném přehříváči vzduchu. Za jemným regulátorem tlaku je odbočka pro připojení manostatu 6 a manometru 7. V manostatu nastavená výška hladiny vody určuje maximální přetlak, kterým je model při zmrazování zatížen. Jemným regulátorem 5 se nastaví tlak tak, aby vzduch jemně probublával manostatem. V další etapě byl model demontován a rozřezán podle rozřezového plánu. Ten byl připojen tak, aby bylo možné změřit napětí ve všech sledovaných bodech. V symetrických oblastech byly voleny vždy tři výřezy po  $120^{\circ}$  ke zjištění nerovnoměrnosti.

Pro měření řádu izochromat na meridálních a obvodových výřezech byl použit rekonstruovaný fotoelasticimetr FMB 56 se sodíkovým zdrojem světla. Zlomkový řád izochro-

mat byl určen pomocí Taráhyho goniometrické kompenzace a exp-  
novaná místa byla doměřována v polarizačním mikroskopu. Sfé-  
rické výřezy víka byly proměřovány šikmo ve směru os otvorů.  
Při prosvěcování byly výřezy umístěny ve skleněné nádobce  
s planparalelními stěnami naplněné inverzní kapalinou. Pomo-  
cí této techniky byl měřen řád izochromat s přesností do  
 $\pm 0,02$  izochromaty. Pro výpočet modelového napětí byly odvo-  
zeny potřebné vztahy vycházející ze zákonů optiky a pružnosti.  
Napětí na skutečné tlakové nádobě byla počítána z rovnice

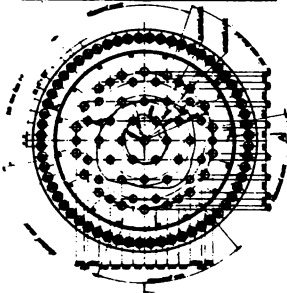
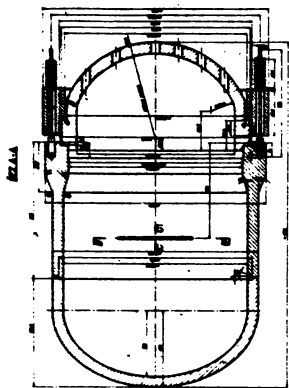
$$\frac{\sigma_D}{\sigma_M} = \frac{\rho_D}{\rho_M} = 6,35$$

Při přesnosti měření řádů izochromat  $\pm 0,02$  jsou napětí na  
díle určena s přesností  $\pm 2$  MPa.

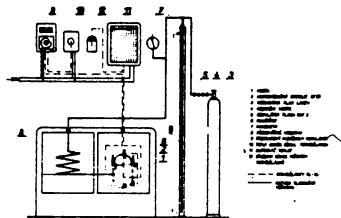
Podrobným proměřením cca 80 výřezů byl získán přehled-  
ný obraz o napjatosti především ve víku tlakové nádoby,  
hlavně kolem otvorů a v místech náhlých změn tvarů jak uvá-  
dí příklad na obr. 3. Rovněž byly získány údaje o napjatosti  
ve volné přírubě a v pevné přírubě tělesa tlakové nádoby  
(obr. 4). Veškeré údaje byly měřeny pro případ zatížení vnitř-  
ním přetlakem 19, 13 MPa a předpětí ve šroubech přírubového  
spoje  $P = 1,25 Q$ .

Uvedený příklad ukazuje jaké možnosti stále ještě foto-  
elasticimetrie poskytuje při rekognoskaci napjatosti na slo-  
žitých a velice důležitých konstrukcích. Přes pokrok v ji-  
ných především teoretických disciplínách je to v ČSSR i v mno-  
ha jiných zemích dosud jediná metoda, která je schopna ve sta-  
diu projektových příprav určit napjatost konstrukce a včas  
ji ovlivnit ve smyslu zvýšené bezpečnosti i ekonomie.

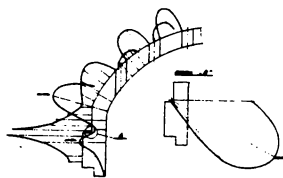
- Literatura: [1] J.E. Smith, C.C. Wilson, W.F. Swinson  
Photoelastic analysis of EGCR Pressure  
Vessel Oak Ridge mat. lab. 1965
- [2] J.W. Dally, W.F. Riley Experimental  
Stress Analysis  
Mc Graw-Hill Suc. 1965
- [3] Polarizaciono-optičeskij metod issledo-  
vanija naprjaženij.  
Izd. Nauka-Moskva 1965



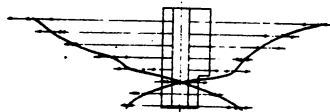
Obr. 1



Obr. 2



Obr. 3



Obr. 4