

## HODNOCENÍ ČERPÁNÍ ŽIVOTNOSTI TLAKOVÉ NÁDOBY JADERNÉHO REAKTORU VVER 1000

P. Macák<sup>\*</sup>, E. Pechmannová<sup>\*</sup>

**Summary:** *The subject matter of this paper is a brief description of the methodology as well as a presentation of conclusions following from the service life exhaustion assessment of pressure vessel of the reactor WWER 1000 (RPV) made after test operation gone at the NPP Temelín Unit 1. The methodology of the assessment comes from low-cycle fatigue analysis and evaluation of the summary fatigue damage at selected points in the RPV. The time history of operation parameters taken from the sources available at the NPP became a set of input data to the analysis. The Russian Standard PNAE G-7-002-86 is a basis for setting up the algorithm to evaluate a value of the summary fatigue damage.*

### 1 Úvod

Významným příspěvkem k posouzení čerpání životnosti je výpočtové vyhodnocení nízkocyklové únavy v kritických místech tlakové nádoby reaktoru (TNR). Po proběhlém spouštění a zkušebním provozu 1. bloku jaderné elektrárny Temelín (JE), zahrnujícím období od listopadu 1999 do prosince 2003, bylo možné vyhodnotit čerpání životnosti TNR na základě skutečně proběhlých režimů.

Takovéto hodnocení bylo jednou z nutných podmínek pro další provozování jaderné elektrárny a poskytlo rovněž podklady pro tvorbu modulu on-line sledování čerpání životnosti TNR, implementovaného v rámci systému, který monitoruje vybrané komponenty primárního okruhu JE.

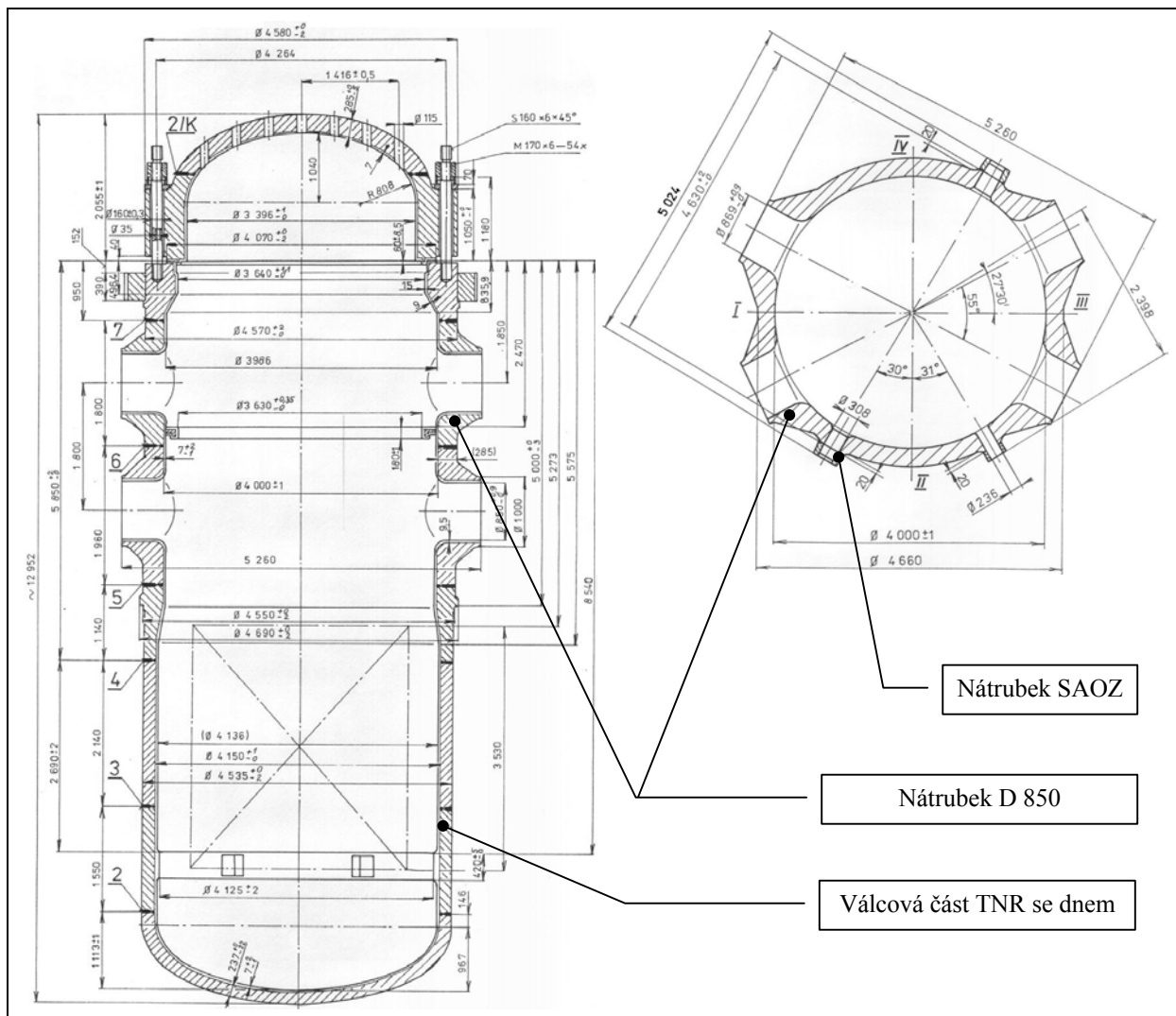
### 2 Hodnocená místa TNR

Projektová dokumentace zahrnuje celkem 21 konstrukčních uzlů TNR, u nichž bylo provedeno hodnocení nízkocyklové únavy, vycházející z předpokladu zatěžování TNR **projektovými režimy**. Na základě těchto výpočtů byly provozovatelem elektrárny stanoveny tři konstrukční uzly (viz Obr. 1), pro které bylo požadováno vyhodnocení čerpání životnosti proběhlými **provozními režimy**:

- válcová část tělesa TNR se dnem
- nátrubek systému havarijního chlazení aktivní zóny (nátrubek SAOZ)
- nátrubek pro připojení horké větve primárního potrubí (nátrubek D 850)

---

<sup>\*</sup> Ing. Pavel Macák, Ph.D., Ing. Eva Pechmannová: ŠKODA JS a.s.; Orlický 266; 316 06 Plzeň; tel.: +420.378 042 469, fax: +420.378 042 407; e-mail: [pavel.macak@skoda.cz](mailto:pavel.macak@skoda.cz), [eva.pechmannova@skoda.cz](mailto:eva.pechmannova@skoda.cz)



Obr. 1: Hodnocené konstrukční uzly TNR

Nízkocyklová únava se v konstrukčních uzlech vyhodnocovala pouze ve vybraných výpočtových bodech. S ohledem na metodiku se k identifikaci a určení polohy výpočtových bodů použil systém přímkových výpočtových řezů. Poloha výpočtových řezů byla přijata podle rozložení předpokládaných oblastí maximální napjatosti od mechanických i teplotních zatížení, především pak v místech a okolí konstrukčních vrubů a rovněž s uvážením experimentálních výsledků měření obdobných uzlů.

### 3 Metodika výpočtu

Metodika hodnocení čerpání únavové životnosti TNR byla založena na výpočtu a posouzení hodnoty součtového únavového poškození při zatěžování TNR nízkocyklovou únavou, způsobenou provozováním bloku JE při provozních (přechodových i stacionárních) režimech během sledovaného období.

Vstupními hodnotami výpočtu byly časové průběhy teploty a tlaku primárního chladiva v TNR. Časové průběhy teplot a tlaku byly nejprve *vyhlazeny* (tj. byly zanedbány jejich malé fluktuační i nevýrazné změny rychlostí zvyšování nebo snižování teploty a tlaku) a z takto

vyhlazených průběhů se, na základě inženýrského citu a zkušenosti, vybíraly typické *výpočtové režimy*.

Další metodický postup byl shodný s metodikou uvedenou v projektové dokumentaci a probíhal v následujících postupných krocích:

- pro každý určený výpočtový režim byl proveden výpočet nestacionárního teplotního pole hodnoceného uzlu TNR
- provedl se výběr *výpočtových stavů*, kde výpočtový stav představoval souhrn zatěžovacích parametrů v určitém časovém okamžiku výpočtového režimu
- pro všechny výpočtové stavy byl proveden pevnostní výpočet, jehož výsledkem byly složky napětí
- posloupnosti jednotlivých výpočtových stavů byly sestaveny do *zátěžných bloků* cyklických zatížení, které tvořily výchozí data pro výpočet nízkocyklové únavy; výsledkem výpočtu nízkocyklové únavy byla hodnota dovoleného počtu cyklů a součtového únavového poškození.

Veškeré výpočty byly provedeny s využitím nekomerčních programových prostředků, standardizovaných SÚJB pro zpracování průkazné dokumentace.

### 3.1 Výpočet teplotních polí

Pro všechny vybrané výpočtové režimy se provedly výpočty nestacionárních teplotních polí v hodnocených uzlech TNR. Rozložení teplot bylo vypočteno jako odezva na změnu parametrů v přechodových a stacionárních režimech, které proběhly během sledovaného období.

Výpočet teplotních polí byl proveden metodou konečných prvků. Všechny hodnocené konstrukční uzly byly modelovány jako dvourozměrné, rotačně symetrické úlohy. Tvořily je modely geometrie se zadanými teplofyzikálními vlastnostmi materiálů, zdroji tepla, okrajovými a počátečními podmínkami řešení. Při výpočtu teplotních polí byly uvažovány nelinearity (teplotní závislosti) zadaných teplofyzikálních vlastností materiálů TNR.

V řešených úlohách byly přijaty okrajové podmínky 3. druhu a okrajové podmínky prostupu tepla mezerou.

Okrajové podmínky 3. druhu působí na vnitřním a vnějším povrchu tlakové nádoby reaktoru, včetně nátrubku D 850. Vnitřní povrch tlakové nádoby reaktoru je omýván primárním chladičem, jehož parametry byly určeny daným přechodovým režimem. Součinitel přestupu tepla na vnitřním povrchu byl převzat z projektových podkladů.

Hodnota sumárního součinitele přestupu tepla (konvekce + sálání) pro okrajovou podmínku na vnějším povrchu TNR byla určena řešením inverzní úlohy vedení tepla za následujících předpokladů:

- teplota primárního chladiča na vnitřním povrchu 289 °C
- naměřená střední teplota vnějšího povrchu válcové části 260,6 °C; hodnota byla určena jako aritmetický průměr měřených teplot na válcové části tělesa TN v úrovni aktivní zóny při práci reaktoru na nominálním výkonu a při práci systému ventilace betonové šachty
- teplota okolí 30 °C; tato teplota je fiktivní hodnota volená tak, aby okrajová podmínka byla platná s ohledem na 2. zákon termodynamiky v celém rozsahu pracovních teplot reaktoru

Okrajová podmínka prostupu tepla mezerou působí v mezeře mezi vnitřním povrchem nátrubku SAOZ a jeho ochrannou vložkou.

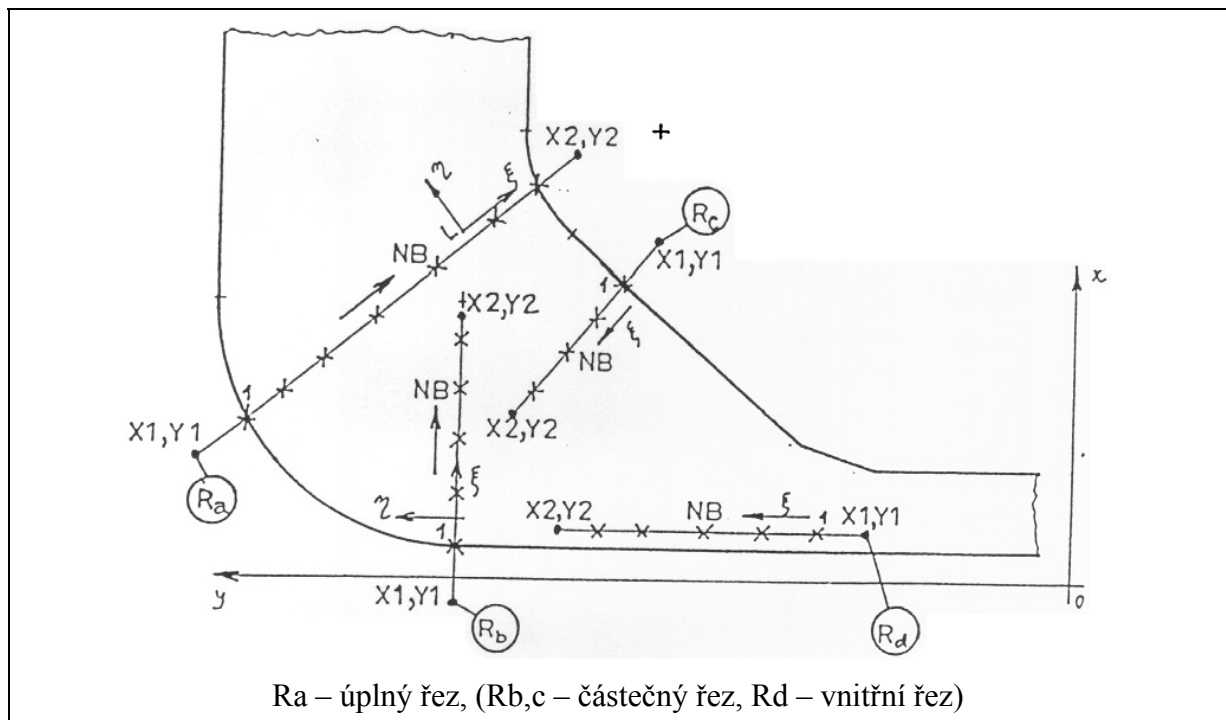
Velikost časových kroků výpočtu teplotních polí byla volena s ohledem na gradienty časových průběhů teplot, a to tak, aby v jednom kroku nebyla změna teploty vstupující do okrajové podmínky větší než 1,5 °C.

### 3.2 Výpočet napětí a únavového poškození

Ve všech výpočtových režimech byly vybrány výpočtové stavy, které představují souhrn zatěžovacích parametrů (teplotní pole, tlak) v určitém časovém okamžiku výpočtového režimu. Pro všechny vybrané výpočtové stavy následoval pevnostní výpočet, provedený metodou konečných prvků. Stejně jako při výpočtu teplotních polí, byly všechny hodnocené konstrukční uzly modelovány jako dvourozměrné, rotačně symetrické úlohy.

Užitý výpočtový program určil v souřadném systému  $x, y, L$  (viz Obr. 2) v každém výpočtovém stavu složky napětí ve všech elementech sítě. K rozboru napjatosti a dostatečně spolehlivému ocenění pevnosti se použila pouze část vypočtených napětí v omezeném počtu vybraných výpočtových bodů. Z hlediska metodiky dalšího zpracování výsledků sloužil k identifikaci a určení polohy výpočtových bodů systém přímkových výpočtových řezů. Každý z výpočtových bodů ležel na některém přímkovém výpočtovém řezu, určeném souřadnicemi počátku ( $X_1, Y_1$ ) a konce řezu ( $X_2, Y_2$ ) v soustavě souřadnic  $x, y$ . Řezy procházející povrchovými výpočtovými body byly zadány vždy tak, aby tvořily normálu k povrchu.

Pro zjednodušení zpracování napětí byla v každém výpočtovém řezu zavedena soustava souřadnic  $\xi, \eta, L$ , do které se po délce řezu transformují složky napětí vypočtené v soustavě souřadnic  $x, y, L$ . Odpovídající označení a příklady různých řezů jsou uvedeny na Obr. 2.



Obr. 2: Ukázky možných řezů pro nízkocyklovou únavu

Vstupními daty pro výpočet únavového poškození byla napěťová a teplotní pole pro všechny uvažované výpočtové stavy a dále pak zátěžné bloky cyklických zatížení, tvořené posloupností jednotlivých výpočtových stavů.

Užitá metodika vychází z ruské normy PNAE G-7-002-86 z roku 1989 a je založena na Palmgren-Minerově hypotéze kumulace únavového poškození. Výsledkem výpočtu nízkocyklové únavy je hodnota součtového únavového poškození  $D$ :

$$D = \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{[N]_i} \right) \quad (1)$$

kde  $N_i$  je počet opakování  $i$ -tého cyklu napětí v zátěžném bloku,  $[N]_i$  je nejmenší dovolený počet opakování  $i$ -tého cyklu napětí,  $k$  je celkový počet cyklů napětí v zátěžném bloku,  $n$  je celkový počet zátěžných bloků.

Únavová životnost se považuje za vyhovující, je-li splněna podmínka:

$$D \leq 1 \quad (2)$$

#### 4 Příprava vstupních dat výpočtu

Vstupními hodnotami výpočtu byly časové průběhy vybraných provozních parametrů, převzaté z dostupných zdrojů na jaderné elektrárně (archiv provozních měření STDAS, historický server HSR) a uložené ve formě vhodné pro další zpracování.

Pro úplné definování zátěží TNR během provozních režimů bylo účelné ukládat datové soubory obsahující časové průběhy:

- teploty primárního chladiva na vstupu do reaktoru ve všech 4 smyčkách
- teploty chladiva na výstupu z reaktoru ve všech 4 smyčkách
- tlaku chladiva v TNR nad aktivní zónou

Další zpracování uvedených časových průběhů provozních parametrů sestávalo z **vyhlazení časového průběhu provozních parametrů** a následného určení **výpočtových režimů**, ze kterých byly vybrány **výpočtové stavy**. Historie zatěžování výpočtových uzlů pak byla popsána **zátěžnými bloky**, obsahujícími posloupnosti značení výpočtových stavů.

S takto připravenými vstupními daty byl následně proveden výpočet napětí a součtového únavového poškození.

##### 4.1 Vyhazení provozních parametrů

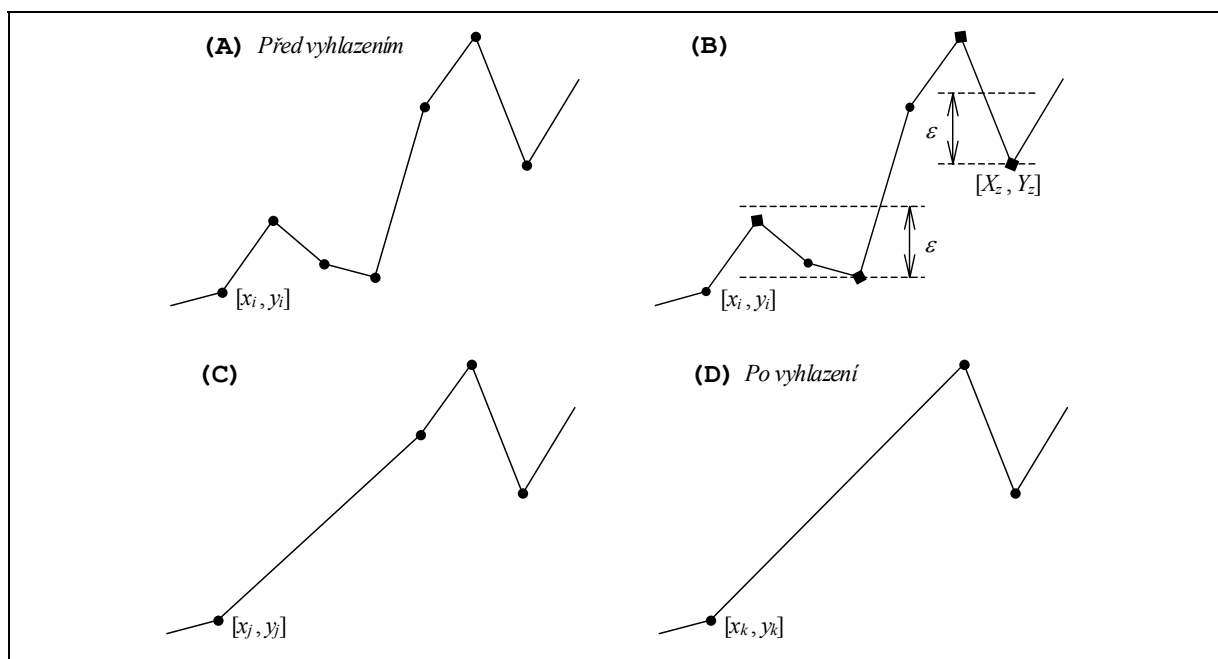
Vzhledem k relativně dlouhému sledovanému období, představuje databáze časových průběhů provozních parametrů velmi rozsáhlý objem dat.

Zkušenosti prokázaly, že pro účely výpočtu zbytkové životnosti je možné zcela ignorovat malé fluktuace i nevýrazné změny rychlostí nárůstu nebo poklesu teploty chladiva i tlaku.

Princip užitého algoritmu vyhlazení časových průběhů, spočívající ve vypouštění vhodných bodů, je uveden na Obr. 3.

Pro vyhlazení provozních parametrů byly zvoleny tolerance  $\varepsilon = 5$  [°C] pro vyhlazení časových průběhů teplot,  $\varepsilon = 1,5$  [MPa] pro vyhlazení časového průběhu tlaku a  $\delta = 30$  [%] pro poměrnou změnu směrnice. Takto provedené vyhlazení vedlo k podstatné redukci objemu

dále zpracovávaných dat (až na 1/100), při zachování celkového charakteru průběhu i všech významných změn hodnot provozních parametrů.



Obr. 3: Algoritmus vyhlazení průběhu parametrů

#### 4.2 Výpočtové režimy

Výpočtový režim je časově ohraničený úsek provozu reaktorového bloku, který je definován časovými průběhy termodynamických parametrů.

Výpočtové režimy byly vybírány z vyhlazených průběhů provozních parametrů s ohledem na jejich opakovatelnost a s cílem minimalizovat jejich počet.

Pro výpočtový uzel *válcová část tělesa TNR se dnem* bylo takto určeno 27 výpočtových režimů, definovaných časovými průběhy teploty primárního chladiva na **vstupu do TNR** a tlaku chladiva v TNR.

Pro výpočtové uzly *nátrubek SAOZ a nátrubek D 850* bylo celkem určeno 35 společných výpočtových režimů, definovaných časovými průběhy teploty primárního chladiva na **výstupu z TNR** a tlaku chladiva v TNR.

#### 4.3 Výpočtové stavy

S ohledem na velký objem datových souborů získaných teplotním výpočtem a počet výpočtových režimů se pevnostní výpočet daného režimu prováděl pouze v několika vybraných časových krocích. Pro správné vyhodnocení únavového poškození však bylo zapotřebí zahrnout do výpočtu všechny významné rozkmity napěťových polí. Proto byl pro každý výpočtový režim vybrán počáteční a koncový čas a dále pak všechny časy, v nichž se předpokládal lokální extrém časového průběhu napětí.

V praxi se jako postačující ukázal výběr, který vycházel jednak z grafických průběhů termodynamických parametrů primárního chladiva, a jednak z posouzení teplotních gradientů po tloušťce materiálu. Pro každý režim se posuzoval časový průběh rozdílu teploty uzlu

vhodně zvoleného na vnitřním a vnějším povrchu komponenty. Vybíraly se vždy takové časové okamžiky, kdy časový průběh rozdílu teplot vykazoval lokální extrém.

Souhrny zatěžovacích parametrů (teplotní pole, tlak, ...) v takto vybraných časových krocích výpočtových režimů pak tvořily jednotlivé výpočtové stavy.

#### 4.4 Zátěžné bloky

Vstupními daty pro ocenění nízkocyklové únavy byly zátěžné bloky cyklických zatížení, které popisovaly historii zatěžování výpočtových uzlů za sledované období. Zátěžné bloky byly tvořeny posloupností pořadových čísel výpočtových stavů, sestavenou na základě řazení výpočtových režimů.

Celé vyhodnocované období (listopad 1999 až prosinec 2003) bylo pokryto 15 zátěžnými bloky, přičemž každý blok se opakoval pouze 1x. Zátěžné bloky obvykle začínaly i končily tzv. *nulovým stavem*, tj. výpočtovým stavem bez jakýchkoliv zatížení.

Z hlediska dalšího zpracování výsledků bylo účelné rozdělit provoz JE na 2 etapy:

- první etapu, zahrnující režimy proběhlé **do zahájení zkušebního provozu** JE v celkové době trvání 570 dní, tvoří zátěžné bloky 1 až 11
- druhou etapu, zahrnující režimy proběhlé **při zkušebním provozu** JE v celkové době trvání 473 dní, představují zátěžné bloky 12 až 15; v grafu uvedeném na Obr. 4 jsou výsledky, vztahující se k této etapě, sumarizovány pod označením *Blok ZP*

## 5 Výsledky

Souhrnným výstupem výpočtu byla tabulka s přehledem hodnot součtového únavového poškození a maximálních rozkmitů ve všech vybraných výpočtových bodech. U každého bodu je uvedeno označení materiálu a u maximálních rozkmitů i pořadové číslo zátěžného bloku, druh hodnoceného redukovaného napětí a dovolená hodnota rozkmitu.

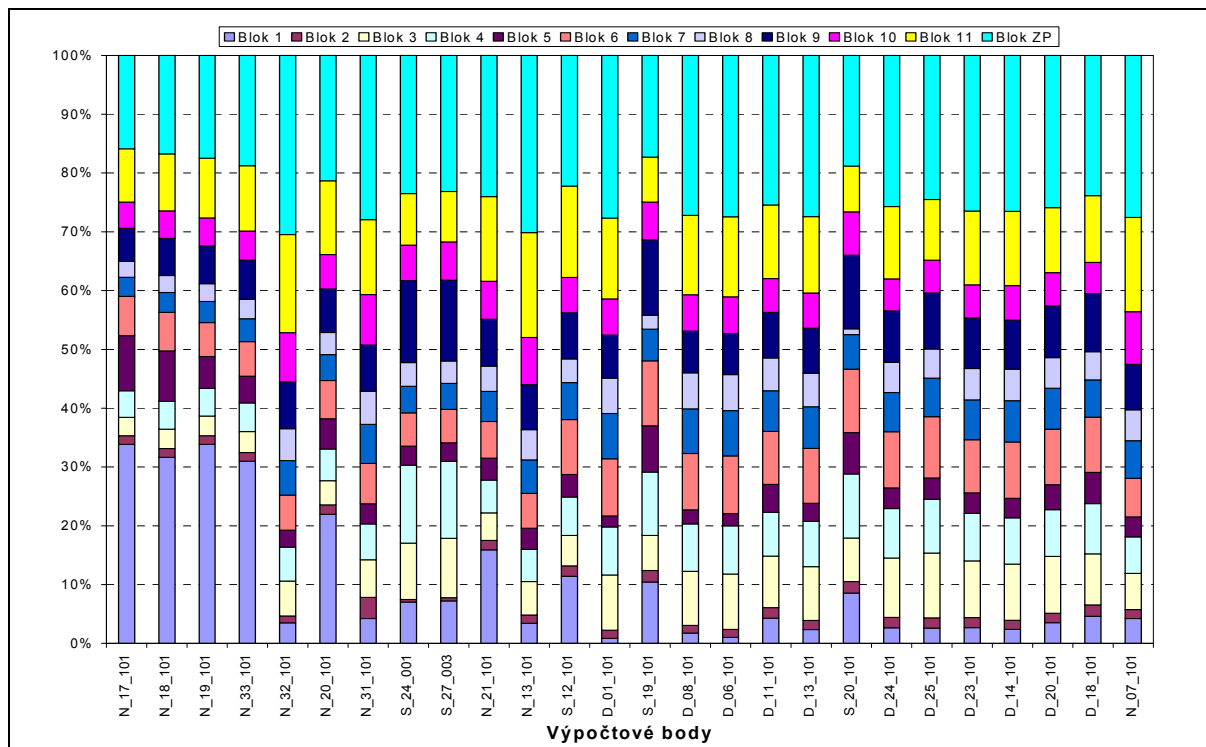
Dílčím výstupem pro každý výpočtový bod byl rovněž výpis všech napěťových cyklů, které přispěly do hodnoty součtového únavového poškození. Pro tyto cykly je uveden jejich dovolený počet hodnoty v minimu a maximu, a dále identifikátory výpočtových stavů, pro které bylo minima a maxima dosaženo.

Všechny dále uvedené výsledky a dílčí závěry se vztahují pouze k hodnoceným konstrukčním uzlům a nelze je zobecnit na ostatní místa TNR.

### 5.1 Únavové poškození

Maximální hodnota únavového poškození na TNR byla vypočtena v bodu, pro který se nachází v místě přechodu na vnitřním povrchu nátrubku D 850, na rozhraní návaru a základního materiálu.

Poměrné příspěvky jednotlivých zátěžných bloků do výsledných hodnot únavového poškození pro všechny výpočtové body, u nichž byla vypočtena hodnota únavového poškození  $D > 0,005$ , jsou uvedeny v grafu na Obr. 4 (hodnoty v %).



Obr. 4: Poměrné příspěvky zátěžných bloků do únavového poškození

Z výsledků vyplývá, že na čerpání životnosti TNR se z více než 70 % podílely předprovozní testy proběhlé v etapě do zahájení zkušebního provozu. Zejména velmi výrazný je příspěvek zátěžného bloku 1 k čerpání životnosti ve výpočtových bodech nátrubku D 850.

### 5.2 Nejméně příznivé režimy

Z výpisu napětových cyklů, které přispěly do hodnoty součtového únavového poškození vyplynulo, že výrazně nejmenší dovolený počet opakování  $[N]_i = 79$  vychází pro napětový cykl vymezený režimy:

- tlaková zkouška na pevnost při tlaku 24 MPa (minimum)
- ohřev na tlakovou zkoušku (maximum)

Z výsledků dále vyplynulo, že převážná většina napětových cyklů je obsažena v zátěžných blocích 1÷11, tedy v blocích proběhlých v etapě do zahájení zkušebního provozu.

### 5.3 Čerpání životnosti při skokových změnách teploty chladiva

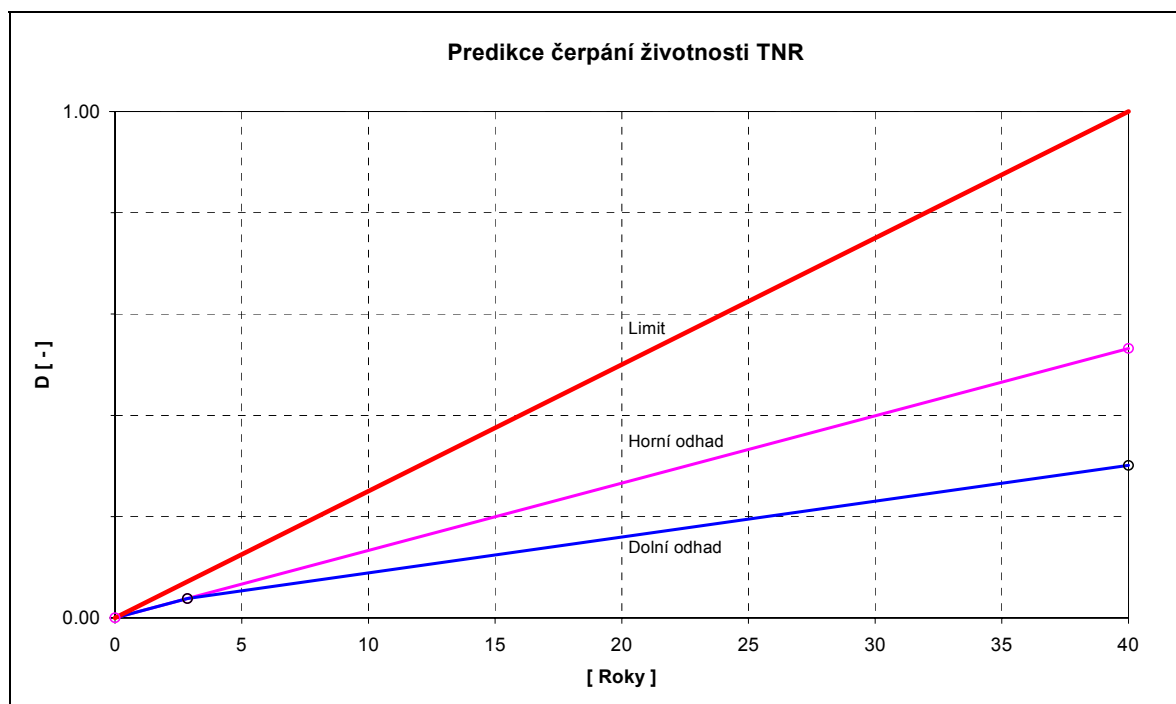
Do výpočtu hodnot únavového poškození byly zahrnuty všechny proběhlé nestandardní režimy, které měly za následek prakticky skokovou změnu teploty primárního chladiva v TNR. Provedený výpočet potvrdil, že události tohoto typu mají, vzhledem k jejich ojedinělosti, zanedbatelný vliv na čerpání životnosti TNR a nelze je hodnotit metodikou posouzení hodnoty součtového únavového poškození při zatěžování nízkocyklovou únavou. V těchto případech je na místě provést vyhodnocení vypočtené napjatosti z hlediska skupin kategorií napětí.



#### 5.4 Extrapolace únavového poškození

Na Obr. 5 je provedena extrapolace vypočtené maximální hodnoty únavového poškození na 40 let nepřetržitého provozu JE pro dva krajní případy:

- čerpání životnosti bude nadále probíhat stejnou rychlostí (*Horní odhad*)
- na čerpání životnosti se budou podílet pouze zátěžné bloky 12 až 15 a 1x za 4 roky zátěžný blok 1, zahrnující tlakovou zkoušku na pevnost (*Dolní odhad*)



Obr. 5: Extrapolace maximální hodnoty únavového poškození

Je třeba podotknout, že uvedený přístup k extrapolaci výsledků je přibližný, neboť vychází z příliš krátkého období provozu JE (cca 3 roky) a nezohledňuje degradaci mechanických vlastností materiálů TNR.

## 6 Závěry

Získané výsledky výpočtu a posouzení hodnoty součtového únavového poškození při zatěžování TNR nízkocyklovou únavou potvrdily, že:

- čerpání životnosti součtovým únavovým poškozením hodnocených uzlů TNR před zahájením a během hodnocené části zkušebního provozu poskytuje dostatečnou rezervu pro čerpání životnosti během dalšího provozu JE
- zbytková životnost po 40 letech provozu nebude v hodnocených uzlech TNR vyčerpána součtovým únavovým poškozením

Výsledky provedených výpočtů rovněž představují databázi, kterou bude možné využít při tvorbě modulu na on-line sledování čerpání životnosti TNR a tento modul implementovat do systému, který monitoruje vybrané komponenty primárního okruhu JE.

## 7 Literatura

- Kolektiv autorů (1989) *Normy rasčeta na pročnosť oborudovanija i truboprovodov atomnych eněrgetičeskich ustanovok PNAE G-7-002-86* (rusky) Eněrgoatomizdat, Moskva
- Macák, P. & Pechmannová, E. (2004) *Předběžné hodnocení čerpání životnosti tlakové nádoby reaktoru 1. bloku JE Temelín*, zpráva ŠKODA JS a.s., Ae 11 298/Dok, Plzeň
- Bláha, V. & Jukl, M. (2002) *Databáze pro hodnocení životnosti TNR a zhodnocení čerpání životnosti bloku*, zpráva ŠKODA JS a.s., Ae 11 037/Dok, Plzeň
- Gregor, J., Pechmannová, E. & Valtr, O. (1995) *Hladká část tělesa se dnem*, Pevnostní a životnostní výpočet, zpráva ŠKODA JS a.s., Ae 8381/Dok, Plzeň
- Gregor, J., Pechmannová, E. & Valtr, O. (1995) *Nátrubek SAOZ*, Pevnostní a životnostní výpočet, zpráva ŠKODA JS a.s., Ae 8454/Dok, Plzeň
- Gregor, J., Pechmannová, E. & Valtr, O. (1995) *Nátrubek D 850*, Pevnostní a životnostní výpočet, zpráva ŠKODA JS a.s., Ae 8452/Dok, Plzeň