

Ing. J. Šneberger, Ing. V. Dolhof, V. Tater
KP Škoda Plzeň - Závod energetické strojírenství

Tenzometrická měření při tlakových zkouškách
nádob jaderných reaktorů.

1. Konstrukce tlakové nádoby.

Tlaková nádoba jaderného reaktoru VVER 440 představuje vertikální válcovou nádobu s eliptickým dnem a kulovým víkem, jak je znázorněno na obr. 1. V horní válcové části má nádoba dvě řady hrdel. V každé řadě je 6 hrdel $\varnothing 500\text{mm}$ a 2 hrdla $\varnothing 250\text{mm}$. Víko je přitaženo k nádobě přes volnou přírubu pomocí 60ti šroubů M 140x6. Celý vnitřní povrch nádoby a část vnějšího povrchu víka je pokryta nerezovým návarem tloušťky 9mm. Vnější průměr nádoby je 3840mm, tloušťka válcové stěny 140mm a celková výška 13815mm. Všechny hlavní díly nádoby jsou vyrobeny z ušlechtilé Cr Mo V oceli.

2. Podmínky tlakové zkoušky.

Obecně jsou na tlakovou nádobu kladeny mimořádně vysoké požadavky z hlediska jaderné bezpečnosti celé elektrárny. Tlaková nádoba musí zajišťovat bezpečný a bezporuchový provoz po celou dobu uvažované životnosti t. j. 40 let. Z tohoto důvodu je kladen zvláštní důraz na tlakovou zkoušku, jakožto konečné ověření pevnosti a těsnosti tělesa nádoby včetně všech svarových spojů.

Vzhledem ke složitosti a výrobní posloupnosti kompletů reaktorových nádob, jsou tlakové zkoušky každého kompletu prováděny dílčím způsobem, t. zn. je prováděna samostatně zkouška tělesa nádoby a samostatně zkouška víka. Za tím účelem je vyrobeno zkušební víko, se kterým se provádějí tlakové zkoušky těles nádoby a zkrácená zkušební nádoba, se kterou se provádějí tlakové zkoušky vík.

Tlakové zkoušky nádob i vík se provádějí vodou při minimální teplotě stěny tělesa 70°C . Tato teplota zaručuje (přibližně s bezpečností $+50^{\circ}\text{C}$), že je nádoba namáhána mimo teplotní oblast křehkého porušení daného materiálu. K jejímu dosažení je na zkušebním pracovišti průtokové ohřívací zařízení o příkonu 990kW. Nádoba nebo víko se ohřívá uzavřenou cirkulací vody přes ohřívák.

Tlakový režim zkoušky vychází z Předpisů pro výstavbu a bezpečný provoz zařízení jaderných elektráren, které stanovují minimální zkušební přetlak jako 1,25 násobek přetlaku výpočtového, násobeného poměrem jmenovitého dovoleného napětí daného materiálu při teplotě tlakové zkoušky a při teplotě výpočtové. Z tohoto požadavku vychází minimální zkušební přetlak 19,12 MPa ($195\text{kp}/\text{cm}^2$). Doba výdrže na zkušebním přetlaku je opět stanovena předpisy a je v našem případě 10min.

Závažnost budoucího bezpečného provozu jaderného reaktoru se projevuje i v požadavku na utěsnění přírubového spoje nádoba - víko. Přítláčná síla šroubů je předepsána jako hodnota prodloužení šroubu o $1,7^{+0,2}_{-0,1}\text{mm}$ (což odpovídá síle ve šroubu 3,4 MN (340t)). Utahování šroubů se provádí pomocí hydraulického napínacího zařízení, což v principu spočívá v předeprnutí šroubu za pomocný závit s následujícím dotažením volné matice a uvolněním šroubu. Utahovací postup probíhá ve 2 cyklech. V prvním cyklu se postupně předeprnou všechny šrouby při konstantní síle napínacího zařízení 4,9 MN (500t). V druhém cyklu je síla napínacího zařízení měněna podle výpočtového programu. Výpočtový program vychází z příčinkových koeficientů zjištěných pomocí tenzometrických snímačů umístěných na šroubech.

3. Tenzometrická měření.

Kromě tenzometrických snímačů umístěných na 12ti šroubech přírubového spoje, je na tělese víka umístěno 90 a na tělese nádoby 70 tenz. snímačů. Jako snímače byly vždy použity samokompensační tenzometry fy Hottinger s měřicí základnou 6mm typu LY 11 a XY 11 lepené tmelem Z 70.

Tenzometrické snímače pro měření na šroubech byly zapojeny jako polomosty s vyloučením ohybu, vždy s dvěma tenzometry 120Ω v serii v každé větvi. Pro vyhodnocení ohybových momentů šroubů byly ve zvolených řezech nalepeny po 120° jednoduché polomosty 120Ω . Každý polomost byl připojen třemi vodiči k měřicí ústředně. Všechny ostatní tenzometrické snímače byly zapojeny jako 1/4 mosty s jedním společným kompenzačním tenzometrem v měřicí místnosti. Připojení bylo rovněž třívodičové. Do pomocných svorkovnic v měřicí šachtě jednotlivými nestíněnými vodiči průřezu $0,5\text{mm}^2$ s PVC izolací a vyšší tepelnou odolností, dále pak stíněnými vícežilovými kabely s průřezem žil $0,5\text{mm}^2$ do měřicí místnosti. Zde se na velké pájecí svorkovnici provádějí všechna potřebná propojení k jednotlivým vstupním konektorům měřicí ústředny. Celková délka vodičů je asi 50m.

Měřicí ústředna je typu Compulog TWO anglické fy Intercole Systems s řídicím počítačem PAC 16. Počítač byl dodán s volně přístupnou feritovou pamětí o kapacitě 16 K-bytů s možností rozšíření na dvojnásobek. Pracuje v jazyku BAL, FORDAC a BASEDAL. V našem případě byl použit jazyk BASEDAL (upravený jazyk BASIC) pro jeho lepší přizpůsobivost a schopnost dodatečných úprav, daných charakterem této zkoušky. Počítač řídí práci celé měřicí jednotky, všechny naměřené hodnoty ukládá do paměti a provádí potřebné výpočty. Vlastní měřicí část v našem provedení obsahuje 150 univerzálních vstupů k připojení pasivních odporových snímačů např. tenzometrů nebo čidel s napěťovým výstupem, dále 50 vstupů pouze pro aktivní čidla s napěťovým výstupem jako termočlánky a pod. Připínací zařízení pro prvních 150 míst je osmipólové, pro dalších 50 pak třípólové se speciálními jazýčkovými relé. Vstupní 150 místná jednotka je vybavena t.z.v. autobalancí k počátečnímu vyvážení použitých snímačů. Vyvažování se provádí paralelními odpery, připojovanými kontakty jazýčkových relé. Je zcela automatické, řízené počítačem. Hodnoty dovažovacích odporů jsou ukládány do autobalancního registru k použití při vlastním měření. Obsah tohoto registru lze vytisknout a v případě potřeby, např. při

náhodné destrukci paměti znovu ručně zavést. Při normálním provozu k této závadě nemůže dojít, paměť počítače je chráněna před destrukcí při výpadku sítě a při vypnutí. Napájení tenzometrů je stejnosměrné, konstantním proudem 6,66 nebo 13,2 mA. Lze připojit tenzometry s odporem 0 - 1000 Ω s libovolným K-faktorem. Za přepínací jednotkou je zařazen pro každých 100 kanálů vysoce stabilní stejnosměrný zesilovač s dálkově nastavitelným ziskem. Výstupy z těchto zesilovačů jsou vedeny stíněným kabelem k analogově-číslicovému převodníku. Ten pracuje metodou postupných aproximací a podle zvoleného režimu rychlostmi 33 míst/sec, 100 míst/sec, až 300 míst/sec. V našem případě byl zvolen režim s rychlostí 33 míst/sec, protože je nejvíce odolný rušení, které je v těžkém provozu vždy značné.

Jako zapisovací zařízení byl dodán stránkový dálkopis Data Dynamics 399 s rychlostí 12 řádků/min. Při měření na mezistupních, kdy není požadován zápis, lze použít obrazkový display ISL, jehož pracovní rychlost je podstatně vyšší. Paralelně s tímto zápisem probíhá „bezpečnostní“ záznam do děrné pásky, který je možno později zpracovat event. jiným způsobem nebo přepsat na papír.

4. Vyhodnocení výsledků.

Program pro měření a zpracování výsledků byl poměrně jednoduchý. Sestával z postupného změření každého kanálu 5x za sebou, kontroly rozptylu hodnot (předepsané pásmo rozptylu $\pm 15 \mu\text{m/m}$), vyloučení náhodných veličin, tisku platného počtu měření, výpočtu středních hodnot poměrných prodloužení a výpočtu napětí v jednotlivých místech. Navíc u měřených šroubů byla vyhodnocena střední síla, ohybové momenty a hlavní směry těchto momentů.

Všechny výše uvedené údaje byly zjištěny při jednotlivých tlakových stupních a jsou součástí protokolu tlakové zkoušky.

Při každé pokrokové konstrukci je snaha o maximální využití materiálu a proto se dostáváme v některých měřených bodech tělesa tlakové nádoby a víka mimo klasickou platnost

Hookova zákona a vypočtená fiktivní napětí v těchto bodech podle výše uvedeného programu nejsou prakticky využitelná. Proto je nutno pro tyto body provést analýzu napětí při stavu elasto-plastických deformací s cílem stanovit skutečná hlavní normální napětí.

Pro ilustraci je na obr.2 uveden průběh naměřených poměrných deformací v místě přechodu pevné příruby víka (ve třech řezech po 120°C) při předběžné a skutečné hydraulické tlakové zkoušce, která byla prováděna při teplotě nádoby cca 80°C. V tomto místě přechodu bylo již po utažení šroubového spoje a ohřevu na zkušební teplotu dosaženo napětí na úrovni meze úměrnosti, což potvrdily údaje předběžné zkoušky (do tlaku 9,81 MPa).

V tabulce na tomto obrázku jsou uvedeny hodnoty odpočítaných fiktivních napětí a skutečných napětí, vyhodnocených podle teorie malých pružně-plastických deformací [1] a za pomoci nomogramu podle Troosta [2] při maximálním tlaku 19,3 MPa. Jak je zřejmé z tabulky, obě použité metody vyhodnocení dávají vcelku shodné výsledky.

Vlastní vyhodnocení skutečných hlavních napětí v místech s elasto-plastickou deformací bylo prováděno manuálně po tlakové zkoušce. V současné době je prováděna příprava měření tak, aby bylo možno vyhodnotit i tyto výsledky počítačem ústředny již v průběhu tlakové hydraulické zkoušky.

5. Závěr.

Během tlakových zkoušek je též sledován diagnostický stav materiálu pomocí akustické emise. Na tělese nádoby je instalováno 36 snímačů, které prakticky umožňují sledovat celý objem tělesa.

Doplněním výsledků tenzometrického měření údaji akustické emise, vzniká komplexní obraz napjatosti a stavu tělesa tlakové nádoby.

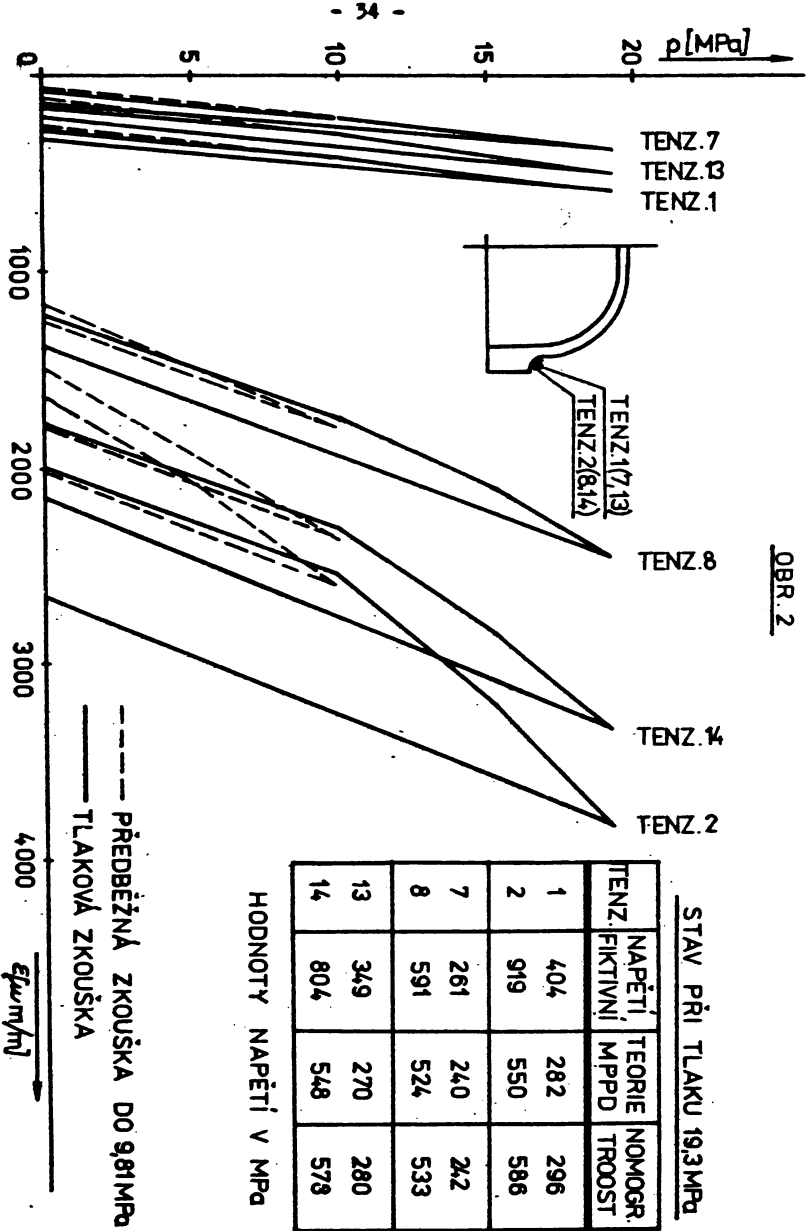
Literatura.

[1] Z. Kuliš: Problematika vyhodnocování napjatosti.

Acta Polytechnica 4 (II, 1, 1976)

[2] O. Benning, S. Keil: HBM Messtechnische Briefe 10, 1974, Heft 1

OBR. 2



$\frac{q_{\text{pr}}}{m^2}$

