Technická správa

Predprevádzková bezpečnostná správa Kapitola 06.02.03 Tlaková nádoba reaktora

Stavba:Dostavba 3. a 4. blok JE Mochovce, stavenisko: Jadrová časťConstruction:3&4 Unit NPP Mochovce Completion, site: Nuclear Island

Stavebník:Slovenské elektrárne, a.s., Bratislava, 3. a 4. blok JE MochovceConstructor:Slovenské elektrárne, a.s., Bratislava, 3&4 Unit NPP Mochovce

LC SE Rev Date / Dátum IS Superv	ision Outcome / Stav schválenia	Super	vised by / O	veril	Checked by / Kontroloval	Approved by / Schválil
e	Language / Jaz	yk S E	Safety Class / Bezpečnostn rieda	á N	SEC. INDEX / INDEX utajenia	Company use/P
SLOVEŅSKÉ	Submited to Cli	ent Scl	proval / hválenie	x	Information O Len na inform	nly / áciu
ELEKTRARNE	to / Prediozen odberateľovi n	e The SE a charged t	The SE a.s. approval refers to the contract clauses only. All design responsibilities charged to the Contractor / Schvälenie SE a.s. sa vzťahuje iba na zmluvné náležitu Za vypracovanie projektu nesie dodávateľ plnú zodpovednosť.			ign responsibilities are na zmluvné náležitosti. povednosť.
EPS No / Číslo EPS: PNM34365000	Revision index / Index revízie: 10	Size / Veľ- kosť	Activity Code / Aktivita	Type / Subtype Typ / Podtyp	Discipline / Profesia	Plant Unit / Blok elektrárne
File name / SE doc. Code / Názov súboru: SE číslo dokum	entu: PNM34361036	A4	6.01	RS	Z	8
		Sheet / List	0	f/z	Plant System / Systém elektrárne	Component / Komponent
* P N M 3 4 3 6	103610*	1	1	38		

SE Contract No. / Číslo zmlu	VUJE Contract No. / číslo zmluvy VUJE: 1719/00/09				
Part name / Označeni	e časti: PNM3436103610_S_C00_V	/	lss	ued on / Vydané	dňa: 18.06.2019
Kód citlivosti ¹⁾ / Sensitivity code ¹⁾ 3	Name / Meno	Organization / Organizácia	Dept. / Útvar	Date / Dátum	Signature / Podpis
Author / Vypracoval:		• VUJE, a.s.	• 0360	• 18.06.2019	
Co-author / Spolupracoval:	•	• VUJE, a.s.	• 0360	• 18.06.2019	
	•		•		•
Checked by / Kontroloval:	•	• VUJE, a.s.	• 0220	• 18.06.2019	•
			•		
Verified by / Overil:	•	• VUJE, a.s.	• 0720	• 18.06.2019	e
Approved by / Schválil:		• VUJE, a.s.	• 1703	• 18.06.2019	

Tento dokument je vlastníctvom Slovenských elektrární, a.s.. Tento dokument, ako aj informácie z neho, môžu byť použité, kopírované, rozmnožované alebo zverejňované iba so súhlasom Slovenských elektrární, a.s.. Uvedené riešenie je obchodným tajomstvom VUJE, a.s..

This document is property of Slovenské elektrárne, a.s. This document as well as information it contains can only be used, copied, reproduced or published with consent of Slovenské elektrárne, a.s. The solution presented is trade secret of VUJE, a.s.



Revision record / Záznam o revízii

Identification /	Brief description of modification /	Reason of modification /
Identifikácia (part/page/chapter/ member/section) (časť/strana/kapitola/ článok/odstavec)	Stručná charakteristika úpravy (description of modification and manner of implementation) (popis úpravy a spôsobu zapracovanie)	Dôvod úpravy (author company, number of Pripomienkas or other stimulation, name of author, Pripomienka document No.) (firma autora a číslo pripomienky, resp. iný podnet, meno autora, č. dokumentu pripomienok)
 Celý dokument 	· Zapracovanie pripomienok ÚJD podľa Aarhuského výboru	V súlade s dokumentom
		PNM34482979
	•	•
	•	•
•	•	•
	•	•
	•	•
	•	•

List of document part Zoznam častí dokumentu

Por. č. No.	Názov dokumentu Document name	Ev. č. súboru časti dokumentu / File ref. No. of document part	Číslo revízie / Revision No.
1.	 Kapitola 06.02.03 Tlaková nádoba reaktora 	• PNM3436103610_S_C00_V	• 10
2.	 Kapitola 06.02.03 Tlaková nádoba reaktora 	• PNM3436103610_S_C01_V	• 10
3.	•	•	•
4.	•	•	•
5.	•	•	•
6.	•	•	•
7.	•	•	•
8.	•	•	•
9.	•	•	•
10.	•	•	•
11.	•	•	•

vůje

OBSAH

ZOZNAM PC	UŽITÝCH SKRATIEK A OZNAČENÍ	. 5
ÚVOD		. 7
6.2.3	Tlaková nádoba reaktora	. 8
6.2.3.1	Popis konštrukcie a upevnenia TNR	. 9
6.2.3.2	Špecifikácia materiálov tlakovej nádoby reaktora	10
6.2.3.3	Špeciálne výrobné postupy	12
6.2.3.4	Degradácia materiálov tlakovej nádoby reaktora	13
6.2.3.4.1	Druhy skúšobných metodík a vzoriek	15
6.2.3.4.2	Meranie ožarovacej teploty vzoriek MPOV34	15
6.2.3.4.3	Meranie fluencie neutrónov v ožarovacích puzdrách	15
6.2.3.4.4	Konštrukcia ožarovacích puzdier a reťazcov	16
6.2.3.5	Limitné hodnoty tlaku a teploty	16
6.2.3.5.1	Limitné hodnoty tlaku a teploty podľa STD TNR MO34	17
6.2.3.5.2	Odvodenie p-T kriviek postupom podľa metodiky VERLIFE	18
6.2.3.5.2.1	1 Metodika výpočtu p-T kriviek	18
	6.2.3.5.2.1.1 Postulovaný defekt	19
	6.2.3.5.2.1.2 Výpočtový model	22
	6.2.3.5.2.1.3 Materiálové vlastnosti TNR	23
	6.2.3.5.2.1.4 Algoritmy výpočtu p-T kriviek	24
	6.2.3.5.2.1.5 Charakteristiky použitého softwaru	26
6.2.3.5.2.2	2 Výsledky výpočtov p-T kriviek	28
	6.2.3.5.2.2.1 p-T krivky pre normálne podmienky prevádzky	28
	6.2.3.5.2.2.2 p-T krivky pre tlakové skúšky	29
	6.2.3.5.2.2.3 p-T krivky pre havarijné režimy	29
6.2.3.6	Integrita tlakovej nádoby	30
6.2.3.6.1	Konštrukcia	30
6.2.3.6.2	Použité materiály	30
6.2.3.6.3	Metódy výroby	30
6.2.3.6.4	Požiadavky na kontroly	30
6.2.3.6.5	Odosielanie	30
6.2.3.6.6	Prevádzkové limity a podmienky	30
6.2.3.7	Pevnostné hodnotenie TNR	31
6.2.3.7.1	Pevnostný výpočet dokumentovaný v STD	31
6.2.3.7.2	Nový pevnostný výpočet TNR	32
6.2.3.7.2.	1 Metodika a použité výpočtové programy	32
6.2.3.7.2.2	2 Výsledky výpočtových analýz	33
LITERATÚR/	۹	35
ZOZNAM OB	RÁZKOV	38

vůje

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A OZNAČENÍ

a [mm]	hĺbka postulovaného defektu	
A [%]	pomerné predĺženie	
A _F [°C]	koeficient radiačného krehnutia	
ASTM	American Society for Testing and Materials	
AZ	aktívna zóna	
AOT	režimy narušenia NOC	
c [mm]	polovičná dĺžka postulovaného defektu	
COD	skúška lomovej húževnatosti na vzorke s bočným vrubom	
ČR	Česká republika	
ČSKAE	Československá komisia pre atómovú energiu	
DPOV	doplnkový program overovacích vzoriek	
$\Delta T_T[^{\circ}C]$	prírastok T _K vplyvom teplotného starnutia	
$\Delta T_{F}[^{\circ}C]$	prírastok T _K vplyvom fluencie rýchlych neutrónov	
ΔT_{N} [°C]	prírastok Τ _κ vplyvom únavy materiálu	
E [MeV]	energia rýchlych neutrónov	
EC	havarijné režimy	
EMO12	jadrová elektráreň Mochovce, 1. a 2. blok	
EOP	elektrická oblúková pec	
F_{n},F_{0} [n/m ²]	fluencia neutrónov	
F _{1/4t}	fluencia neutrónov v ¼ hrúbky steny TNR	
F _{in}	fluencia neutrónov na vnútornom povrch TNR	
HDR	hlavná deliaca rovina reaktora	
JE	jadrová elektráreň	
KCU2 [J/cm ²]	vrubová húževnatosť meraná na vzorke s U-vrubom o polomere vrubu 2 mm	
KCV [J/cm ²]	vrubová húževnatosť meraná na vzorke s V-vrubom	
K _I [MPa.m ^{1/2}]	súčiniteľ intenzity napätia	
K _{IC} [MPa.m ^{1/2}]	lomová húževnatosť	
(K _l) _i	dovolená hodnota K _I pre danú kategóriu režimov i	
LELM	lineárna elastická lomová mechanika	
MAAE	Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu	
MO34	jadrová elektráreň Mochovce, 3. a 4. blok	
Part name / Ozna	čenie časti: PNM3436103610_S_C01_V Page No. / Strana č.:	5/38

vüje

MPOV	modernizovaný program overovacích vzoriek
MS	Microsoft
NOC	normálne podmienky prevádzky
POV	program overovacích vzoriek
PpBS	predprevádzková bezpečnostná správa
PTS	tlakovo teplotné šoky
R _m [MPa]	medza pevnosti
R _{p0,2} [MPa]	zmluvná medza klzu
RVHP	Rada vzájomnej hospodárskej pomoci
σ [MPa]	napätie
SAOZ	systém havarijnej ochrany
SM	Siemens-Martinská pec
SR	Slovenská republika
SPT	Small Punch Test - skúška mechanických vlastností na malých vzorkách
STD	sprievodná technická dokumentácia
ŠPOV	štandardný program overovacích vzoriek
τ [roky]	doba prevádzky
Т _к [°С]	teplota prechodu ku krehkému porušeniu (kritická teplota krehkosti)
T _{Ka} [°C]	maximálna dovolená kritická teplota krehkosti pre zastavenie trhliny
T _{KAL} [°C]	kaliaca teplota
T _{KF} [°C]	teplota prechodu ku krehkému porušeniu po ožiarení danou fluenciou
T _{κ0} [°C]	počiatočná hodnota kritickej teploty krehkosti
T _m [°C]	najnižšia prípustná teplota materiálu TNR
TNR	tlaková nádoba reaktora
T _{OLEJ} [°C]	teplota olejového kúpeľa
тоz	tepelne ovplyvnená zóna
T _{ož} [°C]	ožarovacia teplota
T _{POP} [°C]	popúšťacia teplota
T _R [°C]	referenčná teplota
T _{tav} [°C]	teplota tavenia
VVER	vodo-vodný energetický reaktor
Z [%]	pomerné zúženie
ZM	základný materiál
ZK	zvarový kov

vüje

ÚVOD

Kapitola spĺňa požiadavky BNS I.1.2/2008, pričom bolo prihliadnuté v primeranom rozsahu k BNS I.1.2/2014. Predkladá charakteristiku tlakových nádob reaktorov oboch blokov MO34, popisuje požiadavky na materiály tlakových nádob a ich skutočné vyhotovenie, popisuje špeciálne výrobné postupy pri výrobe tlakových nádob reaktorov oboch blokov MO34, popisuje pôvodný a zároveň navrhovaný spôsob hodnotenia radiačnej degradácie materiálov tlakových nádob reaktorov, dokumentuje postupy pre stanovenie limitných hodnôt teploty a tlaku pracovného média a popisuje postupy hodnotenia integrity tlakových nádob reaktorov.

6.2.3 Tlaková nádoba reaktora

Teleso tlakovej nádoby reaktora (TNR) slúži pre rozmiestnenie vnútorných častí a aktívnej zóny a pre vytvorenie hermetického objemu spolu s vekom horného bloku a tesnením hlavného prírubového spoja reaktora pomocou kompletu dielov tesnení. TNR je spôsobilá pracovať v podmienkach pôsobenia cyklického namáhania od vnútorného pretlaku, teploty, gama žiarenia, neutrónového žiarenia a síl zo smerov hlavného potrubia a zariadenia vo vnútri TNR. TNR je kľúčové zariadenie JE a zásadným spôsobom ovplyvňuje jadrovú bezpečnosť celej elektrárne.

Požiadavky na seizmicitu TNR podľa triedy 1b, kategória vybraných zariadení BT1.

Základné pracovné parametre TNR:

•	tlak teplonosného média na výstupe z TNR	12,26 MPa _g
•	teplota teplonosného média na vstupe do reaktora	267 ± 2°C
•	stredná teplota teplonosného média na výstupe z reaktora	295 ± 2°C
•	výpočtová teplota TNR (v dôsledku absorpcie reaktorového žiarenia)	325°C
•	chladiacim médiom je demineralizovaná voda + H_3BO_3 o koncentrácii	0 ÷ 12 g/l
•	skúšobný hydraulický tlak	19,12 MPa _g

Najnižšia prípustná teplota T_m materiálu TNR pri vyššom tlaku než 3,432 MPa sa podľa [I.5] určuje zo vzťahu:

 $T_m = T_{KF} + 30 [^{\circ}C]$ (6.2.3-1)

kde: T_{KF} je teplota prechodu ku krehkému porušeniu. Je závislá na stupni degradácie materiálu TNR vplyvom neutrónového žiarenia a je stanovovaná na základe analýzy výsledkov skúšok overovacích vzoriek (pozri kapitolu 6.2.3.3). Požiadavka (6.2.3-1) vychádza z konzervatívnych zastaraných postupov, ktoré využívali v dobe svojho vzniku (1976) tzv. Pelliniho diagram. Dovolené teploty a tlaky v TNR, vrátane teploty tlakovej skúšky, sa v súčasnosti určujú modernými postupmi založenými na metódach lomovej mechaniky popísanými v kap. 6.2.3.5.

Základné údaje TNR:

•	materiál telesa	TNR oceľ 15Ch2MFA (podľa GOST)
•	materiál návaru	1. vrstva oceľ typu 07Ch25N13(GOST 2246), ďalšie vrstvy oceľ 08Ch19N10G2B (GOST 2246)
•	výška	11805 mm
•	vonkajší priemer (v mieste deliacej roviny)	4270 mm
•	vonkajší priemer (na hladkej valcovej časti)	3840 mm
•	vnútorný priemer (na hladkej valcovej časti)	3542 mm
•	hrúbka steny (na hladkej valcovej časti)	149 ± 2 mm.
•	hrúbka návaru na hladkej valcovej časti	9 ± 2 mm
•	vnútorný objem	112 m ³
•	hmotnosť TNR	215150 kg.

6.2.3.1 Popis konštrukcie a upevnenia TNR

Vlastné teleso TNR je valcová nádoba, zvarená zo šiestich kovaných prstencov a poloeliptického dna. Horná časť TNR je tvorená tzv. prírubovým prstencom. Čelná plocha tohto prstenca je zároveň deliacou rovinou reaktora; je na nej 60 otvorov so závitom M 140x6 o dĺžke 280 mm pre závrtné skrutky hlavného prírubového spoja a dve dvojice drážok pre niklové tesniace krúžky. Na vonkajšej časti prírubového prstenca (v jeho hornej časti) je realizovaný návar z nehrdzavejúcej ocele pre privarenie vlnovca betónovej konzoly. Na vnútornej časti prírubového prstenca je osadenie na zavesenie šachty reaktora.

K dolnej časti prírubového prstenca je privarená horná sekcia, tzv. prstenec "horúcich" nátrubkov, obsahujúci šesť nátrubkov Ms 500 výstupu chladiacej vody, dva nátrubky Ms 250 systému SAOZ a nátrubok kontroly a riadenia. Na vnútornom povrchu prstenca je deliaci krúžok, ktorý tesne obopína šachtu reaktora a oddeľuje vstupný a výstupný priestor chladiva pri prevádzkovej teplote chladiva.

Pod hornou sekciou je privarená dolná sekcia, tzv. prstenec "studených" nátrubkov, so šiestimi nátrubkami Ms 500 vstupu chladiacej vody do reaktora a dvoma nátrubkami SAOZ o Ms 250. Na horúcich i studených nátrubkoch Ms 500 je na okraji realizovaný technologický návar pre privarenie hrdlových nástavcov Φ 500 (tzv. SAFE-END) z nehrdzavejúcej ocele. Do všetkých nátrubkov SAOZ Ms 250 sú vložené tenkostenné puzdrá, predstavujúce teplotnú ochranu pre materiál nátrubkov pri dodávke chladiacej vody systémom havarijného chladenia aktívnej zóny. U nátrubkov Ms 250 sú rozložené tri vertikálne deliče prúdu. Na tomto prstenci je pod nátrubkami na vonkajšej strane krúžok, ktorým dosadá teleso TNR na oporu, upevnenú na opornom ráme betónovej šachty reaktora. Na obvode krúžku sú výrezy pre kliny.

Na prstenec studených nátrubkov je privarený dlhý hladký prstenec. Na tento prstenec je privarený zvarom, niekedy označovanom ako zvar 5/6, krátky prstenec, ktorý má na vnútornom povrchu osem vodiacich pier z nehrdzavejúcej ocele, slúžiacich pre vedenie a fixáciu šachty reaktora. Dlhý prstenec, zvar s krátkym prstencom a časť krátkeho prstenca sa nachádza na úrovni aktívnej zóny.

Krátky prstenec je spojený s posledným prstencom a tento je zvarom spojený s eliptickým dnom nádoby.

6.2.3.2 Špecifikácia materiálov tlakovej nádoby reaktora

Základným predpisom v oblasti použitia materiálov pre jadrovo energetické zariadenia boli "Pravila ustrojstva a bezopasnoj ekspluataciji oborudovanija atomnych elektrostancij opytnych i issledovatělskich jadernych reaktorov i ustanovok", vydané v r. 1973 v Moskve. Neskôr, v roku 1988 bol spracovaný dokument NTD IAE.4305-88 "Prípustné materiály pre použitie na jadrové zariadenia". Tento dokument bol súčasťou normatívno-technickej dokumentácie vydávanej a implementovanej v oblasti jadrovej energetiky v zemiach bývalej RVHP. Konštrukčné materiály použité na výrobu TNR sú dané pôvodným sovietskym technickým projektom a vychádzajú z príslušnej normatívno-technickej dokumentácie dodanej sovietskou stranou. Pre jadrovo energetické zariadenia v Slovenskej republike sú v súčasnosti stále platné pôvodné ruské normy a Normatívne technické dokumenty Medzinárodného hospodárskeho spoločenstva Interatomenergo a pre TNR najmä [II.8]. V revízii Úvodného projektu MO34 [I.13] sú pre niektoré materiály uvádzané aj ekvivalenty podľa ASTM a preto sú pre tieto materiály uvedené ekvivalenty aj v tejto kapitole.

Tlaková nádoba reaktora VVER 440 je, okrem veka, vyrobená z chróm-molybdén-vanádovej ocele s vysokou úrovňou mechanických vlastností. Oceľ je podľa normy GOST označená 15CH2MFA. Oceľ bola vyvinutá ako nový základný materiál pre tlakovú nádobu tohto typu reaktora.

Teleso TNR je vyrobené z ocele 15Ch2MFA (táto oceľ nemá ekvivalent podľa ASTM), pričom časť nádoby, obklopujúca aktívnu zónu (dlhý hladký prstenec), je vyrobená z rovnakej ocele ale s veľmi nízkou koncentráciou sprievodných nečistôt tak, aby bola zaistená požadovaná radiačná odolnosť materiálu TNR (niekedy tiež označovaná ako 15Ch2MFAA). Prípustné koncentrácie sú stanovené interným predpisom ŠKODA. Teleso TNR je potom zvarené z jednotlivých prstencov automatovým zváraním pomocou prídavného materiálu. Mechanické vlastnosti zvarového kovu sa overujú na skúšobných vzorkách v stave po tepelnom spracovaní.

Veko tlakovej nádoby je tvorené zvareným vrchlíkom a prstencom veka z ocele 18Ch2MFA. Súčasťou veka je i voľná príruba, vyrobená z oceli 25Ch2MFA. Obidve tieto ocele majú zhodné chemické zloženie s oceľou 15Ch2MFA, len majú vyšší obsah C pre zaistenie požadovaných pevnostných vlastností. Ani tieto ocele nemajú ekvivalent podľa ASTM.

Deliaci krúžok je vyrobený z mangánovej perlitickej ocele, vyrábanej v zásaditých elektrických alebo Martinských peciach. Označenie ocele podľa normy GOST 5520-79 je 22K. Táto oceľ nemá ekvivalent podľa ASTM. Polotovar krúžku je normalizačne žíhaný (t.j. ohrev na 920°C, výdrž 9 hodín a následné ochladenie do oleja).

Hrdlové nástavce ϕ 500, komplet nátrubkov SAOZ (t.j. hrdlové nástavce ϕ 250, príruby a puzdrá), hrdlový nástavec a väčšina komponentov systému kontrolného nátrubku, nosníky pre zaistenie šachty reaktora a doska deliča toku sú vyrobené z titanom stabilizovanej austenitickej nehrdzavejúcej ocele 08Ch18N10T (označenie podľa normy GOST 5632-72), ekvivalent oceľ 321 podľa ASTM A-240.

Táto oceľ bola vyrobená v zásaditej elektrickej oblúkovej peci. Chemické zloženie ocele 08Ch18N10T musí, podľa typu výrobku, zodpovedať smernému zloženiu podľa normy GOST.

Polotovary uvedených súčastí TNR, ktoré sú vyrobené z oceli 08Ch18N10T, sú podrobené austenitizačnému žíhaniu o parametroch: ohrev na 1040÷1060°C, výdrž na teplote 40÷255 minút (podľa veľkosti súčiastky) a následné ochladenie do vody.

Všetky komponenty deličov prúdu pod dolnými nátrubkami SAOZ sú vyrobené z oceli STN 17 246.4 (ekvivalent oceľ 321 podľa ASTM A240). Jedná sa o nehrdzavejúcu austenitickú oceľ typu 18-8, stabilizovanú Ti v stave po rozpúšťacom žíhaní (podľa STN 417246, ohrev na 1000 ÷ 1050°C, výdrž na teplote 15 ÷ 30 minút, potom ochladenie vo vode, tenké predmety na vzduchu).

Aby sa zabezpečila korózna ochrana materiálu TNR v prostredí chladiacej vody o vysokých parametroch a aby sa znížila expozícia obslužného a opravárenského personálu od aktivovaných koróznych produktov v primárnom okruhu, je po celom vnútornom povrchu, kde dochádza k styku s chladiacou vodou a na čele prírubového prstenca, realizovaný návar z nehrdzavejúcej austenitickej chrómniklovej ocele.

Vlastný návar sa potom skladá z dvoch častí:

1.časť, pozostávajúca z jednej vrstvy tzv. silového návaru, ktorá tvorí prechodovú vrstvu medzi feritickým materiálom TNR a austenitickým návarom, je realizovaná na hladkých povrchoch automatovým naváraním pod tavidlom po mocou prídavného materiálu Sv 07Ch25N13 podľa GOST 2246 (tento prídavný materiál nemá ekvivalent podľa ASTM), na zakrivených a nepravidelných plochách ručným naváraním elektrickým oblúkom elektródami ZIO 8 a na vonkajších čelách nátrubkov Φ 500 ručne elektrickým oblúkom elektródami EA 395/9 - obidva prídavné materiály podľa GOST (tieto prídavné materiály nemajú ekvivalent podľa ASTM). Prvá časť nie je medzioperačne tepelne spracovaná okrem časti návaru, vytvoreného elektródou ZIO 8. Tento návar bol žíhaný 10,75 hodiny na teplote 680°C s rýchlosťou ohrevu 13,5 °C/min s ochladzovaním v peci na 300 °C.

2.časť je tvorená tromi vrstvami austenitického návaru, realizovaného na hladkých povrchoch naváraním automatom pod tavidlom prídavným materiálom Sv 08Ch19N10G2B podľa GOST 2246 (tento prídavný materiál nemá ekvivalent podľa ASTM), na zakrivených a nepravidelných plochách elektrickým oblúkom ručne elektródami EA 898/21B a na vonkajších čelách nátrubkov Φ 500 ručne elektrickým oblúkom elektródami EA 400/10T obidva prídavné materiály podľa GOST (tieto prídavné materiály nemajú ekvivalent podľa ASTM). Druhá časť návaru bola po každej návarovej vrstve žíhaná 6 ÷ 10,75 hod. pri teplote 675 ÷ 680°C (s rýchlosťou ohrevu 15÷30°C/min) a s ochladzovaním na 300°C v peci.

Z nehrdzavejúcej chrómovej martenzitickej ocele 14Ch17N2 podľa GOST 5632-72 (táto oceľ nemá ekvivalent podľa ASTM) sú vyrobené drobné súčiastky uzlu kontrolného nátrubku, a to krúžky, zátky, dištančné podložky, vložky, ventily, skrutky a matice. Pretože sa jedná o martenzitickú nehrdzavejúcu oceľ, súčiastky z nej vyrobené sú zušľachtené, t.j. napred kalené z 1010°C do oleja a následne dvakrát

VUJE, a. s.

popustené - najskôr z teploty 740°C (chladené na vzduchu) a potom z teploty 640°C (znovu chladené na vzduchu).

Z Cr-Ni-Mo-V ocele 38ChN3MFA (táto oceľ nemá ekvivalent podľa ASTM) sú vyrobené svorníky HDR M140.

Pružiny, použité v zostave kontrolného nátrubku sú vyrobené z austenitickej chrómniklovej nehrdzavejúcej ocele 12Ch18N10T podľa GOST 5632-72 (táto oceľ nemá ekvivalent podľa ASTM) s vyšším obsahom C, popustenej ohrevom na 420°C s výdržou 25 minút. Tesnenia tohto uzla sú vyrobené z vysoko čistého Ni, označenie podľa STN 423405.11. Medza pevnosti R_m (pri 20°C) oceli 12Ch18N10T vo forme pružinového drôtu o Φ = 8,1mm musí byť v rozsahu 1716 až 2010 MPa.

U niklového tesnenia (označenie podľa STN 423405.11) je pri 20°C predpísaná medza sklzu R_{p0.2} max. 118 MPa a ťažnosť A min. 28 %.

Okrem vyššie uvedených, sú na výrobu TNR typu V-213-Č v menšom rozsahu použité ešte nasledovné prídavné materiály resp. zváracie elektródy (nemajú ekvivalenty podľa ASTM):

- elektródy UONI-13/55 pre ručné zváranie elektrickým oblú kom pre privarenie deliaceho krúžku z ocele 22K,
- drôt SV 04Ch19N11M3 (GOST 2246) pre ručné zváranie pod argónom pre privarenie súčastí kontrolného nátrubku, vyrobených z ocele GOST 08Ch18N10T a STN 17 246.4 (zátky, hrdlá, žľaby, stienky, skoby, .. atď.),

elektróda EA 400/10T pre ručné zváranie, ktorou sú na vnútorný povrch krátkeho hladkého prstenca privarené nosníky zaistenia šachty reaktora, vyrobené z ocele GOST 08Ch18N10T,

6.2.3.3 Špeciálne výrobné postupy

Teleso TNR je vyrobené z výkovkov 3 hladkých prstencov, 2 hrdlových prstencov, prírubového prstenca a výlisku dna.

Oceľ 15CH2MFA bola vyrobená v ŠKODA Plzeň špeciálnou technológiou zlievaných tavieb za použitia rafinačnej trosky. Odlievanie ingotov prebiehalo vo vákuu. Postup pri výrobe bol nasledovný:

- oceľ bola vyrábaná z výberovej vsádzky tvorenej predtaveným odpadom, s obmedzeným obsahom P, S, As, Ni, Co, Cu a surovým železom PVK (akostná liatina) a prísadami s kontrolovaným chemickým zložením. V elektrickej oblúkovej peci (EOP) sa vytavila legovaná predzliatina, ktorá obsahuje všetky legujúce prvky s vyššou afinitou ku kyslíku než k železu.
- Súčasne sa v zásaditej Siemens-Martinskej peci (SM) pripravila neupokojená oceľ. Do pripravenej panvy boli zliate obsahy týchto pecí a tavenina bola potom prelievaná rafinačnou troskou s odkysličovacím a odsírovacím účinkom. Po určitej výdrži (odstátí) bola výsledná oceľ odlievaná cez medzipanvu do kokily, uloženej vo vákuovom kesóne. Hodnota vákua bola menšia než 1 torr; teplota odlievania bola 1640°C.
- Podiel ocele, vytavenej v SM peci k množstvu ocele, vytavenej v EOP bol pri tejto zlievanej technológii 70 : 30 %.

Jednou z najdôležitejších výrobných operácií, pre dosiahnutie vysokej požadovanej úrovne mechanických vlastností, je veľmi presne vykonané tepelné spracovanie daného materiálu. Jednotlivé vyhrubované diely

(prstence a dno) boli preto pred zvarením do celku TNR zušľachtené (kalené a popustené). Výsledkom tepelného spracovania má oceľ bainitickú štruktúru.

Jednotlivé diely TNR sú spolu zvarené automatom prídavným materiálom Sv 10ChMFT (značenie podľa GOST 2246) pod tavidlom AN 42, každý zvar viacerými húsenicami (zvar 0.1.7 a zvar 0.1.6 piatimi húsenicami - priechodmi, ostatné zvary TNR štyrmi húsenicami - priechodmi). Po každej zvarovej húsenici bolo vykonané medzioperačné žíhanie na odstránenie vnútorného pnutia s nasledovnými parametrami: ohrev na teplotu 675÷680°C rýchlosťou 20÷40°C/min, výdrž 5,5÷10,75 hodiny a postupné ochladzovanie v peci na 300 °C. Celý vnútorný povrch telesa a aj veka tlakovej nádoby je pokrytý austenitickou nehrdzavejúcou výstelkou pre zabezpečenie koróznej odolnosti. Výstelka je z dvoch vrstiev a je navarená páskou automatovým navarovaním pod tavidlom s výnimkou hrdiel, kde je nutné použiť ručné navarovanie (pozri tiež kapitolu 6.1.5.2).

Pre výrobu polotovarov bola spracovaná výrobná dokumentácia, pozostávajúca z výkresov a nasledujúcich technických podmienok:

- TPE 10-40/1377/74,Technické podmínky pro výrobu hlavních dílů tlakové nádoby VVER- 440, V-213Č [II.5],
- TPE 10-40/1381/74, Technické podmínky na těleso tlakové nádoby, jeho sekce, víko a vík pro tlakové zkoušky reaktoru V-213-Č [II.6],
- TPE 10-40/1378/74, Technické podmínky pro kompletaci a konečnou kontrolu tlakové nádoby reaktoru V-213-Č [II.7].

6.2.3.4 Degradácia materiálov tlakovej nádoby reaktora

U ocelí s kubickou priestorovo centrovanou mriežkou, t.j. feritického typu, medzi ktoré patrí aj oceľ 15Ch2MFA, z ktorej sú vyrobené TNR MO34, sa prejavuje výrazné zníženie vrubovej húževnatosti pri určitej, spravidla nízkej teplote. Táto teplota sa nazýva prechodová teplota alebo teplota prechodu ku krehkému porušeniu, resp. kritická teplota krehkosti a označuje sa T_{κ} .

Hodnota T_{κ} je závislá na chemickom zložení a stave, t.j. technologickom postupe pri výrobe a tepelnom spracovaní. Obvykle sa pohybuje v oblasti veľmi nízkych (záporných) teplôt a významne neovplyvňuje rozsah praktického použitia ocele. Ožarovanie môže spôsobiť zmeny vlastností materiálov, čo má za následok posun hodnoty T_{κ} .

U tlakových nádob reaktorov, u ktorých je integrita nádoby, a s tým súvisiaca bezpečnosť, jednou z najdôležitejších otázok, je hlavným a výrazne sa prejavujúcim činiteľom, ovplyvňujúcim T_K , neutrónové žiarenie, ktorému je materiál TNR v oblasti aktívnej zóny vystavený.

V súčasnosti akceptovaný model degradácie mechanických vlastností popisuje tento mechanizmus ako interakciu vysoko energetických neutrónov s uzlovými atómami kovu v mriežke s následným vznikom mriežkových porúch (vakancie, intersticiály, atď.). Počet mriežkových porúch s dobou ožarovania rastie, čím dochádza k vyčerpávaniu zásoby plasticity materiálu, zvyšovaniu medze pevnosti, rastu tvrdosti a posunu teploty krehkého porušovania do oblasti vyšších teplôt a zníženiu úrovne maximálnych hodnôt vrubovej húževnatosti. Proti mechanizmu tvorby radiačne indukovaných porúch pôsobí zároveň aj mechanizmus ich anihilácie, ktorý riadi proces difúzie intersticiálnych atómov v mriežke. Celý dej má saturačný charakter, ktorý sa tiež nazýva žíhací efekt a s výhodou sa používa pri regenerácii materiálu skrehnutých TNR.

Podľa metodík hodnotenia stavu materiálov TNR, prijatých jadrovým dozorom v SR a používaných pre hodnotenie prevádzkovaných blokov v SR, je prechodová teplota definovaná ako teplota, pri ktorej poklesne vrubová húževnatosť na hodnotu 50 J/cm² [II.3].

Z vyššie uvedeného plynie nutnosť sledovať, a mať možnosť predpovedať, úroveň zmien mechanických vlastností materiálu TNR v priebehu prevádzky.

Súčasťou dodávky kompletov reaktorov MO34 je systém zavezenia overovacích vzoriek oceli TNR (tzv. Štandardný program overovacích vzoriek - ŠPOV), ktorý bol určený na hodnotenie zmien mechanických vlastností materiálov TNR v priebehu prevádzky.

Štandardné programy overovacích vzoriek boli navrhnuté a realizované na úrovni vedomostí z oblasti hodnotenia radiačnej degradácie ocelí TNR na začiatku 70-tich rokov v bývalom ZSSR. Táto skutočnosť sa prejavila kritikou výsledkov jednotlivých etáp hodnotenia pri realizácii ŠPOV. Kritická analýza viedla napokon bývalú ČSKAE k vydaniu Rozhodnutia č.233/92 [II.1] o potrebe realizovať na prevádzkovaných a novobudovaných blokoch dokonalejšie POV, ktoré by splnili stále náročnejšie požiadavky na bezpečnú a spoľahlivú prevádzku blokov JE a odstránili nedostatky štandardných programov.

Ešte pred vydaním tohto rozhodnutia sa vo VUJE realizovali niektoré experimentálne práce so snahou spresnenia merania spektra a fluencie neutrónového toku, dopadajúceho na steny TNR a experimentálne práce v oblasti monitorovania ožarovacej teploty.

V neposlednej miere bola iniciácia zavedenia dokonalejších POV motivovaná aj potenciálnou možnosťou predĺženia životnosti blokov s TNR typu V-213.

Na základe objednávky SE a.s. bol vo VUJE spracovaný návrh projektu zdokonaleného POV a následne predložený na posúdenie na ÚJD SR. Výsledkom posúdenia ÚJD SR bolo jednoznačné konštatovanie, že realizáciou tohto projektu bude možné považovať úlohu, vyplývajúcu z Rozhodnutia č.233/92, za splnenú.

Spracovaním a uskutočnením projektov zmien boli potom zahájené realizácie zdokonalených POV jednak na 3. a 4.bloku JE V-2 pod názvom "Doplnkový program overovacích vzoriek" - DPOV a jednak na 1. a 2. bloku EMO12 pod názvom "Modernizovaný program overovacích vzoriek" - MPOV.

V rámci prípravy realizácie dostavby MO34 je navrhnutá a prijatá "Koncepcia programu overovacích vzoriek POV MO34"[I.12], v rámci ktorej bol spracovaný návrh zdokonaleného projektu POV pod názvom MPOV34.

Predkladaný návrh koncepcie projektu MPOV34 pre MO34 vychádza zo zásadnej požiadavky, ktorou je monitorovanie stavu materiálov TNR počas celej životnosti JE, t.j. aj nad pôvodne plánovanú životnosť.

Veľkou výhodou v prípade monitorovania radiačnej degradácie TNR v MO34 je fakt, že bloky sú v takom stave, že nám umožnia pomerne jednoducho pristúpiť k zásadnej modernizácii programu overovacích vzoriek. Hlavné prvky tohto prístupu sú nasledovné:

- vykonať mechanické skúšky na neožiarených vzorkách ("0" stav) podľa pôvodného ŠPOV,
- z častí jednotlivých vzoriek po vykonaní mechanických skúšok v "0" stave vyrobiť vzorky pre prvých 6 ožarovacích reťazcov MPOV34 pre konkrétny blok MO34,
- pôvodné reťazce ŠPOV demontovať a rozobrať jednotlivé ožarovacie schránky tak, aby bolo možné zabezpečiť monitorovanie radiačnej degradácie ocele TNR počas celej životnosti bloku,

6.2.3.4.1 Druhy skúšobných metodík a vzoriek

Ako základné metódy pre stanovenie posunu prechodovej teploty navrhujeme v zhode so súčasnými požiadavkami a materiálovými možnosťami realizovať nasledovné typy skúšok:

- skúška rázom v ohybe,
- skúška lomovej húževnatosti COD,
- skúška vtláčaním na malých vzorkách SPT (obecne používaná skratka z anglického Small Punch Test).

Aby bol zabezpečený dostatok originálneho materiálu pre monitorovanie stavu TNR počas celej životnosti, predpokladáme ožarovať nasledovné typy vzoriek:

- telieska o rozmeroch cca 10 x 10 x 11 mm, z ktorých budú po ožiarení rekonštituované vzorky typu Charpy-V,
- rovnaké rekonštitučné telieska pre COD vzorky s trhlinou nacyklovanou po ožarovaní,
- SPT vzorky s rozmermi Ø 8 mm x 0,5 mm pre SPT skúšku.

Vhodnosť rozmeru rekonštitučných teliesok ako aj návrh optimálnych parametrov rekonštitúcie bola detailne posúdená v rámci výskumnej úlohy [III.1] a [III.2].

Na stanovenie prechodovej teploty T_{kf} daného materiálu zo skúšky vrubovej húževnatosti (t. j. zostrojenie jednej prechodovej krivky) navrhujeme použiť 12 teliesok a na stanovenie J-integrálu a J-R krivky zo skúšky lomovej húževnatosti zo skúšobných vzoriek typu COD tiež 12 rekonštituovaných skúšobných teliesok.

Pre stanovenie základných mechanických vlastností odpovedajúcich skúške ťahom, ako aj na stanovenie prechodových teplôt T_{kf} daného materiálu je potrebné exponovať z jedného typu materiálu minimálne 25 ks SPT teliesok.

Okrem štandardne predpísaného postupu pre hodnotenie životnosti TNR podľa výsledkov skúšok vrubovej húževnatosti bolo navrhnuté zaradiť do hodnotenia životnosti TNR v rámci programu MPOV34 aj hodnotenie metódou "Master Curve".

6.2.3.4.2 Meranie ožarovacej teploty vzoriek MPOV34

Na základe skúseností a výsledkov meraní v rámci realizovaných ožarovacích programov DPOV a MPOV boli navrhnuté nasledovné merania a monitorovania teplôt v ožarovacích reťazcoch programu MPOV34:

- meranie T_{ož} tromi druhmi tavných monitorov v rozsahu teplôt od 290 do 305°C v každom ožarovacom puzdre,
- kontinuálne meranie T_{ož} v jednom reťazci (z ožarovacej sady šiestich reťazcov) plášťovými termočlánkami s plášťom z nehrdzavejúcej ocele typu 18Cr10Ni stabilizovanej titánom s izolovaným meracím koncom.

6.2.3.4.3 Meranie fluencie neutrónov v ožarovacích puzdrách

Na základe vyššie uvedených skúseností bol navrhnutý v ožarovacích reťazcoch programu MPOV34 nasledovný systém merania a vyhodnocovania fluencie neutrónov:

- okrem detektorov pre rýchlu oblasť budú použité aj detektory pre epitermálnu (E) a termálnu (T) oblasť,
- pokrytie energetickej oblasti neutrónov v E a T-oblasti umožní určiť spektrum neutrónov v celej energetickej oblasti. K určeniu spektra neutrónov bude použitý kód typu SAND (kód potrebuje detektory aj v E a T-oblasti),

- na základe spektra neutrónov určeného pomocou kódu SAND a knižníc účinných prierezov IRDF, resp. JENDL budú určené efektívne účinné prierezy. Takto určené efektívne účinné prierezy budú porovnané so súčasne používanými hodnotami a budú určené odchýlky medzi hustotami toku, resp. fluencie neutrónov spôsobené rôznymi efektívnymi účinnými prierezmi,
- výsledky merania určené metódou efektívnych účinných prierezov budú konfrontované s integrálnou metódou a tiež s metódou využívajúcou výsledky merania na vonkajšom povrchu TNR,
- pre vybraný reťazec budú výsledky merania konfrontované s transportnými výpočtami s cieľom určiť korekcie pri nevhodnom natočení kontajnera oproti AZ.

Zároveň bude pri meraniach na vonkajšom povrchu TNR (posledná kampaň pred vyvezením konkrétneho ožarovacieho reťazca) budú použité aj detektory pre E a T-oblasť s cieľom určiť spektrum neutrónov a následne efektívne účinné prierezy.

6.2.3.4.4 Konštrukcia ožarovacích puzdier a reťazcov

Pre program MPOV34 bolo navrhnuté použiť osvedčenú konštrukciu ožarovacích reťazcov s úpravami na základe doterajších skúseností získaných v rámci DPOV i MPOV.

Hlavným zmyslom tohto prístupu je:

- možnosť priamo porovnávať výsledky DPOV, MPOV a MPOV34,
- splnenie požiadavky na jednoznačnú orientáciu ožarovacích puzdier voči aktívnej zóne reaktora, čo má výrazný vplyv na presnosť určenia fluencií,
- uloženie skupiny vzoriek pre zostrojenie krivky prechodovej teploty v rovnakých ožarovacích podmienkach s minimálnym rozptylom fluencie,
- jednoznačné uloženie ožarovacích schránok po výške AZ (faktor urýchlenia),
- uloženie rôznych (i nových) typov vzoriek v ožarovacích puzdrách s príslušnou úpravou konštrukcie vnútorných hliníkových výplní.

V rámci programu MPOV34 je navrhnuté pre každý blok vyrobiť 6 reťazcov s expozičnými dobami rovnako ako pri programoch DPOV a MPOV, teda po dobu 1, 2, 3, 5, 7 a 10 kampaní. Každý reťazec pritom bude obsahovať 5 puzdier. Návrh MPOV34 bol odovzdaný investorovi v decembri 2006. Po rozhodnutí o dostavbe oboch blokov bol predložený na posúdenie a pripomienkovanie na ÚJD SR a na základe pripomienok dozoru bol spracovaný realizačný projekt MPOV34 a po jeho schválení v roku 2010 začala jeho realizácia.

6.2.3.5 Limitné hodnoty tlaku a teploty

Pre stanovenie limitných hodnôt tlaku a teploty TNR MO34 je nevyhnutné poznať počiatočné mechanické vlastnosti základného materiálu a zvarového kovu v blízkosti AZ TNR a ich vývoj v čase spôsobený degradáciou materiálov v prevádzke JE. Pre tento účel je najdôležitejšou veličinou počiatočná hodnota kritickej teploty krehkosti T_{K0} a parametre umožňujúce predikciu T_K. V štádiu projektovanie je nutné používať hodnoty zaručené výrobcom, ktoré sú taktiež uvedené v štandarde [II.3]. V tejto súvislosti je potrebné uviesť, že podľa výrobcu ŠKODA JS s.r.o. materiál TNR JE VVER 440 od 14. vyrobeného kompletu je v oblasti AZ potrebné považovať, s ohľadom na sprísnenie požiadaviek na výrobu a podľa odpovedajúceho chemického zloženia, za materiál 15Ch2MFAA [I.8].

Vplyv prevádzkovej degradácie materiálov TNR je v [II.3] vyjadrený rovnicou :

$$T_{\rm K} = T_{\rm K0} + \Delta T_{\rm F} + \Delta T_{\rm T} + \Delta T_{\rm N}, \qquad (6.2.3.5-1)$$

kde ΔT_F je prírastok vplyvom fluencie rýchlych neutrónov s energiou väčšou ako 0,5 MeV, ΔT_T zohľadňuje vplyv teplotného starnutia a v zhode s [II.3] je pre dané materiály 0°C, ΔT_N zohľadňuje vplyv únavy. V [I.5] sa ΔT_N pokladá za rovné 20.D [0°C], kde D je kumulácia únavového poškodenia (0 ≤ D ≤ 1). Pre ΔT_F platí:

$$\Delta T_{F} = A_{F} \cdot (F_{n}/F_{0})^{1/3}, F_{0} = 10^{22} n/m^{2}, \qquad (6.2.3.5-2)$$

 F_n je fluencia rýchlych neutrónov v [n/m²] v hodnotenom mieste TNR.

Pre porovnanie uvádzame minimálne hodnoty z pasportov oboch TNR [I.1], [I.2].

Prvá časť tejto kapitoly je zameraná na rozbor STD popisujúcej pevnostný výpočet TNR [I.5], ktorého súčasťou bolo i stanovenie limitných hodnôt tlaku a teploty TNR MO34. V ďalších častiach budú popísané nové práce vykonané pre odvodenie limitných p-T kriviek modernými postupmi lomovej mechaniky.

6.2.3.5.1 Limitné hodnoty tlaku a teploty podľa STD TNR MO34

Tzv. pevnostný výpočet TNR je rozdelený v správe [I.5], vydanej v roku 1980, na dve časti. Prvá časť je zameraná na normálne podmienky prevádzky. Druhá časť sa zaoberá havarijnými režimami. Tieto dve časti sa líšia i použitou metodikou výpočtov.

V časti pevnostného výpočtu pre normálne podmienky prevádzky sa uvádza, že hodnotenie odolnosti TNR proti krehkému porušeniu vychádza z postupov ruského výpočtového štandardu [II.2]. Tento štandard však v skutočnosti (vydanie z roku 1973) pre tento účel neobsahuje žiadny postup. Použitá metóda hodnotenia je založená na tzv. Pelliniho pevnostnom diagrame, ktorý priamo nepoužíva postupy lomovej mechaniky, ale porovnávanie dovolených napätí a teplôt.

Analýzy sa zaoberajú hodnotením všetkých prevádzkových režimov TNR, ktoré spadajú do kategórie normálnych podmienok prevádzky a do kategórie narušenia normálnych podmienok prevádzky a tlakových skúšok, pričom sa uvažuje stav materiálu od začiatku prevádzky až do ukončenia projektovanej doby prevádzky (v prípade TNR je to 40 rokov). Cieľom je odvodiť kritéria pre dovolené tlaky a teploty v TNR. Hlavným parametrom, ktorý vstupuje do tohto hodnotenia je veličina T_K. V súlade s neskoršou verziou ruskej výpočtovej normy [II.3] sú ako T_{K0} základného materiálu TNR a zvarového kovu použité predpísané hodnoty 0°C a 20°C. Vplyv prevádzkovej degradácie materiálov TNR je vyjadrený známou rovnicou (6.2.3.5.-1). V zhode s [II.3] sa ΔT_T pre daný materiál považuje za 0°C a ΔT_N je 20.D [0°C], kde D je kumulácia únavového poškodenia (D je vo valcovej časti nádoby určite menšie ako 0,2). Pre ΔT_F použili autori [I.5] vzťah (6.2.3.5.-2) s A_F = 9 pre ZM a A_F = 13 pre ZK (teploty medzi 250 a 300°C).

Odhad fluencií pre 40 rokov prevádzky v kritických miestach TNR je podľa [I.5] :

- pre ZM v strede AZ je $F_n = 3,23.10^{24} \text{ n/m}^2$
- pre ZK zvar č.4 je $F_n = 2,48.10^{24} \text{ n/m}^2$.

Hodnoty T_K na konci prevádzky (40 rokov) sú podľa [I.5] :

Prevádzkové teploty a tlaky musia byť vo všetkých vyššie uvedených prevádzkových režimoch obmedzené čiarou A₁A₂B₂B₃B₄B₅B₆C₆C₇. Súčasne je podľa [I.5] nevyhnutné vykonávať po celú dobu prevádzky JE pravidelné defektoskopické kontroly TNR a zaistiť existenciu a fungovanie programu overovacích vzoriek.

V časti pevnostného výpočtu pre havarijné režimy sa vychádza z rovnakých vstupných údajov ako v prípade výpočtov pre normálne podmienky prevádzky, ale metodika hodnotenia odolnosti TNR proti krehkému porušeniu je založená na postupoch lineárnej elastickej lomovej mechaniky. Tento postup používa podobne ako postup neskoršie vydaného štandardu [II.3] postuláciu trhliny v kritických miestach TNR. Nasleduje výpočet namáhania tejto trhliny - výpočet súčiniteľa intenzity napätia K_I a porovnávanie K_I s lomovou húževnatosťou K_{IC}(T,T_K) a to pre všetky časové okamihy analyzovanej havárie.

V mieste zvaru č.4 bola postulovaná obvodová podnávarová trhlina s rozmerom $2a_0=5mm$, rovnaká trhlina bola postulovaná v safe-ende primárnych nátrubkov TNR. K_I bol počítaný analyticky použitím maximálnych hodnôt zložiek napätosti v stene nádoby σ_{max} a vzťahu pre K_I, ktorý odpovedá zjednodušeného modelu - doske obsahujúcej trhlinu:

$$K_{I} = C. \sigma_{max} (\pi a)^{1/2}$$
 (6.2.3.5-3)

Boli analyzované režimy roztrhnutia potrubí D500, D250 a D135. V každom čase analyzovaných režimov bola vykonávaná kontrola plnenia kritéria:

$$K_{I} \leq K_{IC},$$
 (6.2.3.5-4)

kde $K_{IC} = 20400/[86-(T-T_{K0})], [K_{IC}]=kp/mm^{3/2}$

Cieľom analýz havarijných režimov bolo preukázať, že pomer a_c/a_0 (a_c je kritický rozmer trhliny odpovedajúci K_{IC}) bude v priebehu všetkých uvažovaných havarijných režimov vždy väčší ako 2, resp. pomer K_I/K_{IC} bude väčší ako $\sqrt{2}$. Výpočtami bolo preukázané splnenie oboch podmienok.

Tieto analýzy boli poplatné dobe svojej realizácie a majú z dnešného pohľadu množstvo nedostatkov. Preto bolo potrebné vykonať novú analýzu [I.17] založenú na moderných postupoch lomovej mechaniky a platnej normatívnej dokumentácii, ktorá je opísaná v nasledujúcej kapitole 6.2.3.5.2.

6.2.3.5.2 Odvodenie p-T kriviek postupom podľa metodiky VERLIFE

S ohľadom na uvedené nedostatky doteraz odvodených p-T kriviek TNR MO34 boli realizované nové výpočty založené na postupoch návodu VERLIFE. Boli odvodené dovolené p-T krivky pre normálne podmienky prevádzky, dovolené p-T krivky pre tlakové skúšky a dovolené p-T krivky pre havarijné režimy a režimy studeného pretlakovania. Podrobnosti o týchto výpočtoch sú v správe [I.17]. Ďalej bude uvedený stručný popis metodiky a výsledky výpočtov.

6.2.3.5.2.1 Metodika výpočtu p-T kriviek

p-T krivky sa určujú výpočtami za použitia aparátu lomovej mechaniky. K tomuto účelu je vytvorený model MKP telesa TNR, obsahujúci výpočtový - tzv. postulovaný defekt. Výpočet jeho zaťaženia v rôznych prevádzkových stavoch poskytuje údaje, ktoré sa porovnávajú s kriteriálnymi mechanickými vlastnosťami charakterizujúcimi lomovú húževnatosť materiálov TNR. Výsledkom sú potom vyššie spomenuté p-T krivky.

vüje

6.2.3.5.2.1.1 Postulovaný defekt

V metodických postupoch pre hodnotenie integrity TNR a odvodenie p-T kriviek sa štandardne využívajú postulované trhliny. V súlade s odporučeniami MAAE [II.10], odporučeniami VERLIFE [II.4], ale i s ohľadom na bežnú prax v krajinách EÚ, vychádza v súčasnosti definícia rozmerov a polohy postulovaných defektov z úrovne kvalitatívnych parametrov vykonávaných prevádzkových kontrol TNR, vrátane rozmerov prevádzkovými kontrolami spoľahlivo detekovateľných trhlín. Podmienka pre možnosť použitia postulovaných defektov s hĺbkou menšou ako 0,25t je podľa [II.4], [II.10] najvhodnejším spôsobom vytvorená existenciou systému kvalifikovaných kontrol. SE a.s. predložila ÚJD SR súbor dokumentov [I.14], [I.15] dokladujúcich vykonanú kvalifikáciu prevádzkových kontrol TNR. ÚJD SR akceptoval 28.3. 2006 systém prevádzkových kontrol pre TNR VVER 440, typ 213 ako kvalifikovaný v zmysle BN ÚJD SR č. II.5.4/2004. Pre oblasť kritického zvaru 5/6 sú kontroly kvalifikované na hĺbku vnútorného defektu 6,5 mm so spoľahlivosťou 100%; čo znamená, že defekt o hĺbke 15 mm je spoľahlivo detekovateľný s bezpečnostnou rezervou väčšou ako 2. Pre povrchové defekty je veľkosť spoľahlivo detekovateľného defektu rovná dokonca 3 mm.

Vychádzajúc z uvedených kvalitatívnych parametrov vykonávaných prevádzkových kontrol TNR a s ohľadom na dominanciu tlakového zaťaženia je preto možné v súlade s [II.14] použiť ako postulovanú trhlinu pre odvodzovanie p-T kriviek pre normálne podmienky prevádzky a pre režim tlakovej skúšky osovú povrchovú trhlinu s a=15 mm, a/c=0,3 lokalizovanú v zvare 5/6. Pre ostatné režimy prevádzky (havarijné režimy a režimy narušenia normálnych prevádzkových podmienok) je možné použiť osovú podnávarovú trhlinu taktiež s parametrami a=15 mm, a/c=0,3 lokalizovanú v zvare 5/6. Je potrebné uviesť, že ďalšou podmienkou pre možnosť použitia podnávarovej trhliny je zaistenie integrity návaru v prevádzke TNR, čo je zabezpečované existenciou systému periodických prevádzkových defektoskopických kontrol a znalosťou mechanických vlastností materiálu návaru.

vůje



Obr. 6.2.3-1 Výpočtový model MKP- TNR s postulovaným podnávarovým defektom





Obr. 6.2.3-2 Výpočtový model MKP- TNR s postulovaným povrchovým defektom

6.2.3.5.2.1.2 Výpočtový model

Výpočtový model je založený na sieti KP predstavujúcu valcovú časť TNR s postulovanou trhlinou. Základné okrajové podmienky tohto modelu sú: na rovinách symetrie sú predpísané nulové posunutia v smeroch kolmých k rovinám symetrie. Výnimku tvoria len uzly ležiace na ploche trhliny, ktoré sa môžu v smere kolmom k rovine trhliny voľne posúvať – trhlina sa môže otvárať.

Tento model umožňuje priamy výpočet J-integrálu resp. hodnôt K_I a presné hodnotenie podmienok zaťaženia celého obrysu trhliny. Tento progresívny prvok výpočtu odstraňuje všetky nezrovnalosti a pochybnosti spojené s používaním analytických vzťahov pre určovanie K_I, u ktorých sa vychádzalo z priebehu zložiek napätosti po hrúbke steny bez prítomnosti trhliny. Súčasné použitie elastoplastického modelu materiálu a výpočet napätosti a deformácie založený na teórii malých pružne plastických deformácií zachycuje verne procesy tvorby plastickej zóny na čele trhliny a prípadný vznik plastickej deformácie v návarovej vrstve TNR. Použitie nového výpočtového modelu vedie k podstatnému spresneniu výpočtov.

Sieť konečných prvkov je, spolu so základnými okrajovými podmienkami, generovaná automatickým generátorom ORMGEN [III.3] vyvinutým v ORNL (Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA. Tento generátor umožňuje modelovanie trhlín rôznych konfigurácií (osová, obvodová, povrchová, podpovrchová atď.) vo valcových telesách a rovných doskách. Výstupom programu je sieť konečných prvkov obsahujúca zvolenú konfiguráciu trhliny, pričom v okolí jej čela sa nachádzajú špeciálne trhlinové prvky umožňujúce riešiť značne nelineárne problémy lomovej mechaniky. Takto vygenerované siete konečných prvkov sú transformovaná do výpočtového programu ADINA. Celý proces prípravy výpočtového modelu je zakončený modifikáciou okrajových a počiatočných podmienok výpočtu pomocou interaktívneho programu ADINA AUI.

Pri výpočtoch rozloženia teplôt uskutočnených programom ADINA-T za účelom určenia limitných p-T kriviek je použitý materiálový model s izotropickým a teplotne závislým súčiniteľom tepelnej vodivosti λ ako aj teplotne závislou tepelnou kapacitou (ρ .Cp).

Pri elastoplastickom výpočte je použitý termo-elasto-plastický materiálový model s izotropickým spevňovaním za predpokladu malých posunutí/rotácií a malých deformácií. Modul pružnosti v ťahu E, súčiniteľ dĺžkovej rozťažnosti α , Poissonovo číslo v a hustota ρ sú uvažované ako teplotne závislé.

Hodnoty J integrálu sú programom ADINA počítané v každom zadanom bode trhliny metódou virtuálnych posunutí a to vždy pre niekoľko rôznych hodnôt posunutí. Ak majú byť vypočítané J-integrály korektné, musia byť všetky hodnoty príslušné jednému bodu trhliny veľmi blízke, v opačnom prípade je J-integrál závislý na ceste a nie je platným parametrom lomovej mechaniky umožňujúcim charakterizáciu iniciácie krehkého lomu na čele trhliny. Preto je vždy nevyhnutná kontrola nezávislosti J na integračnej ceste. Pri splnení týchto podmienok je možné hodnoty súčiniteľa intenzity napätia K_I vypočítať z hodnôt J integrálu jednoduchým prepočtom, ktorý je platný pre podmienky rovinnej deformácie :

$$K_{I} = \{E.J / (1-v^{2})\}^{\frac{1}{2}}$$
 (6.2.3.5-5)

6.2.3.5.2.1.3 Materiálové vlastnosti TNR

Hodnoty fyzikálnych charakteristík materiálov TNR, ktoré boli použité vo výpočtoch, sú hodnotami doporučenými v [II.4]. Hodnoty počiatočných mechanických vlastností pochádzajú z [II.3] a [I.10] (zaručené hodnoty).

Pre určenie dovolených p-T kriviek je nevyhnutná znalosť hodnôt kritickej teploty krehkosti na počiatku prevádzky T_{K0} a prognózu jej vývoja pre projektovanú dobu ukončenia prevádzky JE T_K . Hodnota T_K je v ľubovoľnom čase daná rovnicou :

$$T_{\rm K} = T_{\rm K0} + \Delta T_{\rm N} + \Delta T_{\rm T} + \Delta T_{\rm F}, \qquad (6.2.3.5-6)$$

kde posledné tri zložky vyjadrujú prírastky kritickej teploty krehkosti vplyvom únavového, teplotného, a radiačného starnutia (skrehnutia) materiálu a T_{K0} je počiatočná hodnota kritickej teploty krehkosti. Pre ΔT_F sa používa poloempirický vzťah:

$$\Delta T_{\rm F} = A_{\rm F.} (F_{\rm n}.10^{-22})^{1/3}, \ 1.10^{22} \text{n/m}^{-2} \le \text{F} \le 3.10^{24} \text{n/m}^{-2} \tag{6.2.3.5-7}$$

kde A_F je koeficient radiačného skrehnutia a F_n je fluencia neutrónov s E > 0,5 MeV v rozmedzí 10^{22} - 10^{24} n/m².

$$\Delta T_{\rm N} = 20.D,$$
 (6.2.3.5-8)

kde D je celkové miestne únavové poškodenie ($0 \le D \le 1$).

Prírastok kritickej teploty krehkosti vplyvom teplotného starnutia ΔT_T je pre materiály TNR JE VVER 440 v súlade s [II.3] a [II.4] nulový. To isté platí, s ohľadom na zanedbateľné únavové poškodenie valcovej časti TNR v oblasti AZ JE VVER 440, i pre prírastok vplyvom únavovej degradácie ΔT_N . Experimentálne zistené hodnoty T_{K0} pre nádoby TNR MO34 sú uvedené v sprievodnej technickej dokumentácii [I.10]. V súlade s Appendixom III, par.2.3 [II.4] je ich použitie možné len v tom prípade, ak je k nim pripočítaná predpísaná bezpečnostná rezerva δ_M . Tá je pre základný materiál 10°C a pre zvarový kov 16°C. Konzervatívne hodnoty A_F je možné nájsť v [II.4], resp. v [II.3].

Vo výpočtoch - prognózach T_K boli, použité konzervatívne hodnoty fluencií podľa výpočtov správy [I.18]. Odpovedajúca prognóza hodnôt T_K základného materiálu a zvarového kovu je pre celú plánovanú dobu prevádzky TNR 3. a 4. bloku EMO preto nasledujúca :

Pozn.

Dá sa očakávať, že skutočné prevádzkové hodnoty fluencií pre TNR MO34 budú nižšie. Mali by byť určované priamym meraním v rámci realizácie MPOV pre TNR JE MO34. Na predpokladanom znížení skutočnej fluencie na zvar č. 5/6 TNR MO34 sa podieľa aj výhodnejšia poloha tohto zvaru voči stredu AZ - reálne je o 2,2 cm resp. 0,6 cm nižšia oproti projektovej polohe.

Ako je z priebehov T_K vidieť, kritickým miestom TNR je zvar 5/6. Preto boli pre výpočty dovolených p-T kriviek TNR blokov MO34 použité konzervatívne prognózované hodnoty T_K na vnútornom povrchu nádoby TNR v mieste zvarových spojov 5/6.

Pre výpočet p-T kriviek je potrebná i znalosť závislosti lomovej húževnatosti na teplote. Pre všetky druhy p-T kriviek boli využité závislosti (pre režim NOC viď rovnica (6.2.3.5-9), pre režim HT rovnica (6.2.3.5-10) a pre režimy EC rovnice (6.2.3.5-11) a (6.2.3.5-10)) doporučené návodom VERLIFE [II.4], ktoré reprezentujú spodnú obalovú krivku pre všetky typy materiálov TNR JE VVER 440:

[K _{IC} (T _i)]₁ = min {13 + 18·exp [0.020·(T-T _k)]; 100}	(6.2.3.5-9)
$[K_{IC}(T)]_2 = min \{17 + 24 \cdot exp [0.018 \cdot (T-T_k)]; 120\}$	(6.2.3.5-10)
[K _{IC} (T)] ₃ = min {26 + 36·exp [0.020·(T-T _k)]; 200}}	(6.2.3.5-11)

6.2.3.5.2.1.4 Algoritmy výpočtu p-T kriviek

Normálne podmienky prevádzky

Uvažované záťaže :

Vnútorný pretlak p, teplotný gradient po hrúbke steny ∆T=25°C (v stabilných podmienkách prevádzky), zaťaženie vzniknuté pomalým ochladzovaním dovoleným trendom 30°C/h resp. pomalým ohrevom dovoleným trendom 20°C/h, zvyškové napätie vzniknuté zhotovovaním návaru TNR.

Je vykonaná séria analýz namáhania TNR na modeli s postulovanou trhlinou pre rôzne hodnoty vnútorného pretlaku v TNR a taktiež analýzy namáhania pre ostatné vyššie uvedené záťažové účinky. V analyzovanej časti TNR sa pre každý hodnotený bod postulovaného defektu a danú hodnotu vnútorného pretlaku p_i stanoví hodnota celkového zaťaženia, meraná príslušnou hodnotou K_{IL}, ktorá je sumou hodnôt K_I od jednotlivých zaťažovacích účinkov. Dovolená hodnota teploty T_i sa (pre danú lokalitu TNR) pre tlak p_i vypočíta zo vzťahu :

$$K_{IL} = K_{I}(p_{i}) + K_{I}(\Delta T) + K_{I}(dT/dt) = [K_{IC}(T_{i})]_{1}, \qquad (6.2.3.5-12)$$

kde KIL je celkové zaťaženie trhliny

<u>Tlakové skúšky</u>

Uvažované záťaže :

Vnútorný pretlak p, zaťaženie vzniknuté pomalým ochladzovaním dovoleným trendom 30°C/h resp. pomalým ohrevom dovoleným trendom 20°C/h, zvyškové napätie vzniknuté zhotovovaním návaru TNR.

Je vykonaná séria analýz namáhania TNR na modeli s postulovanou trhlinou pre rôzne hodnoty vnútorného pretlaku v TNR a taktiež analýzy namáhania pre ostatné vyššie uvedené záťažové účinky. V analyzovanej časti TNR sa pre každý hodnotený bod postulovaného defektu a danú hodnotu vnútorného pretlaku p_i stanoví hodnota celkového zaťaženia, meraná príslušnou hodnotou K_{IL}, ktorá je sumou hodnôt K_I od jednotlivých zaťažovacích účinkov. Dovolená hodnota teploty T_i sa (pre danú lokalitu TNR) pre tlak p_i vypočíta zo vzťahu :

$$K_{IL} = K_I(p_i) + K_I(dT/dt) = [K_{IC}(T_i)]_2,$$
 (6.2.3.5-13)

<u>Havarijné režimy</u>

Uvažované záťaže :

Odolnosť TNR proti náhlemu lomu je potrebné zhodnotiť najmä v situáciách, ktoré sa súhrnne kategorizujú ako tzv. tlakovo-teplotné šoky-PTS (pressurized thermal shocks). Tie sú charakterizované rýchlou a veľkou mierou ochladzovania steny TNR za súčasného pôsobenia tlaku v TNR. PTS sú iniciované napr. haváriami typu LOCA. V ďalšom texte ich budeme označovať ako režimy 1.typu. Sú samozrejme možné i iné, ale rovnako nebezpečné udalosti, ktoré sú charakterizované náhlym zvýšením tlaku pri nízkych teplotách média v TNR. Tieto udalosti sa zahŕňajú pod pojem studené pretlakovanie (cold overpressure). Môžu vznikať pri nábehu resp. odstavovaní bloku a nie sú preto nevyhnutne zviazané s porušením dovolených trendov pre zvyšovanie či znižovanie teploty média, ako je to v prípade PTS. Ďalej ich budeme označovať ako režimy 2.typu.

Získanie p-T kriviek pre režimy 2.typu je pomerne jednoduché. To však neplatí pre režimy 1.typu. Súčiniteľ intenzity napätia K_I, je determinovaný priebehmi tlaku média a priebehmi teploty v stene nádoby, nie je však zviazaný s okamžitou hodnotou teploty média. Problémom je ďalej fakt, že okamžitá teplota média nie je zhodná s okamžitou teplotou v hodnotenom mieste defektu, ktorá však určuje lokálnu lomovú húževnatosť materiálu K_{IC}. Teplota média teda neidentifikuje lokálne podmienky krehkého lomu K_I=K_{IC} počas priebehu analyzovanej udalosti. Táto disproporcia je však odstrániteľná.

Ďalším uvažovaným zaťažovacím účinkom je opäť zvyškové napätie vzniknuté zhotovovaním návaru TNR a taktiež zvyškové napätie v zvare. Priame zohľadnenie zvyškových napätí vo zvaroch je možné v programe ADINA len zadaním počiatočných deformácií, čo je však veľmi komplikovaná úloha. Druhou možnosťou je konzervatívne pridanie analyticky stanovených hodnôt K_{Ires} k hodnotám K_I vypočítaných programom ADINA. Podľa [II.4], [II.10] je možné využiť pre výpočet K_{Ires} vzťah pre priebeh zvyškového osového i obvodového napätia v tvare :

 $\sigma = 60.\cos(2\pi x/t), \ [\sigma] = MPa,$ (6.2.3.5-14)

Určenie p-T kriviek pre priebeh režimov 1. Typu :

Celá množina režimov 1. typu sa konzervatívne zredukuje na skupinu skokových zmien teploty média v TNR z nominálnej hodnoty teploty v studenej vetve T_c na teploty, ktorých spodná hranica odpovedá teplote havarijnej chladiacej vody dodávanej do TNR. Postup analýzy sa skladá z nasledujúcich krokov :

1) Vykonanie teplotnej a napäťovej analýzy MKP pre sériu skokových zmien teploty média v TNR z nominálnej teploty média v studenej vetvi PO T_c na T_i (tj. skok o ΔT_i)

Výpočet je realizovaný programom ADINA s použitím elastoplastického modelu materiálu TNR a aplikáciou teórie malých pružne-plastických deformácií. Výsledkom uvedených analýz sú hlavne priebehy hodnôt J-integrálu resp. K_I a teploty po celom obrysu trhliny v závislosti od času (od začiatku až do konca deja). Ako koniec teplotného skoku sa označuje okamih, kedy dochádza k výraznému poklesu napätosti, čo je vždy spojené s vyrovnaním priebehu teploty po stene nádoby.

2) Výpočet hodnôt dovoleného tlaku pre teplotné skoky o ΔT_j metódami lineárnej lomovej mechaniky

Pri výpočtovej analýze sa hodnotí tá lokalita nádoby, kde dochádza k najväčšiemu radiačnému krehnutiu materiálu TNR. U TNR JE VVER 440 je týmto miestom zvar 5/6. V analyzovanej časti TNR sa pre každý hodnotený bod postulovaného defektu a daný časový okamih t_i stanoví hodnota K_i(t_i). Rovnako pre

VUJE, a. s.

čas t_i je teplota v danom mieste T_i a odpovedajúca hodnota lomovej húževnatosti $K_{IC}(t_i) = [K_{IC}(T)]_3$. Dovolená hodnota tlaku sa (pre dané miesto) pre čas t_i a zároveň teplotu T_i vypočíta zo vzťahu :

$$\begin{split} & \mathsf{K}_{\mathsf{I}}(\mathsf{t}_{\mathsf{i}}) + \mathsf{K}_{\mathsf{I}}(\mathsf{p}) = [\mathsf{K}_{\mathsf{IC}}(\mathsf{T})]_{\mathsf{3}} \;, \\ & \mathsf{p}_{\mathsf{i}} = \mathsf{f}[\mathsf{K}_{\mathsf{I}}(\mathsf{t}_{\mathsf{i}}) - [\mathsf{K}_{\mathsf{IC}}(\mathsf{T})]_{\mathsf{3}} \;] \end{split} \tag{6.2.3.5-15}$$

Ak je celkový počet analyzovaných okamihov rovný n, je dovolená hodnota tlaku pre teplotný skok z T_c o ΔT_j rovná :

$$p_j = min(p_i)$$
, $i \le n$, (6.2.3.5-16)

Túto minimalizáciu musíme vykonať vo všetkých bodoch obrysu trhliny .

Hodnote dovoleného tlaku p_j pre teplotný skok z T_c o Δ T_j sa potom priradí koncovej teplote média v tomto skoku, tzn. teplote T_j = T_c - Δ T_j. Pre danú lokalitu TNR tak dostávame súbor hodnôt dovolených tlakov pre dané teploty média, tzn. p - T krivky platné pre celé spektrum režimov 1.druhu. *Určenie p-T kriviek pre priebeh režimov 2. Typu :*

Výpočet dovolených p-T kriviek je pre režimy 2. typu relatívne jednoduchší. Je potrebné vykonať sériu analýz namáhania TNR na modelu s trhlinou pre rôzne hodnoty vnútorného pretlaku v TNR. Pretože tieto režimy môžu nastať taktiež pri ohreve resp. vychladzovaní reaktora, je potrebné vypočítať maximálne prídavné teplotné napätie vzniknuté pri ochladzovaní resp. ohrevu maximálnym dovoleným trendom. Závislosť p=f(T) vyplynie pre kritické miesto nádoby a teda i celú TNR, a postulovaný defekt z rovnosti :

$$K_{I}(p) + K_{I}(dT/dt) = [K_{IC}(T)]_{2}$$
 (6.2.3.5-17)

Ak znázorníme krivky dovolený tlak p - dovolená teplota T pre režimy 1.typu a režimy 2.typu v jedinom grafe, ich spoločná spodná obalová krivka určuje p - T krivku platnú pre všetky havarijné režimy bez ohľadu na spôsob a okolnosti ich vzniku. Hodnoty dovoleného tlaku v PO sú navyše obmedzené hodnotou p_{lim}, pri ktorej dochádza k otvoreniu poisťovacích ventilov KO PO.

6.2.3.5.2.1.5 Charakteristiky použitého softwaru

Pre výpočet stavu napätosti, deformácií a hodnôt J-integrálu bol použitý výpočtový program ADINA. Spracovanie výsledkov MKP analýz a konečný výpočet p-T kriviek bol realizovaný výpočtovým programom PTKRIVKY, vyvinutým v minulosti vo VÚJE, a.s.

Popis programu ADINA

Výpočtový kód ADINA je špičkovým produktom americkej firmy ADINA R&D, Inc., ktorý umožňuje aplikáciou metódy konečných prvkov riešenie statických, dynamických, lineárnych i nelineárnych úloh na 2-D a 3-D telesách. Obsahuje bohatú škálu typov konečných prvkov ako sú: masívne typy prvkov, prútové prvky, potrubné prvky, dosky, škrupiny, výstuže a pod. Je možné použitie rôznych konštrukčných materiálov, ako sú kovy, plasty, betóny, tkaniny, keramické materiály, zeminy, skaly, drevo a pod. Program je autorizovaný US NRC pre použitie v oblasti JE.

Pre odvodenie p-T kriviek boli použité nasledovné moduly programového kódu ADINA:

1. ADINA-AUI (Adina User Interface) – je preprocesor a postprocesor programového balíka ADINA, v ktorom je možné vytvoriť geometriu výpočtového modelu priamo alebo exportovaním z niektorého z kompatibilných CAD systémov (AutoCAD, Pro/Engineer, I-DEAS), vygenerovať sieť konečných prvkov

vūje

manuálne alebo pomocou automatického generátora siete, zadať materiálové vlastnosti analyzovanej konštrukcie, definovať počiatočné a okrajové podmienky výpočtu a zaťaženie. Postprocesor kódu ADINA umožňuje spracovanie výsledkov výpočtov formou ich exportu do textových súborov, vykreslením priebehu vybraného parametru do grafickej závislosti alebo farebným grafickým znázornením rozloženia vypočítaných veličín na modeli analyzovaného telesa.

2. ADINA-T – je časť programového balíka určená na riešenie stacionárnych a nestacionárnych, lineárnych a nelineárnych úloh vedenia tepla. Program umožňuje zadávať časovo a teplotne závislú tepelnú vodivosť materiálov, teplotnú závislosť mernej tepelnej kapacity a prestup tepla (konvekciu) a radiáciu pre uzly, hrany a plochy.

3. ADINA – je časť programového balíka určená na lineárne a nelineárne, statické a dynamické napäťové analýzy aplikáciou metódy konečných prvkov (MKP). Pri výpočtových analýzach je možné použiť rôzne typy konečných prvkov a zadať rôzne materiálové modely. Výpočet napätí a deformácií je možné urobiť pre predpoklad malých aj veľkých deformácií, elasto-plastickej analýzy, creepu s tepelným efektom, kontaktu dvoch telies, lomovej mechaniky s uvažovaním rastu trhliny (iba pre 2-D úlohy) atď. Pri výpočte tepelných napätí od nerovnomerného rozloženia teplôt v analyzovanom telese resp. rôznych materiálových vlastností jednotlivých častí konštrukcie je možné prostredníctvom súboru dát transformovať do programu ADINA nestacionárne teplotné pole (nestacionárny priebeh teploty v každom uzlovom bode siete konečných prvkov) vypočítané programom ADINA-T.

Validáciu výpočtového programu ADINA je možné rozdeliť do týchto troch oblastí:

1. ADINA / Teória - súčasťou programového balíka ADINA sú verifikačné manuály, v ktorých sú pre vybrané fyzikálne problémy porovnané výsledky analytického riešenia daného problému s výsledkami získanými výpočtovým kódom ADINA. Výpočtový kód ADINA-T obsahuje pre lineárne úlohy 12 príkladov a pre nelineárne úlohy 25 príkladov, výpočtový kód ADINA pre lineárne úlohy 124 a pre nelineárne 130 príkladov.

2. ADINA / Iné programy MKP – VUJE, a.s. sa v minulosti zúčastnilo niekoľkých medzinárodných projektov organizovaných IAEA, tzv., benchmarkov, zameraných na problematiku hodnotenia integrity TNR pri PTS (WWER-440/213 RPV PTS Analysis Benchmark Exercise, CRP9). Výsledky týchto projektov preukázali veľmi dobrú zhodu výsledkov programu ADINA v porovnaní s inými výpočtovými programami a analytickými metodikami iných organizácií.

3. ADINA / Experiment – v rámci projektu Európskej komisie NESC-I bol urobený experiment, pri ktorom bol valcový model steny TNR obsahujúci trhlinu zaťažený tepelným a tlakovým namáhaním simulujúcim podmienky namáhania TNR pri PTS. Zároveň 16 výskumných organizácií rôznymi metodikami a výpočtovými kódmi urobilo analýzy rozloženia teplôt, napätí a hodnotenia integrity tohto modelu TNR, ktoré boli porovnávané s nameranými výsledkami experimentu. Štyri organizácie pri svojich analýzach použili výpočtový program ADINA (Siemens, IWM, Vattenfall AB, GRS Köln) a dosiahli veľmi dobrú zhodu s experimentom.

vůje

Číslo publikácie	Názov publikácie	Dátum vydania
Report ARD 92-9	ADINA Verification Manual - Linear Problem, ADINA R&D, Inc. 71 Elton Avenue, Watertown, MA 02172, USA	December 1992
Report ARD 92-10	ADINA Verification Manual - Nonlinear Problem, ADINA R&D, Inc. 71 Elton Avenue, Watertown, MA 02172, USA	December 1992
Report ARD 92-11	ADINA-T Verification Manual, ADINA R&D, Inc. 71 Elton Avenue, Watertown, MA 02172, USA	December 1992
IAEA, WWER-SC- 211	WWER-440/213 RPV Pressurized Thermal Shock Analysis Benchmark Exercise (WPB), Results of Phase II Structural Analysis and Fracture Mechanics Analysis, MAAE, Vienna, 1999	1999
-	CRP-9 On Review and Benchmark of Calculation Methods for Structural Integrity Assessment of RPVs During PTS, IAEA documents	2006
EUR 19051 EN	NESC-I Project Overview, Final Report, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Advanced Materials, Petten, The Netherlands	2001
EUR 22510 EN	Assessment of Dissimilar Weld Integrity, Final Report of the NESC-III Projekt, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Advanced Materials, Petten, The Netherlands	2001

Program PTKRIVKY

Postupy výpočtu dovolených p-T kriviek, popísané v 6.2.3.5.3.1.4 boli implementované do výpočtového programu PTKRIVKY. Program bol vyvinutý v jazyku FORTRAN 90 v programovom prostredí MS FORTRAN Power Station a bol v minulosti používaný na odvodenie p-T kriviek pre JE V1 a V2 v Bohuniciach. Detailný popis tohto programu je v [I.19], [I.20].

6.2.3.5.2.2 Výsledky výpočtov p-T kriviek

6.2.3.5.2.2.1 p-T krivky pre normálne podmienky prevádzky

p-T krivky pre normálne podmienky prevádzky boli odvodené aplikáciou programu PTKRIVKY pre priebežné hodnoty T_{K} , ktoré odpovedajú 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 a 60 kampaniam prevádzky pre oba bloky JE MO34.

p-T krivky sú popísané závislosťou :

$$p = a_3 .T^3 + a_2 .T^2 + a_1 .T + a_0$$

VUJE, a. s.

6.2.3.5.2.2.2 p-T krivky pre tlakové skúšky

p-T krivky pre tlakové skúšky boli odvodené aplikáciou programu PTKRIVKY pre priebežné hodnoty T_{K} , ktoré odpovedajú 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 a 60 kampaniam prevádzky pre oba bloky JE MO34.

p-T krivky sú opäť popísané závislosťou :

 $p = a_3 . T^3 + a_2 . T^2 + a_1 . T + a_0$

Dovolené minimálne teploty tesnostnej a pevnostnej skúšky sú určené priesečníkmi príslušných p-T kriviek s vodorovnými priamkami určujúcimi tlak tesnostnej a pevnostnej skúšky 13,7 a 16,8 MPa.

Krivky sú popísané závislosťou :

$$T_{min} = a_3 .n^3 + a_2 .n^2 + a_1 .n + a_0$$

kde n je počet kampaní.

6.2.3.5.2.2.3 p-T krivky pre havarijné režimy

p-T krivky pre havarijné režimy boli odvodené aplikáciou programu PTKRIVKY pre priebežné hodnoty T_{κ} , , ktoré odpovedajú **5, 10, 15, 20, 30 a 60 kampaniam** prevádzky pre oba bloky JE MO34.

Pri stanovení minimálnych teplôt pre tlakové skúšky PO je potrebné zobrať do úvahy i výsledky výpočtu integrity KO. Tento problém je analyzovaný v kap. 6.2.2 bezpečnostnej správy "Integrita primárneho okruhu".

6.2.3.6 Integrita tlakovej nádoby

6.2.3.6.1 Konštrukcia

Táto problematika je už popísaná v kap.6.2.3.1 "Popis konštrukcie a upevnenia TNR".

6.2.3.6.2 Použité materiály

Materiály použité pre výrobu reaktorovej tlakovej nádoby, ich vlastnosti a oprávnenosť ich použitia sú uvedené a diskutované v kap. 6.1.5 PpBS a v kap. "Špecifikácia materiálov tlakovej nádoby reaktora" tohto dokumentu.

6.2.3.6.3 Metódy výroby

Technológia výroby, vrátane uvedenia špeciálnych postupov vedúcich ku zlepšeniu vlastností dielov vyrábaných tlakových nádob, je uvedená v kap. "Špeciálne výrobné postupy" tohto dokumentu.

Prakticky zhodná výrobná technológie bola použitá pri výrobe oceli, výkovkov prstencov, lisovaní dna a veka a pri zváraní a navarovaní všetkých tlakových nádob jadrových reaktorov vyrobených v ŠKODA Plzeň. Jedná sa spolu o 21 tlakových nádob reaktorov VVER 440.

6.2.3.6.4 Požiadavky na kontroly

Metódy nedeštruktívnych skúšok vykonávaných na nádobe reaktora sú uvedené v kap.6.1.5 PpBS.

6.2.3.6.5 Odosielanie

Je uvedené v kap. 6.1.5 PpBS.

6.2.3.6.6 Prevádzkové limity a podmienky

Prevádzkové limity a podmienky s ohľadom na uvažované režimy prevádzky reaktorovej tlakovej nádoby sú diskutované v kap.6.2.3.5 "Limitné hodnoty tlaku a teploty".

6.2.3.7 Pevnostné hodnotenie TNR

6.2.3.7.1 Pevnostný výpočet dokumentovaný v STD

Pevnostný výpočet tlakových nádob MO34 bol v plnom rozsahu realizovaný výrobcom podľa vtedy platného ruského výpočtového štandardu [II.2] a jeho popis je súčasťou sprievodnej technickej dokumentácie [I.5]. Výpočet zahŕňal:

- posúdenie statickej pevnosti kritických uzlov TNR v normálnych podmienkach prevádzky,
- posúdenie únavovej životnosti kritických uzlov TNR s ohľadom na nízkocyklovú únavu vyvolanú striedaním prevádzkových režimov po celú projektovanú dobu prevádzky (30 rokov),
- posúdenie statickej pevnosti kritických uzlov TNR v podmienkach režimov narušenia normálnych podmienok prevádzky a v podmienkach havarijných režimov.

Vo všetkých analyzovaných prípadoch aplikované konzervatívne výpočtové analýzy potvrdili splnenie záväzných pevnostných a únavových kritérií štandardu [II.2].

Pri výpočtoch boli použité mechanické vlastnosti materiálov TNR predpísané technickými podmienkami pre výrobu, ktorých požiadavky sú identické s požiadavkami uvedenými v [I.3] resp. v [II.2] a [II.3].

Skutočné mechanické vlastnosti a chemické zloženie materiálov TNR oboch nádob MO34 sú uvedené v tabuľkách 3 a 4 dokumentov [I.1] a [I.2] a v drvivej väčšine prípadov sú lepšie ako hodnoty predpísané v [I.3].

Dokumenty [I.1] a [I.2] konštatujú, že všetky existujúce odchýlky boli zhodnotené a schválené ako prípustné autorským dozorom pre TNR, ktorým bol projektant a výrobca TNR vo vtedajšom ZSSR. Nemajú preto dopad na platnosť výsledkov pevnostných analýz TNR.

Toto konštatovanie je možné preveriť nasledujúcim rozborom situácie. Rozhodujúcim parametrom pre výpočet rozmerov a pevnosti TNR je hodnota dovoleného napätia, ktorá sa určuje podľa [I.5], [II.2] pre každú teplotu zo vzťahu :

 $\sigma_{\rm D} = \min \{ {\sf R}_{\sf m}/2.6, \, {\sf R}_{{\sf p}0,2}/1.5 \}$ (6.2.3.4-18)

Pre výpočet σ_D boli v pevnostných analýzach [I.5] použité predpísané hodnoty R_m a $R_{p0,2}$

S ohľadom na zistené odchýlky mechanických vlastností je potrebné korigovať predchádzajúce hodnoty σ_D . Dovolené napätia stanovíme konzervatívne nasledujúcim spôsobom :

- 1) ak boli namerané nevyhovujúce hodnoty, použijeme pre výpočet dovolených napätí minimálne namerané-skutočné hodnoty medze sklzu a medze pevnosti
- v prípade, že všetky namerané hodnoty sú vyhovujúce, použijeme pre výpočet dovolených napätí predpísané hodnoty R_m a R_{p0,2}.

Porovnanie takto vypočítaných dovolených napätí s dovolenými napätiami použitými v pôvodných pevnostných analýzach ukazuje, že pre materiály zvarov 2/3, 1/2 a 3/5 nie je pokles dovolených napätí viac ako 5%. V prípade materiálu návaru **e** (druhá vrstva) je pokles dovoleného napätia pri 350°C takmer 8%. V STD [I.10] sú uvedené výsledky napäťovej analýzy TNR pre všetky základné režimy prevádzky TNR. Vo

všetkých režimoch a v celej nádobe sú splnené predpísané podmienky pre veľkosť, rozkmit a amplitúdu redukovaného napätia s veľkou rezervou bezpečnosti, ktorá prekračuje vyššie uvedené odchýlky. Preto je možné konštatovať, že uvedené lokálne odchýlky mechanických vlastností nemajú dopad na výsledky relevantných pevnostných analýz TNR.

6.2.3.7.2 Nový pevnostný výpočet TNR

Nové výpočtové analýzy TNR [I.21] - [I.25], [I.29] vykonané firmou ŠKODA JS, a.s. predstavujú kompletný súbor analýz pevnosti, životnosti a seizmickej odolnosti TNR (nádoba, horný blok a uzol tesnenia) pri statickom a dynamickom zaťažení v projektových režimoch reaktorových blokov a pri seizmickom zaťažení. Výpočty taktiež zahŕňajú posúdenie únavovej životnosti kritických uzlov TNR s ohľadom na únavové poškodenie vyvolané striedaním prevádzkových režimov (40 rokov prevádzky). Pevnostné a únavové analýzy a posúdenie ich výsledkov bolo vykonané v súlade s normatívnou dokumentáciou [II.3] a [II.11]. Hodnotenie seizmickej odolnosti bolo vykonané v súlade s predpísanou metodikou pre seizmické analýzy [I.26]. Mechanické vlastnosti materiálov použitých vo výpočtoch boli prevzaté z technických podmienok [I.27] a z materiálových špecifikácií TNR. Popis projektových režimov TNR je v [I.28]. Detailný popis všetkých výpočtových analýz TNR sa nachádza v [I.21] - [I.25].

6.2.3.7.2.1 Metodika a použité výpočtové programy

Pre výpočet teplotného zaťaženia a nasledujúci pevnostný výpočet, ako i pre seizmický výpočet, bola zvolená moderná numerická metóda konečných prvkov (MKP), realizovaná v komerčnom programovom systéme ABAQUS. Programový systém ABAQUS bol vytvorený firmou SIMULIA a je určený pre numerickú analýzu mechanických konštrukcií. Programový systém umožňuje tvorbu modelov konštrukcií a ich nasledujúcu analýzu metódou konečných prvkov. Program umožňuje riešiť stacionárne i nestacionárne a nelineárne úlohy. Výpočtový systém bol hodnotený podľa "Směrnice VDS 030", vydanej SÚJB-ČR pre účely hodnotenia výpočtových programov. Program bol posúdený "Odbornou hodnotící komisí č. 5 SÚJB pro pevnostní výpočty komponent a potrubních systémů" ako vhodný k vytváraniu podkladov pre bezpečnostnú dokumentáciu (č. 527). Je prevádzkovaný a udržiavaný v súlade s ustanoveniami riadiacich postupov pre zaistenie akosti ŠKODA JS a.s. ISO 9001:2000, "Software-tvorba a ověřování, Návodka NR03".

Pre hodnotenie nízkocyklovej únavy kritických miest TNR bol použitý programový systém STATES, ktorý bol vytvorený v Ústave aplikovanej mechaniky Brno. Program slúži pre posúdenie tlakových nádob a oceľových konštrukcií pri statickom (monotónnom) zaťažení (STATESM) i na únavu v etape iniciácie defektu (výpočet únavového poškodenia – STATESF). Metodika zapracovaná v programe je v súlade s normou [II.11]. Vstupom do programu STATES sú výsledné napätia a teploty z programu ABAQUS pre jednotlivé záťažové režimy a mechanické vlastnosti materiálov hodnoteného zariadenia. Posudzovanie na statickú pevnosť sa realizuje po rezoch. Pre únavový výpočet je treba zadať postupnosť záťažových blokov vrátane počtu opakovania a ďalšie potrebné špecifikácie. Výstupom sú hodnoty únavového poškodenia pre jednotlivé záťažové bloky vrátane celkového únavového poškodenia. Program bol hodnotený podľa "Směrnice VDS 030", vydanej SÚJB-ČR pre účely hodnotenia výpočtových programov. Program bol posúdený "Odbornou hodnotící komisí č. 5 SÚJB pro pevnostní výpočty komponent a potrubních systémů" ako vhodný k vytváraniu podkladov pre bezpečnostnú dokumentáciu (č. 504). Je prevádzkovaný a udržiavaný v súlade s ustanoveniami riadiacich postupov pre zaistenie akosti ŠKODA JS a.s. ISO 9001:2000, "Software-tvorba a ověřování, Návodka NR03".



6.2.3.7.2.2 Výsledky výpočtových analýz

Pevnosť, únavová životnosť a seizmická odolnosť bola zhodnotená pre nasledujúce časti TNR :

Teleso tlakovej nádoby

- dolná časť telesa tlakovej nádoby reaktora
- nátrubok DN 500
- nátrubok DN 250
- uzol rozdelenia tokov
- oporný nákružok telesa
- konzola

Hlavný prírubový spoj

- horný hrdlový prstenec
- prírubový prstenec
- veko
- voľná príruba
- trubkový kompenzátor
- svorníky M140
- prítlačné skrutky M64
- puzdro

Nátrubky na veku TNR

- prírubový spoj nátrubku ARK
- uzol privarenia nátrubku ARK k veku
- prírubový spoj nátrubku TK
- uzol privarenia nátrubku TK k veku

Podľa [I.21] - [I.25] je možné konštatovať, že pre jednotlivé hodnotené časti TNR platí:

Teleso tlakovej nádoby

- a) získané napätia hodnotené pre jednotlivé skupiny kategórií napätí neprevyšujú limitné hodnoty,
- b)hodnoty únavových poškodení v kritických miestach ani s predpísanými súčiniteľmi bezpečnosti nepresahujú hodnotu 0,3,
- c) pevnosť a únavová životnosť vybraných uzlov TNR VVER 440 vyhovuje pre zadané projektové režimy požiadavkám noriem [II.3], [II.11],

d) podmienka pre hraničnú seizmickú odolnosť $HCLPF_{MO34} \ge 0,15g$ podľa [l.26] je taktiež splnená.

Hlavný prírubový spoj

- a) získané napätia hodnotené pre jednotlivé skupiny kategórií napätí neprevyšujú limitné hodnoty,
- b)hodnoty únavových poškodení v kritických miestach ani s predpísanými súčiniteľmi bezpečnosti nepresahujú hodnotu 0,3,

c) pevnosť a únavová životnosť vybraných uzlov TNR VVER 440 vyhovuje pre zadané projektové režimy požiadavkám noriem [II.3], [II.11].

Nátrubky na veku TNR

- a) získané napätia hodnotené pre jednotlivé skupiny kategórií napätí neprevyšujú limitné hodnoty,
- b)hodnoty únavových poškodení v kritických miestach ani s predpísanými súčiniteľmi bezpečnosti nepresahujú hodnotu 1. Relatívne vysoké hodnoty únavového poškodenia sú však v kritických miestach nátrubkov ARK (D=0,79) a TK (D=0,42). Preto sa týmto miestam odporúča venovať počas prevádzkových kontrol zvýšenú pozornosť a taktiež monitorovať vývoj únavového poškodenia výpočtovými metódami na základe skutočnej histórie prevádzky blokov,
- c) seizmická odolnosť vo vybranom reze na nátrubku ARK vyhovuje predpísaným limitným hodnotám,
- d)hodnoty kontaktného tlaku pre hlavné tesnenie nátrubku ARK a tesnenie nátrubku TK neklesajú pod minimálnu hodnotu merného tlaku.

Vo všetkých analyzovaných prípadoch výpočtové analýzy potvrdili, že TNR spĺňa záväzné pevnostné, únavové a seizmické kritériá požadované platnou normatívnou dokumentáciou ([II.3], [II.11], [I.26]).

LITERATÚRA

I Zdrojové dokumenty, ktoré sú vo vlastníctve SE, a.s.

- [I.1] Komplet reaktorového zařízení V-213-Č/20, Pasport, ŠKODA Plzeň, Ae 5688/Dok
- [I.2] Komplet reaktorového zařízení V-213-Č/21, Pasport, ŠKODA Plzeň, Ae 5688/Dok
- [I.3] Komplet reaktorového zařízení V-213-Č/20, Tlaková nádoba a horní blok reaktoru V-213-Č/20, Specifikace na materiály, ŠKODA Plzeň, Ae 4502/Dok
- [I.4] Komplet reaktorového zařízení V-213-Č/21, Tlaková nádoba a horní blok reaktoru V-213-Č/21, Specifikace na materiály, ŠKODA Plzeň, Ae 4502/Dok
- [I.5] Správa ŠKODA Plzeň, Ae 4432/Dok Pevnostný výpočet, 1980
- [I.6] Ae 8166/Dok.A, Přípustná teplota a tlak z hlediska křehkého lomu tlakové nádoby reaktora VVER 440-JE Mochovce, správa ŠKODA JS s.r.o., 1998
- [I.7] Kapitola 4.3.2.8 PpBS EMO12, Ae 9172/Dok, Revize 1, 1998
- [I.8] List ŠKODA JS s.r.o. č.j.88-TSN/88/98 zo dňa 29.6. 1998
- [I.9] Kapitola 3.9.1.2.10 PpBS EMO12, Revize 1, 1998 (Ae 9104/Dok)
- [I.10] Analýza dopadů různých vyhodnocovacích metodik na průběh p-T křivek pro MO3,4, ŠKODA JS a.s, 2017
- [I.11] Stanovenie kriviek studeného pretlakovania TNR 3. a 4. bloku, správa VUJE a.s., , 2006
- [I.12] Kupča, Ľ. a kol.: Koncepcia programu overovacích vzoriek (POV) MO34, technická správa VUJE, december 2006
- [I.13] Revize a dopracování Úvodního projektu pro MO34, ÚJV Řež a.s. divize ENERGOPROJEKT PRAHA, marec 2007
- [I.14] Dokumentácia výsledkov kvalifikácie systému skúšania obvodových zvarov prstencov tlakovej nádoby reaktora, vnútorného rádiusového prechodu hrdla DN500 do tlakovej nádoby reaktora a zvarového spoja hrdla s nástavcom DN500 tlakovej nádoby reaktora, SE a.s.
- [I.15] Dokumentácia výsledkov kvalifikácie systému skúšania obvodových zvarov prstencov tlakovej nádoby reaktora v oblasti AZ, SE a.s.
- [I.16] Výpočet limitních p-T křivek pro normální provoz a hydrozkoušky TNR 3. a 4. bloku JE Mochovce, Ae 13669/Dok, Rev.1, Plzeň, květen 2011
- [I.17] p-T krivky pre TNR JE MO34, správa VUJE, a.s., č. 35M0117/01, máj 2017
- [I.18] С.М. Зарицкий : Расчёт флюенса быстрых нейтронов на корпусе реактора для срока службы АЭС 40 лет по теме: Выполнение комплекса нейтронно-физических расчетов в обоснование эксплуатации топлива на энергоблоках 3 и 4 АЭС Моховце п. 4 календарного плана договора № 923-10/ИЯР/03-10/335 от 13.07.10, Moskva 2010 (S. M. Zarickij : Výpočet fluencie rychlých neutrónov na telese reaktora pre dobu prevádzky JE 40 rokov na tému : Realizácia komplexu neutróno-fyzikálnych výpočtov pre zdôvodnenie prevádzky paliva



na blokoch 3 a 4 JE EMO, p.4 kalendárneho plánu dohody № 923-10/ИЯР/03-10/335 z 13.07.10, Moskva 2010)

- [I.19] M. Hrázský, P. Hermanský : Dovolené p-T krivky TNR JE V2, správa VUJE a.s. 37/2002
- [I.20] M. Hrázský, P. Hermanský : Dovolené p-T krivky TNR JE V1, správa VUJE a.s. 36/2002
- [I.21] Tlaková nádoba a vnitřní části reaktoru VVER 440 EMO34. Obecná část výpočtů pevnosti, únavové životnosti a seizmické odolnosti, Ae 13372/Dok
- [I.22] Uzly tělesa tlakové nádoby reaktoru VVER 440 EMO34. Výpočet pevnosti, únavové životnosti a seizmické odolnosti, Ae 13373/Dok
- [I.23] Hlavní přírubový spoj tlakové nádoby reaktoru VVER 440 EMO34. Výpočet pevnosti, únavové životnosti a seizmické odolnosti, Ae 13374/Dok
- [I.24] Nátrubky na víku tlakové nádoby reaktoru VVER 440 EMO34. Výpočet pevnosti, únavové životnosti a seizmické odolnosti, Ae 13375/Dok
- [I.25] Seizmický výpočet reaktoru VVER 440 EMO34, Ae 13376/Dok
- [I.26] M. Pusztai, V. Skopik, S. Giovine: Požiadavky na hodnotenie seizmickej odolnosti konštrukcií systémov a komponentov JE Mochovce 3. a 4. blok, 04/2009
- [I.27] Technické podmínky pro těleso TN
- [I.28] Projektové režimy reaktorových bloků VVER 440/213, Ae 12887/Dok, Rev. 5, ÚAM Brno, s.r.o., ŠKODA JS a.s., 04/2010
- [I.29] Kontrolní výpočet pevnosti tlakové nádoby a VČR VVER 440 EMO34 při vibracích, Ae 12641/Dok, Rev.0, leden 2011

II Legislatívne dokumenty (zákony, vyhlášky, normy, dokumenty MAAE, apod.)

- [II.1] ČSKAE: Rozhodnutí č.233/92
- [II.2] Normy rasčeta na pročnosť oborudovanija i truboprovodov AES, Metalurgija, Moskva, 1973
- [II.3] Normy rasčeta na pročnosť oborudovanija i truboprovodov AES, PNAEG G-7-002-86, Moskva,1986
- [II.4] Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in VVER NPPs, VERLIFE, Version 2008, COVERS project, 2008
- [II.5] TPE 10-40/1377/74,Technické podmínky pro výrobu hlavních dílů tlakové nádoby VVER-440, V-213Č
- [II.6] TPE 10-40/1381/74, Technické podmínky na těleso tlakové nádoby, jeho sekce, víko a vík pro tlakové zkoušky reaktoru V-213Č
- [II.7] TPE 10-40/1378/74,Technické podmínky pro kompletaci a konečnou kontrolu tlakové nádoby reaktoru V-213Č
- [II.8] NTD MHS Interatomenergo č.440.51-84 Materiály pre zariadenia a potrubia JE Všeobecné požiadavky na základné materiály

- [II.9] NTD MHS Interatomenergo č. 442.50-85 Materiály pre zariadenia a potrubia JE. Požiadavky na použitie a atestáciu nových materiálov
- [II.10] Guidelines on PTS Analysis for WWER Nuclear Power Plant, IAEA-EBP-WWER-08, Revision 1, IAEA, 2005
- [II.11] Normativně technická dokumentace A.S.I., sekce III, Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, Praha a Brno, květen 2007

III Zdrojové dokumenty

- [III.1] Petzová, J. a kol.: Metodiky hodnotenia starnutia materiálov TNR, výskumná správa VUJE, ev. č. V03 0360 VS 2004.1, december 2004
- [III.2] Petzová, J. a kol.: Projekt monitorovania starnutia ocelí TNR, výskumná správa VUJE, č. V03-0300TD.5-2.1, november 2005
- [III.3] ORMGEN3D FEM Generator for 3D Crack Geometries, ORNL report no. PSR-430, August 1999



ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 6.2.3-1 Výpočtový model MKP-	TNR s postulovaným podnávarovým defektom	20
Obr. 6.2.3-2 Výpočtový model MKP-	TNR s postulovaným povrchovým defektom	21