

**Západočeská univerzita v Plzni**

**Fakulta aplikovaných věd**

# **Disertační práce**

**2016**

**Ing. Miroslav Švrček**

**Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta aplikovaných věd**

**SPOLEHLIVOST REAKTORU VVER 1000  
S OHLEDEM NA POŠKOZENÍ VLIVEM  
NÍZKOCYKLOVÉ ÚNAVY**

**Ing. Miroslav Švrček**

**disertační práce  
k získání akademického titulu doktor  
v oboru Aplikovaná mechanika**

**Školitel: prof. Ing. Vladimír Zeman, DrSc.  
Katedra mechaniky**

**Plzeň 2016**

**University of West Bohemia  
Faculty of Applied Sciences**

**RELIABILITY OF REACTOR WWER 1000  
IN RELATION TO LOW CYCLE FATIGUE**

**Ing. Miroslav Švrček**

**doctoral thesis  
to acquire academic title doctor  
of Applied mechanics**

**Supervisor: prof. Ing. Vladimír Zeman, DrSc.  
Department of Mechanics**

**Pilsen 2016**

**Prohlášení autora o původnosti práce**

*Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně na základě uvedené literatury a znalostí nabytých během studia.*

V Plzni dne .....

Podpis .....

### **Poděkování**

Děkuji svému školiteli prof. Ing. Vladimíru Zemanovi, DrSc. za jeho čas a energii, kterou mi během studia věnoval. Velké poděkování patří školiteli specialistovi panu Ing. Ladislavu Pečínkovi, CSc. a kolegům ze společnosti ÚJV Řež, a. s., bez jejichž pomoci by tato práce nevznikla. Speciálně děkuji svým blízkým za podporu a pochopení.

## Abstrakt

Disertační práce se zabývá problematikou výpočtu únavové životnosti komponent jaderných elektráren. Majoritně pojednává o hodnocení únavy materiálu tlakové nádoby, její vnitřní vestavby a horního bloku reaktoru VVER 1000.

Jedním z hlavních cílů je popis, interpretace a algoritmizace postupů uvedených v různých normativních dokumentech, a tím čtenáři přiblížit teorii výpočtů prováděných při hodnocení únavy komponent JE.

Důležitou částí práce je tvorba ucelené počítačové aplikace sloužící pro výpočty kumulace únavového poškození na základě výsledků MKP výpočtů. Vyvinutá počítačová aplikace umožňuje jednoduše provádět hodnocení únavové životnosti dle postupů definovaných v diskutovaných předpisech. Aplikace má naprogramované uživatelské rozhraní a její funkcionality uživateli ulehčují a zprůhledňují postup hodnocení únavy komponent JE ve formě názorných grafických a podrobných textových výpisů.

Vytvořená aplikace byla v rámci práce využita pro vzájemné porovnání jednotlivých diskutovaných postupů různých normativních standardů. Toto porovnání je provedeno pro vybrané praktické příklady hodnocení nízkocyklové únavy komponent tlakové nádoby reaktoru VVER 1000. Významný prostor je věnován posouzení nízkocyklové únavy komponent z austenitických ocelí. Pro tyto komponenty jsou v práci definována některá užitečná doporučení.

Součástí práce jsou také praktické aplikace, které reflektují reálnou práci autora na průmyslových problémech svázaných s průkazem životnosti komponent tlakové nádoby reaktoru VVER 1000 na Ukrajině především pro potřeby prodloužení provozu bloků za projektovou dobu života.

## Abstract

The Doctoral thesis deals with problems of fatigue assessment of nuclear reactor components, namely with fatigue assessment of reactor pressure vessel material as well as reactor internals and upper block of WVER 1000.

Main goal is the description, interpretation and numerical formulation of methods presented in different international standards to explain theory of calculations used for the fatigue assessment of reactor components.

An important part of this thesis is to create a comprehensive computer application used for fatigue assessment based on the results of FEM calculations. Based on the developed computer application it is possible very simply calculate cumulative usage factors according to different standards.

The application has friendly user interface and its functionality make the procedure for fatigue evaluation easier and more transparent for users in the form of

illustrative graphics and detailed text oriented outputs.

Developed application has been used for mutual comparison of the different methods according different standards. This comparison has been performed for selected practical examples of low cycle fatigue evaluation of the safety related components of reactor pressure vessel WWER 1000. Considerable space is devoted to the fatigue assessment of austenitic stainless steel components. For these components are formulated some useful recommendations.

Part of this thesis is formed by practical applications, which reflect author's works related to long-term operation of Ukraine reactor pressure vessels (WWER 1000) to obtain license renewal behind project given operation time.

## Аннотация

Диссертация занимается расчетами по циклической прочности компонентов атомных электростанций (АЭС). Именно относится к расчетам по усталости материалов корпуса реактора, внутрикорпусных устройств и верхнего блока реактора типа ВВЭР 1000.

Главным участком работы является описание, интерпретация и вычислительное оформление методов опубликованных в разных нормативных стандартах, и так пояснит теорию расчетов применяемых при оценках усталости компонентов АЭС.

Самой важной частью является создание целостной компьютерной аппликации, используемой для расчетов накопленного усталостного повреждения на основе результатов расчетов МКЭ. Разработанная компьютерная аппликация позволяет легко выполнять оценку циклической прочности в соответствии с процедурами определенными в обсуждаемых нормативных документах. Аппликация имеет пользовательский интерфейс и ее функциональные возможности пользователям более облегчает и сделает прозрачной процедуру для оценки усталости в качестве иллюстративных графических функции и подробными текстовыми выписками результатов.

Созданная аппликация была использована в рамках взаимного сравнения отдельных методов разных норм. Это проведено на выбранных примерах оценки циклической прочности реальных компонентов корпуса реактора. Значительная часть диссертации уделена оценке усталости компонентов изготовленных из сталей аустенитного класса. Для оценок данных компонентов определяются здесь некоторые полезные рекомендации.

Частью диссертации являются также практические применения реальных работ, которые отражают участь автора на проблемах АЭС связанных с расчетами циклической прочности компонентов корпуса реактора ВВЭР 1000 украинских АЭС, именно с целом продления срока их службы.

# Obsah

|  |          |
|--|----------|
| Seznam zkratk  | vii      |
| Seznam použitého značení   | ix       |
| Seznam obrázků   | xii      |
| Seznam tabulek   | xvii     |
| <b>1 Úvod</b>  | <b>1</b> |
| <b>2 Současný stav problematiky</b>  | <b>3</b> |
| 2.1 Americká norma ASME . . . . .  | 4        |
| 2.2 Ruská norma PNAE . . . . .   | 4        |
| 2.3 Česká norma NTD . . . . .  | 4        |
| 2.4 Software pro výpočet únavy komponent jaderných elektráren . . . . .                | 5        |
| 2.5 Cíle disertační práce . . . . .  | 6        |
| <b>3 Stanovení hodnoty kumulace únavového poškození</b>                                | <b>7</b> |
| 3.1 Tahové vlastnosti materiálu . . . . .  | 8        |
| 3.2 Závislost napětí na deformaci . . . . .  | 10       |
| 3.3 Fiktivní napětí . . . . .  | 12       |
| 3.3.1 Neuberovo pravidlo . . . . .   | 13       |
| 3.3.2 Metoda ekvivalentní energie . . . . .  | 15       |
| 3.3.3 Postup určení fiktivních napětí pro časový průběh<br>lineárního napětí . . . . . | 16       |
| 3.3.3.1 Lineární oblast . . . . .  | 17       |
| 3.3.3.2 Poloha na cyklické deformační křivce . . . . .                                 | 18       |
| 3.3.3.3 Hledání počátku hysterezní větve . . . . .                                     | 19       |
| 3.4 Dekompozice posloupnosti fiktivního napětí na jednotlivé cykly . . . . .           | 22       |
| 3.4.1 Metoda stékání deště (Rainflow) . . . . .  | 22       |
| 3.4.2 Metoda maximálních rozkmitů . . . . .  | 24       |
| 3.5 Koeficient asymetrie cyklu napětí . . . . .  | 25       |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.6      | Křivky únavové životnosti . . . . .  | 27        |
| 3.6.1    | Vliv asymetrie cyklu dle koncepce Goodman . . . . .                              | 31        |
| 3.6.2    | Vliv asymetrie cyklu dle koncepce Morrow . . . . .                               | 32        |
| 3.6.3    | Křivky únavové životnosti ASME . . . . .   | 33        |
| 3.7      | Redukční koeficienty . . . . .   | 36        |
| 3.8      | Kumulace únavového poškození . . . . .   | 40        |
| 3.9      | Trojosý stav napjatosti . . . . .  | 40        |
| <b>4</b> | <b>Počítačová aplikace pro hodnocení únavy materiálu komponent reaktoru VVER</b> | <b>44</b> |
| 4.1      | Využití programu Matlab pro tvorbu aplikací . . . . .                            | 45        |
| 4.2      | Grafická podoba aplikace . . . . .   | 46        |
| 4.3      | Vstupní data . . . . .   | 47        |
| 4.4      | Definování úlohy . . . . .   | 48        |
| 4.4.1    | Členění vstupního textového souboru . . . . .                                    | 49        |
| 4.5      | Použitá teorie . . . . .   | 51        |
| 4.6      | Nastavení a provedení výpočtu . . . . .  | 51        |
| 4.6.1    | Načtení vstupních dat . . . . .  | 51        |
| 4.6.2    | Sestavení posloupnosti zatížení . . . . .  | 52        |
| 4.6.3    | Přepočet na elasto-plastický stav napjatosti . . . . .                           | 52        |
| 4.6.4    | Dekompozice posloupnosti na jednotlivé cykly . . . . .                           | 53        |
| 4.6.5    | Výpočet dílčích poškození . . . . .  | 53        |
| 4.7      | Výstupní textové soubory . . . . .   | 55        |
| 4.8      | Grafické výstupy aplikace . . . . .  | 55        |
| <b>5</b> | <b>Využití aplikace v praxi při hodnocení reaktoru VVER 1000</b>                 | <b>59</b> |
| 5.1      | Provozní historie bloku a predikovaný provoz . . . . .                           | 60        |
| 5.2      | Válcová část, dno a rozdělovací prstenec tlakové nádoby reaktoru . . . . .       | 65        |
| 5.2.1    | Výpočtový model . . . . .  | 65        |
| 5.2.2    | Výpočty teplotních polí . . . . .  | 65        |
| 5.2.3    | Lineárně-elastický výpočet napětí a deformace . . . . .                          | 68        |
| 5.2.4    | Stavy zatížení . . . . .   | 69        |
| 5.2.5    | Hodnocené body . . . . .   | 70        |
| 5.2.6    | Výsledné hodnoty únavového poškození . . . . .                                   | 70        |
| 5.3      | Nátrubky tlakové nádoby reaktoru . . . . .                                       | 75        |
| 5.3.1    | Nátrubek hlavního cirkulačního potrubí a nátrubek SAOZ . . . . .                 | 76        |
| 5.3.1.1  | Výpočtový model nátrubků HCP a SAOZ . . . . .                                    | 76        |
| 5.3.1.2  | Výsledky výpočtů . . . . .   | 77        |
| 5.3.2    | Nátrubek KIP . . . . .   | 83        |
| 5.4      | Víko reaktoru . . . . .  | 83        |
| 5.4.1    | Oblast vetknutí nátrubku odvzdušnění do víka TNR . . . . .                       | 84        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.5      | Hlavní přírubový spoj . . . . .  | 87         |
| 5.5.1    | Výpočtový model HPS . . . . .  | 87         |
| 5.5.2    | Výsledky výpočtů pro HPS . . . . .   | 88         |
| <b>6</b> | <b>Porovnání postupů dle rozdílných normativních dokumentů</b>                                       | <b>92</b>  |
| 6.1      | Porovnání výsledků výpočtů při hodnocení dle rozdílných normativních předpisů . . . . .              | 93         |
| 6.1.1    | Porovnání hodnot kumulace únavového poškození pro materiál 22K . . . . .                             | 94         |
| 6.1.2    | Porovnání hodnot kumulace únavového poškození pro materiál 15Ch2NMFA . . . . .                       | 94         |
| 6.1.3    | Porovnání hodnot kumulace únavového poškození pro materiál 08Ch18N10T . . . . .                      | 95         |
| 6.1.4    | Výsledky porovnání . . . . .   | 96         |
| 6.2      | Závislost únavových křivek na tahových vlastnostech materiálu . . . . .                              | 98         |
| 6.3      | Křivka životnosti austenitické oceli, určená na základě výsledků experimentů . . . . .               | 102        |
| 6.4      | Porovnání křivek pro austenitickou ocel . . . . .  | 103        |
| 6.5      | Výpočet pro navrženou změnu a srovnání s výsledky dle ASME a VERLIFE . . . . .                       | 107        |
| <b>7</b> | <b>Dosažené poznatky</b>   | <b>110</b> |
| 7.1      | Hodnoty dílčích poškození reaktoru při zaprojektové době života . . . . .                            | 110        |
| 7.2      | Porovnání postupů dle rozdílných norem . . . . .   | 111        |
| 7.3      | Oprava postupu v normě NTD A.S.I. . . . .  | 112        |
| 7.4      | Doporučení při hodnocení únavy materiálu austenitických ocelí . . . . .                              | 114        |
| <b>8</b> | <b>Shrnutí a závěr</b>   | <b>115</b> |
| 8.1      | Přínos pro využití v praxi . . . . .   | 116        |
| 8.2      | Vědecký přínos práce . . . . .   | 117        |
| <b>9</b> | <b>Výhledy dalších prací</b>   | <b>118</b> |
| 9.1      | Provedení elastoplastického hodnocení . . . . .  | 118        |
| 9.2      | Zpracování problematiky řešení únavy s vlivem prostředí do vytvořené aplikace . . . . .              | 119        |
| 9.3      | Schválení vyvinutého programu v rámci komise č.5 SÚJB . . . . .                                      | 120        |
| 9.4      | Navržení změny normy NTD A.S.I. z hlediska použití únavových křivek pro austenitické oceli . . . . . | 120        |
|          | <b>Literatura</b>  | <b>121</b> |
|          | <b>Publikace autora</b>  | <b>125</b> |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>A</b> | <b>Rozměrové výkresy TNR 3. Bloku Rovenské JE</b>                         | <b>130</b> |
| <b>B</b> | <b>Prognóza posloupnosti provozních režimů</b>                            | <b>144</b> |
| <b>C</b> | <b>Grafické výstupy z MKP výpočtu TNR</b>                                 | <b>148</b> |
| <b>D</b> | <b>Grafické výstupy z MKP výpočtu teplot a napjatosti v HPS</b>           | <b>155</b> |
| <b>E</b> | <b>Grafické výstupy z MKP výpočtu teplot a napjatosti v hrdlové sekci</b> | <b>158</b> |
| <b>F</b> | <b>Nátrubek HCP a SAOZ v oblasti spodní hrdlové sekce</b>                 | <b>163</b> |
| <b>G</b> | <b>Nátrubek KIP</b>   | <b>167</b> |
| <b>H</b> | <b>Víko reaktoru a oblast přivaření nátrubku</b>                          | <b>170</b> |
| <b>I</b> | <b>Víko reaktoru a oblast přivaření nátrubků - další směry</b>            | <b>173</b> |
| <b>J</b> | <b>Příruby nátrubků horního bloku</b>                                     | <b>176</b> |
| J.1      | Přírubové spoje nátrubků SUZ, TK a EV . . . . .                           | 176        |
| J.1.0.1  | Příruba nátrubku TK . . . . .   | 177        |
| J.1.0.2  | Příruba nátrubku EV . . . . .   | 179        |
| J.1.0.3  | Příruba nátrubku SUZ . . . . .  | 181        |
| J.1.1    | Příruba nátrubku odvzdušnění . . . . .                                    | 183        |

# Seznam zkratek

|            |   |
|------------|---|
| A.S.I.     | Asociace strojních inženýrů   |
| ANL        | Argonne National Laboratory   |
| ASME       | American Society of Mechanical Engineers  |
| AZ         | Aktivní zóna reaktoru   |
| EV         | Systém vnitroreaktorového monitoringu neutronového toku<br>(ЭВ - энерговыделение)               |
| HB         | Horní blok  |
| HCP        | Hlavní cirkulační potrubí   |
| HČČ        | Hlavní cirkulační čerpadlo  |
| HPS        | Hlavní přírubový spoj   |
| I.O.       | Primární okruh výrobního bloku jaderné elektrárny   |
| II.O.      | Sekundární okruh výrobního bloku jaderné elektrárny   |
| JE         | Jaderná elektrárna  |
| KIP        | Nátrubek pro vývody kontrolních vnitroreaktorových měření<br>(контрольно-измерительные приборы) |
| KO         | Kompenzátor objemu  |
| MCR        | Matlab Compiler Runtime   |
| MKP        | Metoda konečných prvků  |
| NDS        | Napětově-deformační stav  |
| NTD        | Normativně technická dokumentace  |
| NTD A.S.I. | Normativně technická dokumentace A.S.I.   |
| PG         | Parogenerátor   |

|         |   |
|---------|---|
| PNAE    | Pravidla a normy jaderné energetiky<br>(Правила и Нормы атомной энергетики)                                     |
| RK      | Regulační klastr  |
| SAOZ    | Systém havarijního chlazení aktivní zóny<br>(Система аварийного охлаждения активной зоны реактора)              |
| SUZ     | Systém řízení a ochrany (система управления и защиты)   |
| SÚJB    | Státní úřad pro jadernou bezpečnost   |
| TK      | Systém vnitroreaktového monitoringu teploty<br>(TK - термоконтроль)   |
| TNR     | Tlaková nádoba reaktoru   |
| VERLIFE | Guidelines for Integrity and Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER Nuclear Power Plants, viz [5] |
| VTO     | Vysokotlaký ohřívák   |
| VVER    | Vodo-vodní energetický reaktor  |

# Seznam použitého značení

| Označení          | Popis  | Jednotka                              |
|-------------------|--|---------------------------------------|
| $A$               | Plocha průřezu vzorku během a po tahové zkoušce                | $\text{m}^2$                          |
| $A_0$             | Plocha průřezu nedeformovaného vzorku                          | $\text{m}^2$                          |
| $A_1, A_2$        | Koeficienty Langerova vztahu                                   |                                       |
| $D$               | Kumulace únavového poškození                                   |                                       |
| $D_i$             | Dílčí faktor únavového poškození                               |                                       |
| $E$               | Modul pružnosti materiálu                                      | Pa                                    |
| $K$               | Lineární koeficient materiálového zpevnění                     |                                       |
| $L$               | Délka vzorku   | m                                     |
| $L_0$             | Délka vzorku před zkouškou tahem                               | m                                     |
| $N$               | Počet cyklů  |                                       |
| $N_i$             | Dovolný počet opakování daného cyklu                           |                                       |
| $P$               | Zatížení zkušební vzorku při zkoušce tahem                     | N                                     |
| $R_m$             | Mez pevnosti   | Pa                                    |
| $R_{p0.2}$        | Smluvní mez kluzu  | Pa                                    |
| $R_{pe}$          | Mez úměrnosti  | Pa                                    |
| $T$               | Teplota  | $^{\circ}\text{C}, \text{K}$          |
| $X, Y$            | Rozkmity fiktivního napětí použité v algoritmu metody Rainflow | Pa                                    |
| $Z$               | Poměrné zúžení (kontrakce)                                     | %                                     |
| $\Delta\epsilon$  | Rozkmit deformace  |                                       |
| $\alpha$          | Koeficient přestupu tepla                                      | $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ |
| $\alpha_{\sigma}$ | Multiplikační faktor teplotního zatížení                       |                                       |
| $\beta$           | Koeficient funkce signum                                       |                                       |
| $\beta_{\sigma}$  | Multiplikační faktor mechanického zatížení                     |                                       |
| $\epsilon$        | Deformace materiálu  |                                       |
| $\epsilon_H$      | Deformace plynoucí z elastické analýzy NDS                     |                                       |
| $\epsilon_a$      | Amplituda deformace  |                                       |
| $\epsilon_e$      | Inženýrská deformace   |                                       |

| Označení                                | Popis   | Jednotka |
|---|---|----------|
| $\epsilon_t$                            | Deformace v pružně-plastickém stavu   |          |
| $\epsilon_{Rp}$                         | Deformace na mezi kluzu   |          |
| $\epsilon_{a_{el}}$                     | Amplituda elastické deformace   |          |
| $\epsilon_{a_{pl}}$                     | Amplituda plastické deformace   |          |
| $\epsilon_{el}$                         | Elastická deformace   |          |
| $\epsilon_{fr}$                         | Skutečná deformace při přetržení vzorku tahové zkoušky                      |          |
| $\epsilon_{max}$                        | Maximální hodnota deformace na cyklu  |          |
| $\epsilon_{min}$                        | Minimální hodnota deformace na cyklu  |          |
| $\epsilon_{pl}$                         | Plastická deformace   |          |
| $\mathbf{T}_\sigma$                     | Tenzor napětí   | Pa       |
| $\sigma_H$                              | Napětí plynoucí z elastické analýzy NDS                                     | Pa       |
| $\sigma_\theta, \sigma_r, \sigma_z$     | Normálová napětí v tečném, radiálním a vertikálním směru                    | Pa       |
| $\sigma_a$                              | Amplituda napětí  | Pa       |
| $\sigma_c$                              | Mez únavy   | Pa       |
| $\sigma_e$                              | Inženýrské napětí   | Pa       |
| $\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k$          | Hlavní napětí ve směrech $i, j$ a $k$                                       | Pa       |
| $\sigma_m$                              | Střední hodnota napětí na cyklu   | Pa       |
| $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$          | Normálová napětí v kartézském souřadném systému                             | Pa       |
| $\sigma_{F_{max}}$                      | Maximální hodnota fiktivního napětí na cyklu                                | Pa       |
| $\sigma_{F_{min}}$                      | Minimální hodnota fiktivního napětí na cyklu                                | Pa       |
| $\sigma_{F_e}(t)$                       | Posloupnost lokálních extrémů fiktivního napětí                             | Pa       |
| $\sigma_{aF}$                           | Amplituda fiktivního napětí   | Pa       |
| $\sigma_{fr}$                           | Skutečné napětí při lomu vzorku tahové zkoušky                              | Pa       |
| $\sigma_{ij}, \sigma_{jk}, \sigma_{ki}$ | Redukované hodnoty napětí   | Pa       |
| $\sigma_{mF}$                           | Střední hodnota fiktivního napětí na cyklu                                  | Pa       |
| $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$       | Smyková napětí v kartézském souřadném systému                               | Pa       |
| $\varphi_F$                             | Redukční koeficient únavové životnosti vlivem radičního poškození materiálu |          |
| $\varphi_S$                             | Redukční koeficient únavové životnosti                                      |          |
| $\varphi_k$                             | Redukční koeficient únavové životnosti vlivem pracovního prostředí          |          |
| $\varphi_w$                             | Redukční koeficient únavové životnosti ve svarech a návarech                |          |
| $dL$                                    | Inkrementální přírůstek délky vzorku  | m        |
| $d\epsilon$                             | Inkrementální přírůstek deformace   |          |
| $h, l, l_1, s$                          | Označení časových okamžiků  |          |

| Označení     | Popis  | Jednotka |
|--------------|--|----------|
| $i, j, k$    | Označení fixovaných ortogonálních směrů pro řešení únavy   |          |
| $m$          | Exponent materiálového zpevnění                            |          |
| $m_e$        | Exponent Basquinova vztahu                                 |          |
| $m_p$        | Exponent plasticity  |          |
| $n_1$        | Exponent Langerova vztahu                                  |          |
| $n_N$        | Redukční koeficient na počet cyklů                         |          |
| $n_\sigma$   | Redukční koeficient na deformaci, resp. na fiktivní napětí |          |
| $n_i$        | Počet opakování daného cyklu                               |          |
| $r_\epsilon$ | Koeficient asymetrie deformace                             |          |
| $r_\sigma$   | Koeficient asymetrie napětí                                |          |
| $t$          | Čas  | s        |



# Seznam obrázků

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.1  | Poloha meze úměrnosti na deformační křivce. . . . .   | 11 |
| 3.2  | Závislost napětí na deformaci v log-log souřadnicích. . . . .   | 12 |
| 3.3  | Neuberův princip. . . . .   | 14 |
| 3.4  | Metoda ekvivalentní energie. . . . .  | 15 |
| 3.5  | Hysterezní smyčky a cyklická deformační křivka. . . . .   | 17 |
| 3.6  | Schéma postupu pro způsob určení pružně-plastického napětí. . . . .   | 18 |
| 3.7  | Určení počátku hysterezní větve. . . . .  | 20 |
| 3.8  | Určení počátku hysterezní větve. . . . .  | 21 |
| 3.9  | Hodnoty koeficientu asymetrie pro různé typy cyklického zatěžování. . . . .   | 26 |
| 3.10 | Křivka únavové životnosti, mez únavy na elastické části. . . . .  | 29 |
| 3.11 | Křivka životnosti dle přístupu 'Coffin-Manson-Basquin'. . . . .   | 30 |
| 3.12 | Vliv střední hodnoty - koncepce „Goodman“. . . . .  | 31 |
| 3.13 | Vliv střední hodnoty - koncepce „Morrow“. . . . .   | 32 |
| 3.14 | Srovnání únavových křivek definovaných normami [2] a [4, 3] pro austenitický materiál vnitřní vestavby reaktoru (VVER). . . . .                               | 34 |
| 3.15 | Srovnání únavových křivek definovaných normami [2] a [4, 3] pro materiál tlakové nádoby reaktoru (VVER), symetricky střídavý cyklus $r_\sigma = -1$ . . . . . | 35 |
| 3.16 | Srovnání únavových křivek definovaných normami [2] a [4, 3] pro materiál tlakové nádoby reaktoru (VVER), mívivý cyklus v tahu $r_\sigma = 0$ . . . . .        | 36 |
| 3.17 | Křivka únavové životnosti redukováná o koeficienty $n_\sigma$ a $n_n$ . . . . .   | 38 |
| 3.18 | Indexace hlavních napětí. . . . .   | 42 |
| 4.1  | Grafické rozhraní vytvořené aplikace - karta „Sources“. . . . .   | 46 |
| 4.2  | Grafické rozhraní vytvořené aplikace - karta „Materials“. . . . .   | 49 |
| 4.3  | Grafické rozhraní vytvořené aplikace - karta „Solution“. . . . .  | 52 |
| 4.4  | Grafické rozhraní vytvořené aplikace - karta „Results“. . . . .   | 54 |
| 4.5  | Grafické rozhraní vytvořené aplikace - vykreslená hysterezní křivka. . . . .  | 56 |
| 4.6  | Grafické rozhraní vytvořené aplikace - karta „Countplot“. . . . .   | 57 |
| 4.7  | Grafické rozhraní vytvořené aplikace - barevné rozlišení skupin cyklů. . . . .  | 58 |
| 5.1  | Tlaková nádoba, víko a vnitřní vestavba reaktoru VVER 1000. . . . .   | 60 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.2  | Výpočtový MKP model válcové části TNR. . . . .  | 66  |
| 5.3  | Hodnocené body v oblasti válcové části a dna TNR. . . . .   | 69  |
| 5.4  | Hodnocené body v oblasti dělicího prstence TNR. . . . .   | 70  |
| 5.5  | Hysterezní křivky a dekomponované cykly (v diagramu amplituda-<br>medián-počet polocyklů) vykreslené pomocí vyvinuté aplikace pro<br>hodnocené místo 36 v oblasti přivaření dělicího prstence k tělesu<br>TNR pro 40 let provozu. . . . .               | 74  |
| 5.6  | Výpočtový MKP model 1/4 obvodu hrdlové sekce TNR. . . . .   | 76  |
| 5.7  | Hodnocené body v oblasti hrdlové sekce TNR. . . . .   | 77  |
| 5.8  | Hodnocené body v oblasti nátrubku HCP. . . . .  | 78  |
| 5.9  | Hodnocené body v oblasti přivaření austenitické košilky nátrubku SAOZ. . . . .  | 78  |
| 5.10 | Hodnocené body v oblasti nátrubku SAOZ. . . . .   | 78  |
| 5.11 | Azimutální směry rovin, ve kterých ležely hodnocené body, nalézající se<br>v oblastech nátrubků HCP a SAOZ. . . . .   | 78  |
| 5.12 | Výpočtový MKP model víka TNR s nátrubkem odvzdušnění. . . . .   | 85  |
| 5.13 | Hodnocené body v oblasti přivaření nátrubku odvzdušnění k víku<br>reaktoru. . . . .   | 86  |
| 5.14 | Hodnocené body v oblasti nátrubku odvzdušnění. . . . .  | 86  |
| 5.15 | Směry ve kterých leží hodnocené body v oblasti přivaření nátrubku<br>odvzdušnění k víku TNR. . . . .  | 86  |
| 5.16 | Výpočtový MKP model přírubového spoje TNR. . . . .  | 88  |
| 5.17 | Hodnocené body v oblasti hlavního přírubového spoje TNR. . . . .  | 89  |
| 6.1  | Porovnání únavových křivek dle různých dokumentů pro materiál<br>TNR . . . . .  | 97  |
| 6.2  | Závislost únavové křivky na hodnotě meze pevnosti $R_m$ , pro hodnoty<br>$R_m < 700$ MPa. . . . .   | 98  |
| 6.3  | Závislost únavové křivky na hodnotě meze pevnosti $R_m$ , pro hodnoty<br>$R_m > 700$ MPa. . . . .   | 99  |
| 6.4  | Závislost únavové křivky na hodnotě kontrakce $Z$ . . . . .   | 100 |
| 6.5  | Závislost únavové křivky na hodnotě modulu pružnosti $E$ . . . . .  | 100 |
| 6.6  | Závislost únavové křivky na hodnotě maximální dosažené plastické de-<br>formace $\epsilon_{pl}$ v průběhu zatěžování. . . . .   | 101 |
| 6.7  | Aproximace výsledků únavových zkoušek (za kontrolované deformace)<br>materiálů X10-CrNiNb-18-9 a X-10-CrNiTi-18-9 prováděných v rozmezí<br>teplot 20-350°C [40]. . . . .  | 103 |
| 6.8  | Porovnání únavových křivek pro austenitickou ocel dle různých norma-<br>tivních předpisů [2, 3, 4] s křivkou stanovenou v kapitole 6.3. Na pozadí<br>jsou vykreslena experimentálně stanovená data pro austenitickou ocel<br>(převzata z [40]). . . . . | 104 |
| 6.9  | Porovnání analyticky definovaných únavových křivek. . . . .   | 106 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 6.10 | Porovnání únavových křivek austenitických ocelí určených dle různých standardů. . . . .  | 109 |
| 7.1  | Určení polohy počátku větve hysterezní smyčky v posloupnosti lokálních extrémů lineárního napětí $\sigma_{He}(t)$ . . . . .  | 113 |
| 7.2  | Průběh elasto-plastického napětově deformačního stavu určeného: a) dle chybně zapsaného postupu v NTD, b) dle opraveného postupu s korektním dohledáním počátku větve hysterezní křivky. . . . . | 113 |
| A.1  | Rozměrový výkres přivaření dělicího prstence. . . . .  | 130 |
| A.2  | Rozměrový výkres tlakové nádoby reaktoru. . . . .  | 131 |
| A.3  | Rozměrový výkres osazení na opěrném nákrůžku, sloužící pro uložení TNR na opěrných elementech. . . . .   | 132 |
| A.4  | Rozměrový výkres nátrubku KIP v hrdlové sekci TNR. . . . .   | 132 |
| A.5  | Rozměrový výkres provedení hrdlové sekce TNR. . . . .  | 133 |
| A.6  | Rozměrový výkres provedení nátrubků HCP a SAOZ. . . . .  | 134 |
| A.7  | Rozměrový výkres spojovacích elementů hlavního přírubového spoje TNR. . . . .  | 135 |
| A.8  | Rozměrový výkres hlavního přírubového spoje TNR. . . . .   | 136 |
| A.9  | Rozměrový výkres těsnění hlavního přírubového spoje TNR. . . . .   | 137 |
| A.10 | Rozměrový výkres víka TNR. . . . .   | 138 |
| A.11 | Rozměrový výkres víka TNR s nátrubky HB. . . . .   | 139 |
| A.12 | Rozměrový výkres víka TNR. Oblast přivaření nátrubku k víku. . . . .   | 139 |
| A.13 | Rozměrový výkres víka TNR. Poloha nátrubku odvzdušnění. . . . .  | 140 |
| A.14 | Rozměrový výkres víka TNR. Nátrubek odvzdušnění. . . . .   | 141 |
| A.15 | Rozměrový výkres víka TNR. Oblast přivaření nátrubku odvzdušnění. . . . .  | 141 |
| A.16 | Rozměrový výkres přírubového spojení nátrubku SUZ. . . . .   | 142 |
| A.17 | Rozměrový výkres přírubového spojení nátrubku TK. . . . .  | 142 |
| A.18 | Rozměrový výkres přírubového spojení nátrubku EV. . . . .  | 143 |
| A.19 | Rozměrový výkres přírubového spojení nátrubku odvzdušnění s navazujícím potrubím. . . . .  | 143 |
| C.1  | Rozložení teploty $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) v TNR při nominálním provozu. . . . .   | 149 |
| C.2  | Rozložení teploty $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) v průběhu režimu 1.13 v čase $t = 30000\text{s}$ . . . . .  | 149 |
| C.3  | Rozložení teploty $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) v průběhu režimu 2.6 v čase $t = 3090\text{s}$ . . . . .  | 150 |
| C.4  | Rozložení teploty $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) v průběhu režimu 3.2 v čase $t = 120\text{s}$ . . . . .   | 150 |
| C.5  | Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) v TNR při zatížením vnitřním přetlakem $p = 1\text{MPa}$ . . . . .   | 151 |
| C.6  | Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) v průběhu režimu 1.13 v čase $t = 30000\text{s}$ . . . . .   | 151 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| C.7  | Rozložení hodnoty redukováného napětí (MPa) v průběhu režimu 2.6 v čase $t = 3090s$ . . . . .   | 152 |
| C.8  | Rozložení hodnoty redukováného napětí (MPa) v průběhu režimu 2.12 v čase $t = 15000s$ . . . . .   | 152 |
| C.9  | Rozložení hodnoty redukováného napětí (MPa) v průběhu režimu 3.2 v čase $t = 120s$ . . . . .  | 153 |
| C.10 | Rozložení hodnoty redukováného napětí (MPa) ve „studeném stavu“ $T = 20^{\circ}C$ . . . . .   | 153 |
| C.11 | Rozložení hodnoty redukováného napětí (MPa) v TNR při nominálním výkonu bloku. . . . .  | 154 |
| D.1  | Rozložení teploty ( $^{\circ}C$ ) v HPS, režim 1.3 na konci náhřevu. . . . .  | 156 |
| D.2  | Rozložení teploty ( $^{\circ}C$ ) v HPS, režim 2.12 na konci zchlazení. . . . .   | 156 |
| D.3  | Rozložení hodnoty redukováného napětí (Pa) v oblasti konstrukčních míst koncentrace napětí pod přírubou TNR, při režimu 1.3 na konci náhřevu. . . . .   | 157 |
| D.4  | Rozložení hodnoty redukováného napětí (Pa) v oblasti konstrukčních míst koncentrace napětí pod přírubou TNR, při režimu 2.12 na konci zchlazení. . . . .  | 157 |
| E.1  | Rozložení teploty ( $^{\circ}C$ ) v oblasti horní hrdlové sekce TNR, při režimu 1.3 „Plánovaný ohřev ze studeného stavu s rychlostí do $20^{\circ}C/hod.$ “ na konci ohřevu. . . . .                      | 159 |
| E.2  | Rozložení teploty ( $^{\circ}C$ ) v oblasti horní hrdlové sekce TNR, při režimu 1.13 „Plánované vychlazování do studeného stavu s rychlostí $30^{\circ}C/hod.$ “ na konci vychlazování. . . . .           | 159 |
| E.3  | Rozložení teploty ( $^{\circ}C$ ) v oblasti horní hrdlové sekce TNR, při režimu 2.12 „Zrychlené vychlazování s rychlostí $60^{\circ}C/hod.$ “ na konci vychlazování. . . . .                              | 160 |
| E.4  | Rozložení hodnoty redukováného napětí (MPa) v oblasti horní hrdlové sekce TNR, při režimu 1.13 „Plánované vychlazování do studeného stavu s rychlostí $30^{\circ}C/hod.$ “ na konci vychlazování. . . . . | 160 |
| E.5  | Rozložení hodnoty redukováného napětí (MPa) v oblasti horní hrdlové sekce TNR, při režimu 1.3 „Plánovaný ohřev ze studeného stavu s rychlostí do $20^{\circ}C/hod.$ “ na konci ohřevu. . . . .            | 161 |
| E.6  | Rozložení hodnoty redukováného napětí (MPa) v oblasti horní hrdlové sekce TNR, při režimu 2.12 „Zrychlené vychlazování s rychlostí $60^{\circ}C/hod.$ “ na konci vychlazování. . . . .                    | 161 |
| E.7  | Rozložení hodnoty redukováného napětí (MPa) v oblasti horní hrdlové sekce, při zatížení vnitřním přetlakem 1 MPa. . . . .   | 162 |
| E.8  | Rozložení hodnoty redukováného napětí (MPa) v oblasti horní hrdlové sekce, ve „studeném“ stavu při pokojové teplotě. . . . .  | 162 |
| G.1  | Hodnocené body v oblasti nátrubku KIP. . . . .  | 168 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| H.1 | Výpočtový MKP model víka TNR s nátrubkem TK (EV, SUZ). . .   | 170 |
| H.2 | Hodnocené body v oblasti přivaření nátrubků TK (EV, SUZ). . .  | 171 |
| H.3 | Hodnocené body v oblasti víka TNR. . . . .   | 171 |
| H.4 | Směry ve kterých leží hodnocené body v oblasti přivaření nátrubku k víku TNR. . . . .                | 171 |
| J.1 | Body pro vyhodnocení kumulace únavového poškození v oblasti přírubového spoje nátrubku TK . . . . .  | 177 |
| J.2 | Body pro vyhodnocení kumulace únavového poškození v oblasti přírubového spoje nátrubku EV . . . . .  | 179 |
| J.3 | Body pro vyhodnocení kumulace únavového poškození v oblasti přírubového spoje nátrubku SUZ . . . . . | 181 |
| J.4 | Hodnocené body v oblasti přírubového spojení nátrubku odvodu s navazujícím potrubím. . . . .         | 183 |

# Seznam tabulek

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.1  | Hodnoty redukčních koeficientů pro různé typy komponent. . . . .  | 36 |
| 5.1  | Seznam provozních režimů na 3. bloku Rovenské JE. . . . .   | 62 |
| 5.2  | Posloupnost provozních režimů v provozu 3. Bloku Rovenské JE. . . . .   | 63 |
| 5.3  | Kumulace únavového poškození $D$ na vnitřním povrchu TNR. . . . .   | 71 |
| 5.4  | Kumulace únavového poškození $D$ pod návarem TNR. . . . .   | 71 |
| 5.5  | Kumulace únavového poškození $D$ na vnějším povrchu TNR. . . . .  | 72 |
| 5.6  | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti dělicího prstence. . . . .   | 72 |
| 5.7  | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti přivaření austenitické košilky nátrubku SAOZ. . . . .  | 79 |
| 5.8  | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti návaru hrdlové sekce TNR. . . . .  | 80 |
| 5.9  | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti nátrubku HCP a SAOZ. . . . .   | 81 |
| 5.10 | Kumulace únavového poškození $D$ na vnějším povrchu hrdlové sekce TNR. . . . .  | 82 |
| 5.11 | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti přivaření nátrubku vzdušníku k víku reaktoru. . . . .  | 85 |
| 5.12 | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti hlavní příruby TNR na vnitřním povrchu návaru. . . . .   | 90 |
| 5.13 | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti hlavní příruby TNR pod návarem. . . . .  | 90 |
| 5.14 | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti hlavní příruby TNR na vnějším povrchu. . . . .   | 91 |
| 5.15 | Kumulace únavového poškození $D$ ve šroubech hlavní příruby TNR. . . . .  | 91 |
| 6.1  | Hodnoty kumulace únavového poškození $D$ v oblasti přivaření dělicího prstence (body 34-44), určené pro 28 let provozu (26 kampaní) dle různých přístupů. . . . .                       | 94 |
| 6.2  | Hodnoty kumulace únavového poškození $D$ na vnitřním povrchu TNR v oblasti hlavního přírubového spoje (body 1-11), určené pro 28 let provozu (26 kampaní) dle různých přístupů. . . . . | 94 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 6.3 | Hodnoty kumulace únavového poškození $D$ v oblasti přivaření nátrubku odvodu k víku TNR (body 24-28), určené pro 28 let provozu (26 kampaní) dle různých přístupů. . . . .         | 95  |
| 6.4 | Hodnoty kumulace únavového poškození $D$ v oblasti přivaření austenitické košilky nátrubku SAOZ (body 11-15), určené pro 28 let provozu (26 kampaní) dle různých přístupů. . . . . | 95  |
| 6.5 | Hodnoty kumulace únavového poškození $D$ v oblasti přivaření nátrubku odvodu k víku TNR (body 24-28), určené pro 60 let provozu dle různých přístupů. . . . .                      | 107 |
| 6.6 | Hodnoty kumulace únavového poškození $D$ v oblasti přivaření austenitické košilky nátrubku SAOZ (body 11-15), určené pro 28 let provozu dle různých přístupů. . . . .              | 108 |
| B.1 | Prognóza posloupnosti režimů 3. Bloku Rovenské JE na 60 let provozu.   | 144 |
| B.2 | Prognóza posloupnosti režimů 3. Bloku Rovenské JE na 40 let provozu.   | 147 |
| F.1 | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti návaru hrdlové sekce TNR; oblast „studených“ nátrubků. . . . .  | 163 |
| F.2 | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti přivaření austenitické košilky nátrubku SAOZ; oblast „studených“ nátrubků. . . . .  | 164 |
| F.3 | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti nátrubku HCP a SAOZ; oblast „studených“ nátrubků. . . . .   | 165 |
| F.4 | Kumulace únavového poškození $D$ na vnějším povrchu hrdlové sekce TNR; oblast „studených“ nátrubků. . . . .  | 166 |
| G.1 | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti nátrubku KIP. . . . .   | 168 |
| H.1 | Kumulace únavového poškození $D$ ve víku reaktoru, v oblasti přivaření nátrubků HB. . . . .  | 172 |
| I.1 | Kumulace únavového poškození $D$ ve víku reaktoru, především v oblasti přivaření nátrubků (směr II, III a IV). . . . .   | 173 |
| I.2 | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti přivaření nátrubku vzdušníku k víku reaktoru (směr II, III a IV). . . . .   | 175 |
| J.1 | Kumulace únavového poškození $D$ v austenitické košilce TK. . . . .  | 177 |
| J.2 | Kumulace únavového poškození $D$ v návaru a svaru košilky TK. . . . .  | 178 |
| J.3 | Kumulace únavového poškození $D$ v základním materiálu nátrubku a příruby TK. . . . .  | 178 |
| J.4 | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti příruby kanálu TK. . . . .  | 178 |
| J.5 | Kumulace únavového poškození $D$ v austenitické košilce EV. . . . .  | 179 |
| J.6 | Kumulace únavového poškození $D$ v návaru a svaru košilky EV. . . . .  | 179 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| J.7  | Kumulace únavového poškození $D$ v základním materiálu nátrubku a příruby EV. . . . .  | 180 |
| J.8  | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti příruby kanálu EV. . . . .                  | 180 |
| J.9  | Kumulace únavového poškození $D$ v austenitické košilce SUZ. . . . .                   | 181 |
| J.10 | Kumulace únavového poškození $D$ v návaru a svaru košilky SUZ. . . . .                 | 182 |
| J.11 | Kumulace únavového poškození $D$ v základním materiálu nátrubku a příruby SUZ. . . . . | 182 |
| J.12 | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti příruby kanálu SUZ. . . . .                 | 182 |
| J.13 | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti příruby potrubí odvodušnění. . . . .        | 184 |
| J.14 | Kumulace únavového poškození $D$ v oblasti příruby nátrubku odvodušnění. . . . .       | 184 |



# Kapitola 1

## Úvod

V současné době lidstvo spotřebuje ročně asi  $4,5 \cdot 10^{20}$  J nejrůznějších druhů energie. Z vnějších energetických zdrojů tedy na jednoho člověka připadá trvalý příkon v průměru asi 2,5 kW, tj. 30 krát více, než je člověk při trvalé práci fyzicky schopný sám vyvíjet. Ve vyspělé průmyslové společnosti je tento průměrný příkon vnějších energetických zdrojů dokonce ještě pětkrát až desetkrát větší než celosvětový průměr. Existence soudobé společnosti je tedy z energetického hlediska postavena na využívání vnějších zdrojů energie, přičemž přínos vlastní fyziologické energie člověka je dnes již zanedbatelný [1].

Vývoj spotřeby energie je zejména od vzniku průmyslové společnosti velice dynamický. V dnešní době se zvyšuje spotřeba všech druhů energie v celosvětovém měřítku asi o 4% ročně, tj. více než dvakrát rychleji, než jak roste světová populace. Přibližně vždy za 18 let se tedy spotřebuje tolik energie, kolik bylo vyrobeno za všechnu předchozí dobu (exponenciální růst).

Tento bouřlivý rozvoj energetiky je však spojen s některými vážnými problémy technickými, ekonomickými a hygienickými. Proto se v dnešní společnosti klade stále větší důraz na využívání ekologicky přijatelnějších zdrojů energie. Z hlediska energetické budoucnosti se v mnoha zemích klade důraz na jadernou energii. V jaderných elektrárnách se dnes vyrábí asi 7% celkového množství světové produkce elektrické energie.

Většina dnes provozovaných jaderných elektráren je vybavena reaktory tlakovodního typu s označením PWR (Pressurized Water Reactor), pro reaktory ruské konstrukce se používá zkratka VVER. V takovýchto reaktorech je voda zároveň transmisní médium („chladiivo“) i moderátor štěpné reakce. Voda se v reaktoru přímo nevaří, ale je v reaktoru za vysokého tlaku zahřívána. Teplo je následně odváděno skrze primární potrubí do parogenerátorů a tudíž je energie předávána do sekundárního okruhu. Cirkulaci chladiva zajišťují hlavní cirkulační čerpadla (HCČ). Provoz jaderných reaktorů tlakovodního typu sebou přináší různá úskalí. Provozní parametry, především oblast vysokých tlaků a teplot, jaderných zařízení

vykazují vysoké požadavky na specifické schopnosti a nestandardní konstrukční řešení.

Při provozu se hodnoty provozních parametrů mění v průběhu provozních režimů zařízení, to spěje k cyklickému zatěžování konstrukčních materiálů. Tato proměnná zatížení mohou významně přispívat k degradaci materiálů vlivem nízko-cyklové únavy. V rámci projektu byly stanoveny hodnoty kumulací únavového poškození pro projektem dané počty provozních režimů.

V současné době je snahou společnosti vlivem zvyšující se poptávky po energii nenavyšovat cenu vyráběné elektrické energie. Snahou provozovatelů jaderných elektráren je proto prodloužení provozu těchto jaderných elektráren, které se blíží konci své projektové doby života. Se zaprojektovým provozem přirozeně souvisí navýšení počtu přechodových režimů (oproti projektem stanovených), a tím také navýšení počtu cyklického zatížení konstrukce. To může mít významný vliv na čerpání životnosti konstrukce z hlediska nízko-cyklové únavy materiálu v napětově nejexponovanějších místech.

Významným krokem pro licencování zaprojektové doby života jaderných zařízení je přehodnocení degradace jejich konstrukčních materiálů v důsledku nízko-cyklové únavy. K tomuto účelu je nutné specifikovat postup hodnocení nízko-cyklové únavy a mít vhodný matematický aparát v podobě uceleného výpočetního nástroje (v podobě počítačových výpočetních programů), který umožňuje posuzovat nízko-cyklovou únavu konstrukčních materiálů jaderných zařízení na základě požadavků platných normativních předpisů.

# Kapitola 2

## Současný stav problematiky

Průmyslová revoluce podmínila vznik strojů a soustrojí, jejichž nechtěná selhání způsobovala nehody následované ztrátami na lidských životech. To si vynutilo rozvoj pevnostních výpočtů a zejména hodnocení únavy materiálu.

Ve dvacátém století byly zformovány sofistikované teorie závislé na stavu tehdejší techniky. Ve druhé polovině dvacátého století se objevil nový technický fenomén - jaderná energetika. Únavové výpočty tvořily významnou část projektu, neboť jaderná bezpečnost vyžaduje zabránit nekontrolovanému šíření radioaktivity, což může nastat v důsledku únavového lomu některé bezpečnostně významné komponenty.

Výhodou tehdejších techniků a výpočtářů bylo, že mohli vycházet ze solidního základu znalostí a že výpočetní technika, kterou měli k dispozici, se prudce vyvíjela. Z hlediska únavových výpočtů existují dva základní přístupy. Jeden z nich reprezentuje normu ASME a druhý pak postupy dle ruské „únavové školy“.

Pro průkaz bezpečnosti konstrukce jaderného reaktoru z hlediska únavy materiálu lze využít postupů dle několika světových a jednoho tuzemského normativního dokumentu. Jsou to především postupy popsané v těchto třech normativních dokumentech:

1. Mezinárodní norma ASME - sekce III pro konstrukci jaderných zařízení [2]
2. Ruská norma pro výpočty komponent jaderných elektráren PNAE [3]
3. Česká norma NTD A.S.I. sekce III - pro hodnocení komponent jaderných elektráren [4]

Postupy výpočtu únavy popsané ve zmíněných třech dokumentech jsou Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB) akceptovány při průkazech bezpečnosti nových či provozovaných komponent JE. Všechny tři postupy mají společný základ a obdobné předpoklady, nicméně v detailech se jednotlivé postupy liší.

Obsahem této kapitoly je stručný popis výpočtu únavy dle zmíněných dokumentů a popis komerčních počítačových programů, které mají implementován postup výpočtu dle zmíněných norem.

## 2.1 Americká norma ASME Boiler and Pressure Vessel Code, section III, part NB

Tato část mezinárodně uznávané normy ASME (American Society of Mechanical Engineers), zaměřená na tlakové komponenty, stanovuje kritéria pro konstrukci komponent JE. Obsahuje rovněž postup pro hodnocení bezpečnosti vůči únavě materiálu. Postup je velmi obecný, ale má jasná pravidla.

Norma především požaduje stanovení kumulace únavového poškození na základě únavových křivek stanovených pro specifické typy ocelí (uhlíková, nízkolegovaná, austenitická). Předepisuje možný postup jak stanovit amplitudy napětí, resp. deformace a zároveň zachovává jistou benevolenci pro přesnější hodnocení dle koncepčně modernějších postupů.

Jedná se o světově nejrozšířenější normativní dokument. Je využíván pro posouzení bezpečnosti konstrukce ve většině zemí provozujících jaderná zařízení. Rovněž postup dle tohoto dokumentu je přijímán národními regulačními orgány<sup>1</sup>. Postupy pro posouzení nízkocyklové únavy dle národních standardů v mnoha zemích<sup>2</sup> adoptovaly obdobný postup, který je uveden v [2].

## 2.2 Ruská norma PNAE G-7-002-86

V ruské normě PNAE je postup pro hodnocení únavy postaven na základě analyticky definovaných křivek životnosti. Tyto křivky jsou definovány na základě tahových vlastností konstrukčních materiálů. Ze znalosti především hodnot meze pevnosti a kontrakce lze teoreticky konstruovat křivku životnosti pro libovolný materiál. Konstrukční vztahy jsou definovány na základě poznatků a vztahů plynoucích z experimentálních zkoušek. Postup pro přepočet elastického stavu napjatosti na stav pružně-plastické napjatosti je v normě předepsán pomocí metody ekvivalentní energie.

## 2.3 Česká norma NTD A.S.I. sekce III

Normativně technická dokumentace Asociace strojních inženýrů [4] tvoří soubor pravidel rozdělených do šesti základních oddílů (Sekcí), pro výrobu, montáž, re-

<sup>1</sup> Např.: na Ukrajině není norma ASME v současné době akceptovaná.

<sup>2</sup> Francie, Německo, Japonsko a další.

konstrukce a provoz (údržbu a opravy) zařízení a potrubí elektráren typu VVER v podmínkách platné právní legislativy České republiky.

Pro výpočty pevnosti a seismické odolnosti zařízení a komponent jaderných elektráren typu VVER do roku 1996 neexistovala normativní dokumentace vydaná v České republice, která by odrážela současné ověřené poznatky v této oblasti. Asociace strojních inženýrů v České republice proto po dohodě se Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB) zpracovala Normativně technickou dokumentaci A.S.I. „Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, Sekce III“ [4]. Tato dokumentace vychází z dřívějších norem NTD SEV a ruské normy PNAE-G-7-002-86 [3]. SÚJB v roce 1998 vydal stanovisko SÚJB k použitelnosti této normy. Tímto stanoviskem SÚJB akceptoval použití NTD A.S.I. Sekce III [4] k vypracování nové průkazné dokumentace pro komponenty JE Temelín.

V rámci mezinárodního projektu, vedeném ÚJV Řež, se začala zpracovávat Sekce IV - Výpočet zbytkové životnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, která reflektuje postupy dle mezinárodního dokumentu [5]. Sekce IV byla schválena k použití v roce 2004.

V roce 2006 byly všechny Sekce NTD A.S.I. schváleny jako celek a v roce 2013 vyšla nová celková revize a byla rovněž SÚJB schválena [6]. Aktuálně se norma stále vyvíjí v rámci pravidelně se scházejících pracovních skupin.

Z hlediska výpočtů únavy norma v základní podobě reflektuje postupy dle ruského standardu PNAE. Nicméně oproti ruskému dokumentu byla norma rozšířena o modernější postupy hodnocení, například předepisuje využití metody Stékání deště a postup pro hodnocení vysokocyklové únavy je rozdílný.

## 2.4 Software pro výpočet únavy komponent JE

Světově je oblast výpočtů únavy velmi dobře pokryta softwarovým vybavením. Existují velmi robustní komerční programy pro výpočet únavy a také drobné podnikové počítačové skripty. Mnohé z komerčních programů jsou součástí balíků s programy využívajících MKP a interaktivně s nimi spolupracují. Zahrnuté metody posouzení únavy materiálu jsou velmi široké. Velmi často reflektují nejmodernější trend posudku a odhadu životnosti konstrukce. Nicméně komerčních programů, které zahrnují postup výpočtu únavy daný výše zmíněnými normativními předpisy, není příliš mnoho. Výhodou jistě benevolence normativního předpisu ASME je možnost využití některých průmyslově rozšířených metod posouzení náchylnosti konstrukce k poškození vlivem nízkocyklové únavy. Takto lze užít komerčně rozšířených programů, jako jsou např.: Fe-Safe, Systus-fatigue či Femap. Z normy [2] se většinou používá pouze křivka únavové životnosti.

Na rozdíl od normy ASME je v normách [3, 4] přesněji specifikován postup hod-

nocení únavy materiálu. Jelikož se jedná o velmi úzkou problematiku, zaměřující se pouze na posouzení komponent jaderných elektráren, není tento postup obsažen v komerčně dostupných softwarech.

Jediným českým a zároveň komisí SÚJB akceptovaným programem pro jeho využití při průkazu bezpečnosti jaderných zařízení je program STATES [7]. Tento počítačový program je spravovaný a distribuovaný Ústavem aplikované mechaniky Brno. Program umožňuje hodnotit konstrukce z hlediska statické pevnosti a únavy. Program je velmi široce rozpracován a napojen na výstupy mnoha komerčních MKP softwarů (Ansys, Cosmos, Systus, aj.). Výsledky a mezivýsledky vypisuje v podrobných textových výstupních souborech.

Jelikož jsou si normy NTD A.S.I. [4] a PNAE [3] dosti blízké (jak je uvedeno výše), lze program STATES s určitým nastavením výpočtu využít rovněž při hodnocení komponent na únavu dle přístupu ruské normy [3].

## 2.5 Cíle disertační práce

Práce si klade za cíl provedení teoretického rozboru postupů pro řešení nízkocyklové únavy materiálu tlakové nádoby jaderného reaktoru. Především postupů, které jsou obsahem výše zmíněných normativních dokumentů. Následné provedení jejich vzájemného porovnání na úrovni výpočtů hodnot kumulace únavového poškození pro kritická místa konstrukce tlakové nádoby reaktoru VVER 1000.

Pro tento úkol se provede rozbor a kompletní algoritmizace postupů hodnocení dle výše zmíněných norem a jejich následné naprogramování do formy počítačové aplikace. Práce si neklade za cíl vytvořit plnohodnotnou náhradu za program STATES. To by bylo nad rámec možností autora. Aplikace má posloužit jako přiměřená alternativa s transparentním kódem, možností jeho editace a možnostmi výstupů řešení v grafické podobě. Zvláště grafické výstupy mohou odhalit nesrovnalosti v zadaných vstupech, použitých postupech či předpokladech řešení, které u jinak složité úlohy nelze jednoduše identifikovat. Také mohou posloužit při interpretaci výsledků, kdy mohou pomoci stanovit, který z provozních režimů, či kombinace provozních stavů zatížení, má dominantní vliv na čerpání únavové životnosti.

Práce je velmi úzce svázána s reálnou činností autora na průmyslových problémech řešených pro jaderné bloky s reaktory VVER na Ukrajině, které se blíží konci své projektové doby života. Hodnocení tlakových nádob reaktoru těchto bloků je proto první oblastí použití vyvinuté počítačové aplikace v praxi. Z tohoto důvodu se práce významně zaměřuje především na postup hodnocení dle ruské normy PNAE, která je na Ukrajině vyžadována. Česká norma obsahuje podobný postup jako je definován v PNAE, ten bude tedy také významným předmětem této práce. Oba postupy pak budou konfrontovány s postupem dle normy ASME a okrajově také s VERLIFE.

# Kapitola 3

## Stanovení hodnoty kumulace únavového poškození

Pro hodnocení únavového poškození v důsledku provozu jaderných zařízení se obecně používají postupy dle platné normativně technické dokumentace. Těleso a komponenty jaderného reaktoru spadají do bezpečnostní třídy 1 a 2, a proto je nutné je hodnotit dle postupů uvedených v normě NTD [4]. Metodický postup pro hodnocení únavového poškození [4] do značné míry koinciduje s ruskou normou [3], protože mají společnou historii. Vznikly v návaznosti na mezinárodní normu bývalých sovětských republik po záštitou Interatomenergo.

Vyhodnocení únavy lze provést na základě výstupů z řešení napěťově deformačních stavů pomocí metody konečných elementů (MKP). Pro vyhodnocení únavového poškození je nutné znát posloupnost složek tenzoru napětí  $\sigma$  v průběhu provozu zařízení pro hodnocené body konstrukce. Normy také stanovují jak na základě tahových vlastností konstruovat únavové křivky řešeného materiálu [3, 4], nebo udávají únavové křivky v tabelární podobě [2].

Vztahy a postupy uvedené v normách [4] a [3] jsou v porovnání s jinými normami složitější. Nicméně při bližším pohledu je zřejmá jejich teoretická podstata. Bez znalosti hlubšího významu v normě uvedených vztahů a algoritmů může dojít k jejich nesprávné interpretaci či nesprávnému užití. V této kapitole si přiblížíme významy v normě uvedených vztahů, algoritmů a postupů. Zmíníme základní informace o teoretickém základu a uvedeme teoretické předpoklady jejich odvození.

Při zpracování této kapitoly byly v normě [4] nalezeny malé, vesměs formální, nedostatky definovaných postupů. Tyto nesrovnalosti jsou diskutovány v kapitole 7.3, kde jsou rovněž navržena správná řešení, která již byla zabudována do vyhotovené počítačové aplikace popsané v kapitole 4.

Vytvořená počítačová aplikace byla vyhotovena s ohledem na možnosti jejího využití nejen pro účely hodnocení komponent jaderného reaktoru v ČR, ale především pro možnost jejího využití při hodnocení komponent jaderných reaktorů

Ukrajinských JE<sup>1</sup>.

Na Ukrajině byla ukrajinským státním úřadem pro jadernou bezpečnost<sup>2</sup> pro posudky únavové životnosti adoptována ruská norma [3]. Z tohoto důvodu byly do této kapitoly začleněny především ty postupy, které jsou pro obě normy [4, 3] společné. Snahou autora rovněž bylo konfrontovat uváděnou teorii s obdobnými přístupy dle světově nejrozšířenějšího normativního kódu [2].

Při konstrukci křivek a postupu výpočtu únavového poškození vyjdeme nejprve z tahových vlastností materiálu.

Základní tahové vlastnosti, které se využívají při výpočtu hodnoty únavového poškození materiálu jsou především:

**Smluvní mez kluzu**  $R_{p0,2}$  je hodnota napětí na napětově-deformační křivce, která odpovídá plastické deformaci  $\epsilon_{pl} = 0,002$ .

**Mez pevnosti**  $R_m$  je nejvyšší hodnota napětí na inženýrské napětově-deformační křivce.

**Poměrné zúžení**  $Z$  je hodnota relativní změny průřezu na konci tahové zkoušky (po přetržení vzorku)  $\Delta A = A_0 - A_{fr}$ , vztahovaná k původní velikosti průřezu  $A_0$ .

Tyto tři základní vlastnosti bývají obsahem průvodní dokumentace komponent bezpečnostních tříd 1 a 2 [8] dodávaných pro jaderná zařízení. Jelikož jsou tyto vlastnosti vesměs známy, jsou dle normy účelně vzaty jako výchozí parametry pro určení:

1. závislosti skutečného napětí na celkové deformaci  $\sigma(\epsilon)$ ,
2. únavové křivky materiálu  $\sigma_{aF}(N)$ .

Pro výše zmíněné účely je potřeba znát také hodnotu modulu pružnosti materiálu  $E$ , který je pro běžně používané oceli v normách [2, 3, 4] tabelována.

### 3.1 Tahové vlastnosti materiálu

Tahová zkouška je jedna ze základních, možná nejvýznamnějších zkoušek mechanické odezvy materiálu [9]. Jeden konec tyčového či drátového vzorku se při zkoušce zafixuje a druhý podléhá kontrolovanému posunutí  $\delta$ . Lze sledovat vývoj zátěže, korespondující s příslušným posunutím  $P(\delta)$ . Vypočtené hodnoty napětí a deformace

---

<sup>1</sup>Tato hodnocení tvoří majoritní náplň vykonávané práce autora na jeho pracovišti ve firmě ÚJV Řež, a. s.

<sup>2</sup>ДІЯРУ - Державна інспекція ядерного регулювання України



odpovídající příslušnému zatížení či posunutí lze chápat jako inženýrskou hodnotu napětí  $\sigma_e$ , resp. deformace  $\epsilon_e$ . Ty jsou stanoveny na základě měřené zátěže či prodloužení, které jsou vztaženy k originálnímu průřezu  $A_0$ , resp. k délce zkušební vzorku  $L_0$  takto:

$$\sigma_e = \frac{P}{A_0} \implies \epsilon_e = \frac{\delta}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}. \quad (3.1)$$

Jelikož se geometrické rozměry zkušební vzorku neustále v průběhu zkoušky mění vůči jejich originálním rozměrům, je nutné zavést pojem skutečného napětí  $\sigma$ , resp. skutečné deformace  $\epsilon$ . Inkrementální přírůstek deformace  $d\epsilon$  lze vyjádřit jako poměr přírůstku délky  $dL$  k délce aktuální  $L$ :

$$d\epsilon = \frac{dL}{L}; \quad \epsilon = \int_{L_0}^L \frac{1}{L} dL = \ln \frac{L}{L_0}. \quad (3.2)$$

Během kluzu a při rozvoji plastické deformace následující za kluzem dochází k rozvoji deformace materiálu se zanedbatelnou změnou objemu zkušební tělesa. Prodloužení vzorku je vyváženo změnou příčného průřezu. Až do doby tvorby krčku je deformace přibližně rovnoměrná po celé délce vzorku. Zachování konstantního objemu můžeme vyjádřit jako:

$$dV = 0 \implies AL = A_0L_0 \implies \frac{L}{L_0} = \frac{A_0}{A}. \quad (3.3)$$

Poměr  $\frac{L}{L_0}$  lze na základě vztahu (3.1) vyjádřit jako  $\frac{L}{L_0} = (1 + \epsilon_e)$ . Na základě vztahu (3.3) a (3.3) lze následně odvodit vztah mezi skutečnými a inženýrskými hodnotami napětí a deformace:

$$\sigma = \sigma_e (1 + \epsilon_e), \quad \epsilon = \ln (1 + \epsilon_e). \quad (3.4)$$

Tyto vztahy platí až do tvorby krčku. Po zaškrcení vzorku již není deformace rovnoměrná po celé jeho délce a výše uvedené vztahy pro inženýrské deformace za touto oblastí by byly nepřesné.

Pro celkovou skutečnou deformaci rovněž platí:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{A_0}{A} \implies \epsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A}. \quad (3.5)$$

Ze znalosti konečné velikosti plochy při přetržení vzorku  $A_{fr}$ , můžeme přibližně určit skutečnou deformaci při přetržení vzorku  $\epsilon_{fr}$ :

$$\epsilon_{fr} = \ln \frac{A_0}{A_{fr}}. \quad (3.6)$$

Jestliže pro definování deformace při roztržení vzorku  $\epsilon_{fr}$  uijeme hodnotu poměrného zúžení  $Z$ , dostáváme následující vztah:

$$Z = \frac{A_0 - A_{fr}}{A_0} \implies \frac{A_{fr}}{A_0} = 1 - Z \implies \epsilon_{fr} = \ln \left( \frac{1}{1 - Z} \right). \quad (3.7)$$

Při použití dekadického logaritmu a předpokladu, že hodnota kontrakce je dána v procentech, získáme pro hodnotu skutečné deformace při roztržení vzorku  $\epsilon_{fr}$  následující tvar:

$$\epsilon_{fr} = 2,3 \log \left( \frac{100}{100 - Z} \right). \quad (3.8)$$

Skutečné lomové napětí  $\sigma_{fr}$  je rovno podílu namáhání při přetržení vzorku  $P_{fr}$  a plochy průřezu vzorku při lomu  $A_{fr}$ . Toto napětí by mělo být rovněž korigováno s ohledem na trojosý stav napjatosti vyskytující se při lomu vzorku. Protože data potřebná pro tuto korekci nejsou běžně dostupná, je ve většině případů hodnota skutečného lomového napětí určena jen přibližně. Normy [3, 4] pro vyjádření hodnoty skutečného lomového napětí využívají vztahu:

$$\sigma_{fr} = (1 + 0,014Z) R_m, \quad (3.9)$$

kde  $R_m$  je mez pevnosti a odpovídá maximálnímu napětí na inženýrské deformační křivce, neboli hodnotě napětí pro historicky nejvyšší zátěž  $P_{max}$ .

## 3.2 Závislost napětí na deformaci

Pro popis chování materiálu nad mezí úměrnosti můžeme využít exponenciální závislost materiálového zpevnění. Tuto závislost skutečného napětí na skutečné celkové deformaci můžeme zapsat jako:

$$\sigma(\epsilon) = K \epsilon^m, \quad (3.10)$$

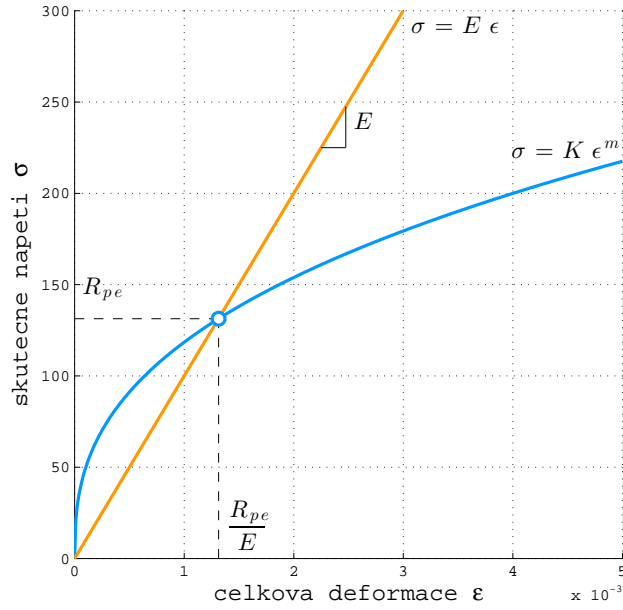
kde  $K$  a  $m$  jsou lineární a exponenciální koeficient materiálového zpevnění.

Lineární koeficient materiálového zpevnění  $K$  lze určit z průsečíku exponenciální křivky a lineární přímky s tangentou  $E$ . Tento průsečík představuje mez úměrnosti  $R_{pe}$  (viz obrázek 3.1):

$$R_{pe} = K \left( \frac{R_{pe}}{E} \right)^m \implies K = R_{pe} \left( \frac{E}{R_{pe}} \right)^m. \quad (3.11)$$

Výsledný tvar deformační křivky používaný v normativních dokumentech [3, 4], lze zapsat v následujícím tvaru:

$$\sigma(\epsilon) = \begin{cases} R_{pe} \left( \frac{E}{R_{pe}} \epsilon \right)^m & \text{pro } \sigma > R_{pe} \\ E \epsilon & \text{pro } \sigma < R_{pe}. \end{cases} \quad (3.12)$$



**Obr. 3.1:** Poloha meze úměrnosti na deformační křivce.

Dosadíme-li do rovnice (3.12) za napětí hodnotu pro smluvní mez kluzu  $\sigma = R_{p0,2}$  a za hodnotu celkové deformace  $\epsilon = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} = R_{p0,2}/E + 0,002$ , určíme hodnotu meze úměrnosti  $R_{pe}$  jako:

$$R_{p0,2} = R_{pe} \left[ \frac{E \left( \frac{R_{p0,2}}{E} + 0,002 \right)}{R_{pe}} \right]^m \quad (3.13)$$

a odtud:

$$R_{p0,2} = R_{pe}^{1-m} (0,002E + R_{p0,2})^m. \quad (3.14)$$

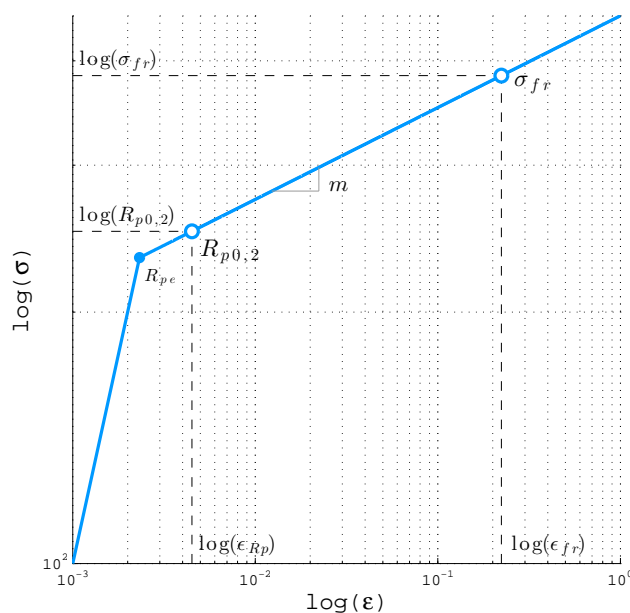
Výsledný vztah pro hodnotu meze úměrnosti má tvar:

$$R_{pe} = \left[ \frac{R_{p0,2}}{(0,002E + R_{p0,2})^m} \right]^{\frac{1}{1-m}}. \quad (3.15)$$

Hodnotu exponentu zpevnění  $m$  můžeme určit pomocí dvou bodů ležících na deformační křivce. Použijme tedy následující body: (1) smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  a (2) bod lomu  $\sigma_{fr}$ .

Koeficient  $m$  pak určíme jako směrnici spojnice těchto dvou bodů v log-log diagramu, viz obrázek 3.2:

$$m = \frac{\log(\sigma_{fr}) - \log(R_{p0,2})}{\log(\epsilon_{fr}) - \log(\epsilon_{Rp})} = \frac{\log\left(\frac{\sigma_{fr}}{R_{p0,2}}\right)}{\log\left(\frac{\epsilon_{fr}}{\epsilon_{Rp}}\right)} = \frac{\log\left(\frac{\sigma_{fr}}{R_{p0,2}}\right)}{\log\left(\frac{\epsilon_{fr}}{0,002 + \frac{R_{p0,2}}{E}}\right)}. \quad (3.16)$$



**Obr. 3.2:** Závislost napětí na deformaci v log-log souřadnicích.

Po dosazení výrazů pro  $\sigma_{fr}$  a  $\epsilon_{fr}$  dle (3.9), resp. (3.8) můžeme vztah pro výpočet koeficientu  $m$  zapsat v následujícím tvaru:

$$m = \frac{\log\left(\frac{R_m(1+0,014Z)}{R_{p0,2}}\right)}{\log\left(\frac{2,3E \log\left(\frac{100}{100-Z}\right)}{0,002E+R_{p0,2}}\right)}. \quad (3.17)$$

Při určení cyklické deformační křivky se v normě hodnota tohoto exponenciálního koeficientu materiálového zpevnění konzervativně snížila konstantou 0,73. Důvodem je uměle simulovat cyklické změkčení tvárných materiálů. Vztah pro exponent zpevnění  $m$  dostáváme ve tvaru shodném s tvarem uvedeným v normách [3, 4]:

$$m = \frac{0,73 \log\left(\frac{R_m(1+0,014Z)}{R_{p0,2}}\right)}{\log\left(\frac{2,3E \log\left(\frac{100}{100-Z}\right)}{0,002E+R_{p0,2}}\right)}. \quad (3.18)$$

### 3.3 Fiktivní napětí

Výpočet jednotlivých tlakově-teplotních provozních režimů (např.: náhrev, změna výkonu, odstavení do horkého stavu, apod.) je výpočtově náročná činnost. Počítání těchto úloh v pružně-plastickém stavu by bylo enormně pracné. Pružně-plastický

výpočet pro celou dobu provozu, která řádově představuje tisíce člennou posloupnost desítek typů provozních režimů, je prakticky vyloučen.

Jako vhodný postup se jeví provedení pouze elastických výpočtů jednotlivých provozních režimů a jejich následné sloučení v celkovou provozní historii. V lineární oblasti navíc platí princip superpozice, kdy je možné řešit zatížení tlakem a teplotou odděleně. Takto definované úlohy jsou lehce aplikovatelné, ovšem výstupem deformačně-napěťových analýz jsou čistě lineární napětí  $\sigma_H$  a deformace  $\epsilon_H$  (platnost Hookova zákona).

Pro jednoosý stav napjatosti platí:

$$\sigma_H = E \epsilon_H. \quad (3.19)$$

Hodnoty lineárního napětí  $\sigma_H$  a deformace  $\epsilon_H$  nám přirozeně neudávají informaci o napjatosti v pružně-plastickém stavu v případech kdy  $\sigma_H > R_{pe}$ . Ty nastávají především ve vrubech konstrukce. Je tedy nutný přepočítání lineárních napětí na ekvivalentní napětí v pružně-plastickém stavu. Ten lze provést na základě energetické ekvivalence. Je možno použít dva základní přístupy. Jeden je založený na Neuberově metodě [10], druhý na metodě ekvivalentní energie [11].

Fiktivní napětí  $\sigma_F$  je uměle vytvořený pojem<sup>3</sup>. Je definován pro účely hodnocení únavy dle křivek životnosti ve formě závislosti amplitudy deformace na počtu cyklů  $\epsilon_a(N)$ . Fiktivní napětí je lineárním násobkem celkové skutečné deformace v pružně-plastickém stavu  $\epsilon_t$ ; lze jej pro jednoosý stav napjatosti vyjádřit jako:

$$\sigma_F = E \epsilon_t. \quad (3.20)$$

Má tedy rozměr v Pascalech. Pro lineární oblast dle (3.12), resp. pro hodnoty lineárního napětí pod mezí úměrnosti  $\sigma_H < R_{pe}$ , platí  $\sigma_F = \sigma_H$ .

### 3.3.1 Neuberovo pravidlo

Postup určení ekvivalentního pružně-plastického napětí  $\sigma_t$  a deformace  $\epsilon_t$  pro konkrétní lineární jednoosé napětí  $\sigma_H > R_{pe}$  je znázorněn na obrázku 3.3.

Neuberovo pravidlo vychází z následujícího předpokladu:

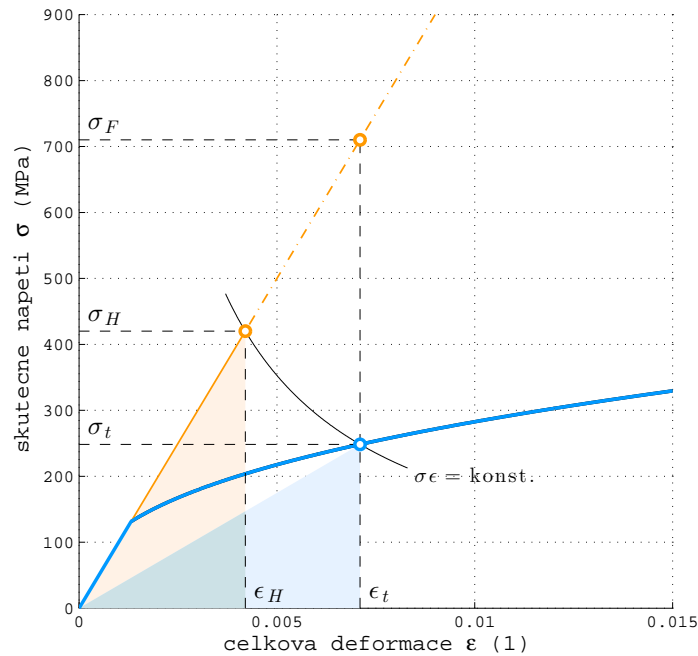
$$\sigma_H \epsilon_H = \sigma_t \epsilon_t. \quad (3.21)$$

Geometricky si lze rovnici (3.21) představit jako shodné velikosti obsahů trojúhelníků vyobrazených na obrázku 3.3. Levý trojúhelník představuje deformační energii čistě lineárního zatížení. Pravý nemá přímý fyzikální význam, nicméně si jej představme jako přibližnou deformační energii pro pružně-plastický stav.

---

<sup>3</sup>Fiktivní napětí není napětím, jako slaměný vdovec není vdovcem

pozn.: Velikost plochy mezi odvěsnou pravého trojúhelníku a napětově-deformační křivkou nám vyjadřuje odchytku od skutečné deformační energie při daném pružně-plastickém zatížení.



**Obr. 3.3:** Neuberův princip.

Dosadíme-li do rovnice (3.21) vztah pro deformační křivku dle rovnic (3.12), dostaneme:

$$\sigma_H \epsilon_H = R_{pe} \left( \frac{E \epsilon_t}{R_{pe}} \right)^m \epsilon_t. \quad (3.22)$$

Pokud dále použijeme vztahy (3.19) a (3.20), můžeme rovnici rozepsat jako:

$$\frac{\sigma_H^2}{E} = R_{pe} \left( \frac{\sigma_F}{R_{pe}} \right)^m \epsilon_t,$$

$$\sigma_H^2 = R_{pe} \left( \frac{\sigma_F}{R_{pe}} \right)^m \sigma_F,$$

resp.:

$$\sigma_H^2 = R_{pe}^2 \left( \frac{\sigma_F}{R_{pe}} \right)^{m+1}, \quad (3.23)$$

a odtud můžeme vyjádřit výsledný vztah pro fiktivní napětí:

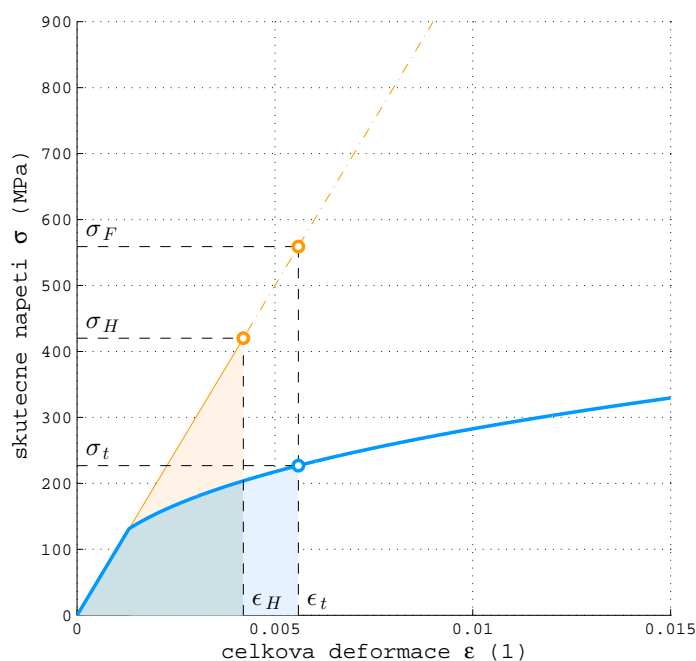
$$\sigma_F = R_{pe} \left( \frac{\sigma_H}{R_{pe}} \right)^{\frac{2}{m+1}}. \quad (3.24)$$

Celkovou deformaci pružně plastického stavu  $\epsilon_t$  můžeme při znalosti fiktivního napětí  $\sigma_F$  vyjádřit ze vztahu (3.20) a skutečné napětí  $\sigma_t$  dosazením hodnoty celkové deformace pružně plastického stavu  $\epsilon_t$  do rovnice (3.12).

### 3.3.2 Metoda ekvivalentní energie

V této metodě jde o nalezení takového plastického napětí a plastické deformace, při které platí rovnost deformační energie lineárního zatížení a deformační energie při zatížení v pružně-plastickém stavu. Pro jednoosou napjatost (viz obrázek 3.4) lze tuto bilanci zapsat takto:

$$\frac{1}{2}\sigma_H \epsilon_H = \int_0^{\epsilon_t} \sigma(\epsilon) d\epsilon. \quad (3.25)$$



**Obr. 3.4:** Metoda ekvivalentní energie.

Pokud do vztahu (3.25) dosadíme vztah pro napětově-deformační křivku dle (3.12), pak dostaneme:

$$\frac{1}{2}\sigma_H \epsilon_H = \frac{1}{2}R_{pe} \frac{R_{pe}}{E} + \int_{\frac{R_{pe}}{E}}^{\epsilon_t} R_{pe} \left( \frac{E \epsilon}{R_{pe}} \right)^m d\epsilon. \quad (3.26)$$

Pokud dále použijeme vztah (3.19), můžeme rovnici (3.26) dále rozepsat:

$$\frac{1}{2E}\sigma_H^2 = \frac{1}{2E}R_{pe}^2 + \frac{E^m}{R_{pe}^{m-1}} \int_{\frac{R_{pe}}{E}}^{\epsilon_t} \epsilon^m d\epsilon,$$

$$\frac{1}{2}\sigma_H^2 - \frac{1}{2}R_{pe}^2 = \frac{E^{m+1}}{R_{pe}^{m-1}} \cdot \frac{\epsilon_t^{m+1} - \left(\frac{R_{pe}}{E}\right)^{m+1}}{m+1}. \quad (3.27)$$

Uvážíme-li dle vztahu (3.20), že  $\sigma_F = E \epsilon_t$ , pak můžeme dále psát:

$$\begin{aligned} \sigma_F^{m+1} - R_{pe}^{m+1} &= (m+1)R_{pe}^{m-1} \left( \frac{1}{2}\sigma_H^2 - \frac{1}{2}R_{pe}^2 \right), \\ \sigma_F &= R_{pe}^{\frac{m-1}{m+1}} \left( \frac{1+m}{2}\sigma_H^2 - \frac{1+m}{2}R_{pe}^2 + R_{pe}^2 \right)^{\frac{1}{m+1}}, \end{aligned} \quad (3.28)$$

a odtud můžeme vyjádřit výsledný vztah pro fiktivní napětí:

$$\sigma_F = R_{pe}^{\frac{m-1}{m+1}} \left( \frac{1+m}{2}\sigma_H^2 + \frac{1-m}{2}R_{pe}^2 \right)^{\frac{1}{m+1}}. \quad (3.29)$$

Celkovou deformaci  $\epsilon_t$  lze při znalosti fiktivního napětí vyjádřit ze vztahu (3.20) a skutečné napětí  $\sigma_t$  po dosazení hodnoty celkové deformace  $\epsilon_t$  do rovnice (3.12).

Jelikož tuto metodu ve své práci [11] definoval Glinka, hovoříme proto dále v textu o metodě Glinka či Glinkově principu.

### 3.3.3 Postup určení fiktivních napětí pro časový průběh lineárního napětí

Dříve definovaná pravidla se užívají pro stanovení pružně-plastického napětově deformačního stavu pro konkrétní lineárně-elastický napětově deformační stav. Pokud je znám časový průběh hodnoty lineárního napětí  $\sigma_H(t)$ , musíme se vypořádat s proměnnou polohou plochy plasticity v průběhu zatěžování. Dle norem [3, 4] se totiž využívá kinematického zpevnění materiálu [12].

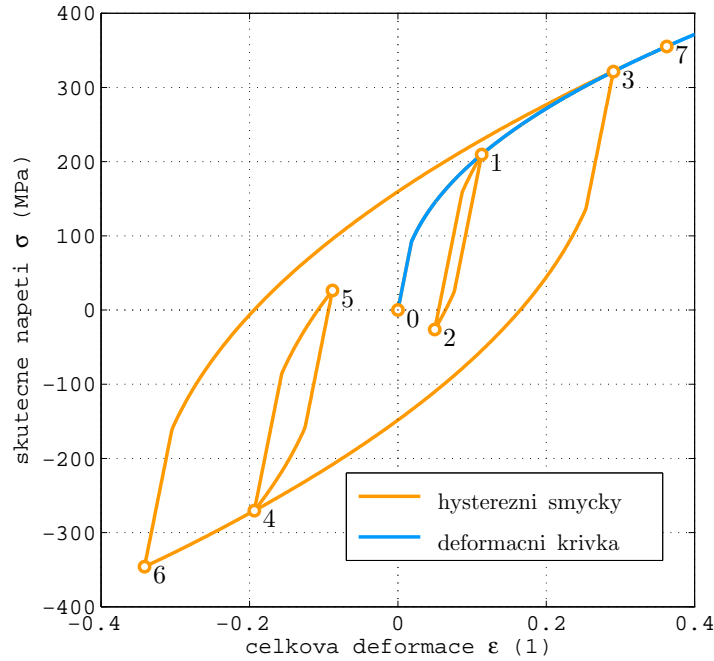
Vývoj hodnoty lineárního napětí v diskrétní podobě má následující tvar:

$$\{\sigma_H(t)\} = \{\sigma_H(0), \sigma_H(1), \dots, \sigma_H(l-1), \sigma_H(l), \sigma_H(l+1), \dots, \sigma_H(n-1), \sigma_H(n)\}, \quad (3.30)$$

kdy časové okamžiky v dané posloupnosti se mění v rozmezí  $t = 1, 2, \dots, n$ . Časový okamžik  $t = l$  představuje aktuální čas, ve kterém chceme určit hodnoty pružně-plastického napětově deformačního stavu charakterizovaného hodnotou napětí  $\sigma_t(l)$  a deformace  $\epsilon_t(l)$ . Lze využít první a druhé paměti materiálu:

**Paměť 1:** Po uzavření hysterezní smyčky, která začala na cyklické deformační křivce, se napětově-deformační cesta opět vrátí na cyklickou deformační křivku (na obrázku 3.5, cesta 1-2-1 a 3-6-3).





Obr. 3.5: Hysterezní smyčky a cyklická deformační křivka.

**Paměť 2:** Po uzavření hysterezní smyčky, která začala na hysterezní větvi, se napětově-deformační dráha opět vrátí na předchozí hysterezní větev (na obrázku 3.5, cesta 4-5-4).

Postup výpočtu celkové deformace, resp. určení hodnoty fiktivního napětí, lze na základě dvou kritérií rozdělit do třech hlavních stavů, viz obrázek 3.6. Tyto stavy jsou popsány v níže uvedených podkapitolách.

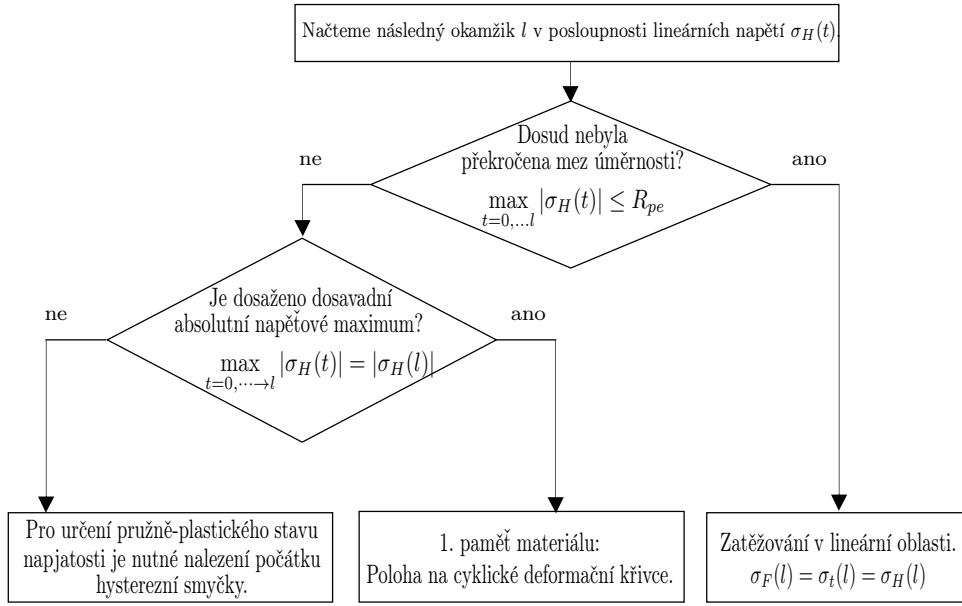
### 3.3.3.1 Lineární oblast

Pokud aktuální zatížení probíhá v lineární oblasti, tedy pokud v dosavadní posloupnosti (do časového okamžiku  $t = l$ ) absolutní hodnota lineárního napětí nepřekročila hodnotu na mezi úměrnosti  $R_{pe}$ , tedy

$$\max_{t=0,\dots,l} [|\sigma_H(t)|] \leq R_{pe},$$

můžeme hodnotu fiktivního napětí, stejně jako hodnotu skutečného napětí pro okamžik  $l$ , stanovit jako:

$$\sigma_F(l) = \sigma_t(l) = \sigma_H(l). \quad (3.31)$$



**Obr. 3.6:** Schéma postupu pro způsob určení pružně-plastického napětí.

### 3.3.3.2 Poloha na cyklické deformační křivce

Dosahuje-li absolutní hodnota lineárního napětí  $|\sigma_H(l)|$  v okamžiku  $t = l$  globálního maxima dosavadního průběhu:

$$\max_{t=0..l} [\sigma_H(t)] = \sigma_H(l),$$

a byla-li v dosavadním průběhu překročena hodnota meze úměrnosti

$$\max_{t=0..l} [\sigma_H(t)] > R_{pe},$$

použijí se pro stanovení hodnoty fiktivního napětí v okamžiku  $t = l$  vztahy (3.24), resp. (3.29).

Při použití metody Neubergera lze fiktivní napětí stanovit jako:

$$\sigma_F(l) = \text{sign} [\sigma_H(l)] R_{pe} \left[ \frac{|\sigma_H(l)|}{R_{pe}} \right]^{\frac{2}{m+1}}. \quad (3.32)$$

Při použití metody ekvivalentní energie pak:

$$\sigma_F(l) = \text{sign} [\sigma_H(l)] R_{pe}^{\frac{m-1}{m+1}} \left[ \frac{1+m}{2} \sigma_H(l)^2 + \frac{1-m}{2} R_{pe}^2 \right]^{\frac{1}{m+1}}. \quad (3.33)$$

Pro určení celkové deformace lze dle vztahu (3.20) přímo psát  $\epsilon_t(l) = \sigma_F(l)/E$ . Pro určení hodnoty skutečného napětí můžeme dosadit celkovou deformaci  $\epsilon_t$  do

vztahu (3.12), pak dostáváme vztah:

$$\sigma_t(l) = \text{sign} [\sigma_H(l)] R_{pe} \left[ \frac{|\sigma_F(l)|}{R_{pe}} \right]^m. \quad (3.34)$$

### 3.3.3.3 Hledání počátku hysterezní větve

V případě že se nejedná o dosavadní maximum a zároveň byla-li v předešlé posloupnosti překročena hodnota meze úměrnosti

$$|\sigma_H(t)| > R_{pe}, \text{ pro } t = 0, 1, 2 \dots l,$$

uplatňuje se druhá paměť materiálu. Pro určení skutečného napětí  $\sigma$ , resp. deformace  $\epsilon$  pro aktuální okamžik  $t = l$ , je nejprve nutné určení počátku aktuální hysterezní větve. Počátek hysterezní větve označme jako okamžik  $t = h$ . Tento okamžik můžeme v předešlé historii zatížení  $\sigma_H(t)$  nalézt použitím metody „bazénů“ [13].

Pro oblast, kdy má lineární napětí  $\sigma_H(t)$  stoupající charakter, je postup demonstrován na třech příkladech na obrázku 3.7. Lze identifikovat následující okamžiky:

okamžik  $t = l$  je aktuální poloha na časové posloupnosti a rovněž pozice odkud do diagramu „přitéká voda“,

okamžik  $t = h$  je poloha počátku aktuální hysterezní větve, reprezentuje nejnižší bod na „zatopeném údolí“, tedy splňuje podmínku  $\sigma_H(h) = \min_{t=s..l} [\sigma_H(t)]$ ,

okamžik  $t = s$  reprezentuje protější „břeh zatopeného údolí“, kde přirozeně  $\sigma_H(s) = \sigma_H(l)$ . Jedná se o levý hraniční prvek intervalu  $(s; l)$ , pro který platí následující „zátopová“ podmínka  $\sigma_H(t) < \sigma_H(l)$ .

Pokud se aktuální čas  $t = l$  nalézá v oblasti, kdy má  $\sigma_H(t)$  klesající charakter, je nutné „obrátit gravitaci“ a plnit „vodou“ oblast pod křivkou, viz obrázek 3.8.

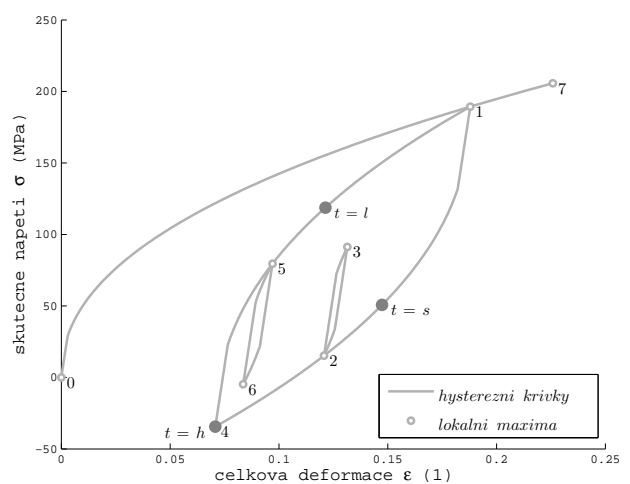
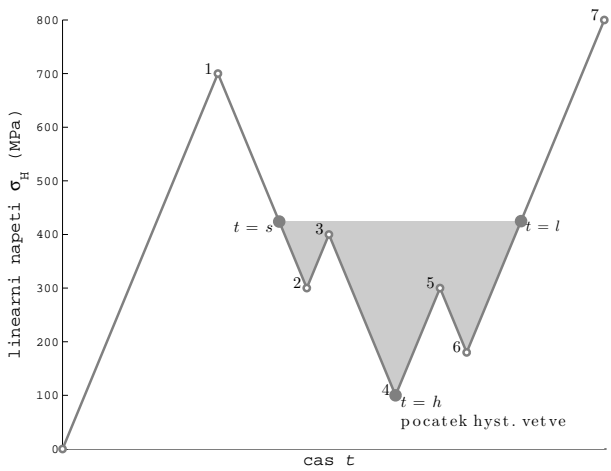
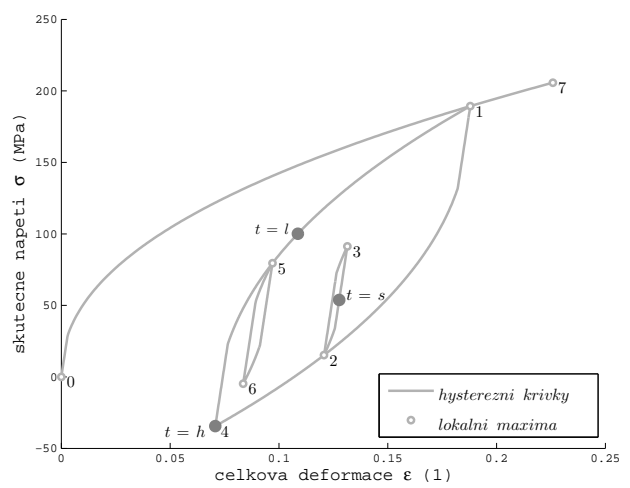
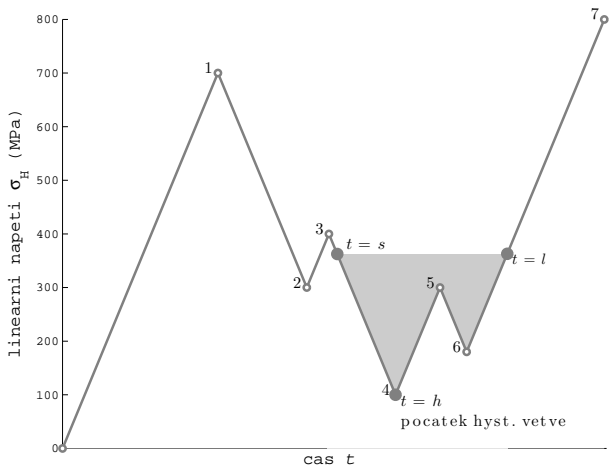
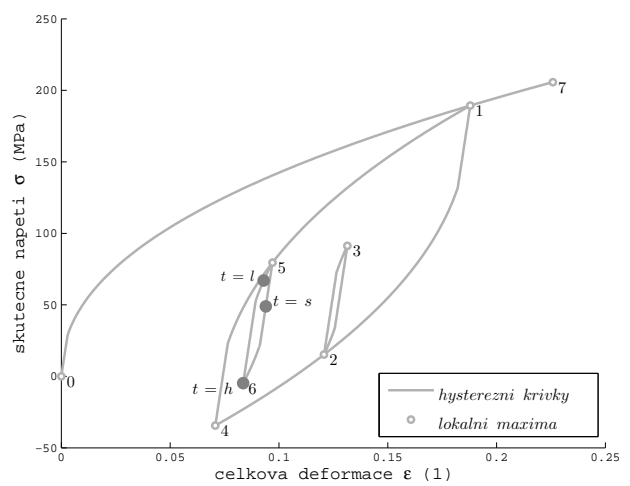
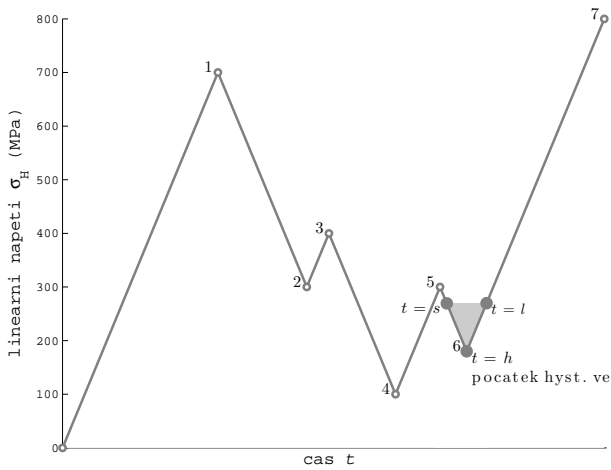
Obecně lze podmínku pro určení intervalu  $(s; l)$  pro diskrétní posloupnost hodnot lineárních napětí (3.30) vyjádřit jako [4]:

$$\beta [\sigma_H(t)] \leq \beta [\sigma_H(l)], \quad (3.35)$$

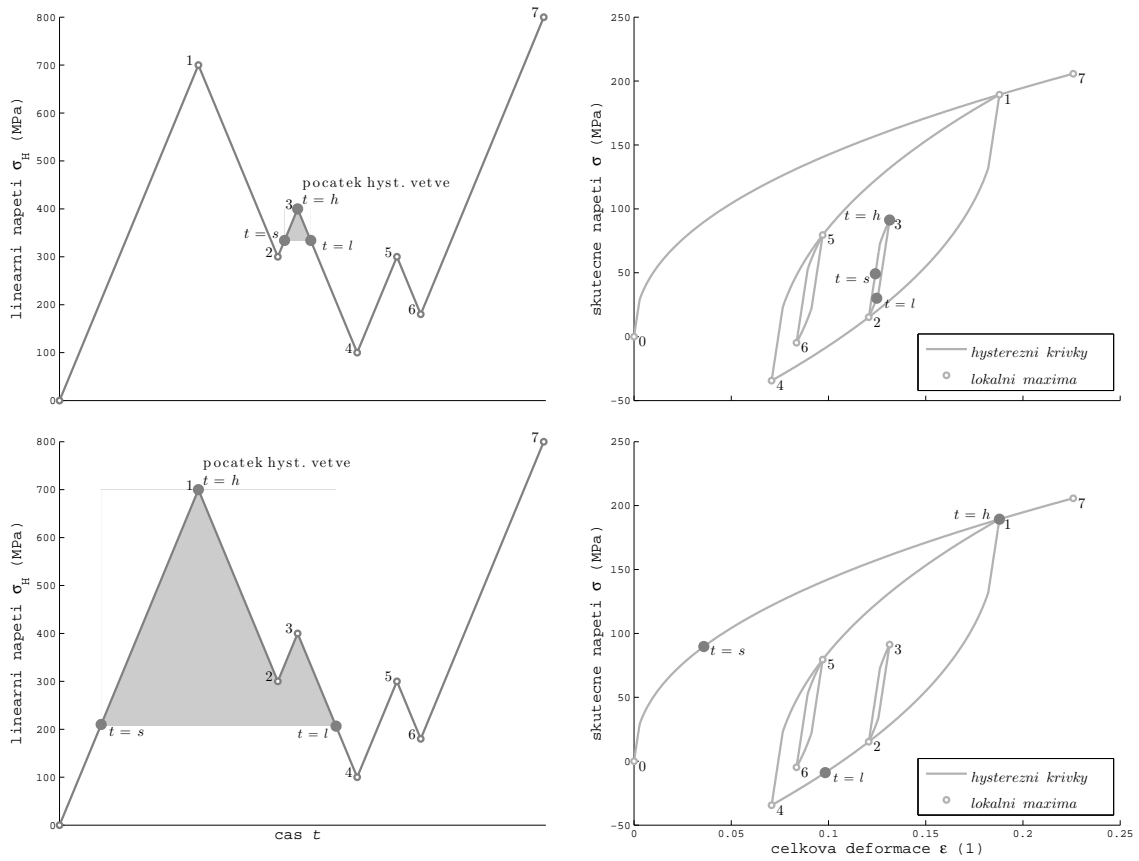
kde

$$\beta = \begin{cases} -1 & \text{pro } \sigma_H(l) - \sigma_H(l-1) \leq 0, \\ 1 & \text{pro } \sigma_H(l) - \sigma_H(l-1) > 0. \end{cases}$$

Pozn.:  $\beta = -1$  v případech kdy má  $\sigma_H(t)$  klesající charakter. Pokud má  $\sigma_H(t)$  stoupající charakter pak  $\beta = 1$ .



**Obr. 3.7:** Určení počátku hysterezní větve - okamžiku  $t = h$ , pro aktuální polohu na větvi  $t = l$ . Počátek větve leží uvnitř intervalu  $t \in (s, l)$  a představuje minimální hodnotu  $\sigma_H(t)$ . Bod  $l$  představuje jeden „břeh zatopeného údolí“, „břeh protějščí“ reprezentuje bod  $s$ .



**Obr. 3.8:** Určení počátku hysterezní větve pro aktuální polohu  $t = l$  na klesající části průběhu lineárního napětí  $\sigma_H(t)$ .

Hodnoty pružně-plastické deformace a napětí v čase  $l$  udávají bod ležící na Masingově křivce [14], která má svůj počátek v bodě (napětově-deformačního diagramu) v čase  $h$ . Proto skutečnou deformaci, tedy jí úměrnou hodnotu v podobě fiktivního napětí, lze určit pomocí následujících vztahů:

1. pro případ kdy  $|\sigma_H(l) - \sigma_H(h)| > 2R_{pe}$ ,

(a) při použití pravidla dle Neubergera:

$$\sigma_F(l) = \text{sign} [\sigma_H(l) - \sigma_H(h)] 2R_{pe} \left[ \frac{|\sigma_H(l) - \sigma_H(h)|}{2R_{pe}} \right]^{\frac{2}{1+m}} + \sigma_F(h), \quad (3.36)$$

(b) nebo při užití metody ekvivalentní energie:

$$\begin{aligned} \sigma_F(l) = & \text{sign} [\sigma_H(l) - \sigma_H(h)] (2R_{pe})^{\frac{m-1}{m+1}} \cdot \\ & \cdot \left[ \frac{1+m}{2} [\sigma_H(l) - \sigma_H(h)]^2 + \frac{1-m}{2} (2R_{pe})^2 \right]^{\frac{1}{1+m}} + \sigma_F(h). \end{aligned} \quad (3.37)$$

Hodnotu skutečného napětí  $\sigma_t$  lze pro čas  $t = l$  určit jako:

$$\sigma_t(l) = \text{sign} [\sigma_H(l) - \sigma_H(h)] 2R_{pe} \left[ \frac{|\sigma_F(l) - \sigma_F(h)|}{2R_{pe}} \right]^m + \sigma_F(h) \quad (3.38)$$

2. V případech kdy  $|\sigma_H(l) - \sigma_H(h)| \leq 2R_{pe}$  fiktivní napětí určíme jako:

$$\sigma_F(l) = [\sigma_H(l) - \sigma_H(h)] + \sigma_F(h) \quad (3.39)$$

a analogicky i skutečné napětí:

$$\sigma_t(l) = [\sigma_H(l) - \sigma_H(h)] + \sigma(h). \quad (3.40)$$

## 3.4 Dekompozice posloupnosti fiktivního napětí na jednotlivé cykly

Česká norma [4] používá pro dekompozici posloupnosti fiktivních napětí na jednotlivé cykly metodu stékání deště, viz kapitola 3.4.1. Americká [2] a ruská norma [3] jsou při dekompozici průběhu napětí na cykly poněkud přísnější a předepisují metodu maximálních rozkmitů, viz kapitolu 3.4.2. Nicméně odchýlení se od předpisů a použití metody stékání deště při hodnocení dle norem [2, 3] je obecně běžná praxe, kterou dozorné orgány pro jadernou bezpečnost ve většině zemí akceptují.

### 3.4.1 Metoda stékání deště (Rainflow)

Metoda stékání deště byla původně navržena autory M.Matsuiski a T.Endo pro získání dekomponovaných cyklů a polocyklů z časového průběhu skutečné deformace [15]. Dekompozice se provádí na bázi napětově-deformačního chování materiálu (viz obrázek 3.5), kdy jsou jednotlivé cykly a polocykly zřejmé. Nicméně určit toto chování jen na základě znalosti časového průběhu deformace vyžaduje specifický postup. Pro detailní popis metody viz např. [16]. Níže je věnován prostor pouze popisu užitého algoritmu.

Metoda stékání deště se aplikuje na posloupnost lokálních extrémů celkové skutečné deformace, resp. v našem případě můžeme metodu aplikovat na posloupnost lokálních extrémů fiktivního napětí.

Algoritmus Metody stékání deště pro potřebu jeho zabudování do vytvořené počítačové aplikace byl konstruován na základě přístupu popsáném v [15]. Vychází se ze znalosti časového průběhu fiktivního napětí  $\sigma_F(t)$ , které je úměrné celkové skutečné deformaci, neboť  $\epsilon = \frac{\sigma_F}{E}$ . Předpokladem je prvotní zpracování celého časového průběhu fiktivního napětí a separace posloupnosti pouze lokálních extrémů  $\sigma_{Fe}(t)$ . Neextremální (mezilehlé) body se z posloupnosti  $\sigma_{Fe}(t)$  vynechají. Dekompozice tohoto průběhu na jednotlivé cykly a polocykly se dle [17] řídí následujícím předpisem úkonů:

Nechť  $t = l$  je aktuální čas na posloupnosti lokálních extrémů fiktivního napětí;  $X$  a  $Y$  jsou aktuální a minulý rozkmit napětí (vztaženo k časovému okamžiku  $l$ ), tedy  $X = |\sigma_{Fe}(l) - \sigma_{Fe}(l-1)|$  a  $Y = |\sigma_{Fe}(l-1) - \sigma_{Fe}(l-2)|$ ; a okamžik  $t = S$  je počáteční bod historie.

- (1) Načti další vrchol, či údolí aktuální posloupnosti. Jestliže již není další bod (tedy  $l \equiv n$ ), jdi na Krok (6).
- (2) Jestliže má posloupnost k okamžiku  $l$  méně než tři hodnoty, jdi na Krok (1). Vypočti hodnoty rozkmitů  $X$  a  $Y$  pro aktuální polohu na aktuální posloupnosti.
- (3) Srovnej absolutní hodnoty rozkmitů  $X$  a  $Y$ .
  - (a) Jestliže  $X < Y$ , jdi na Krok (1).
  - (b) Jestliže  $X \geq Y$ , jdi na Krok (4).
- (4) Jestliže se rozkmit  $Y$  počítal vůči časovému kroku  $S$  (tedy  $l-2 = S$ ), jdi na Krok (5); jinak zaznamenej rozkmit  $Y$  jako jeden cyklus; odeber hodnoty  $\sigma_{Fe}(l-2)$  a  $\sigma_{Fe}(l-1)$  z časové posloupnosti a jdi na Krok (2).
- (5) Zaznamenej rozkmit  $Y$  jako polocyklus; vyřaď hodnotu  $\sigma_{Fe}(l-2)$  z časové posloupnosti; přesuň počáteční okamžik na čas  $S = (l-1)$  a jdi na Krok (2).
- (6) Zaznamenej veškeré zbylé po sobě jdoucí rozkmit v aktuální posloupnosti jako polocykly.

Všechny zaznamenané rozkmit  $Y$  jsou dány dvojicí hodnot fiktivního napětí  $\sigma_F(1)$  a  $\sigma_F(2)$ . Pro každou dvojici lze definovat minimální hodnotu cyklu jako:

$$\sigma_{F_{\min}} = \min [\sigma_F(1), \sigma_F(2)],$$

maximální hodnotu cyklu

$$\sigma_{F_{\max}} = \max [\sigma_F(1), \sigma_F(2)]$$

a amplitudu cyklu:

$$\sigma_{aF} = \frac{\sigma_{F_{\max}} - \sigma_{F_{\min}}}{2}. \quad (3.41)$$

Střední hodnotu cyklu lze stanovit jako:

$$\sigma_{mF} = \frac{\sigma_{F_{\min}} + \sigma_{F_{\max}}}{2}. \quad (3.42)$$

### 3.4.2 Metoda maximálních rozkmitů

V normě ASME [2] a ruské normě [3] je předepsáno použít jednodušší postup pro dekompozici historie zatížení na jednotlivé cykly zatížení. Obě normy<sup>4</sup> vyžadují použít metodu maximálních rozkmitů. Metoda maximálních rozkmitů obecně vede k nadhodnocení výsledku oproti použití fyzice bližší metody stékání deště (popsané v předchozí kapitole). Filozofie této metody je nalézt maximální možné rozkmit v historii posloupnosti napětí (resp. deformace) a označit je jako vrcholy hysterézních smyček, byť tento rozkmit nemusí tvořit reálný cyklus. Časová posloupnost hodnot napětí (resp. deformace) v tomto způsobu dekompozice, narozdíl od Metody stékání deště, nehraje žádnou roli. Máme-li časovou posloupnost lokálních extrémů fiktivního napětí  $\sigma_{Fe}(t)$ , můžeme maximální hodnotu prvního cyklu definovat jako absolutní maximum této posloupnosti:

$$\sigma_{F_{\max}} = \max_t [\sigma_{Fe}(t)] \quad (3.43)$$

a minimální hodnotu prvního cyklu jako absolutní minimum posloupnosti:

$$\sigma_{F_{\min}} = \min_t [\sigma_{Fe}(t)]. \quad (3.44)$$

Hodnotu amplitudy fiktivního napětí pro tento cyklus lze pak dopočítat dle vztahu (3.41) a hodnotu středního napětí na cyklu dle vztahu (3.42). Další cyklus pak nalezneme stejným postupem, ovšem nejprve je nutné odstranit z posloupnosti absolutní maximum a minimum, které nám definovalo cyklus první. Jinými slovy druhý cyklus je tvořen druhým největším, resp. nejmenším extrémem posloupnosti. Celý proces lze takto opakovat až do doby, kdy na posloupnosti zbývají méně než 2 hodnoty. Všechny takto definované cykly jsou následně chápány jako plné cykly, nikoliv polocykly.

Z hlediska počítačového naprogramování je tato metoda velmi jednoduchá, neboť stačí

---

<sup>4</sup>V normě ASME [2] není tento požadavek přímo explicitně zmíněn, nicméně tento postup jasně vyplývá z (v normě uvedených) příkladů výpočtu.



- (1) seřadit hodnoty na posloupnosti  $\sigma_{Fe}(t)$  podle jejich velikosti.
- (2) V případě že je celkový počet hodnot na posloupnosti lichý, pak se hodnota ‘uprostřed’ vektoru vynechá.
- (3) Celý vektor se rozdělí ‘uprostřed’ na dva stejně dlouhé vektory.
- (4) Druhý vektor se ‘převrátí’.

Maxima jednotlivých cyklů jsou nyní členy prvního vektoru a minima na cyklech jsou členy vektoru druhého. Cyklus je zde charakterizován vzájemně si odpovídajícími pozicemi na obou vektorech.

### 3.5 Koeficient asymetrie cyklu napětí

Pro snížení únavové odolnosti vlivem vyšší hodnoty středního napětí  $\sigma_m$  na cyklu (tahového charakteru cyklu) můžeme definovat koeficient asymetrie cyklu. Ten aplikujeme na změnu elastické části křivky.

Každé hodnotě maximálního, resp. minimálního fiktivního napětí na cyklu ( $\sigma_{F_{\max}}$  a  $\sigma_{F_{\min}}$ ), nalezené dle postupu uvedeném v předchozí kapitole 3.4, odpovídá maximální, resp. minimální hodnota skutečného napětí  $\sigma_{\max}$  a  $\sigma_{\min}$ . Koeficient asymetrie cyklu lze pak definovat jako:

$$r_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}. \quad (3.45)$$

Koeficient asymetrie deformace lze určit přímo z fiktivních napětí:

$$r_\epsilon = \frac{\sigma_{F_{\min}}}{\sigma_{F_{\max}}} = \frac{\epsilon_{\min}}{\epsilon_{\max}}. \quad (3.46)$$

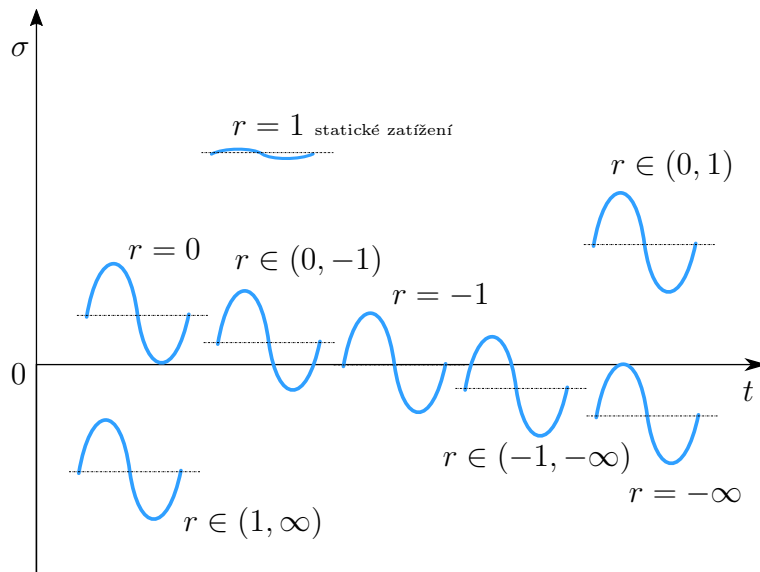
Koeficient asymetrie deformace se dále v křivkách životnosti, dle [4, 3], neuplatňuje.

Pokud chceme koeficient asymetrie cyklu napětí  $r_\sigma$  přibližně určit z hodnot fiktivního napětí (tedy z hodnot celkové deformace, kterým jsou hodnoty fiktivních napětí úměrné), lze využít následujících vztahů:

$$\begin{aligned} r_\sigma &= \frac{\sigma_{F_{\min}}}{\sigma_{F_{\max}}} && \text{pro } \sigma_{F_{\max}} < R_{p0,2} \text{ a } \sigma_{aF} < R_{p0,2}, \\ r_\sigma &= \frac{R_{p0,2} - 2\sigma_{aF}}{R_{p0,2}} && \text{pro } \sigma_{F_{\max}} > R_{p0,2} \text{ a } \sigma_{aF} < R_{p0,2}, \\ r_\sigma &= -1 && \text{pro } \sigma_{aF} > R_{p0,2}. \end{aligned} \quad (3.47)$$

Při uvážení rozdílných teplot na cyklu je postup lehce náročnější, detailněji viz [4] nebo [3].

Pokud je hodnota koeficientu asymetrie napětí pro daný cyklus menší než jedna, pak se cyklus konzervativně předpokládá jako souměrně střídavý. Tedy „zvýšení“



**Obr. 3.9:** Hodnoty koeficientu asymetrie pro různé typy cyklického zatěžování.

únavové křivky v důsledku tlakového charakteru zatížení se neuvažuje. Proto, je-li koeficient asymetrie cyklu napětí  $r_\sigma < -1$  (tlakově střídavý cyklus), nebo  $r > 1$  (napětí alternující v tlaku), pak se pro hodnocení uvažuje  $r = -1$  (symetricky střídavý cyklus).

Poměr střední hodnoty napětí a amplitudy napětí  $\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right)$  lze vyjádřit pomocí koeficientu asymetrie jako:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_a} = \frac{\frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}}{\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}} = \frac{\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\max}} + \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}}{\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\max}} - \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}} = \frac{1 + r}{1 - r} \quad (3.48)$$

Závislost hodnoty koeficientu asymetrie napětí na charakteru zatěžování je patrná z obrázku 3.9

Při výpočtu podle ASME [2] není třeba další korekce respektující vliv středního napětí cyklu. Tato okolnost je již zahrnuta v konstrukčních únavových křivkách, kde dovolené amplitudy fiktivního napětí jsou mírně sníženy v oblasti vyšších počtů cyklů.

Proto při hodnocení dle požadavků americké normy [2] není potřeba zvláštním způsobem stanovit hodnotu koeficientu asymetrie či střední hodnotu napětí na cyklu, ty se při výpočtu únavy neuplatňují. Naopak při hodnocení dle [3, 4] se hodnota koeficientu asymetrie uplatňuje.

## 3.6 Křivky únavové životnosti

Pro hodnocení životnosti se dle [4, 3] využívá křivek životnosti<sup>5</sup> deformace. Závislost amplitudy deformace na dovoleném počtu cyklů, resp. závislost dovolené amplitudy na počtu cyklů, lze zapsat ve tvaru:

$$\frac{\Delta\epsilon(N)}{2} = \epsilon_a(N) = \epsilon_{a_{pl}}(N) + \epsilon_{a_{el}}(N), \quad (3.49)$$

kde  $\Delta\epsilon$  označuje rozkmit deformace (určený např. dle kap. 3.4.1),  $N$  je počet cyklů do iniciace defektu,  $\epsilon_a$  je amplituda deformace,  $\epsilon_{a_{el}}$  je amplituda elastické složky celkové deformace a  $\epsilon_{a_{pl}}$  je amplituda plastické deformace. Křivku životnosti lze tedy rozdělit na dvě složky:

1. elastickou (vysokocyklovou) část  $\epsilon_{a_{el}}(N)$  pro oblast malých amplitud plastické deformace, avšak výrazných amplitud napětí
2. a plastickou (nizkokykovou) část  $\epsilon_{a_{pl}}(N)$  s výraznými amplitudami celkové deformace (vlivem příspěvku plastických deformací) a nízkými přírůstky pro amplitudu napětí.

Pro plastický člen rovnice (3.49) lze užít Manson-Coffinova vztahu [18, 19]:

$$\epsilon_{a_{pl}}(N) = \epsilon_c N^{-m_p}, \quad (3.50)$$

kde  $-m_p$  je exponent plasticity a  $\epsilon_c$  je koeficient plasticity.

Pokud uvažujeme monotónní zatěžování jako čtvrt cyklus, lze pro  $N = \frac{1}{4}$  vyjádřit koeficient plasticity jako:

$$\epsilon_c = \frac{1}{2} \left\{ \epsilon_{fr} - \max_t [\epsilon_{pl}(t)] \right\}, \quad (3.51)$$

kde  $\epsilon_{fr}$  je deformace lomu vzorku při tahové zkoušce, kterou můžeme stanovit pomocí vztahu (3.8) a  $\max_t [\epsilon_{pl}(t)]$  je maximální dosažená plastická deformace v průběhu zatěžování. Plastickou deformaci od lomového napětí odčítáme, abychom určili zbytkovou deformaci do lomu. Takto v únavové křivce zohledníme kvazistatické trhání, které nastává při vysoké amplitudě plastické deformace pro velmi nízké počty cyklů. Zbytková plastická deformace se při určení koeficientu plasticity  $\epsilon_c$  dělí dvěma. To odpovídá přístupu S. Mansona, resp. D. Martina uvedenému např. v [16], kdy pro  $N = 1/2$ :  $\Delta\epsilon = \epsilon_{fr} \Rightarrow \epsilon_{a_p} = 0,5 \epsilon_{fr} = \epsilon_c$ .

---

<sup>5</sup>Křivkami životnosti, resp. křivkami únavové životnosti v textu této práce rozumějme závislost amplitudy deformace  $\epsilon_a$  (resp. fiktivního napětí  $\sigma_{aF}$ ) na dovoleném počtu cyklů do iniciace defektu  $N = N_0$ , nikoliv do lomu  $N \neq N_f$ .

Výsledný tvar vztahu pro hodnotu koeficient plasticity, použitý v [3, 4], je následující:

$$\epsilon_c = \begin{cases} 1,15 \log\left(\frac{100}{100-Z}\right) - \frac{(\sigma_F)_{\max} - R_{p0,2}}{E} & \text{pro } (\sigma_F)_{\max} > R_{p0,2}, \\ 1,15 \log\left(\frac{100}{100-Z}\right) & \text{pro } (\sigma_F)_{\max} \leq R_{p0,2}, \end{cases} \quad (3.52)$$

přičemž za kontrakci  $Z$  se dle [4, 3] do uvedeného vztahu dosadí maximálně hodnota  $Z = 50$  %. Původní vztah (3.50) pro takto definovaný koeficient plasticity (s ohledem na  $N = 1/4$ ) můžeme přepsat do tvaru:

$$\epsilon_{a_{pl}}(N) = \frac{\epsilon_c}{(4N)^{m_p}}. \quad (3.53)$$

Hodnota exponentu  $m_p$  je dle [3, 4]:

$$m_p = \begin{cases} 0,5 & \text{pro } R_m \leq 700 \text{ MPa}, \\ 0,36 + 0,0002R_m & \text{pro } 700 \text{ MPa} < R_m \leq 1200 \text{ MPa}. \end{cases} \quad (3.54)$$

Hodnota exponentu  $m_p$  dosahuje maximálně hodnoty 0,6 pro  $R_m = 1200$  MPa.

Elastický člen rovnice (3.49) můžeme vyjádřit více způsoby. V normě [3] se uplatňují především následující dva:

1. elastická (vysokocyklová) část je definována pouze hodnotou meze únavy  $\epsilon_{a_{el}}(N) = \frac{\sigma_c}{E}$ . Koncepce křivky je znázorněna na obrázku 3.10. Mez únavy se dle [4, 3] definuje jako:

$$\sigma_c = \begin{cases} 0,4R_m & \text{pro } R_m \leq 700 \text{ MPa}, \\ (0,54 - 0,0002R_m) R_m & \text{pro } 700 \text{ MPa} < R_m \leq 1200 \text{ MPa}. \end{cases} \quad (3.55)$$

Pro hodnotu meze pevnosti  $R_m = 1200$  MPa je mez únavy  $\sigma_c = 0,3R_m$ .

Rovnice křivky životnosti (3.49) pak nabývá tvaru:

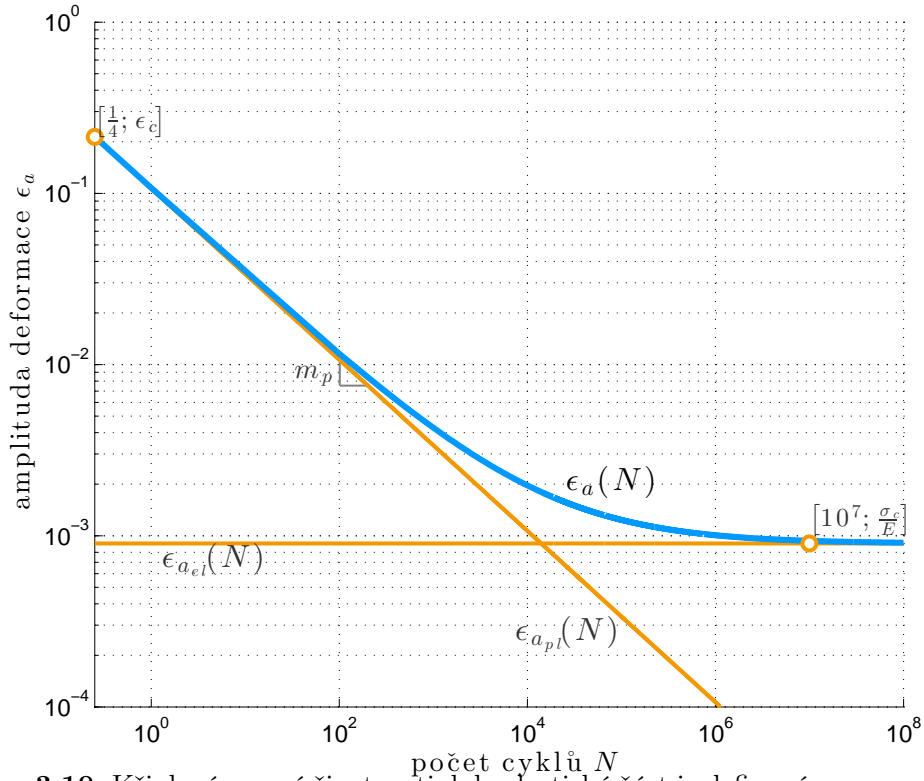
$$\epsilon_a(N) = \frac{\epsilon_c}{(4N)^{m_p}} + \frac{\sigma_c}{E}. \quad (3.56)$$

Tento vztah pro závislost amplitudy deformace na počtu cyklů můžeme také vyjádřit jako závislost amplitudy fiktivního napětí:

$$\sigma_{aF}(N) = \frac{E \epsilon_c}{(4N)^{m_p}} + \sigma_c. \quad (3.57)$$

2. Elastický příspěvek definovaný pomocí Basquinova vztahu [20]:

$$\epsilon_{a_{el}}(N) = \frac{\sigma_{fr}}{E} N^{-m_e}. \quad (3.58)$$



**Obr. 3.10:** Křivka únavové životnosti, kdy elastická část je definována pomocí meze únavy.

Koncepce tohoto přístupu je demonstrována na obrázku 3.11.

Pokud za  $\sigma_{fr}$  dosadíme napětí při lomu, dané vztahem (3.9), přechází vztah (3.58) na tvar (s ohledem  $N = 1/4$  pro monotonní zatížení):

$$\epsilon_{el}(N) = \frac{\sigma_{fr}}{E(4N)^{m_e}}, \quad (3.59)$$

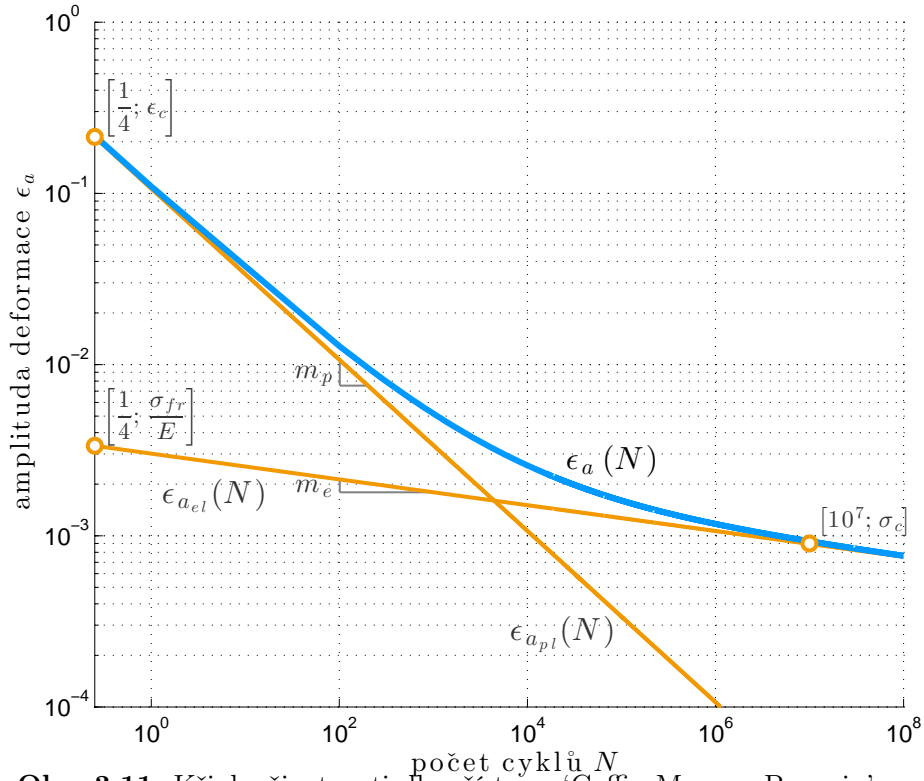
kde exponent  $m_e$  určíme z polohy dvou bodů na křivce. Prvním bodem je (jak je výše uvedeno) lomové napětí  $\sigma_{fr}$  pro  $N = 1/4$  a druhý bod je dán mezí únavy  $\sigma_c$  pro  $N = 10^7$ . Exponent lze tedy vyjádřit jako:

$$m_e = \frac{\log(\sigma_{fr}) - \log(\sigma_c)}{\log(10^7) - \log(\frac{1}{4})}. \quad (3.60)$$

Pokud za  $\sigma_{fr}$  dosadíme ze vztahu (3.9) lze pro exponent  $m_e$  psát:

$$m_e = 0,132 \log \left[ \frac{R_m(1 + 0,014Z)}{\sigma_c} \right]. \quad (3.61)$$

Za hodnotu meze únavy  $\sigma_c$  dosadíme dle vztahu (3.55).



Obr. 3.11: Křivka životnosti dle přístupu ‘Coffin-Manson-Basquin’.

Rovnice křivky životnosti (3.49) pak nabývá tvaru:

$$\epsilon_a(N) = \frac{\epsilon_c}{(4N)^{m_p}} + \frac{\sigma_{fr}}{E(4N)^{m_e}}. \quad (3.62)$$

Tento vztah pro závislost amplitudy deformace na počtu cyklů lze rovněž vyjádřit jako závislost amplitudy fiktivního napětí:

$$\sigma_{aF}(N) = \frac{E \epsilon_c}{(4N)^{m_p}} + \frac{\sigma_{fr}}{(4N)^{m_e}}. \quad (3.63)$$

Výše uvedené vztahy křivek životnosti (3.63) a (3.57) jsou definovány pro střídavě symetrický cyklus zatížení. Vliv střední hodnoty má významný vliv především pro elastickou část. Vliv střední hodnoty je v křivkách životnosti (dle [4, 3]) zahrnut pomocí: a) Goodmanovy metody [21], (viz následná podkapitola 3.6.1) a b) Morrowovy metody [22] (viz podkapitola 3.6.2).

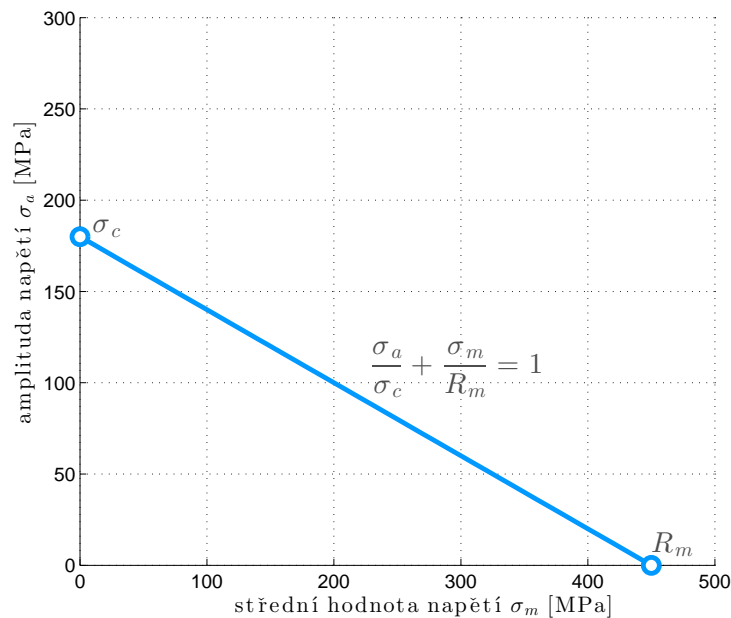
Jak je uvedeno v kapitole 3.5, uvažuje se vliv střední hodnoty napětí pouze pro cykly, které mají střední hodnotu tahového charakteru (kladnou). Pokud je pro určitý cyklus střední hodnota napětí záporná (tlak), pak se tento cyklus konzervativně uvažuje jako symetrický střídavý  $r_\sigma = -1$ . Proto v následných kapitolách

je vliv střední hodnoty vyjádřen pouze pro oblast cyklů pro tahová napětí<sup>6</sup> a tlakovými cykly se nezaobírá.

### 3.6.1 Vliv asymetrie cyklu dle koncepce Goodman

V Haighově diagramu lze vliv střední hodnoty vyjádřit limitní přímkou spojující mez únavy  $\sigma_c$  pro symetrický střídavý cyklus (kdy  $\sigma_m = 0$ ) a mez pevnosti materiálu  $R_m$  pro statické zatížení (kdy  $\sigma_a = 0$ ). Koncepce je znázorněna na obrázku 3.12. Limitní přímkou lze tedy vyjádřit jako:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_c} + \frac{\sigma_m}{R_m} = 1. \quad (3.64)$$



**Obr. 3.12:** Limitní přímkou pro vliv střední hodnoty napětí dle koncepce „Goodman“.

Po úpravě vztahu (3.64) dostáváme pro amplitudu napětí následující vztah:

$$1 + \frac{\sigma_c}{R_m} \frac{\sigma_m}{\sigma_a} = \frac{\sigma_c}{\sigma_a},$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_c}{1 + \frac{\sigma_c}{R_m} \frac{\sigma_m}{\sigma_a}}. \quad (3.65)$$

<sup>6</sup>Dále se proto zabýváme pouze prvním kvadrantem Haighova diagramu.

Jestliže následně amplitudu napětí doplníme o plastický příspěvek dle Manson-Coffinova vztahu (3.50) a pro poměr  $\frac{\sigma_m}{\sigma_a}$  dosadíme ekvivalent dle (3.48), dostáváme křivku životnosti ve tvaru:

$$\sigma_{aF} = \frac{E \epsilon_c}{(4N)^{m_p}} + \frac{\sigma_c}{1 + \frac{\sigma_c}{R_m} \frac{1+r_\sigma}{1-r_\sigma}}. \quad (3.66)$$

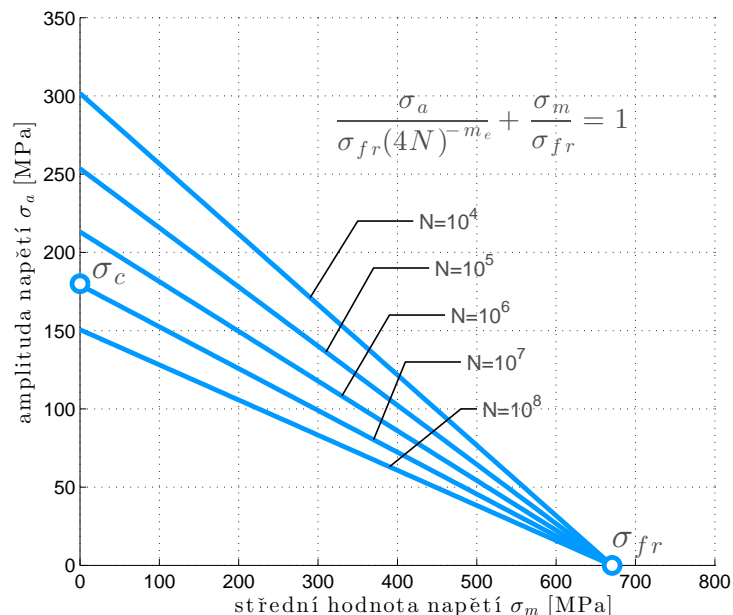
Pokud do rovnice (3.66) dosadíme  $r_\sigma = -1$  pro střídavě symetrický cyklus, dostáváme tvar rovnice shodný s (3.57).

### 3.6.2 Vliv asymetrie cyklu dle koncepce Morrow

Přístup, který publikoval J. Morrow [22] je analogický ke dříve popsanému (3.64). Jen za hodnotu meze únavy (pro  $\sigma_m = 0$ ) dosadíme limitní hodnotu danou Basquinovým vztahem (3.58) a jako limitní statické zatížení (při  $\sigma_a = 0$ ) použijeme hodnotu pro lomovou pevnost  $\sigma_{fr}$ , pak:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{fr} (4N)^{-m_e}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{fr}} = 1. \quad (3.67)$$

Limitní křivky v Haighově diagramu pro různé úrovně počtu cyklů  $N$  jsou vyobrazeny na obrázku 3.13.



**Obr. 3.13:** Limitní přímky pro vliv střední hodnoty napětí dle koncepce „Morrow“.



Z rovnice (3.67) lze vyjádřit amplitudu napětí jako:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{fr}}{(4N)^{m_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_a}}. \quad (3.68)$$

Pokud do tohoto vztahu dosadíme plastickou část a za poměr  $\frac{\sigma_m}{\sigma_a}$  jeho ekvivalent dle (3.48), dostáváme křivku životnosti ve tvaru:

$$\sigma_{aF} = \frac{E \epsilon_c}{(4N)^{m_p}} + \frac{\sigma_{fr}}{(4N)^{m_e} + \frac{1+r_\sigma}{1-r_\sigma}}. \quad (3.69)$$

Pokud do rovnice (3.69) dosadíme  $r_\sigma = -1$  pro střídavě symetrický cyklus, dostáváme tvar rovnice shodný s (3.63).

### 3.6.3 Křivky únavové životnosti ASME

Únavové křivky životnosti, definované v ASME Sekci III [2], jsou sestrojeny na základě deformací kontrolovaných únavových zkoušek prováděných na malých hladkých vzorcích za pokojové teploty a na vzduchu. Křivky životnosti byly následně sestrojeny vhodnou aproximací naměřených dat pomocí závislosti mezi amplitudou deformace a počtem cyklů  $\epsilon_a(N)$ . Aproximace experimentálních dat se předpokládala ve tvaru Langerova vztahu [23]:

$$\epsilon_a = A_1(N)^{-n_1} + A_2, \quad (3.70)$$

kde  $\epsilon_a$  je amplituda deformace,  $N$  je počet cyklů a  $A_1$ ,  $A_2$  a  $n_1$  jsou hledané koeficienty modelu. Langer [23] rovněž jako první definoval pojem fiktivního napětí  $\sigma_F$ , proto rovnici (3.70) můžeme za použití vztahu (3.20) vyjádřit jako závislost fiktivního napětí na počtu cyklů  $\sigma_F(N)$ . V této podobě jsou rovněž křivky v normě uvedeny. Konečná aproximace použitá při sestrojení křivek životnosti, uvedených v [2], je dána vztahem:

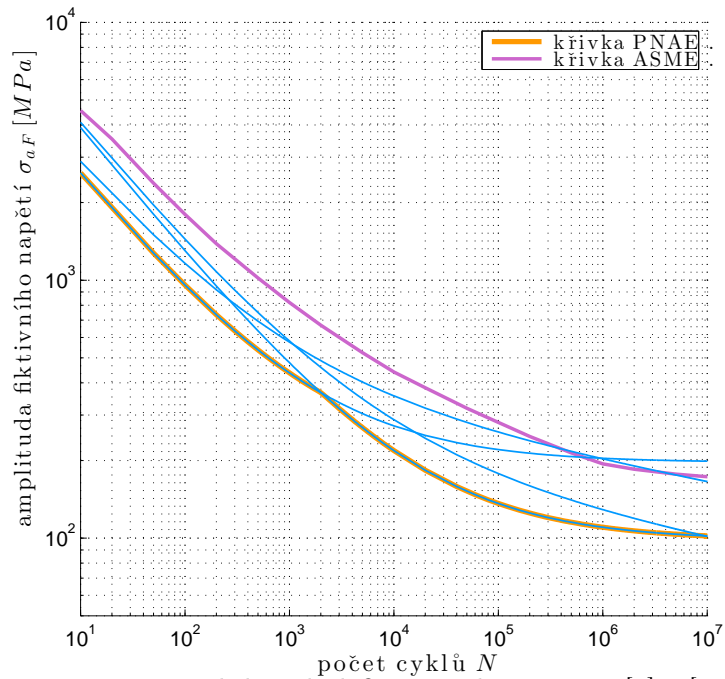
$$\sigma_{aF} = \frac{E}{4\sqrt{N}} \ln \left( \frac{100}{100 - Z} \right) + \sigma_c. \quad (3.71)$$

Pokud využijeme vztahu (3.52) a přijmeme následující označení  $\epsilon_c = \ln \left( \frac{100}{100 - Z} \right)$ , pak rovnice přejde na tvar:

$$\sigma_{aF} = \frac{E \epsilon_c}{4\sqrt{N}} + \sigma_c, \quad (3.72)$$

který je nápadně podobný se vztahem (3.57), uvedeným jako jedna z variant křivky životnosti v normách [4, 3]. Hovoříme zde o konstrukci dle Langera.

Ovšem ASME [2] neuvádí přímo analytické výrazy pro únavové křivky. Uvažují se konstrukční křivky (s respektováním součinitelů bezpečnosti - viz kapitola 3.7)



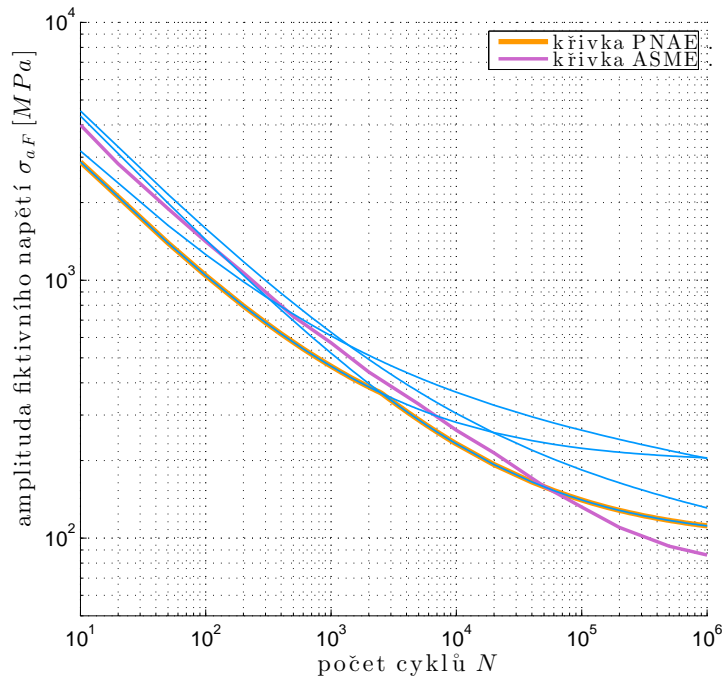
**Obr. 3.14:** Srovnání únavových křivek definovaných normami [2] a [4, 3] pro austenitický materiál vnitřní vestavby reaktoru (VVER).

pro různé typy materiálů. Tyto křivky sice vycházejí z Langerova vztahu, ale jsou určeny na základě experimentálních dat a jsou v normě uvedeny v tabelární podobě pro různé typy materiálů zvlášť.

Na obrázku(3.14) je vyobrazeno porovnání křivek životnosti pro austenitický materiál dle [4, 3] s příslušnou křivkou únavové životnosti austenitu dle [2]. Vyobrazená únavová křivka dle [4, 3] je tvořena spodní obálkou křivek (na obrázku oranžovou barvou), které jsou určeny vztahy (3.66), (3.69). Křivka je definována pro austenitický materiál 08Ch18N10T s mechanickými vlastnostmi:  $R_m = 491\text{MPa}$ ,  $R_{p0.2} = 196\text{MPa}$ ,  $Z = 40\%$  ( $\max_t [\sigma_{aF}(t)] = 800\text{MPa}$ , symetricky střídavý cyklus  $r_\sigma = -1$ ); a je redukována o koeficienty  $n_\sigma = 2$  a  $n_n = 10$ , blíže popsány v následující kapitole 3.7. Finální podobu křivek udávají vztahy (3.73) a (3.74); tyto křivky jsou na obrázku znázorněny světle modrou barvou.

Na obrázku (3.15) je zobrazeno porovnání únavových křivek pro materiál tlakové nádoby reaktoru 15Ch2NMFA s mechanickými vlastnostmi:  $R_m = 491\text{MPa}$ ,  $R_{p0.2} = 395\text{MPa}$ ,  $Z = 45\%$  ( $\max_t [\sigma_{aF}(t)] = 800\text{MPa}$ , symetricky střídavý cyklus  $r_\sigma = -1$ ).

Z obrázku 3.14 je patrné, že únavová křivka ASME austenitického materiálu leží výrazně nad křivkou definovanou ruskou normou. Významný rozdíl můžeme vidět ve vysokocyklové oblasti, kdy pro  $N = 10^7$  je dovolená amplituda dle ASME více než čtyřikrát vyšší, než dle křivek PNAE. Rozdíl se pomalu srovnává pro nižší



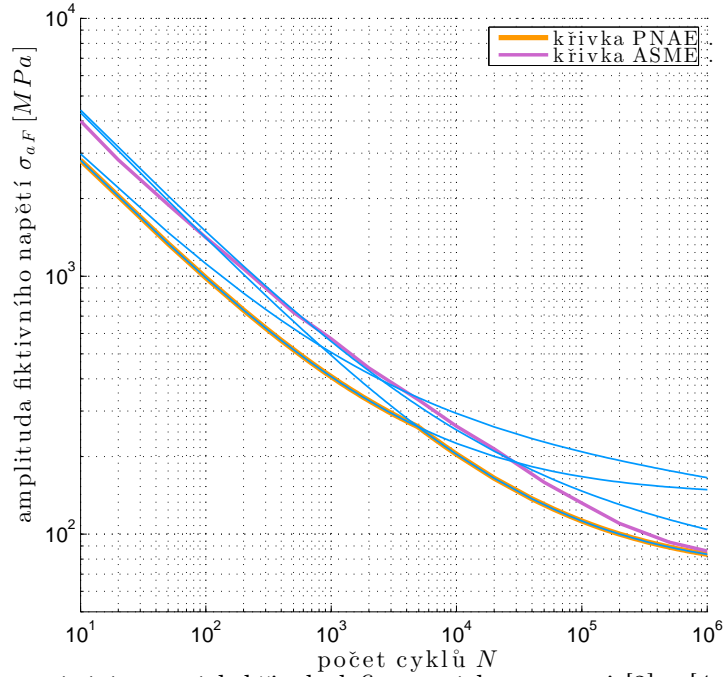
**Obr. 3.15:** Srovnání únavových křivek definovaných normami [2] a [4, 3] pro materiál tlakové nádoby reaktoru (VVER), symetricky střídavý cyklus  $r_\sigma = -1$ .

počty cyklů v oblasti nízkocyklové únavy.

Křivky materiálu TNR vyobrazené na obrázku 3.15 mají trend opačný. V nízkocyklové části je rozdíl podobný jako u křivek pro austenitický materiál. Sklon plastické složky je u obou křivek (ASME i PNAE) podobný. Vysokocyklová složka porovnávaných křivek (elastická část) je dána jinou hodnotou meze únavy  $\sigma_c$ . Pro ASME křivku je tato hodnota podstatně nižší.

Připomeňme si, že vztah (3.66) obsahuje možnost zahrnout vliv asymetrie cyklu napětí  $r_\sigma$ , zatímco křivka ASME je již s tímto ohledem dopředu redukována (při její konstrukci z experimentálních dat). Na obrázku 3.16 jsou vykresleny křivky životnosti materiálu TNR, kde pro křivky [3, 4] uvažujeme hodnotu koeficientu asymetrie  $r_\sigma = 0$ , tedy mívající tahové zatížení. V tomto případě jsou vysokocyklové části křivek (ASME, PNAE) podobné hodnoty.

Z kvalitativního porovnání křivek vyplývá, že křivky dle norem [3, 4] jsou přísnější než jejich ekvivalenty dané v [2]. Detailnější porovnání únavové životnosti na reálném příkladu komponent tlakové nádoby jaderného reaktoru VVER je provedeno v kapitole 6. Rovněž si můžeme povšimnout, že u křivek pro austenitický materiál je rozdíl v dovolených amplitudách relativně vysoký, zatímco u feritického (nízko legovaného) materiálu tlakové nádoby reaktoru je rozdíl mnohem nižší. Proto je v kapitole 6.3 věnován prostor pro bližší přezkoumání a porovnání křivek dle jednotlivých norem na základě dostupných experimentálních dat.



**Obr. 3.16:** Srovnání únavových křivek definovaných normami [2] a [4, 3] pro materiál tlakové nádoby reaktoru (VVER), mějivý cyklus v tahu  $r_\sigma = 0$ .

### 3.7 Redukční koeficienty

Konstrukce křivek (3.66) a (3.69) použité v normách [4, 3] jsou finálně redukovány pomocí koeficientu bezpečnosti vůči počtu cyklů  $n_N$  anebo pomocí koeficientu bezpečnosti vůči deformaci (resp. vůči fiktivnímu napětí)  $n_\sigma$ . Hodnoty těchto koeficientů mohou být různé pro rozdílné konstrukční prvky tlakových zařízení, viz tabulka 3.1. Základní hodnoty těchto koeficientů jsou  $n_N = 10$  a  $n_\sigma = 2$ .

Křivku (3.66) po aplikaci redukčních koeficientů můžeme zapsat v následujícím tvaru, který je shodný s tvarem, pod kterým je křivka v normách [4, 3] uvedena:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{aF}}{\varphi_S} &= \frac{E \epsilon_c}{n_\sigma (4N)^{m_p}} + \frac{\sigma_c}{n_\sigma \left(1 + \frac{\sigma_c}{R_m} \frac{1+r_\sigma}{1-r_\sigma}\right)}, \\ \frac{\sigma_{aF}}{\varphi_S} &= \frac{E \epsilon_c}{(4n_N N)^{m_p}} + \frac{\sigma_c}{\left(1 + \frac{\sigma_c}{R_m} \frac{1+r_\sigma}{1-r_\sigma}\right)}, \end{aligned} \quad (3.73)$$

kde  $\varphi_S$  je koeficient snížení únavové životnosti ve svarech a návarech, resp. vlivem prostředí, viz níže.

**Tab. 3.1:** Hodnoty redukčních koeficientů pro různé typy komponent.

| Oblast použití  | Redukční koeficient |       |
|---|---------------------|-------|
|   | $n_\sigma$          | $n_N$ |
| Komponenty tvořící hranici tlakového okruhu.                | 2                   | 10    |
| Svarové spoje s neúplným průvarem. <sup>7</sup>             | 1,25                | 2,1   |
| Šrouby a svorníky. <sup>8</sup>                             | 1,5                 | 5     |
| Komponenty namáhané pouze teplotním zatížením. <sup>9</sup> | 1,5                 | 3     |

Jak je patrné, tvar (3.73) má dvě varianty, odpovídající dvěma redukčním koeficientům. Při hodnocení se pak pro danou hodnotu amplitudy fiktivního napětí (amplitudy deformace) stanoví hodnota dovoleného počtu cyklů  $N$  dle obou variant a při hodnocení se použije nižší z obou hodnot, resp. používá se spodní obálka obou variant křivek.

Křivka (3.69) po aplikaci redukčních koeficientů přechází na dvou variantní tvar, viz také [4, 3]:

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_{aF}}{\varphi_S} &= \frac{E \epsilon_c}{n_\sigma (4N)^{m_p}} + \frac{\sigma_{fr}}{n_\sigma \left[ (4N)^{m_e} + \frac{1+r_\sigma}{1-r_\sigma} \right]}, \\ \frac{\sigma_{aF}}{\varphi_S} &= \frac{E \epsilon_c}{(4n_N N)^{m_p}} + \frac{\sigma_{fr}}{(4n_N N)^{m_e} + \frac{1+r_\sigma}{1-r_\sigma}}.\end{aligned}\tag{3.74}$$

Křivky únavové životnosti (3.69) s aplikovanými koeficienty  $n_N = 10$  a  $n_\sigma = 2$  jsou vyobrazeny na obrázku (3.17). Jsou zde patrné obě snížené varianty. Finální křivka tvořená jejich spodní obálkou je na obrázku vyznačena oranžově. Z tohoto znázornění jasně vyplývá, že koeficient na počet cyklů  $n_n$  se uplatní především v oblasti s nízkým počtem cyklů, zatímco koeficient  $n_\sigma$  formuje spodní obálku v oblasti vyšších počtů cyklů.

Krom koeficientů na počet cyklů  $n_N$ , resp na deformaci  $n_\sigma$ , se finální křivky [4, 3] dále redukuje součinitelem  $\varphi_S$ , uvedeným ve vztazích (3.73) a (3.74). Tento součinitel je dle normy [4] součinem dílčích redukčních faktorů:

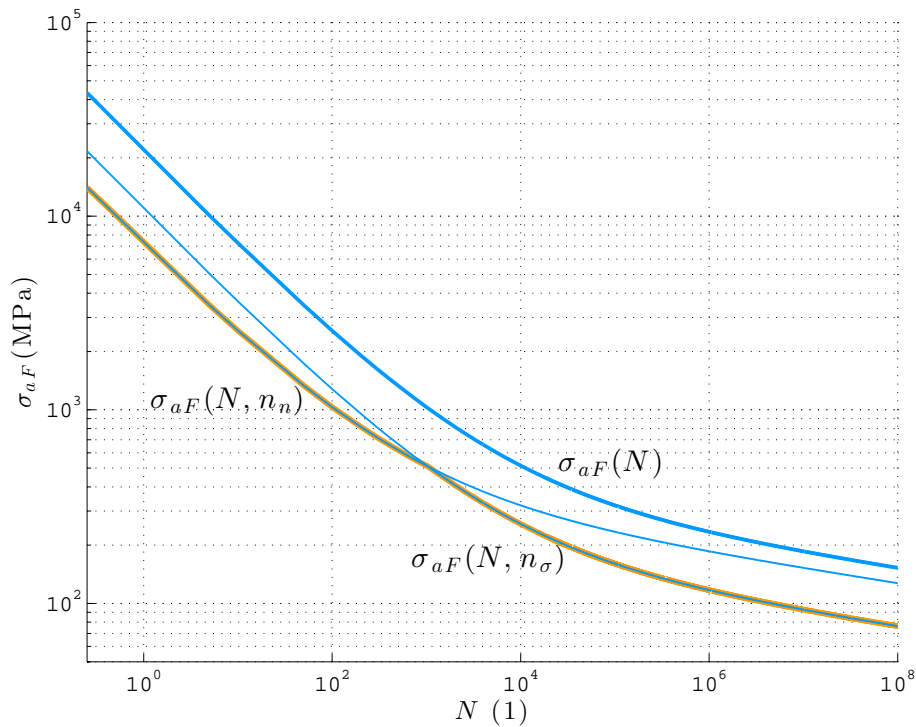
$$\varphi_S = \varphi_F \cdot \varphi_k \cdot \varphi_w,\tag{3.75}$$

kde  $\varphi_F$  je redukční součinitel únavové životnosti vlivem radiačního poškození materiálu,  $\varphi_k$  je redukční součinitel únavové životnosti vlivem pracovního prostředí a  $\varphi_w$  je redukční součinitel únavové životnosti ve svarech a návarech. Všechny

<sup>7</sup>Uvedené hodnoty redukčních faktorů se mohou použít pro svar s neúplným průvarem v případě použití hodnoty koeficientu koncentrace  $k_{ef}$ , který je uveden v normách [4, 3].

<sup>8</sup>Platí pro šrouby a svorníky z perlitických ocelí.

<sup>9</sup>Platí pouze pro komponenty, které netvoří hranici tlakového okruhu.



**Obr. 3.17:** Křivka únavové životnosti redukována o koeficienty  $n_\sigma$  a  $n_n$ .

dílčí koeficienty nabývají hodnot menších než jedna, proto také celkový redukční součinitel  $\varphi_S \leq 1$ . Hodnoty dílčích součinitelů  $\varphi_F, \varphi_k, \varphi_w$  jsou blíže specifikovány v normě [4].

Dle normy [3] je hodnota koeficientu  $\varphi_S = \varphi_w$ .

Křivky životnosti uvedené v [2] byly získány na základě aproximace naměřených dat. Křivky byly nejprve korigovány o efekt střední hodnoty. Následně byly redukovány součinitelem na amplitudu deformace, resp. napětí  $n_\sigma = 2$ , resp. o faktor na počet cyklů  $n_N = 20$ . Použila se vždy nižší hodnota redukce. Jak je uvedeno v [24], důvodem aplikace těchto redukčních faktorů je rozptyl experimentálních hodnot vlivem rozdílnosti materiálových vlastností, kvalitou povrchu a velikostí zkušebních těles a reálné konstrukce. V dokumentu [25] jsou uvedeny dílčí členěny výsledného koeficientu na životnost  $n_N = 20$ . Vzniká součinem těchto dílčích redukčních koeficientů:

|                 |      |
|-----------------|------|
| na rozptyl dat  | 2,0, |
| efekt velikosti | 2,5, |

na kvalitu povrchu, vliv okolí, atd. 4,0.

Faktory  $n_\sigma$  a  $n_N$  nejsou tedy bezpečnostními koeficienty, ale spíše redukčními faktory, které musí být aplikovány na experimentální data pro stanovení smysluplné křivky únavové životnosti reálné komponenty JE. V [24] je rovněž zmíněno, že uvedené redukční faktory také pokrývají vliv provozního prostředí<sup>10</sup> (jako je vyšší teplota a chladivo) vůči výsledkům experimentů provedených na vzduchu při teplotě 20°C.

V normě [2] se v roce 2009 revidovala návrhová křivka únavové životnosti austenitických ocelí. Dřívější křivka (ve verzích před rokem 2009) byla stanovena pro celou škálu austenitických ocelí s různým obsahem uhlíku. V práci [27] je nově stanovena únavová křivka austenitických ocelí na základě experimentálních dat získaných na vzorcích z materiálů s označením (dle amerického AISI) 304, 316, resp. 316T (08Ch18N10T), které jsou ve světě nejpoužívanější austenitické oceli pro výrobu komponent JE. Toto přehodnocení prokázalo nekonzervativnost původní únavové křivky austenitických ocelí. Proto nově stanovená únavová křivka nahradila v [2] (ve verzi 2009) původní křivku pro austenitické oceli. Při konstrukci nové křivky austenitických ocelí se použily již revidované redukční koeficienty  $n_N = 12$ , resp.  $n_\sigma = 1,7$  dle [27, 28].

---

<sup>10</sup>Nepokrývají vliv korozního prostředí, jak je uvedeno např. v [26]

### 3.8 Kumulace únavového poškození

Na základě dříve definovaných křivek životnosti lze každému cyklu, resp. polocyklu (charakterizovaného hodnotou amplitudy fiktivního napětí  $\sigma_{aF}$  a koeficientem asymetrie cyklu  $r$ ), jednoznačně přiřadit hodnotu dovoleného počtu cyklů  $N$ . Dílčí poškození tímto cyklem lze vyjádřit jako:

$$D_i = n_i/N_i, \quad (3.76)$$

kde  $D_i$  je dílčí poškození cyklem (polocyklem),  $n_i$  je počet opakování cyklu, u polocyklu je  $n_i$  poloviční a  $N$  je dovolená hodnota opakování cyklu (polocyklu) dle použité křivky životnosti. Pro sumaci dílčích poškození se dle všech, v této práci diskutovaných norem [2, 4, 3], jednotně používá Palmgren-Minerovy hypotézy. Hypotéza byla původně navržena Palmgrenem [29] a později modifikována Minerem [30]. Lineární sumační pravidlo dílčích poškození lze zapsat dle této hypotézy jako:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}, \quad (3.77)$$

kde  $D$  je celkové poškození a  $k$  je celkový počet typů cyklů v historii zatěžování. Podmínkou vyhovujícího hodnocení únavové životnosti jsou hodnoty celkového poškození menší než jedna:

$$D \leq 1. \quad (3.78)$$

### 3.9 Trojosý stav napjatosti

Vztahy v dřívějších kapitolách se vztahovaly k posloupnosti napětí (intensity napětí) při jednosém stavu zatížení. Stav zatížení je ovšem obecně trojosý. Hlavním předpokladem norem [2, 3, 4], které se zabývají posuzováním bezpečnosti komponent JE, tvořících tlakový okruh, je fakt, že tyto komponenty mají převážně válcový, kulový či eliptický tvar. V takových případech pak napjatost od zatížení tlakem či teplotním gradientem přes stěnu tloušťky má jasný charakter. Radiální, obvodové a osově napětí bývají rovněž napětími hlavními, respektive válcové či sférické souřadnice těles jsou totožné směrům hlavních napětí. Takto jsou definovány tři průběhy složek tenzoru napětí ve třech na sobě kolmých směrech  $i, j, k$  (smykové složky jsou nulové):

$$\mathbf{T}_\sigma(t) = \begin{bmatrix} \sigma_\theta(t) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_r(t) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_i(t) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_j(t) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_k(t) \end{bmatrix}. \quad (3.79)$$



Zůstávají tedy tři průběhy hlavního napětí označené  $\sigma_i(t)$ ,  $\sigma_j(t)$  a  $\sigma_k(t)$ . Průběhy redukovaných hodnot napětí můžeme vypočítat dle kritéria maximálních smykových napětí jako:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}(t) &= \sigma_i(t) - \sigma_j(t), \\ \sigma_{jk}(t) &= \sigma_j(t) - \sigma_k(t), \\ \sigma_{ki}(t) &= \sigma_k(t) - \sigma_i(t).\end{aligned}\tag{3.80}$$

Dostáváme tři časové průběhy redukovaných hodnot napětí  $\sigma_{ij}(t)$ ,  $\sigma_{jk}(t)$  a  $\sigma_{ki}(t)$ . Vliv každé časové historie redukovaného napětí na únavu pak analyzujeme zvlášť, dle postupů uvedených výše. Finálně lze vypočítat tři hodnoty celkového poškození ve třech vzájemně kolmých směrech, které jednotlivě musí splnit limitní podmínku (3.78).

V oblastech různých tvarových diskontinuit (např.: osazení, rádius, kuželový přechod, nátrubek, apod.) vznikají komplexní stavy napjatosti a je nutné uvažovat všechny složky tenzoru napjatosti, včetně smykových:

$$\mathbf{T}_\sigma(t) = \begin{bmatrix} \sigma_x(t) & \tau_{xy}(t) & \tau_{xz}(t) \\ \tau_{yx}(t) & \sigma_y(t) & \tau_{yz}(t) \\ \tau_{zx}(t) & \tau_{zy}(t) & \sigma_z(t) \end{bmatrix},\tag{3.81}$$

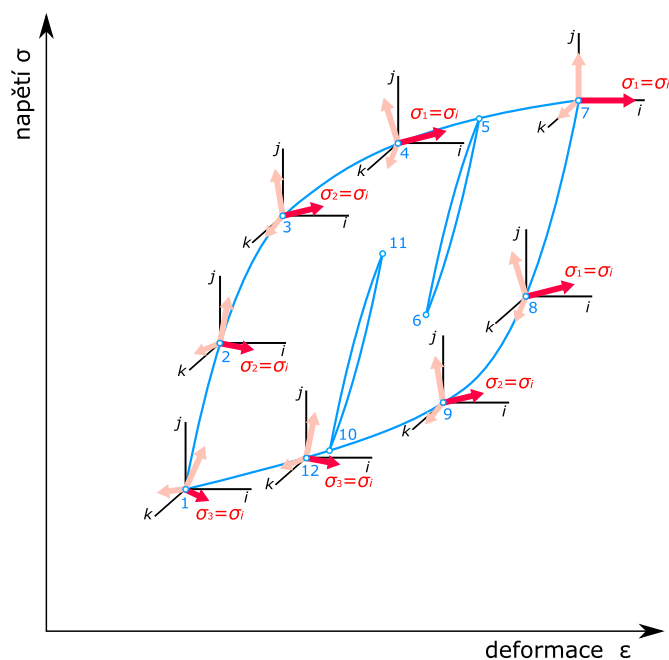
pozn.: tenzor napětí je symetrický, tedy  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$  a  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ .

Ve vyšetřovaném bodě, který leží v uvedené oblasti, dochází v průběhu zatěžování k rotaci směrů hlavních napětí (v důsledku neproporcionálních časových změn jednotlivých složek tenzoru napětí  $\mathbf{T}_\sigma$ ). Nelze tedy přímo převést průběhy jednotlivých složek tenzoru napětí  $\sigma_x(t)$ ,  $\sigma_y(t)$ ,  $\sigma_z(t)$ ,  $\tau_{xy}(t)$ ,  $\tau_{yz}(t)$  a  $\tau_{zx}(t)$ , na tři časové průběhy redukovaných napětí  $\sigma_{ij}(t)$ ,  $\sigma_{jk}(t)$  a  $\sigma_{ki}(t)$ , jako v předchozím případě. V těchto případech je nutné použít obecnějšího postupu, protože nelze jednoznačně přiřadit směr hlavního napětí v aktuálním časovém okamžiku hlavnímu napětí v jiném časovém okamžiku. Procedury uvedené v normách [2, 3, 4] obecně předpokládají, že v průběhu zatěžování nedochází k významným natočením směrů hlavních napětí, tedy jejich vzájemná natočení v různých časech jsou malá.

V časové posloupnosti lze vždy nalézt okamžik  $t = l_1$ , kdy je v průběhu celé historie zatěžování dosaženo algebraicky<sup>11</sup> největšího hlavního napětí. V tomto okamžiku se směry hlavních napětí označí jako směry  $i$ ,  $j$  a  $k$ , kdy směr  $i$  přináleží největšímu hlavnímu napětí  $\sigma_1(l_1)$ , směr  $j$  odpovídá směru druhého hlavního napětí  $\sigma_2(l_1)$  a směr  $k$  směru nejmenšího hlavního napětí  $\sigma_3(l_1)$  v čase  $l_1$ .

Máme-li v průběhu zatěžování uzavřené hysterezní křivky, hlavní napětí v průběhu zatěžování sice rotují, ale vždy na konci cyklu se opět vrátí do původní polohy na vrcholu největší hysterezní smyčky. Směry hlavních napětí  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  opět odpovídají směrům  $i, j, k$ , jak tomu bylo v čas  $t = l_1$ , viz obrázek 3.18.

<sup>11</sup>Hledání algebraicky největšího hlavního napětí je požadavek norem [2, 4], dle požadavku normy [3] se hledá okamžik s největší absolutní hodnotou hlavních napětí.



**Obr. 3.18:** Indexace hlavních napětí v řešeném bodě tělesa v průběhu zatěžování, resp. přiřazení hlavních napětí  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$  (v jednotlivých časových krocích) k zafixovaným směrům  $i$ ,  $j$ ,  $k$ .

V jiných časových okamžicích ( $t \neq l_1$ ) se jednotlivé hodnoty hlavních napětí přiřadí k zafixovaným směrům  $i$ ,  $j$  a  $k$ . Proces přiřazování můžeme formálně nazvat jako ‘indexaci hlavních napětí’ nebo geometricky jako proces ‘sklápění hlavních napětí’ do předem definovaných směrů  $i$ ,  $j$ ,  $k$ . Schématicky je tento proces vyobrazen na obrázku 3.18, kde je vyobrazeno indexování pro zafixovaný směr  $i$ , který v sedmém časovém kroku  $l_1 = 7$  představoval směr historicky největšího hlavního napětí  $\sigma_1(7)$ , označený jako  $\sigma_i$ . Tento proces lze realizovat následujícími postupy:

- Pokud máme k dispozici diskrétní hodnoty časových průběhů složek tenzoru napětí  $\mathbf{T}_\sigma$  s dostatečně jemným časovým krokem, pak můžeme sledovat vývoj rotace směrů hlavních napětí od času  $l_1$  (pozn.: v čase vpřed i vzad). Změna směru hlavních napětí je v čase spojitá<sup>12</sup>. Tak lze jednotlivým hlavním napětím přiřadit, resp. zachovat indexy  $i$ ,  $j$ ,  $k$  jak postupně rotují v čase, což je rovněž předpis normy [2].
- Problém nastává v případech, kdy nemáme k dispozici dostatečně velký počet časových kroků nebo v případech, kdy máme k dispozici jen napja-

<sup>12</sup>Neplatí u numerického výpočtu při přechodu přes singulární body (stejně velká hlavní napětí či nulové zatížení), kdy nelze směr hl. napětí exaktně určit.

tost v některých napěťových stavech. V takovém případě nelze sledovat spojitou rotaci hlavních napětí z času  $l_1$ . V těchto případech lze využít (dříve zmíněného) předpokladu, že vychýlení směrů hlavních napětí od směrů  $i, j, k$  jsou malá. Přiřazení indexů lze pak provést na základě směrových úhlů definujících aktuální natočení směrů hlavních napětí v časech  $t \neq l_1$  od směrů  $i, j, k$  v čase  $t = l_1$ . Tento postup je popsán v [7].

Po provedení indexace napětí dostáváme tři průběhy hlavních napětí označené jako  $\sigma_i(t)$ ,  $\sigma_j(t)$  a  $\sigma_k(t)$ .

Při využití vztahu (3.80) opět získáme tři časové průběhy redukováných hodnot napětí  $\sigma_{ij}(t)$ ,  $\sigma_{jk}(t)$  a  $\sigma_{ki}(t)$ . Vliv každé časové historie redukováného napětí na únavu analyzujeme zvlášť, jak bylo uvedeno výše. Dostaneme trojici hodnot celkového poškození  $D$ , z nichž nejvyšší hodnota se bere jako výsledné únavové poškození a musí splnit limitní podmínku (3.78).

## Kapitola 4

# Počítačová aplikace pro hodnocení únavy materiálu komponent reaktoru VVER

Z dřívějších pasáží této práce vyplývá, že hodnocení komponent jaderných elektráren z hlediska únavového poškození má své přesné požadavky a postupy, které se lehce odchyľují od přístupů používaných k řešení únavové životnosti v jiných průmyslových odvětvích, např.: v automobilovém průmyslu, v letectví; problémy kontaktní únavy ložísek či únavy komponent rotujících strojů. Vývojáři programového vybavení, umožňujícího stanovovat únavovou životnost strojních komponent, zaměřují své úsilí především na odvětví s širším uplatněním. V těchto odvětvích lze rovněž sledovat značný vývoj v oblasti hodnocení únavové životnosti. To je spojeno s cílem stanovit únavovou životnost co možná nejpřesněji vzhledem k reálnému stavu. Díky tomu se strojní díly dimenzují dosti přesně na požadovanou dobu života. To vede k úsporám materiálu, výrobních prostředků, času a v neposlední řadě k rozvoji tržního hospodářství<sup>1</sup>. V jaderné energetice se klade hlavní důraz na bezpečnost navrhované, resp. posuzované konstrukce. Navržené postupy hodnocení únavy materiálu vedou k záměrnému nadhodnocení výsledků na stranu bezpečnosti. Z tohoto důvodu jsou postupy používané k posudku únavy materiálu v jaderné energetice významně odlišné od trendu světového průmyslu.

Česká republika je zemí využívající jadernou energii, je také zemí s nemálo průmyslovými podniky, které vyrábějí komponenty jaderných elektráren<sup>2</sup>. Jaderná energetika v České republice je velmi úzce svázána s ruskou technologií. Provozané JE jsou typu VVER. Proto také norma [4] je velmi blízká normě ruské [3],

---

<sup>1</sup>Jelikož se součásti strojního zařízení většinou poškodí v důsledku únavy ihned po záruční době, pak je přinejmenším nutná jejich nákladná oprava.

<sup>2</sup>V minulosti rovněž koncern Škoda Plzeň byl výrobcem reaktorových celků, aktuálně výroba komponent JE pokračuje v podniku Škoda JS, Plzeň.

rovněž vlivem společného historického vývoje. Použití existujících počítačových programů na hodnocení únavy dle [2] proto nemusí být zcela vhodné. Jak v důsledku odlišných materiálů tak z hlediska jiných návrhových specifikací<sup>3</sup>.

Jak bylo zmíněno v úvodní části práce, v České republice existuje pouze jediný komerční program na hodnocení únavové životnosti schválený pro použití v jaderné energetice. Jmenovitě jde o program STATES [7], vyvinutý a spravovaný Ústavem aplikované mechaniky Brno, s.r.o.

Počítačová aplikace vyvinutá v rámci této práce si neklade za cíl vytvořit plnohodnotnou náhradu za program STATES. To by bylo nad rámec možností autora. Aplikace má posloužit jako přiměřená alternativa s transparentním kódem, možností jeho editace a možnostmi výstupů řešení v grafické podobě (viz kapitolu 4.8 níže). Zvláště grafické výstupy mohou odhalit nesrovnalosti v zadaných vstupech či předpokladech řešení, které u jinak složité posloupnosti napěťových stavů nelze jednoduše odhalit. Také mohou posloužit při interpretaci výsledků, kdy mohou pomoci stanovit, který z provozních režimů či kombinace provozních zatížení má dominantní vliv na čerpání únavové životnosti, blíže viz kapitolu 4.8.

Jako vhodné prostředí pro rychlou tvorbu aplikace bylo zvoleno prostředí programu MATLAB se spoustou předdefinovaných matematických funkcí [31].

Níže uvedený text slouží především jako návod k užívání vytvořené aplikace pro případného dalšího uživatele, který by měl zájem využít aplikaci k posudku únavové životnosti strojních komponent určených k instalaci na JE.

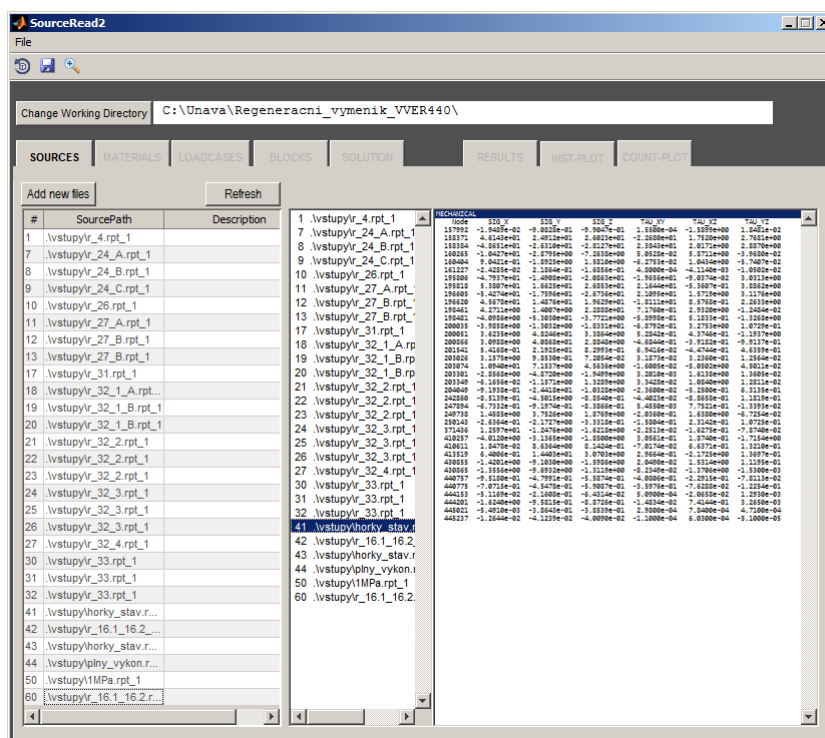
## 4.1 Využití programu Matlab pro tvorbu aplikací

Program MATLAB [31] je výborným pomocníkem při řešení různých jednoduchých i složitých technických výpočtů, při kterých využívá předem nadefinované funkce. Uživateli pak stačí napsat pár programových řádků pro řešení složitých výpočtů. MATLAB je rovněž užitečný nástroj při tvorbě samostatně spustitelných aplikací, kdy usnadňuje uživateli práci při vytváření vlastních aplikací díky integrovanému maticově orientovanému jazyku a vestavěným matematickým, grafickým či datovým funkcím. Stačí mít nainstalovaný MATLAB Compiler, který převede aplikaci nebo funkci na samostatně spustitelnou aplikaci. Zkompilovat se dá většina MATLAB funkcí a toolboxů.

Aplikace vytvořené pomocí MATLAB Compileru se můžou rovněž distribuovat ke koncovým uživatelům, kteří MATLAB nevlastní. Je nutné ovšem nainstalovat Matlab Compiler Runtime (MCR), který umožní spustit vytvořené aplikace s grafickým prostředím. MATLAB generované samostatné aplikace se tedy můžou

---

<sup>3</sup>Při návrhu konstrukce komponent jaderných elektráren se používala jiná kritéria než jsou stanovena v [2].



Obr. 4.1: Náhled zobrazení aplikace na kartě „Sources“, která slouží k definování vstupních zdrojových souborů s daty.

distribuovat na jakýkoli cílový stroj<sup>4</sup>.

## 4.2 Grafická podoba aplikace

Koncepce grafického rozhraní vytvořené aplikace je patrná z obrázku 4.1. V horní části je lišta pro možnost načítání a ukládání nadefinovaného výpočtu únavy (položkou „file“).

Program se člení do několika karet. Karty jsou označeny záložkovým řádkem. Záložky slouží k přepínání mezi jednotlivými kartami:

- **Sources** slouží pro zadávání vstupních textových souborů obsahujících složky tenzorů napětí.
- **Materials** na této kartě se definují mechanické vlastnosti hodnocených materiálů, přiřazují se k nim příslušná čísla uzlů (figurujících ve vstupních souborech) a specifikují se koeficienty pro konstrukci únavových křivek.

<sup>4</sup>Na počítač, který má stejný operační systém jako ten, na kterém byly aplikace vytvořeny.

- **Loadcases** karta slouží pro definování jednotlivých zátěžových stavů, které lze tvořit pomocí lineární kombinace odpovídajících si složek tenzorů napětí, definovaných ve vstupních souborech, např. teplotní zatížení se zatížením od přetlaku.
- **Blocks** slouží k definování posloupnosti zatěžovacích stavů v historii zatěžování (resp. historii provozu zařízení).
- **Solution** na této kartě lze spustit výpočet, definovat jednotlivé nastavení výpočtu a lze sledovat jeho průběh.
- **Results** slouží k výpisu výsledných hodnot únavového poškození v hodnocených uzlech.
- **History plot** nástroje pro vykreslení posloupnosti zatížení či hysterezních křivek.
- **Counted plot** možnost vykreslit histogramy dekomponovaných cyklů.

V horní liště aplikace lze měnit pracovní adresář. Ten slouží pro uchování vstupních textových souborů a vytváření dočasných i výstupních textových souborů.

## 4.3 Vstupní data

Soudobé komerční MKP softwary umožňují výpis vypočtených dat ve formě textových souborů. Vhodnou formou zápisu napětového stavu (plynouceho z elastické, resp. lineární analýzy napjatosti) jsou složky tenzoru napětí  $\mathbf{T}_\sigma$  v definovaném kartézském souřadném systému. Vypsaná data v textovém dokumentu tvoří sedm sloupců. V prvním sloupci jsou (zpravidla) uvedeny čísla uzlů a ve zbylých sloupcích pak šest složek tenzoru napětí, tři normálové ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ) a tři smykové složky ( $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ). Tato forma zápisu je v MKP systémech nastavena jako výchozí. Vstupní data vytvořené aplikace přejímají tento formát jako vstupní datové soubory. Počet řádků odpovídá počtu uzlů vstupujících do únavového řešení.

Aplikace předpokládá, že vstupní napětové stavy jsou určeny čistě na základě lineárního výpočtu, resp. s předpokladem elastického chování materiálu. Přepočtení na pružně-plastický stav je již součástí následného výpočtu, prováděného aplikací, viz kapitolu 4.6.3. Výhodou lineární analýzy napjatosti je možnost kombinovat stavy zatížení. Například lze kombinovat teplotní zatížení s mechanickým zatížením od jednotkového přetlaku, které je vynásobené celkovou hodnotou působícího tlaku v příslušném časovém kroku teplotního režimu:

$$\mathbf{T}_\sigma = \alpha_\sigma \mathbf{T}_\sigma^{\text{temp}} + \beta_\sigma \mathbf{T}_\sigma^{\text{mech}}, \quad (4.1)$$

kde  $\alpha$  je násobitel teplotního zatížení (obvykle  $\alpha_\sigma = 1$ ),  $\beta_\sigma$  je násobitel mechanického zatížení a  $\mathbf{T}_\sigma^{\text{temp}}$ , resp.  $\mathbf{T}_\sigma^{\text{mech}}$  jsou tenzory napětí při teplotní, resp. mechanické zátěži plynoucí z elastické analýzy napjatosti.

Tento postup definování jednotlivých stavů zatížení je velmi efektivní a šetří čas při výpočtech pomocí MKP. Je možné vypočítat napjatost při různých teplotních režimech odděleně od zatížení přetlakem, vlastní váhy a jiných mechanických zátěží. Tento postup by u pružně-plastického výpočtu nebyl možný, jelikož rozvoj plasticity závisí na historii zatěžování.

Některá data vypsaná z MKP systémů ve výchozím nastavením vyžadují následnou přípravnou fázi, než mohou být načtena vytvořenou aplikací. Je nutné využít externích skriptů, převádějících textové výpisy z MKP softwarů do požadované podoby (např.: odstranění hlaviček, přeskládání posloupnosti složek tenzoru na řádcích či nalezení lokálních extrémů v časových historiích, které mohou v jednotlivých uzlech nastávat v jiném časovém kroku). Na obrázku 4.1 je patrný požadovaný formát vstupních datových souborů, které jsou již načteny v prostředí aplikace.

## 4.4 Definování úlohy

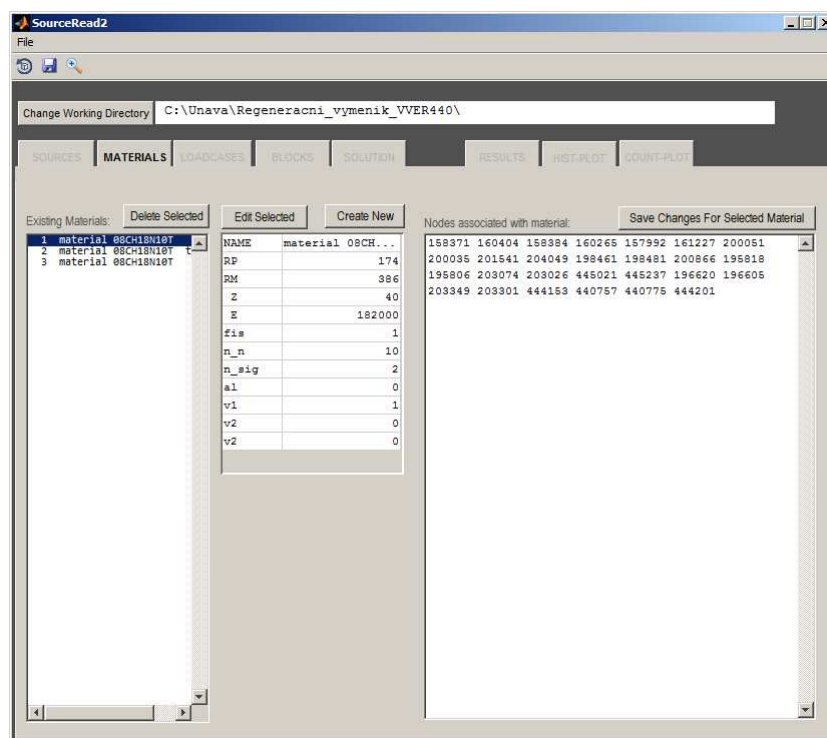
Úlohu s jednoduchým zadáním lze pohodlně zadávat přímo přes grafické rozhraní aplikace. Pod jednotlivými kartami lze postupně definovat jednotlivé kroky výpočtu. Nejprve se nadefinují cesty ke vstupním textovým souborům v kartě „sources“, následně jednotlivé stavy zatížení. Ty lze definovat jako lineární kombinace vstupních dat. To se provádí v kartě „loadcases“. V kartě „blocks“ se definují bloky zatížení. Bloky jsou charakterizované posloupností zátěžových stavů. Ve spodní části karty „blocks“ lze definovat celkovou historii zatěžování ve formě posloupnosti a počtu opakování nadefinovaných bloků.

Materiálová data, koeficienty redukce únavových křivek, koeficient koncentrace a výčet uzlů pro řešení lze definovat v kartě „materials“. Materiálová karta v prostředí aplikace je vyobrazena na obrázku 4.2.

Úlohu zadanou přes grafické rozhraní můžeme uložit do archivačního textového souboru pomocí příkazu „save“ v záložce „file“.

Pro složitější zadání (v podobě dlouhých posloupností, mnoha různých materiálů, velkého počtu řešených uzlů či velkého počtu stavů zatížení) je výhodnější využít textový editor pro tvorbu vstupního textového souboru. Pro nadefinování úlohy můžeme takto využít koncept dříve vytvořených částí a není tedy nutné vše znovu ručně „vyklikávat“. Forma vstupního textového souboru je popsána v následující podkapitole.





Obr. 4.2: Náhled zobrazení aplikace na kartě „Materials“, která slouží k definování materiálových dat a skupin uzlů svázaných s konkrétním materiálem.

#### 4.4.1 Členění vstupního textového souboru

Vstupní textový soubor je členěn do několika sekcí. Začátek každé sekce je označen klíčovým slovem na samostatném řádku. Klíčová slova<sup>5</sup> jsou následující: MATERIALS, LOADS, SOURCES, BLOCKS, HISTORY a SIGMAFMETHOD. Každá ze sekcí je ukončena klíčovým slovem následující sekce nebo koncem textového vstupního souboru. Doporučuje se zachovat pořadí sekcí, jak jsou uvedeny ve výčtu:

**MATERIALS** Sekci lze členit do oddělených skupin. Skupina nejprve obsahuje výčet uzlových bodů svázaných s daným materiálem. Tento výčet začíná písmenem „N“ a je po uvedení všech uzlů (náležících danému materiálu) ukončen znakem „/“. Za seznamem uzlů následují parametry materiálu ve formě mechanických vlastností ( $R_m$ ,  $R_p$ ,  $E$ ,  $Z$ ), zadaných redukčních koeficientů pro konstrukci únavových křivek ( $n_N$ ,  $n_\sigma$ ,  $\varphi_S$ ), hodnoty koeficientu koncentrace elastických napětí ( $\alpha$  a složky jeho směrového vektoru  $V_1$ ,  $V_2$

<sup>5</sup>Klíčová slova jsou citlivá na velká a malá písmena Case Sensitive.

a  $V_3$ ) a hodnota reziduálního napětí ( $\sigma_0$ ). Tyto parametry jsou opět označeny příslušným klíčovým slovem<sup>5</sup>, za kterým následuje hodnota parametru<sup>6</sup>.

**LOADS** V této sekci se definují stavy zatížení ve formě lineární kombinace vstupních údajů (plynoucích ze vstupních textových souborů). Zátěžové stavy jsou definované pomocí lichého počtu za sebou jdoucích hodnot oddělených mezerami. Vstupní údaje pro jednotlivé stavy jsou ukončeny znakem „/“.

První hodnota je celé číslo. To udává označení definovaného stavu zatížení (pro každý stav zatížení musí být tato hodnota přirozeně jiná). Následné dvojice hodnot jsou dány postupně násobitelem a označením zdroje kombinovaných vstupních dat. Celočíslné označení zdrojů je definováno v následující sekci „SOURCES“. Násobitel lze zadat jako číslo ve formátu „floating point“ (např.: 15.3, případně 1.53e1)<sup>7</sup>.

**SOURCES** Slouží pro zadání cest ke vstupním textovým souborům a přiřazují k nim celočíselné označení, které se používá při tvorbě zátěžových stavů. Na každém řádku v této sekci se uvede celočíselné označení zdroje a po mezeře následuje cesta (relativní či absolutní) ke vstupnímu textovému souboru.

**BLOCKS** Posloupností zátěžových stavů lze definovat provozní režimy jako je např.: tlaková zkouška, nahřátí, vychlazení, aj. Tyto posloupnosti lze pak logicky shlukovat do větších celků, které se nazývají bloky zatížení.

Bloky mohou reprezentovat reálnou posloupnost provozních režimů logické části historie provozu zařízení, např.: jednu palivovou kampaň jaderného reaktoru. Nebo v případě nově konstruovaných zařízení mohou tvořit logické celky provozních režimů, např.: utěsnění zařízení → tlaková zkouška → nahřátí na provozní teplotu → změny výkonu → vychlazení → roztěsnění. Zátěžový blok se ve vstupním souboru definuje nejprve celočíselným označením, za kterým následuje posloupnost zátěžových stavů. Vstupní údaje pro jednotlivé bloky se oddělují mezerami a ukončují se znakem „/“.

**HISTORY** Historie udává posloupnost definovaných bloků v historii zatěžování. Je dána dvojicemi za sebou řazených čísel. První charakterizuje označení bloku a druhé počet opakování tohoto bloku. Celá historie se ukončí znakem „/“.

**SIGMAFMETHOD** Sekce definuje použitou metodu pro přepočítání elastických napětí na pružně-plastický stav. Zadává se pomocí textového řetězce v podobě „neuber“ nebo „glinka“. Jestliže je zadán odlišný řetězec nebo žádný,

---

<sup>6</sup>Napětí a modul pružnosti se zadávají v MPa.

<sup>7</sup>V celém textovém vstupním souboru je nutné jako desetinný oddělovač používat tečku.

pak program automaticky použije konzervativnější metodu Neubergera, viz kapitola 3.3.1. Označením „glinka“ se rozumí metoda ekvivalentní energie, viz kapitola 3.3.2.

Vytvořený vstupní textový soubor lze načíst příkazem „open“ v záložce „file“. Po načtení se v grafickém rozhraní objeví veškerá nadefinovaná data a lze tak snadno provést jejich kontrolu. Do vstupního textového souboru můžeme vkládat poznámky, musí však být zakomentovány znakem ‘;’<sup>8</sup>.

## 4.5 Použitá teorie

Veškerou naprogramovanou teorii můžeme dohledat v kapitole 3. Aplikace umožňuje transformovat vstupní časovou posloupnost složek tenzoru napětí na tři složky maximálních smykových napětí ( $\sigma_{ij}, \sigma_{jk}, \sigma_{ki}$ ) ve třech vzájemně kolmých rovinách, viz kapitola 3.9. Následně provádí přepočítání elastických napětí  $\sigma_H(t)$  na elasto-plastický stav napjatosti  $\sigma_F(t)$  dle postupů popsanych v kapitole 3.3. Navazuje dekompozice časových průběhů na cykly  $\sigma_{aF}$  dle metod uvedených v kapitole 3.4. Výsledně pak aplikace počítá dílčí poškození pomocí křivek únavové životnosti, viz kapitola 3.6. Výsledná hodnota kumulace únavového poškození se stanoví na základě Palmgren-Minerovy hypotézy, jak je zmíněno v kapitole 3.8.

## 4.6 Nastavení a provedení výpočtu

Aplikace umožňuje nastavení několika variabilních možností výpočtu. Lze volit mezi různými způsoby: (1) přepočítání na elasto-plastický stav napjatosti ve vrubu, (2) postup dekompozice časového průběhu a (3) použití únavových křivek. Tento výběr se provádí na kartě „solution“. Náhled karty je vyobrazen na obrázku 4.3. Spustit výpočet lze tlačítkem „solve“ na téže kartě aplikace.

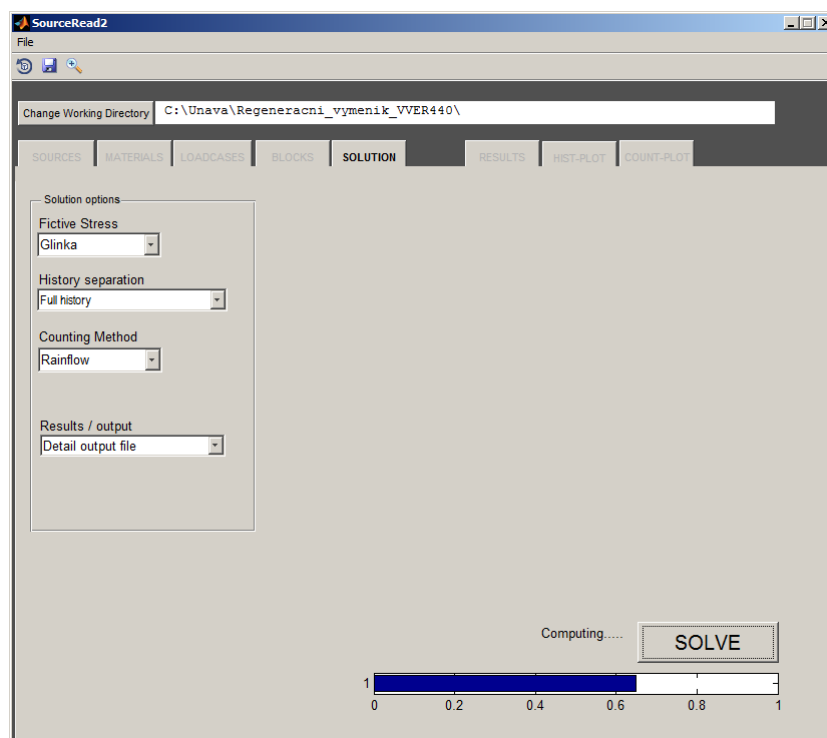
### 4.6.1 Načtení vstupních dat

Při načítání vstupních dat jde především o práci s textovými řetězci, pro které má software MATLAB spoustu předdefinovaných funkcí. Rovněž jsou v programu Matlab dostupné mnohé funkce známé z jazyka C.

Program načítá jednotlivé vstupy ze vstupních textových souborů postupně pro jednotlivé řešené uzly a tvoří z nich tenzory napětí. Ty vzájemně kombinuje dle definovaných zátěžových stavů a seřazuje stavy za sebe do trojrozměrného pole dle jejich posloupnosti definované v blocích a historii. Každému takto načtenému poli přísluší vektor hodnot z materiálové karty.

---

<sup>8</sup>Text který se nachází za symbolem ‘;’ se ve vstupním textovém souboru chápe jako poznámka.



Obr. 4.3: Náhled zobrazení aplikace na kartě „Solution“ (při puštění výpočtu). Karta slouží k nastavení a spuštění výpočtů.

## 4.6.2 Sestavení posloupnosti zatížení

Z pole, které reprezentuje posloupnost složek tenzoru napětí v čase, se v každém posloupném kroku vypočítají tři hlavní napětí. Ta se indexují nikoli dle jejich algebraické velikosti, nýbrž dle postupu popsáném v kapitole 3.9. Z posloupnosti hlavních napětí se vypočítá posloupnost hodnot redukovaných napětí, resp. maximálních smykových napětí. Ta jsou stále výsledkem elastické analýzy.

## 4.6.3 Přepočet elastického stavu napjatosti na elasto-plastický stav napjatosti ve vrubu konstrukce

Dojde-li na časové posloupnosti redukované hodnoty napětí k překročení meze úměrnosti, dochází k přepočtu elastického stavu napjatosti na stav pružně-plastický. Na základě tahových vlastností materiálu se konstruuje závislost skutečného napětí na deformaci  $\sigma(\epsilon)$ . Využitím této závislosti se pro posloupnost elastického redukovaného napětí dle zvoleného postupu (Neuber/Glinka) stanoví posloupnost fiktivního napětí  $\sigma_F(t)$ .

## 4.6.4 Dekompozice posloupnosti na jednotlivé cykly

Vytvořená počítačová aplikace umožňuje využít dvou základních přístupů pro dekompozici posloupnosti zatížení na jednotlivé cykly, resp. polocykly. Jedním je postup popsáný v normách [2, 3] a druhým pak fyzice bližší využívající metodu stékání deště [15]. Cyklem se rozumí rozkmit fiktivního napětí, který je úměrný rozkmitu deformace. Pro dekomponované cykly, resp. polocykly se stanoví střední hodnota fiktivního napětí  $\sigma_{mF}$  a koeficient asymetrie napětí  $r_\sigma$ .

## 4.6.5 Výpočet dílčích poškození

Program umožňuje volbu únavových křivek, které mají být zahrnuty do výpočtu. Jedná se o naprogramované křivky (3.73) či (3.74) dle [3, 4] a některé tabelárně definované únavové křivky dle [2]. Na základě těchto křivek, které nám udávají závislost  $\sigma_{aF}(N)$ , můžeme ze znalosti hodnoty amplitudy fiktivního napětí  $\sigma_{aF}$  stanovit pro každý cyklus hodnotu dovoleného počtu cyklu  $N_i$ .

Křivky dané vztahem (3.73) lze přímo upravit do podoby  $N(\sigma_{aF})$  a dovolený počet cyklů pro danou amplitudu fiktivního napětí můžeme ze vztahu exaktně vypočítat. Dovolенý počet cyklů  $N_i$  dle křivek daných vztahem (3.74) řeší aplikace numericky. Numerické řešení je naprogramováno pomocí metody půlení intervalu<sup>9</sup>. Při použití tabelovaných křivek dle normy ASME [2] stanoví aplikace dovolený počet cyklů  $N_i$  na základě interpolace.

Při znalosti dovoleného počtu cyklů  $N_i$  můžeme stanovit hodnotu kumulace únavového poškození  $D$  pomocí postupu, který je zmíněn v kapitole 3.8. Při současném užití více křivek únavové životnosti (např.: vztahy (3.73) a (3.74)) je pak každý cyklus charakterizován nejvyšší stanovenou hodnotou dílčího poškození  $D_i$ .

Vypočtené hodnoty součinitele kumulace únavového poškození  $D$  pro všechny řešené uzly zobrazuje aplikace na kartě „Results“. Zde můžeme výsledky setřídít dle čísla řešeného uzlu, nebo dle výsledné hodnoty kumulace únavového poškození  $D$ . Náhled výpisu výstupních hodnot únavového poškození v prostředí aplikace je vyobrazen na obrázku 4.4.

Program rovněž výsledky zapisuje do výstupních textových souborů, které jsou blíže popsány v následující kapitole.

---

<sup>9</sup>Pro urychlení algoritmu by bylo vhodnější, vzhledem k exponenciální povaze křivek, využít metodu tečen (Newton-Raphsonova metoda) v log-log souřadnicích.

SourceRead2

File

Change Working Directory C:\Unava\Regeneracni\_vymenik\_VVER440\

SOURCES MATERIALS LOADCASES BLOCKS SOLUTION RESULTS HIST-PLOT COUNT-PLOT

Read Results

|    | Node number | Fatigue Usage Factor |
|----|-------------|----------------------|
| 1  | 158384      | 0.8562               |
| 2  | 160265      | 0.7980               |
| 3  | 158371      | 0.7117               |
| 4  | 160404      | 0.5809               |
| 5  | 440775      | 0.4084               |
| 6  | 440757      | 0.4082               |
| 7  | 195806      | 0.3937               |
| 8  | 203026      | 0.3775               |
| 9  | 444153      | 0.3747               |
| 10 | 444201      | 0.3739               |
| 11 | 195818      | 0.3276               |
| 12 | 203301      | 0.3163               |
| 13 | 196620      | 0.2927               |
| 14 | 196605      | 0.2921               |
| 15 | 203074      | 0.2763               |
| 16 | 203349      | 0.2707               |
| 17 | 198481      | 0.0646               |
| 18 | 200051      | 0.0612               |
| 19 | 200866      | 0.0545               |
| 20 | 413519      | 0.0357               |
| 21 | 198461      | 0.0338               |
| 22 | 200035      | 0.0301               |
| 23 | 247894      | 0.0275               |
| 24 | 242860      | 0.0262               |
| 25 | 204049      | 0.0261               |
| 26 | 430865      | 0.0248               |
| 27 | 410611      | 0.0241               |
| 28 | 201541      | 0.0220               |
| 29 | 430855      | 0.0215               |

Sort by Node Number

Sort by Resulting FUF

Obr. 4.4: Náhled zobrazení aplikace na kartě „Results“ s vyobrazenými hodnotami součinitelů únavové životnosti pro jednotlivé řešené uzly.

## 4.7 Výstupní textové soubory

Aplikace v průběhu výpočtu zapisuje výsledky a mezi výsledky<sup>10</sup> do textových souborů. Generují se dva výstupní soubory. První s názvem „result\_file.txt“ je obecný soubor s hodnotami výsledných součinitelů únavového poškození pro jednotlivé uzly. Hodnoty jsou v něm seřazeny ve dvou sloupcích, v prvním je uvedeno označení uzlu a v druhém hodnota poškození  $D$ .

Druhým je výstupní textový soubor s názvem „output\_file.txt“, ve kterém jsou uvedeny veškeré mezivýsledky výpočtu. Člení se na po sobě jdoucí sekce definované pro jednotlivé uzly. Každá sekce je nejprve označena číslem uzlu. Sekce se dále dělí do čtyř podsekcí. První podsekce nám udává historii zatížení, která je zde charakterizována devíti sloupci číselných hodnot. Sloupec charakterizuje celou posloupnost zatížení. První tři sloupce jsou posloupnosti hodnot elastických redukovaných napětí  $\sigma_{ij}, \sigma_{jk}, \sigma_{ki}$ , následují tři posloupnosti hodnot fiktivního napětí  $\sigma_F^{(ij)}, \sigma_F^{(jk)}, \sigma_F^{(ki)}$  a poslední tři sloupce reprezentují posloupnost hodnot skutečného napětí  $\sigma^{(ij)}, \sigma^{(jk)}, \sigma^{(ki)}$  v celé zatěžovací historii. Zbylé tři podsekcce lze chápat jako seznam dekomponovaných cyklů a polocyklů pro jednotlivé směry  $ij, jk, ki$ . Pro každý cyklus je uvedena hodnota minimální, maximální a střední hodnoty fiktivního napětí, koeficient asymetrie napětí, počet opakování cyklu a hodnoty dílčích poškození (stanovených dle jednotlivých, do výpočtu zahrnutých únavových křivek). Tyto dílčí poškození  $D_i$  jsou označeny jako „D1“ až „D5“. D1-D4 udávají hodnotu  $D_i$ , stanovenou dle křivek (3.73), resp. (3.74) a hodnota D5 je hodnotou  $D_i$ , určenou na základě zvolené tabelované křivky dle normy [2].

## 4.8 Grafické výstupy aplikace

Vytvořená aplikace nabízí možnost grafické interpretace výstupních a vstupních dat. Tyto funkcionality jsou dostupné přes karty „Hist-plot“ a „Count-plot“.

Na kartě „Hist-plot“ je možné vykreslovat průběhy lineárních napětí  $\sigma_{ij}, \sigma_{jk}, \sigma_{ki}$ , fiktivních napětí  $\sigma_F^{(ij)}, \sigma_F^{(jk)}, \sigma_F^{(ki)}$ , skutečných napětí  $\sigma^{(ij)}, \sigma^{(jk)}, \sigma^{(ki)}$  a celkové deformace  $\epsilon^{(ij)}, \epsilon^{(jk)}, \epsilon^{(ki)}$ , pro celou historii zatěžování. Rovněž zde můžeme nechat vykreslit tvar hysterezní křivky a identifikovat tak jednotlivé cykly. Na hysterezní křivce můžeme vyobrazit polohy reprezentující jednotlivé stavy zatížení, viz obrázek 4.5. Ty jsou označeny pomocí čísla zátěžového stavu, jak byl v úloze definován.

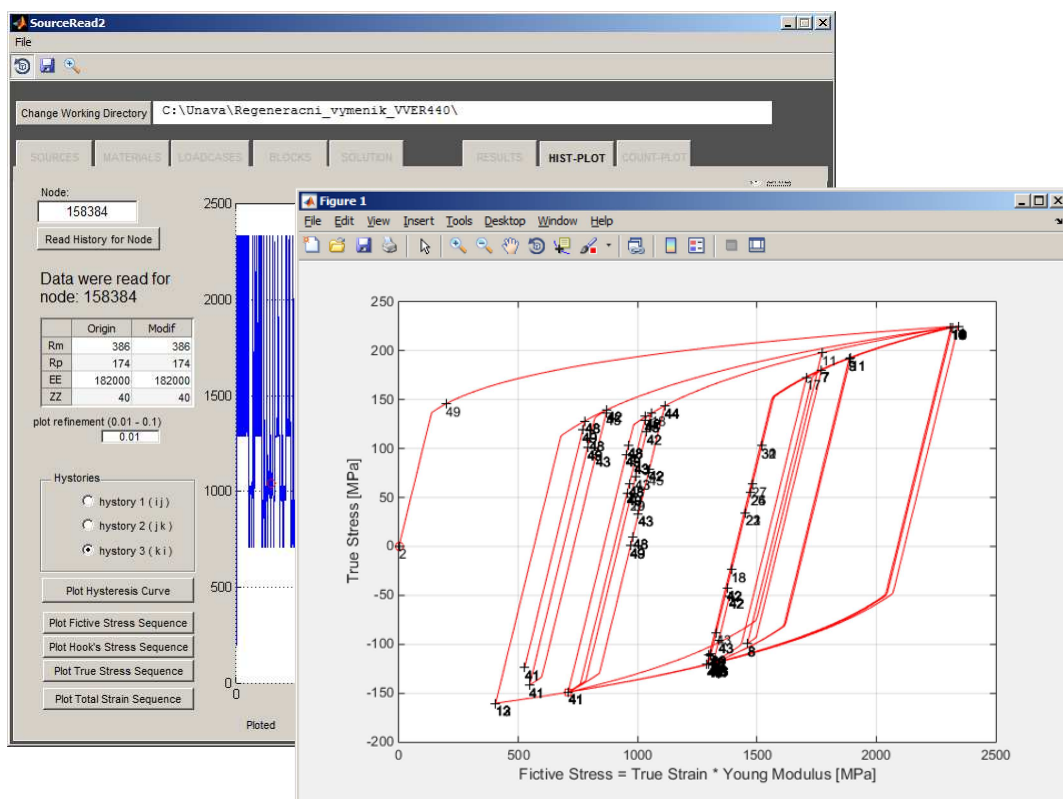
Další užitečnou grafickou funkcí je možnost vykreslení histogramu dekomponovaných cyklů. Histogram je trojrozměrný, kdy na jedné horizontální ose jsou vyneseny hodnoty amplitudy fiktivních napětí  $\sigma_{aF}$ , na druhé střední hodnoty fik-

<sup>10</sup>Pokud je tato volba nastavena na kartě „Solution“.

tivního napětí  $\sigma_{mF}$  a na ose vertikální je četnost jednotlivých skupin cyklů  $n_i$ . Náhled grafického rozhraní aplikace s vykresleným histogramem je znázorněn na obrázku 4.6.

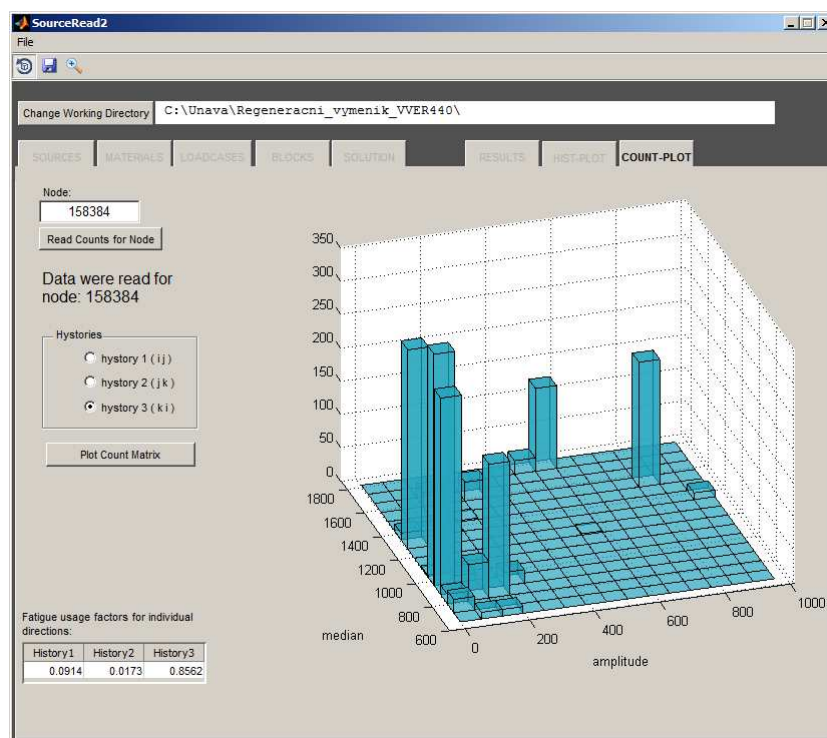
Program také umožňuje vykreslit tento obrázek v pokročilejším režimu, kdy vykresluje jednotlivé polocykly jako body (netřídí je do sloupců histogramu, jako v předešlém případě). Poloha vykreslených bodů v 3D diagramu je zde opět závislá na amplitudě cyklu  $\sigma_{aF}$ , střední hodnotě fiktivního napětí  $\sigma_{aF}$  a četností jeho opakování  $n_i$ . Tyto body jsou navíc barevně rozlišeny dle celkového dílčího poškození  $D_i = \frac{n_i}{N_i}$ . Pro pět z hlediska celkového poškození  $D_i$  nejvýznamnějších polocyklů a pro všechny polocykly s větším poškozením než  $10^{-3}$  jsou v diagramu vypsány hodnoty dílčích poškození  $D_i$  jako i příspěvek jediného daného polocyklu  $1/N_i$ . Náhled tohoto zobrazení je patrný z obrázku 4.7.

Na základě tohoto zobrazení (jednotlivých cyklů a jim příslušných hodnot  $D_i$ ) a grafu ve formě hysterezních křivek (s vyobrazenými polohami a značením jednotlivých stavů zatížení) můžeme přímo určit, které provozní režimy jsou z hlediska čerpání únavové životnosti rozhodující a které naopak nevýznamné. Rovněž



**Obr. 4.5:** Grafické rozhraní aplikace při vykreslování hysterezních křivek.



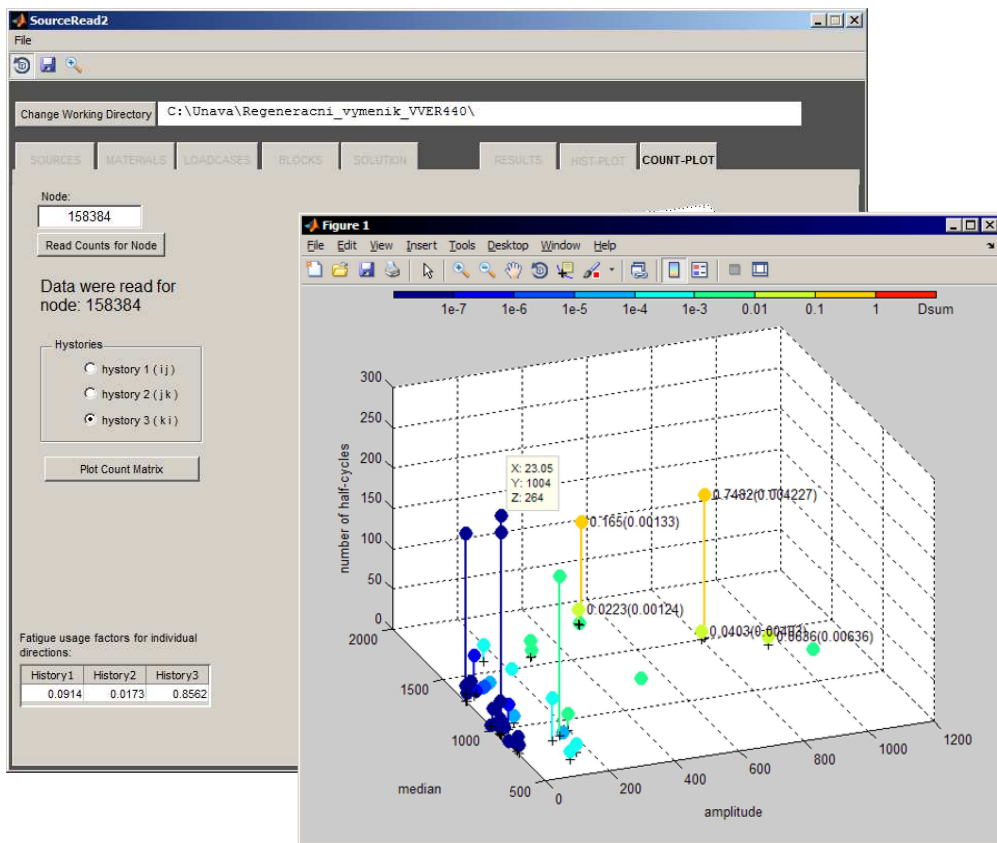


**Obr. 4.6:** Náhled zobrazení aplikace na kartě „Countplot“, která slouží k vykreslení histogramu dekomponovaných cyklů.

můžeme takto odhalit nesrovnalosti v zadaných vstupech (posloupnost režimů) či předpokladech provedených MKP výpočtů<sup>11</sup>. Tento nástroj také pomáhá rozhodnout na které režimy je nutné se zaměřit pokud chceme počítat amplitudy deformace přesněji pomocí elasto-plastického MKP výpočtu<sup>12</sup>.

<sup>11</sup>V případech, kdy významná čerpání únavové životnosti náleží provozním režimům, které lze expertně považovat za nevýznamné

<sup>12</sup>Není účelné počítat celou historii provozu a při pouze expertní volbě významných teplotních režimů na základě MKP bychom mohli některé vzájemné vazby provozních stavů opomenout.



Obr. 4.7: Náhled zobrazení aplikace na kartě „Countplot“, vykreslení barevně rozlišených skupin polocyklů s vypsáním dílčím poškozením jednoho polocyklu  $1/N_i$  a příslušné skupiny polocyklů  $n_i/N_i$ .

## Kapitola 5

# Využití aplikace v praxi při hodnocení komponent reaktoru VVER 1000

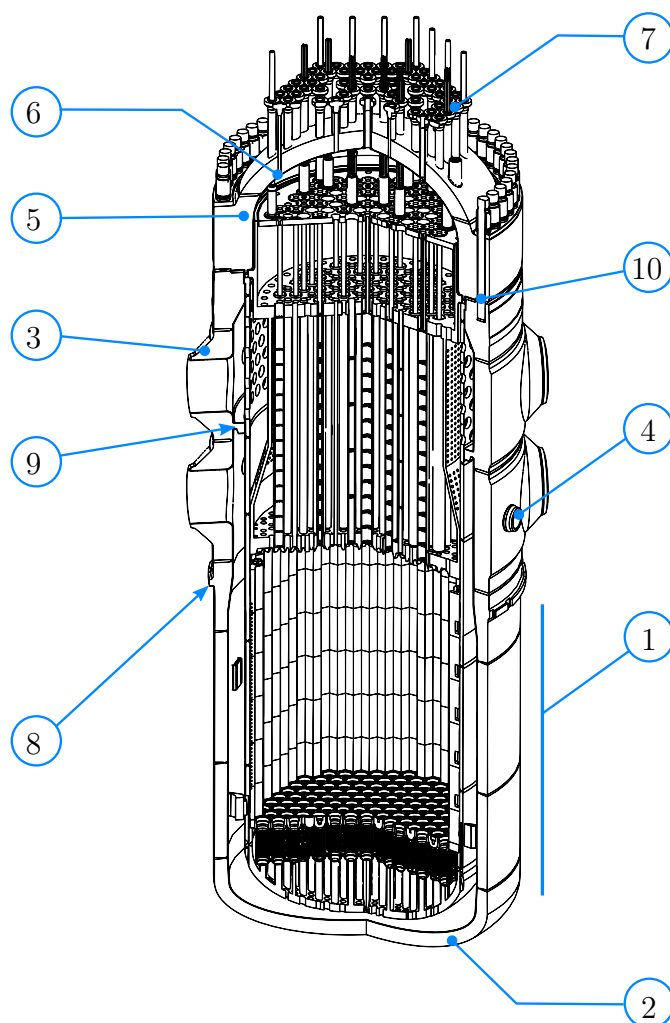
V této kapitole si uvedeme názorné příklady únavových výpočtů pro hodnocené komponenty jaderného reaktoru VVER 1000. Většina zde uvedených informací<sup>1</sup> reflektuje praktické případy řešené zde popsanými postupy a provedené při hodnocení životnosti tlakové nádoby reaktoru (TNR) 3. bloku Rovenské jaderné elektrárny. Přehodnocení životnosti se provádělo za účelem licencování bloku pro prodloužený zaprojektový provoz. Požadavkem hodnocení bylo prokázat bezpečnost provozu pro celkovou dobu životnosti 40, resp. až 60 let.

Blok je v provozu od roku 1986 a aktuálně má za sebou 28 palivových kampaní. Při hodnocení únavy se uvažuje reálná provozní historie bloku. Na jejím základě se stanoví predikce budoucího provozu. Predikci můžeme stanovit pomocí extrapolace počtu doposud proběhlých provozních režimů. Predikce musí obsahovat některé hypotetické havarijní situace. To je z hlediska hodnocení únavy značně nestandardní, nicméně je to požadavek Ukrajinského státního dozoru (pevný a neměnný<sup>2</sup>). Se-stavení provozní historie je blíže popsána v následující kapitole.

---

<sup>1</sup>Některé z uváděných informací nejsou zcela výlučnou prací autora. Především tvorba výpočtových modelů a provedených MKP výpočtů je mnohdy dílem širší skupiny pracovníků firmy ÚJV Řež, a. s.

<sup>2</sup>V důsledku historické jaderné havárie na Ukrajině má ДІЯРУ velmi silné postavení. Defi-nované požadavky jsou neměnné. Všechny předložené analýzy podléhají přísné expertize.



**Obr. 5.1:** Tlaková nádoba, víko a vnitřní vestavba reaktoru VVER 1000, 1–válcová část, 2–dno, 3–nátrubek HCP, 4–nátrubek SAOZ, 5–víko, 6–vetknutí nátrubku do víka, 7–příruby nátrubků HB, 8–opěrný nákrůžek, 9–dělicí prstenec a 10–hlavní přírubový spoj (HPS).

## 5.1 Provozní historie bloku a predikovaný provoz

Sestavení provozní historie je obsahem dokumentu [32]. Zde byly analyzovány jednotlivé provozní podmínky a historické záznamy provozu bloku. Z provozních záznamů byla sestavena posloupnost registrovaných režimů pro 26 palivových kampaní, které odpovídají 27letům provozu. Historické záznamy byly korigovány, aby v příslušných palivových kampaních souhlasily počty vzájemně si odpovídajících režimů (např.: zvýšení výkonu vs. snížení výkonu, uvedení zařízení na provozní

teplotu vs. jeho odstavení). Takto ošetřená provozní historie je následně podkladem pro tvorbu predikce budoucího provozu. Seznam registrovaných provozních režimů je uveden v tabulce 5.1. Jsou tam uvedeny také predikce počtu provozních režimů pro 40, resp. 60 let.

Pro hodnocení únavy je také rozhodující přesná posloupnost provozních režimů. Na jejím základě se přepočítává elastický stav napjatosti na elastoplastický. Proto způsob jakým jsou režimy za sebou řazeny, rozhoduje o výsledné hodnotě poškození. Dosavadní provoz se dá, až na malé korekce, stanovit poměrně přesně. Při definování predikce budoucího provozu je nutné vyjít z logického řazení provozních režimů, např.: vytvořit si posloupnost na základě vybrané proběhlé palivové kampaně, nebo využít typové bloky zatížení.

Posloupnost provozních režimů v jednotlivých kampaních (sestavená v rámci práce [32]) je uvedena v tabulce 5.2. Predikce posloupnosti režimů pro 60 let provozu je uvedena v příloze B v tabulce B.1. V důsledku požadavku zahrnutí havarijních režimů do predikované doby života je nutné vytvořit predikci posloupnosti pro 40 let provozu odděleně. Predikce pro 40letý provoz je uvedena v tabulce B.2. Členění posloupnosti je v tabulkách uvedeno odděleně pro jednotlivé kampaně.

Výsledná posloupnost provozních režimů se pro jednotlivá tělesa nahrazovala posloupností zátěžových stavů. Každý režim byl nahrazen minimálně dvojicí (když šlo o změnu mezi dvěma stacionárními režimy) po sobě jdoucích zátěžových stavů. V případě režimů, charakterizovaných rychlými tlakově-teplotními ději, bylo potřeba definovat zátěžové stavy na základě vypočtené časové změny napjatosti v tělesech. Tyto závislosti se následně analyzují a pro každý řešený uzel (pro každý z tranzientů) se stanoví posloupnost lokálních extrémů hlavních napětí. Lokální extrémy pak pro řešený režim tvoří posloupnost zátěžových stavů.

Ne všechny provozní režimy se při hodnocení uplatňují. Pokud v oblasti řešeného konstrukčního uzlu jsou v průběhu některého režimu změny teploty a tlaku nevýznamné, může se daný režim na základě expertního posouzení z analýzy vypustit. Průběhy provozních parametrů v průběhu režimů jsou rovněž obsahem dokumentu [32].

Posloupnosti tvoří základní vstup do analýzy únavy jednotlivých komponent reaktoru. Provedené analýzy na jednotlivých tělesech reaktorové nádoby jsou uvedeny v následujících kapitolách.

**Tab. 5.1:** Seznam provozních režimů na 3. bloku Rovenské JE, včetně počtu dosažených v průběhu dosavadního provozu a predikovaného počtu jednotlivých režimů v prodlouženém provozu.

| Označení | Popis režimu   | Projektový počet [33] | Dosavadní provoz | Predikce            |                     |
|----------|--|-----------------------|------------------|---------------------|---------------------|
|          |  |                       |                  | 40 let              | 60 let              |
| 1.1.1    | Utěsnění hlavní příruby                                  | 100                   | 53               | 75                  | 112                 |
| 1.2.1    | Těsnostní hydrozkouška I.O. (18.4 -20.4 MPa)             | 100                   | 78               | 104                 | 148                 |
| 1.2.2    | Těsnostní hydrozkouška II.O. (8.5 MPa)                   | 100                   | 31               |                     |                     |
| 1.2.3    | Pevnostní hydrozkouška I.O. (25.4 MPa)                   | 30                    | 8                | 12                  | 19                  |
| 1.2.4    | Pevnostní hydrozkouška II.O. (11.2 MPa)                  | 30                    | 11               |                     |                     |
| 1.3      | Plánovaný ohřev s rychlostí 20°C/hod.                    | 130                   | 81               | 114                 | 161                 |
| 1.4.1    | Přechod z „horkého“ stavu na nominální výkon             | -                     |                  | 367                 | 512                 |
| 1.4.2    | Odstavení reaktoru do „horkého“ stavu                    | -                     |                  | 181                 | 255                 |
| 1.6      | Chybné zapracování havarijní ochrany                     | 150                   | 23               | 28                  | 36                  |
| 1.7      | Plánované odstavení HCČ                                  | 200 <sub>/HCČ</sub>   | 62/69/56/54      | 93 <sub>/HCČ</sub>  | 133 <sub>/HCČ</sub> |
| 1.8      | Spuštění HCČ (dříve odstavené větve)                     | 230 <sub>/HCČ</sub>   | 69/75/68/62      | 106 <sub>/HCČ</sub> | 156 <sub>/HCČ</sub> |
| 1.9      | Odstavení VTO a jeho následné spuštění                   | 300                   | 68               |                     |                     |
| 1.10     | Zkouška pojistných ventilů KO                            |                       | 33               |                     |                     |
| 1.11     | Zkouška pojistných ventilů PG                            |                       | 34               |                     |                     |
| 1.12     | Zkouška pasivního uzlu SAOZ (uzly 1 až 4)                | 50 <sub>/uzel</sub>   | 16/16/17/19      | 27 <sub>/uzel</sub> | 41 <sub>/uzel</sub> |
| 1.13     | Plánované odstavení s rychlostí 30°C/hod.                | 90                    | 78               | 104                 | 148                 |
| 1.14.1.1 | Roztěsnění hlavní příruby reaktoru                       | 100                   | 52               | 75                  | 112                 |
| 1.16     | Práce na výkonu vlastní spotřeby                         | 30                    | 1                |                     |                     |
| 2.1      | Odpojení HCČ   | 30 <sub>/HCČ</sub>    | 8/7/12/9         | 13                  | 23                  |
| 2.2      | Zavření ventilu turbíny                                  | 150                   | 42               | 52                  | 68                  |
| 2.3      | Výpadek bloku, přívod vody ( $T=5-160^{\circ}\text{C}$ ) | 10                    | 2                | 3                   | 6                   |
| 2.4      | Zastavení přívodu vody do parogenerátoru                 | 30                    | 3                | 4                   | 8                   |
| 2.5      | Neřízené vytažení RK z AZ                                | 30                    | 0                | 2                   | 4                   |
| 2.6      | Snížení koncentrace kyseliny borité                      | 30                    | 0                | 2                   | 4                   |
| 2.7      | Režim úniku v PG: roztržení teplosměnné trubky           | 30                    | 0                | 2                   | 4                   |
| 2.8      | Chybný vstřík do KO ze systému doplňování                | 10                    | 0                | 2                   | 4                   |
| 2.9      | Náhly přechod na doplňování I.O. (60-70°C)               | 30                    | 1                | 5                   | 7                   |
| 2.10     | Havarijní změna frekvence v síti                         | 55                    | 5                | 10                  | 15                  |
| 2.11     | Narušení odvodu tepla z hermetické zóny                  | 30                    | 0                | 2                   | 4                   |
| 2.12     | Urychlené vychlazování s rychlostí 60 °C/hod.            | 10                    | 1                | 4                   | 8                   |
| 2.13     | Nesprávné zafungování havarijní ochrany                  | 150                   | 41               | 53                  | 74                  |
| 3.1      | Malý únik: roztržení potrubí I.O. s $D < 100$ mm         | 15                    | 1                | 4                   | 6                   |
| 3.2      | Velký únik: roztržení potrubí I.O. s $D > 100$ mm        | 1                     | 0                | 1                   | 1                   |
| 3.3      | Nezavření pojistného ventilu KO                          | 3                     | 0                | 2                   | 2                   |
| 3.4      | Nezavření pojistného ventilu PG                          | 8                     | 0                | 4                   | 4                   |
| 3.5      | Nezavření ventilu systému odvodu páry                    | 8                     | 0                | 4                   | 4                   |
| 3.6      | Vytlačení RK při roztržení přívodního kanálu             | 5                     | 0                | 2                   | 2                   |
| 3.7      | Zaseknutí nebo roztržení oběžného kola HCČ               | 1 <sub>/HCČ</sub>     | 0                | 2                   | 2                   |
| 3.8      | Roztržení parovodu PG                                    | 1 <sub>/PG</sub>      | 0                | 4                   | 4                   |
| 3.9      | Roztržení potrubí napájecí vody PG                       | 1 <sub>/PG</sub>      | 0                | 4                   | 4                   |
| 3.10     | Roztržení parního kolektoru                              | 1                     | 0                | 4                   | 4                   |

**Tab. 5.2:** Posloupnost provozních režimů v provozu 3. Bloku Rovenské JE.

| Kamp. | Posloupnost režimů   |
|-------|--|
| 1     | 1.1.1 1.2.3 1.2.1 1.3 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.13 1.2.1 1.3 1.13<br>1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.6 1.4.1 1.6 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.6 1.4.1 1.4.2<br>1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3<br>1.4.1 2.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.1.2 1.4.1 1.6 1.4.1 1.6 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 1.4.2<br>1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.2 1.4.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 2.2 1.4.1 1.6 1.4.1 1.4.2<br>1.4.1 2.1.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.8.2 2.1.2 1.4.1 2.1.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2<br>1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 2.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2<br>1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.8.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.8.2<br>1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1 |
| 2     | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.3 1.4.1 1.6 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.4.1 1.7.2 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1<br>2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.13 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.13 1.4.1<br>1.6 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.7.2 1.8.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.7.2 1.8.2 1.2.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.6<br>1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.7.2 1.8.2 1.8.2 2.13 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.7.2 1.8.2 1.3 1.4.1<br>1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1   |
| 3     | 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.7.2<br>1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2<br>1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2<br>1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1  |
| 4     | 1.1.1 1.2.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2<br>1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.7.2 1.8.2 1.8.2 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2<br>1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.13 1.4.1 2.13 1.4.1 1.6 1.13 1.14.1.1  |
| 5     | 1.1.1 1.12.4 1.2.1 1.2.1 1.14.1.1 1.1.1 1.3 1.2.1 1.13 1.2.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.13 1.2.1 1.3<br>1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.1.2 1.8.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1   |
| 6     | 1.1.1 1.2.3 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 2.13<br>1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.1.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1  |
| 7     | 1.1.1 1.12.4 1.2.1 1.2.1 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.1.2 1.4.1 1.4.2 1.13<br>1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1   |
| 8     | 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.13 1.4.1 2.13 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.13<br>1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.13 1.13 1.14.1.1   |
| 9     | 1.1.1 1.12.4 1.2.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1<br>1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1  |
| 10    | 1.1.1 1.12.4 1.2.3 1.2.1 1.3 1.4.1 2.2 1.4.1 2.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 2.13<br>1.4.1 2.10 1.4.1 1.6 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1   |
| 11    | 1.1.1 1.3 1.2.1 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.13 1.3 1.2.1 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13<br>1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1  |
| 12    | 1.1.1 1.2.1 1.12.4 1.3 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13<br>1.14.1.1   |
| 13    | 1.1.1 1.2.1 1.12.4 1.3 1.13 1.2.1 1.3 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.10 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2<br>1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.3 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3<br>1.4.1 1.6 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.6 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1  |

pokračování na další straně

Tab. 5.2 – pokračování z předchozí strany

| Kamp. Posloupnost režimů |   |
|--------------------------|---|
| 14                       | 1.1.1 1.2.1 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.12.4 1.3 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2<br>1.13 1.3 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.13 1.2.1 1.14.1.1   |
| 15                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.1 1.2.1 1.12.4 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2<br>1.13 1.14.1.1  |
| 16                       | 1.1.1 1.2.1 1.12.4 1.3 1.4.1 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1   |
| 17                       | 1.1.1 1.2.1 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.12.4 1.3 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2<br>1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.2.3 1.14.1.1   |
| 18                       | 1.1.1 1.2.1 1.12.4 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 2.13 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13<br>1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.13 1.4.1 2.13 1.13 1.2.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2<br>1.13 1.14.1.1                                 |
| 19                       | 1.1.1 1.2.1 1.12.4 1.3 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.2.1<br>1.3 1.4.1 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1<br>1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1 |
| 20                       | 1.1.1 1.2.3 1.12.4 1.3 1.4.1 2.13 1.4.1 2.13 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1  |
| 21                       | 1.1.1 1.12.4 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.4 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.10 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1   |
| 22                       | 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 3.3 2.12 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1<br>1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1   |
| 23                       | 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.4 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1   |
| 24                       | 1.1.1 1.2.1 1.3 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1  |
| 25                       | 1.1.1 1.2.3 1.12.4 1.3 1.4.1 1.6 1.4.1 2.1.2 1.4.2 1.8.2 1.4.1 2.1.2 1.6 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1  |
| 26                       | 1.1.1 1.2.1 1.12.4 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.4.2 1.13 1.14.1.1  |



## 5.2 Válcová část, dno a rozdělovací prstenec tlakové nádoby reaktoru

Tlaková nádoba reaktoru VVER 1000 má přibližně válcový charakter. Ten je narušen pouze v oblasti hrdlové sekce, kde se nacházejí nátrubky (HCP, SAOZ a KIP). Těmto tvarovým odchylkám od válcové struktury tlakové nádoby je věnován prostor v jiných kapitolách (viz 5.3). V této kapitole práce se zaměříme na hodnocení té oblasti TNR, kterou můžeme chápat jako rotačně symetrickou. Do výpočtového modelu (viz následující kapitolu) můžeme proto zahrnout tyto rotačně symetrické části:

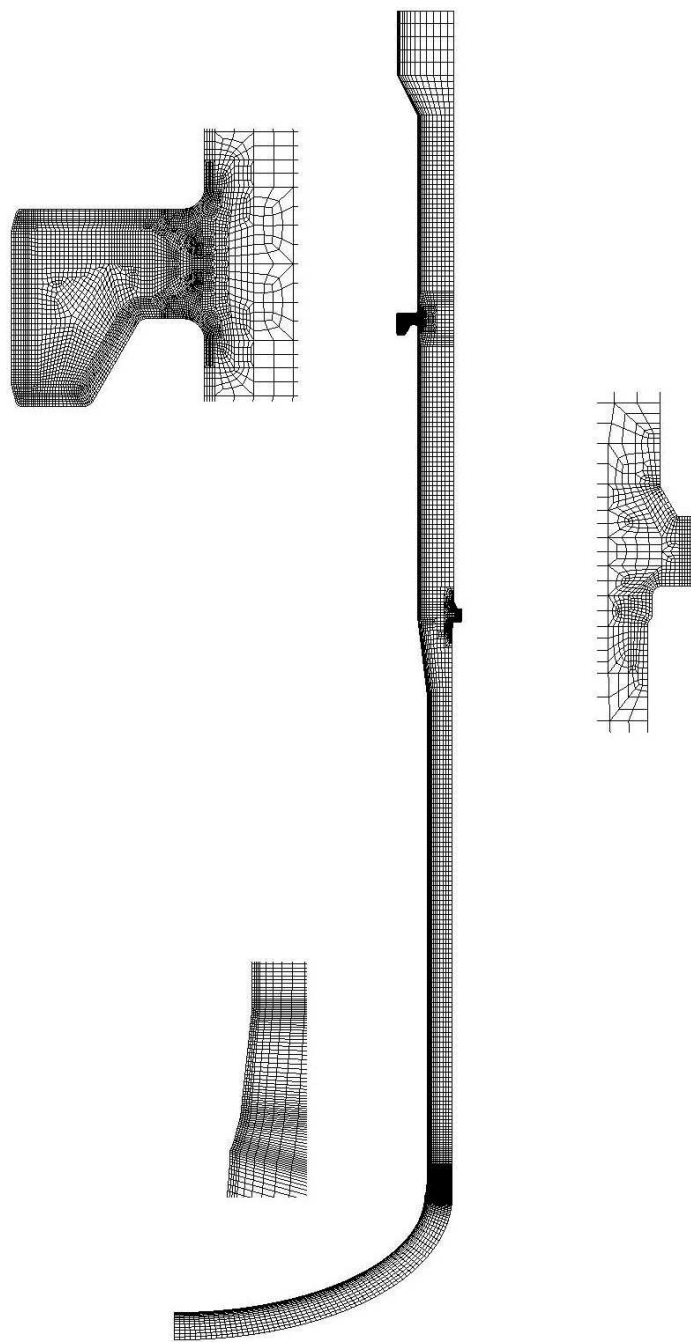
1. válcová část TNR,
2. dno,
3. dělicí prstenec.

### 5.2.1 Výpočtový model

Na obrázku 5.2 je vyobrazen výpočtový MKP model tlakové nádoby reaktoru (TNR). Ten reprezentuje její příčný průřez. Byl sestaven na základě výkresové dokumentace (schématicky viz. přílohu A). Pro tvorbu modelu byly využity kvadratické čtyřhranné elementy s rozšířenou integrací a předepsanou podmínkou rotační symetrie. Významné koncentrátoři napětí se nachází především v oblasti přechodu dna do válcové části v blízkosti svaru č. 2 (viz obrázek A.2), v oblasti osazení opěrného nákrůžku a v oblasti přivaření dělicího prstence. V těchto oblastech byla síť zjemněna do té míry, aby výsledky nebyly závislé na topologii diskretizace (citlivostní studie je provedena v [34]). Oblast přivaření dělicího prstence je významné místo z hlediska koncentrace teplotního napětí. V této oblasti se nachází velké množství různých materiálů se vzájemně rozdílnými teplotními roztažnostmi. V důsledku teplotních změn zde následně vznikají poměrně vysoká napětí.

### 5.2.2 Výpočty teplotních polí

Úloha vedení tepla byla řešena jako nelineární, vlastnosti materiálu jsou závislé na teplotě. Na vnitřním povrchu tlakové nádoby byla zadána okrajová podmínka třetího druhu. Byly zadány časově závislé hodnoty koeficientu přestupu tepla a teploty média, které byly stanoveny na základě termohydraulických analýz a jsou uvedeny v [32]. Okrajová podmínka byla rozdělena na dvě základní oblasti její aplikace. Jde o vnitřní povrch TNR pod a nad dělicím prstencem. Pro každou z těchto oblastí jsou jiné časové průběhy zadaných parametrů  $\alpha_T, T$ . Na vnějším povrchu byl předpokládán nulový přestup tepla (izolace), což je konzervativní předpoklad.



**Obr. 5.2:** Výpočtový MKP model válcové části, dna a rozdělovacího prstence tlakové nádoby reaktoru VVER 1000.

Výpočty časově proměnného teplotního pole byly provedeny pro tyto provozní režimy:

- 1.3 Plánovaný ohřev s rychlostí 20°C/hod.;
- 1.6 Chybné zapracování havarijní ochrany;
- 1.13 Plánované odstavení s rychlostí 30°C/hod.;
- 2.2 Uzavření ventilu turbíny 30°C/hod.;
- 2.3 Výpadek bloku, přívod vody ( $T = 5 - 160^{\circ}\text{C}$ );
- 2.4 Zastavení přívodu vody do parogenerátoru;
- 2.5 Neřízené vytažení RK z AZ;
- 2.6 Snížení koncentrace kyseliny borité;
- 2.7 Režim úniku v PG: roztržení teplosměnné trubky;
- 2.8 Chybný vstřík do KO ze systému doplňování;
- 2.9 Náhlý přechod na doplňování I.O. (60-70°C);
- 2.10 Havarijní změna frekvence v síti;
- 3.1 Malý únik: roztržení potrubí I.O. s  $D < 100$  mm;
- 3.2 Velký únik: roztržení potrubí I.O. s  $D > 100$  mm (včetně Du850);
- 3.3 Nezavření pojistného ventilu KO;
- 3.4 Nezavření pojistného ventilu PG;
- 3.5 Nezavření ventilu systému odvodu páry;
- 3.6 Vytlačení RK při roztržení přívodního kanálu;
- 3.7 Zaseknutí nebo roztržení oběžného kola HCČ;
- 3.8 Roztržení parovodu PG;
- 3.9 Roztržení potrubí napájecí vody PG;
- 3.10 Roztržení parního kolektoru;

Zbylé provozní režimy se neuvažují jako teplotně tranzientní úloha, ale vstupují do hodnocení jako přechod mezi stacionárními stavy.

Výsledné průběhy teplot pro vybrané režimy jsou vyobrazeny v příloze C. Lze si povšimnout významného teplotního gradientu v oblasti dělicího prstence při práci bloku na nominálním výkonu, viz obrázek C.1. Rozdíl teplot  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ ; odpovídá rozdílu teploty média na vstupu a výstupu. Tento teplotní rozdíl také podstatně přispívá k vyšším hodnotám napětí v tomto řešeném konstrukčním uzlu (ve studeném stavu, neboť teplota nenapjatého stavu je rovna teplotě nominálního provozu).

### 5.2.3 Lineárně-elastický výpočet napětí a deformace

Úloha mechaniky byla řešena jako lineárně-elastická a na identické síti jako úloha vedení tepla. Byly předepsány nulové posuvy ve vertikálním směru, nulové horizontální posuvy řezu dna na ose reaktoru (podmínka symetrie), která rovněž definovala osu rotačně-symetrické úlohy. Při použití MKP při určení teplotních napětí je vždy nutné stanovit teplotu nenapjatého stavu. V normách [3, 4] chybí způsob postupu jak definovat teplotu nenapjatého stavu. Proto lze přijmout předpis dokumentu [5], který je dle TNR také podložen experimentálními daty (při pokojové teplotě byla objevena velká tahová napětí v návaru, což svědčí o tom, že teplota nenapjatého stavu je blízká teplotě nominálního provozu). Proto v souladu s [5] se při výpočtech uvažuje teplota nenapjatého stavu rovna teplotě při nominálním výkonu. Lze zmínit, že hodnota teploty nenapjatého stavu má vliv na výsledné hodnoty napětí v jednotlivých stavech, především pro elementy vyrobené z materiálů s různou hodnotou koeficientu teplotní roztažnosti - v našem případě např. základní materiál TNR a austenitický návar (při homogenních strukturách, vyrobených z jednoho materiálu, není nutné specifikovat teplotu nenapjatého stavu, protože zde nemá na výsledky vliv). Lze také říci, že teplota nenapjatého stavu má vliv především na napjatost v návaru. Při hodnocení únavového poškození může teplota nenapjatého stavu sehrát jistou roli, např. může ovlivnit střední hodnotu napětí na cyklu, ovšem hodnotu rozkmitu (amplitudy) napětí, resp. deformace neovlivní, proto se nepředpokládá její vliv jako významný.

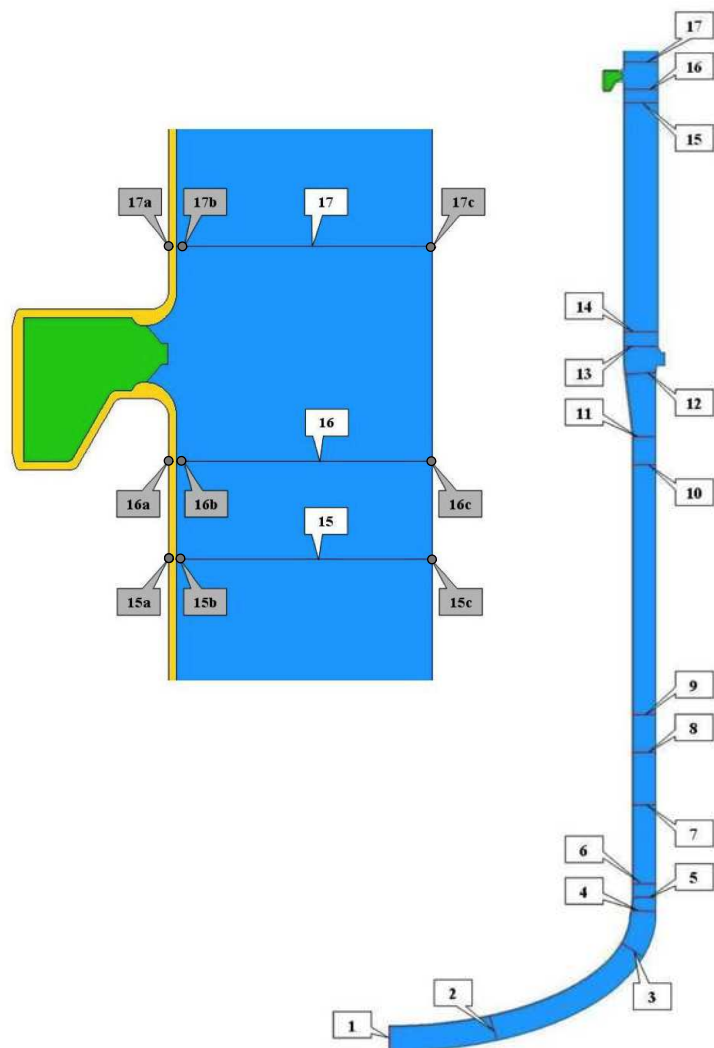
Pro jednotlivá časově proměnná teplotní pole byla vypočtena příslušná teplotní napětí. Příklady vypočtených hodnot v podobě rozložení hodnoty redukováného napětí jsou uvedeny v příloze C .

Byla vypočtena mechanická napětí při zatížení vnitřním přetlakem, viz obrázek C.5. Ten byl zadán na vnitřní povrch TNR. Byl také zadán kompenzační tahový účinek vnitřního přetlaku, který byl aplikován v oblasti příruby TNR.

Výsledně byl stanoven příspěvek napjatosti od jednoho MPa, který se dále využíval při definování zátěžových stavů, kdy se jeho příslušný násobek sčítal s teplotním namáháním.

## 5.2.4 Stavby zatížení

Stavy zatížení se definují jako lineární kombinace teplotních napětí s napětím od vnitřního přetlaku. V případě režimů s časově proměnnými teplotními napětími byly kombinace s příslušným tlakovým zatížením provedeny v každém časovém kroku. Následně byly reprezentativní stavy zatížení od daného režimu určeny jako časové okamžiky lokálních extrémů redukovaných hodnot napětí. Pro každý uzel tělesa nastávají tyto okamžiky přirozeně v jiném čase. Kombinace jsou naznačeny



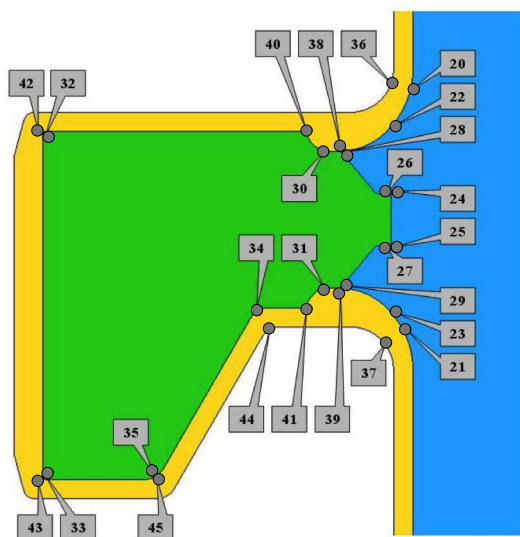
**Obr. 5.3:** Hodnocené body v oblasti válcové části a dna TNR jsou definované na vyznačených řezech.

## 5.2.5 Hodnocené body

Hodnocení únavové životnosti můžeme provést v předem definovaných bodech. Je vhodné zahrnout do únavového hodnocení ty body, ve kterých se nalézají maximální a špičkové hodnoty redukováného napětí, plynoucí z MKP napěťově-deformační analýzy.

Vybrané body pro válcovou část a dno TNR jsou vyobrazeny na obrázku 5.3. Body leží na definovaných řezech a jsou očíslovány pomocí čísla řezu a písmena, které odpovídá poloze body na řezu: body na vnitřním povrchu (v návare) jsou označeny písmenem „a“, v základním materiálu (pod návarem) písmenem „b“ a na povrchu vnějším písmenem „c“.

Body pro hodnocení únavy v oblasti dělicího prstence jsou vyznačeny na obrázku 5.4.



Obr. 5.4: Hodnocené body v oblasti dělicího prstence TNR.

## 5.2.6 Výsledné hodnoty únavového poškození

Na základě výše uvedených informací a s daty (složky tenzoru elastického napětí) z MKP výpočtů v podobě upravených textových souborů lze jednoduše úlohu řešit za pomoci vytvořené aplikace (viz kapitola 4). Výsledné hodnoty řešení, v podobě hodnot součinitele únavového poškození  $D$  pro jednotlivé hodnocené body, jsou níže uvedeny v tabulkové podobě. Body jsou rozděleny dle jejich polohy do čtyř skupin. Každé skupině přísluší jedna tabulka 5.3–5.6.

**Tab. 5.3:** Kumulace únavového poškození  $D$  na vnitřním povrchu TNR.

| bod        | materiál        | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|------------|-----------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1a         | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 6,73E-03        | 1,36E-02        | 1,83E-02        |
| 2a         | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 7,45E-03        | 1,49E-02        | 2,01E-02        |
| 3a         | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 9,71E-03        | 1,70E-02        | 2,33E-02        |
| 4a         | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,06E-02        | 2,11E-02        | 2,79E-02        |
| 5a         | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 9,75E-03        | 2,00E-02        | 2,64E-02        |
| 6a         | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | 0,8         | 5,96E-03        | 1,21E-02        | 1,64E-02        |
| 7a         | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | 0,8         | 5,76E-03        | 1,15E-02        | 1,55E-02        |
| 8a         | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | 0,8         | 6,37E-03        | 1,21E-02        | 1,65E-02        |
| 9a         | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | 0,8         | 6,46E-03        | 1,22E-02        | 1,67E-02        |
| 10a        | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | 0,8         | 6,70E-03        | 1,35E-02        | 1,83E-02        |
| <b>11a</b> | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | 0,8         | <b>1,19E-02</b> | <b>2,43E-02</b> | <b>3,19E-02</b> |
| 12a        | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | 0,8         | 8,06E-03        | 1,69E-02        | 2,27E-02        |
| 13a        | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | 0,8         | 8,98E-03        | 1,87E-02        | 2,50E-02        |
| 14a        | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 9,42E-03        | 1,96E-02        | 2,62E-02        |
| 15a        | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,08E-02        | 2,10E-02        | 2,84E-02        |
| 16a        | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,11E-02        | 2,16E-02        | 2,93E-02        |
| 17a        | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,13E-02        | 2,03E-02        | 2,82E-02        |

**Tab. 5.4:** Kumulace únavového poškození  $D$  pod návarem TNR.

| bod       | materiál      | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----------|---------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1b        | SV-16Ch2NMFTA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 2,47E-05        | 6,75E-04        | 8,30E-04        |
| 2b        | SV-16Ch2NMFTA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 2,12E-05        | 2,37E-04        | 2,40E-04        |
| <b>3b</b> | SV-16Ch2NMFTA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | <b>1,72E-03</b> | <b>5,77E-03</b> | <b>8,16E-03</b> |
| 4b        | SV-16Ch2NMFTA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 1,10E-04        | 3,07E-03        | 4,25E-03        |
| 5b        | Sv-08ChGNMTA  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 4,44E-05        | 2,04E-03        | 2,72E-03        |
| 6b        | 15Ch2NMFA-A   | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | –           | 2,63E-05        | 2,95E-04        | 2,99E-04        |
| 7b        | 15Ch2NMFA-A   | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | –           | 1,58E-04        | 6,33E-04        | 7,77E-04        |
| 8b        | 15Ch2NMFA-A   | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | –           | 5,22E-04        | 1,19E-03        | 1,57E-03        |
| 9b        | Sv-10ChGNMAA  | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | 1,0         | 5,56E-04        | 3,69E-03        | 5,12E-03        |
| 10b       | Sv-10ChGNMAA  | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | 1,0         | 2,39E-04        | 7,30E-04        | 9,23E-04        |
| 11b       | 15Ch2NMFA-A   | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | –           | 1,21E-04        | 5,78E-04        | 6,49E-04        |
| 12b       | 15Ch2NMFA-A   | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | –           | 7,24E-05        | 5,43E-04        | 5,96E-04        |
| 13b       | 15Ch2NMFA-A   | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | –           | 7,83E-05        | 6,65E-04        | 7,20E-04        |
| 14b       | Sv-08ChGNMTA  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 7,78E-05        | 6,96E-04        | 7,48E-04        |
| 15b       | Sv-08ChGNMTA  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 8,37E-05        | 7,56E-04        | 8,18E-04        |
| 16b       | 15Ch2NMFA     | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 6,66E-05        | 5,73E-04        | 6,22E-04        |
| 17b       | 15Ch2NMFA     | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,72E-05        | 3,45E-04        | 3,55E-04        |

**Tab. 5.5:** Kumulace únavového poškození  $D$  na vnějším povrchu TNR.

| bod | materiál      | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|---------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1c  | SV-16Ch2NMFTA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | <b>1,84E-03</b> | <b>4,76E-03</b> | <b>6,48E-03</b> |
| 2c  | SV-16Ch2NMFTA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 4,90E-04        | 8,66E-04        | 1,25E-03        |
| 3c  | SV-16Ch2NMFTA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 3,38E-08        | 9,81E-05        | 1,12E-04        |
| 4c  | SV-16Ch2NMFTA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 1,64E-08        | 9,91E-05        | 1,11E-04        |
| 5c  | Sv-08ChGNMTA  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 1,15E-06        | 4,74E-04        | 6,22E-04        |
| 6c  | 15Ch2NMFA-A   | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | –           | 7,73E-06        | 6,51E-05        | 6,91E-05        |
| 7c  | 15Ch2NMFA-A   | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | –           | 2,47E-04        | 4,94E-04        | 7,14E-04        |
| 8c  | 15Ch2NMFA-A   | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | –           | 2,49E-04        | 4,96E-04        | 7,21E-04        |
| 9c  | Sv-10ChGNMAA  | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | 1,0         | 2,05E-04        | 2,74E-03        | 3,91E-03        |
| 10c | Sv-10ChGNMAA  | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | 1,0         | 1,01E-04        | 2,60E-03        | 3,66E-03        |
| 11c | 15Ch2NMFA-A   | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | –           | 5,83E-05        | 1,44E-04        | 1,71E-04        |
| 12c | 15Ch2NMFA-A   | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | –           | 5,41E-05        | 1,55E-04        | 1,72E-04        |
| 13c | 15Ch2NMFA-A   | 15Ch2NMFA-A     | 10    | 2          | –           | 2,84E-05        | 9,82E-05        | 1,15E-04        |
| 14c | Sv-08ChGNMTA  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 9,01E-06        | 1,49E-03        | 2,08E-03        |
| 15c | Sv-08ChGNMTA  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 8,81E-06        | 1,65E-03        | 2,29E-03        |
| 16c | 15Ch2NMFA     | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 9,07E-06        | 7,20E-05        | 7,54E-05        |
| 17c | 15Ch2NMFA     | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,23E-05        | 9,46E-05        | 1,01E-04        |

**Tab. 5.6:** Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti dělicího prstence.

| bod | materiál | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let   | 40 let   | 60 let   |
|-----|----------|-----------------|-------|------------|-------------|----------|----------|----------|
| 20  | Sv-08AA  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 3,04e-05 | 4,35e-04 | 4,52e-04 |
| 21  | Sv-08AA  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 8,86e-05 | 4,85e-04 | 5,89e-04 |
| 22  | Sv-08AA  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 9,59e-04 | 7,19e-03 | 9,98e-03 |
| 23  | Sv-08AA  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 7,07e-04 | 5,84e-03 | 8,16e-03 |
| 24  | Sv-08AA  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 3,23e-04 | 7,68e-04 | 9,95e-04 |
| 25  | Sv-08AA  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1,0         | 2,97e-04 | 7,45e-04 | 9,58e-04 |
| 26  | Sv-08A   | 22K             | 10    | 2          | 1,0         | 1,91e-03 | 4,52e-03 | 5,75e-03 |
| 27  | Sv-08A   | 22K             | 10    | 2          | 1,0         | 1,42e-03 | 3,03e-03 | 3,96e-03 |
| 28  | Sv-08A   | 22K             | 10    | 2          | 1,0         | 2,11e-03 | 3,25e-03 | 4,57e-03 |
| 29  | Sv-08A   | 22K             | 10    | 2          | 1,0         | 1,95e-03 | 3,00e-03 | 4,24e-03 |
| 30  | 22K      | 22K             | 10    | 2          | –           | 2,43e-03 | 3,70e-03 | 5,20e-03 |
| 31  | 22K      | 22K             | 10    | 2          | –           | 2,52e-03 | 3,88e-03 | 5,49e-03 |
| 32  | 22K      | 22K             | 10    | 2          | –           | 3,69e-03 | 5,65e-03 | 7,97e-03 |
| 33  | 22K      | 22K             | 10    | 2          | –           | 3,15e-03 | 6,19e-03 | 7,47e-03 |
| 34  | 22K      | 22K             | 10    | 2          | –           | 2,97e-03 | 4,57e-03 | 6,48e-03 |
| 35  | 22K      | 22K             | 10    | 2          | –           | 7,39e-04 | 2,93e-03 | 3,49e-03 |

pokračování na další straně



Tab. 5.6 – pokračování z předchozí strany

| bod       | materiál        | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----------|-----------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>36</b> | Sv-04Ch20N10G2B | 22K             | 10    | 2          | 0,8         | <b>2,38e-01</b> | <b>5,33e-01</b> | <b>6,90e-01</b> |
| 37        | Sv-04Ch20N10G2B | 22K             | 10    | 2          | 0,8         | 1,74e-01        | 4,52e-01        | 5,68e-01        |
| 38        | ZIO-8           | 22K             | 10    | 2          | 0,8         | 5,25e-03        | 8,82e-03        | 1,21e-02        |
| 39        | Sv-07Ch25N13    | 22K             | 10    | 2          | 0,8         | 4,61e-03        | 9,49e-03        | 1,29e-02        |
| 40        | ZIO-8           | 22K             | 10    | 2          | 0,8         | 1,69e-02        | 2,57e-02        | 3,63e-02        |
| 41        | Sv-07Ch25N13    | 22K             | 10    | 2          | 0,8         | 1,48e-02        | 2,64e-02        | 3,54e-02        |
| 42        | Sv-07Ch25N13    | 22K             | 10    | 2          | 0,8         | 1,45e-02        | 2,42e-02        | 3,30e-02        |
| 43        | Sv-07Ch25N13    | 22K             | 10    | 2          | 0,8         | 1,55e-02        | 3,61e-02        | 4,48e-02        |
| 44        | Sv-04Ch20N10G2B | 22K             | 10    | 2          | 0,8         | 4,79e-02        | 8,24e-02        | 1,12e-01        |
| 45        | ZIO-8           | 22K             | 10    | 2          | 0,8         | 1,97e-02        | 4,19e-02        | 5,32e-02        |

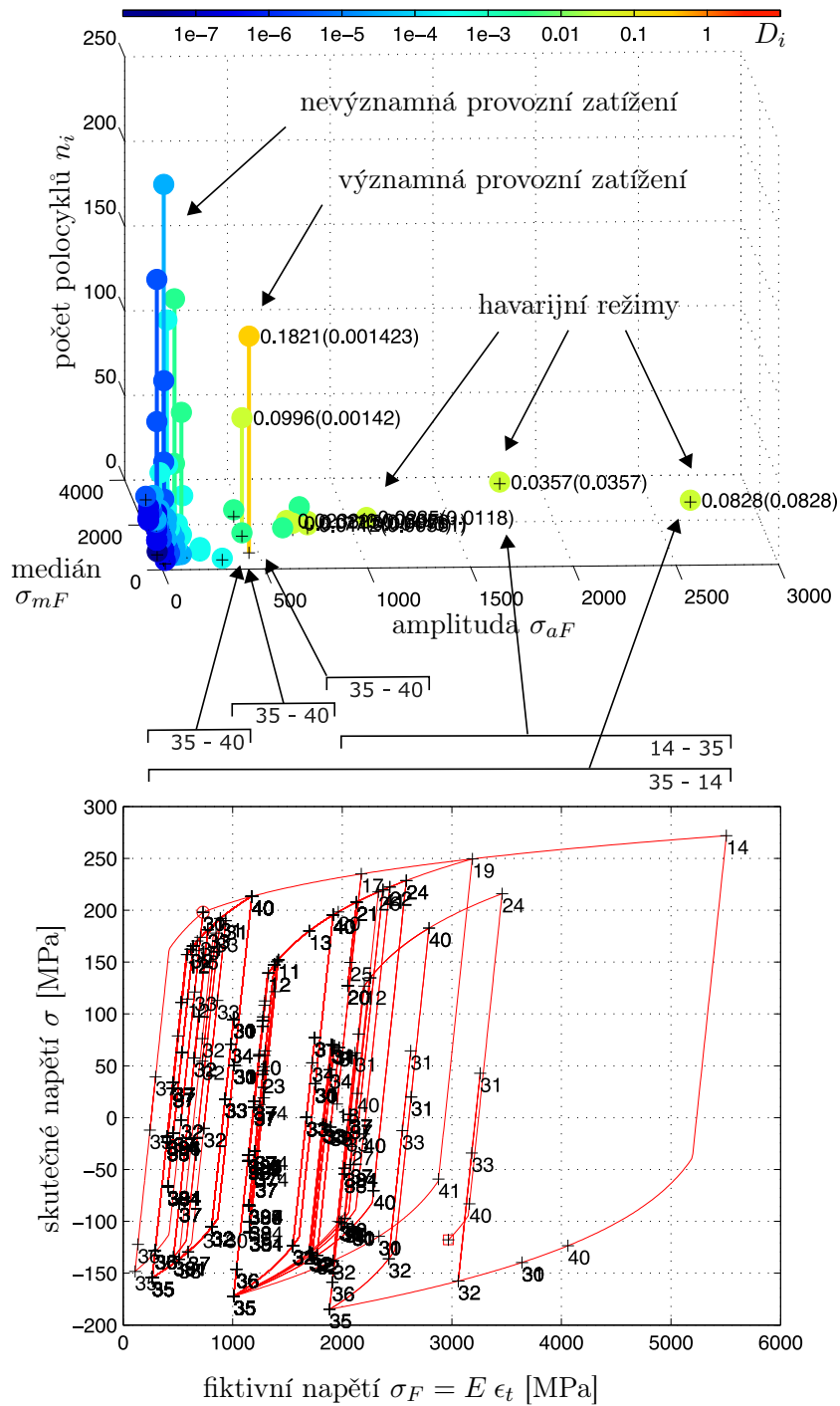
Můžeme si povšimnout, že v tabulkách výše je pro některá hodnocená místa uveden dvojí materiál. Ruská norma umožňuje použít únavovou křivku základního materiálu pro hodnocení svarů a návarů. Křivka musí být ovšem redukována součinitelem  $\varphi_S$ . Při hodnocení komponent TNR Rovenské JE bylo tohoto postupu využito.

Maximální hodnoty součinitele únavového poškození je dosaženo v oblasti přivaření děličního prstence k tělesu TNR, místo je označené číslem 36.

Využijeme-li grafických funkcí vytvořené aplikace, můžeme analyzovat příspěvky jednotlivých provozních režimů k celkové únavě v hodnoceném místě. Grafické výstupy z aplikace pro hodnocené místo 36 jsou vyobrazeny na obrázku 5.5. V horní části jsou v diagramu amplituda-medián-počet vyobrazeny všechny dekomponované polocykly. Na obrázku můžeme identifikovat následující skupiny polocyklů:

- **významná provozních zatížení** s polocykly charakterizovanými vysokým počtem  $n_i$ , významnou hodnotou amplitudy fiktivních napětí  $\sigma_{aF}$ , a tedy významnou hodnotou dílčího poškození  $D_i$ ;
- **nevýznamná provozních zatížení** s polocykly s vysokým počtem  $n_i$ , nevýznamnou amplitudou  $\sigma_{aF}$ , kdy jejich dílčí poškození jsou nezajímavá  $D_i \leq 10^{-3}$ ;
- **polocykly vzniklé v důsledku havarijních režimů** charakteristické nízkým počtem  $n_i$ , ovšem s významnou hodnotou dílčího poškození  $D_i$ , vlivem značně vysokých hodnot amplitudy fiktivního napětí  $\sigma_{aF}$ .

Významné cykly lze v diagramu (amplituda-medián-počet polocyklů) lehce identifikovat. Všechny vyobrazené cykly jsou barevně rozlišeny dle jejich hodnoty dílčího poškození  $D_i = \frac{n_i}{N_i}$ . Pro významné polocykly jsou hodnoty dílčích poškození v diagramu přímo uvedeny, viz obrázek 5.5. V závorkách je navíc doplněn parciální příspěvek jednoho polocyklu  $\frac{1}{N_i}$ .



**Obr. 5.5:** Hysterezní křivky a dekomponované cykly (v diagramu amplituda-medián-počet polocyklů) vykreslené pomocí vyvinuté aplikace pro hodnocené místo 36 v oblasti přivaření děličícího prstence k tělesu TNR pro 40 let provozu.

V dolní části obrázku 5.5, je uveden průběh elastoplastického napětově-deformačního stavu v podobě hysterezních křivek. Na hysterezních křivkách můžeme identifikovat vyobrazené body, které odpovídají vstupním zátěžovým stavům. Každý bod je označen příslušným číslem zátěžového stavu. Takto můžeme identifikovat, které stavy formují jednotlivé hysterezní křivky a následně je pak přiřadit k cyklům vykresleným v diagramu ve vrchní části obrázku.

Porovnáním lze identifikovat, že významná provozní zatížení jsou způsobena cykly od zátěžových stavů 35 a 40. Tyto stavy odpovídají napětovému extrému (v hodnoceném místě) v průběhu provozního režimu 1.3 (ohřev 20°C/hod.) pro stav 35, resp. extrému při provozním režimu 1.13 (zchlazení 30°C/hod.) pro stav 40. Z uvedeného vyplývá, že dominantní část celkové kumulace únavového poškození je tvořena teplotním zatížením v důsledku rozdílné teplotní roztažnosti konstrukčních materiálů. Tento polocyklus v hodnoceném místě způsobuje čerpání únavy o hodnotě  $\frac{1}{N_i} = 0,0014$ . Cykly mezi stavy 35-40-35 mají vždy stejnou amplitudu  $\sigma_{aF}$ , ale v diagramu se vyskytují pro různé hodnoty  $\sigma_{mF}$ . Změna střední hodnoty těchto cyklů nastává vždy po výskytu některého (v predikci postulovaného) havarijního režimu. Extrémní zatížení, dosažené v průběhu havarijních režimů, navyšuje plastickou deformaci v důsledku kinematického zpevnění materiálu.

Významná část celkové hodnoty kumulace únavového poškození, je tvořena také havarijními režimy. Lze si povšimnout, že největší příspěvek vnáší režim charakterizovaný zátěžovým stavem 14. Tento stav reprezentuje extrémní zatížení při provozním režimu 3.2 (velký únik při roztržení potrubí s průměrem  $D > 100\text{mm}$ ). Jednotlivé havarijní režimy způsobují dílčí poškození v řádech  $10^{-2}$  a na celkové hodnotě kumulace únavového poškození (pro 40 let provozu)  $D = 0,53$  mají podíl přibližně 30%.

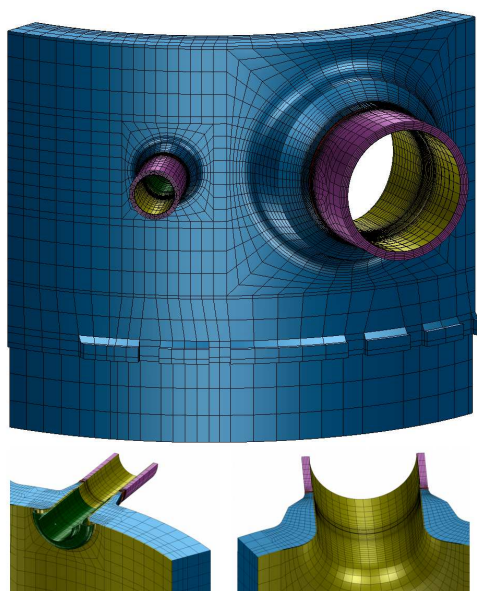
### 5.3 Nátrubky tlakové nádoby reaktoru

Na tlakové nádobě reaktoru VVER 1000 se nachází dva prstence s kovanými nátrubky, viz obrázek A.5. Na spodním hrdlovém prstenci se nachází vstupní „studené“ nátrubky, k nimž je přivařeno hlavní cirkulační potrubí. Na horním prstenci jsou umístěny výstupní „horké“ nátrubky. Každý z prstenců má navíc dva nátrubky havarijního dochlazování SAOZ. Na spodní hrdlové sekci se navíc nachází nátrubek KIP, sloužící pro vývod vnitroreaktorového měření teploty a tlaku. Výsledky únavového hodnocení nátrubků HCP a SAOZ je uvedeno v kapitole 5.3.1. Únavové hodnocení nátrubku KIP je představeno v kapitole 5.3.2 a výsledky jsou uvedeny v příloze G.

### 5.3.1 Nátrubek hlavního cirkulačního potrubí a nátrubek havarijního chlazení

Při výpočtu bylo využito symetrie hrdlové sekce a při výpočtech provedených v práci [35] byla modelována 1/4 obvodu jednoho prstence<sup>3</sup>. V modelu nátrubku HCP (viz obrázek 5.6) byla zahrnuta rovněž geometrie nátrubku SAOZ. Z analýz vyplynulo, že nátrubek HCP sice není blízkostí nátrubku SAOZ ovlivněn, nicméně relativně větší nátrubek HCP významně ovlivňuje napjatost v oblasti nátrubku SAOZ. Geometrie nátrubků je vyobrazena na obrázku A.6.

#### 5.3.1.1 Výpočtový model nátrubků HCP a SAOZ



**Obr. 5.6:** Výpočtový MKP model 1/4 obvodu hrdlové sekce TNR, s detailně modelovanou oblastí nátrubku HCP a nátrubku SAOZ, včetně přivařené vnitřní košilky nátrubku SAOZ (na obrázku zelenou barvou).

Na obrázku 5.6 je vyobrazen MKP výpočtový model. Pro tvorbu byly využity kvadratické 20uzlové prvky. Byla modelována také austenitická košilka nátrubku SAOZ, která slouží pro usměrnění toku chladiva při havarijním dochlazování a pro ochranu nátrubku před teplotním šokem při zapracování SAOZ. Vlivem rozdílné

<sup>3</sup>Takto zjednodušený model vede k určitým nepřesnostem, vhodnější by bylo neomezovat se pouze na jeden hrdlový prstec, ale zahrnout do výpočtu celou výšku TNR, nebo přinejmenším oba hrdlové prstence a blízkou relativně tuhou přírubu.

roztlačnosti austenitické oceli košilky a feriticko-perlitické oceli TNR lze očekávat v oblasti přivaření košilky významnější namáhání.

Jelikož jsou změny provozních parametrů při provozních přechodových režimech různé na vstupu a výstupu z reaktoru, byly počítány výpočty vždy dvakrát, pro vstupní a pro výstupní nátrubek zvlášť. Vlivem větších teplotních změn na výstupu z reaktoru, kde je při nominálním režimu o 30°C vyšší teplota, vychází o málo vyšší výsledné hodnoty kumulace únavového poškození pro nátrubek výstupní.

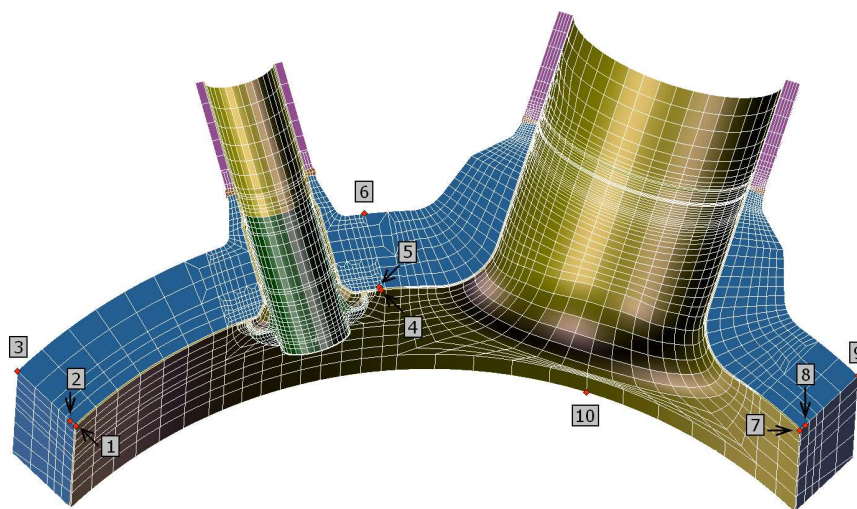
Při analýzách NDS oblasti hrdlové sekce, provedených v [35], byla uvažována zatížení modelovaných nátrubků od připojených potrubí. Zatížení byla různá v různých provozních režimech, neboť přirozeně jsou závislá na aktuálních hodnotách provozních parametrů (především teploty a tlaku).

Výsledné hodnoty kumulace únavového poškození pro výstupní nátrubek jsou uvedeny v podkapitole 5.3.1.2.

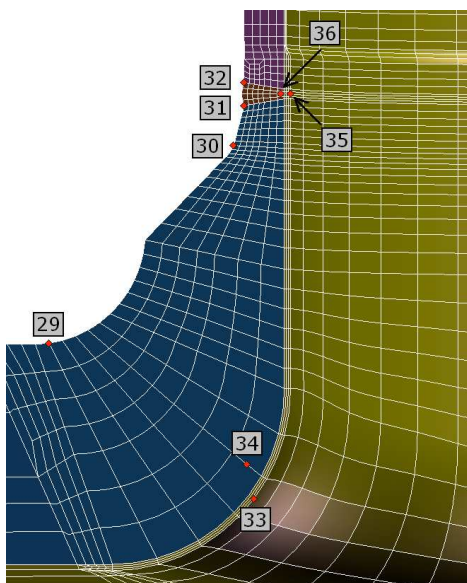
Výsledné hodnoty kumulace únavového poškození pro vstupní nátrubek jsou pro přehlednost uvedeny v příloze F.

### 5.3.1.2 Výsledky výpočtů

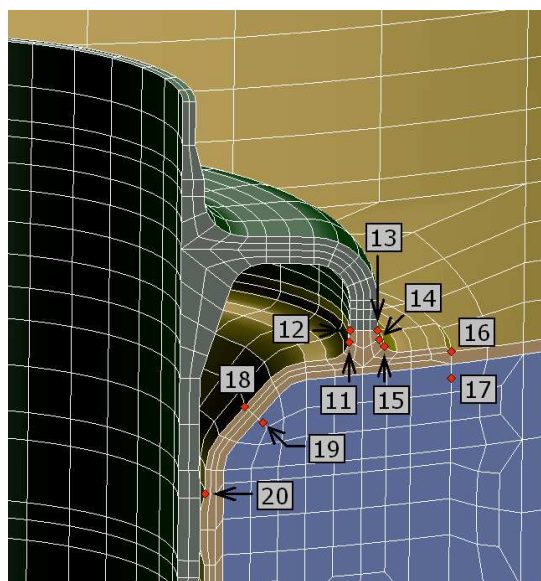
Hodnocené body jsou vyobrazeny na obrázcích 5.7 až 5.8. Tyto hodnocené body byly identifikovány na základě analýzy napěťových polí jako místa s významnou hodnotou redukováného napětí při analyzovaných provozních režimech. Tyto analýzy jsou obsahem dokumentu [35], na jehož vypracování se autor této práce podílel. Některé výsledky teplotních a napěťových polí jsou pro vybrané hodnoty uvedeny v příloze E.



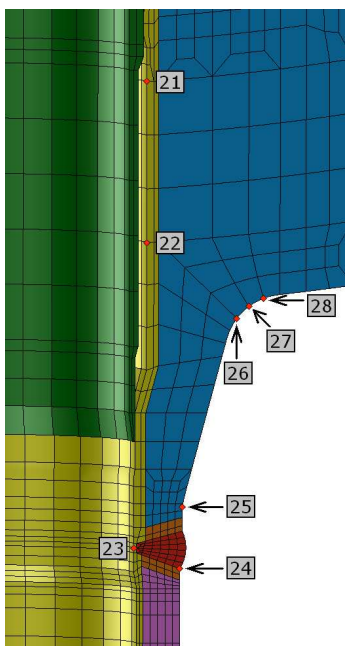
Obr. 5.7: Hodnocené body v oblasti hrdlové sekce TNR.



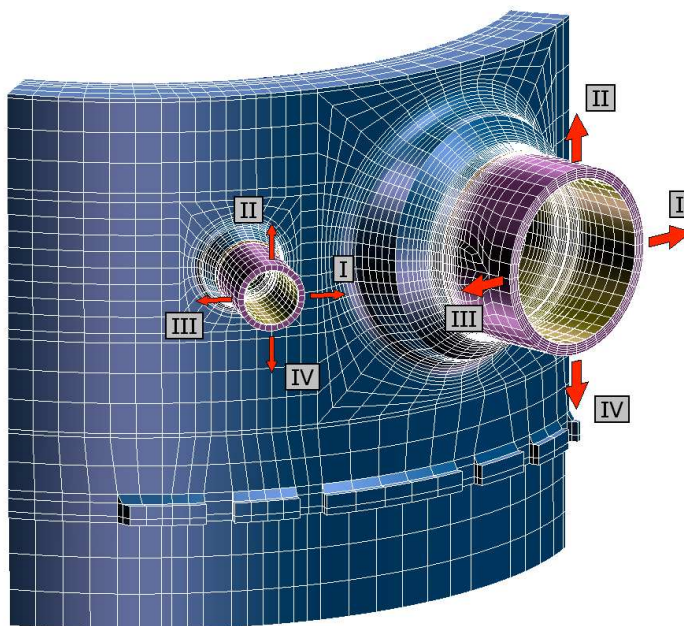
**Obr. 5.8:** Hodnocené body v oblasti nátrubku HCP.



**Obr. 5.9:** Hodnocené body v oblasti přivaření austenitické košilky nátrubku SAOZ.



**Obr. 5.10:** Hodnocené body v oblasti nátrubku SAOZ.



**Obr. 5.11:** Azimutální směry rovin, ve kterých ležely hodnocené body, nalézající se v oblastech nátrubků HCP a SAOZ.

Na obrázku 5.7 jsou vyobrazeny hodnocené body v TNR v oblasti hrdlové sekce, na obrázku 5.9 jsou vyznačeny body v oblasti nátrubku HCP. Na obrázku 5.8 jsou vyobrazeny hodnocené body v oblasti nátrubku SAOZ a na obrázku 5.10 jsou vyobrazeny hodnocené body v oblasti přivaření austenitické košilky nátrubku SAOZ.

V nátrubcích HCP a SAOZ jsou hodnocené body lokalizovány ve čtyřech vzájemně pravouhlých rovinách, označených římskými číslicemi I-IV. Polohy těchto rovin jsou vyobrazeny na obrázku 5.11.

Výsledné hodnoty kumulace únavového poškození v hodnocených bodech jsou uvedeny v tabulkách 5.8 až 5.7. V tabulce 5.8 jsou uvedeny hodnoty kumulace únavového poškození v návaru, v tabulce 5.9 jsou uvedeny výsledky pro body lokalizované v základním materiálu pod návarem, v tabulce 5.10 jsou uvedeny výsledné hodnoty pro body na vnějším povrchu a v tabulce 5.7 jsou uvedeny hodnoty kumulace únavového poškození pro oblast přivaření austenitické košilky.

**Tab. 5.7:** Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti přivaření austenitické košilky nátrubku SAOZ.

| bod    | materiál                     | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|--------|------------------------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 11 I   | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | <b>1,62E-01</b> | <b>3,49E-01</b> | <b>4,55E-01</b> |
| 11 II  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,19E-01        | 2,61E-01        | 3,38E-01        |
| 11 III | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,55E-01        | 3,41E-01        | 4,41E-01        |
| 11 IV  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,20E-01        | 2,66E-01        | 3,43E-01        |
| 12 I   | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 7,11E-02        | 1,56E-01        | 2,02E-01        |
| 12 II  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,00E-01        | 2,22E-01        | 2,86E-01        |
| 12 III | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 6,74E-02        | 1,52E-01        | 1,95E-01        |
| 12 IV  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,01E-01        | 2,25E-01        | 2,89E-01        |
| 13 I   | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,95E-02        | 4,30E-02        | 5,52E-02        |
| 13 II  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,30E-02        | 5,13E-02        | 6,58E-02        |
| 13 III | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,84E-02        | 4,20E-02        | 5,35E-02        |
| 13 IV  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,27E-02        | 5,02E-02        | 6,46E-02        |
| 14 I   | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 3,42E-02        | 7,79E-02        | 9,97E-02        |
| 14 II  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 3,63E-02        | 8,22E-02        | 1,06E-01        |
| 14 III | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 3,32E-02        | 7,78E-02        | 9,89E-02        |
| 14 IV  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 3,64E-02        | 8,19E-02        | 1,06E-01        |

pokračování na další straně

Tab. 5.7 – pokračování z předchozí strany

| bod    | materiál                     | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let   | 40 let   | 60 let   |
|--------|------------------------------|-----------------|-------|------------|-------------|----------|----------|----------|
| 15 I   | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,41E-02 | 5,04E-02 | 6,52E-02 |
| 15 II  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 3,04E-02 | 6,16E-02 | 8,05E-02 |
| 15 III | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,36E-02 | 5,03E-02 | 6,47E-02 |
| 15 IV  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 3,96E-02 | 8,03E-02 | 1,08E-01 |

Tab. 5.8: Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti návaru hrdlové sekce TNR.

| bod    | materiál        | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let   | 40 let   | 60 let   |
|--------|-----------------|-----------------|-------|------------|-------------|----------|----------|----------|
| 1      | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,33E-02 | 2,39E-02 | 3,34E-02 |
| 4      | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,69E-02 | 3,32E-02 | 4,58E-02 |
| 7      | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,56E-02 | 2,95E-02 | 4,13E-02 |
| 10     | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,62E-02 | 2,73E-02 | 3,82E-02 |
| 16 I   | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 2,17E-02 | 3,80E-02 | 5,28E-02 |
| 16 II  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,69E-02 | 2,98E-02 | 4,15E-02 |
| 16 III | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,84E-02 | 3,34E-02 | 4,63E-02 |
| 16 IV  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,67E-02 | 2,93E-02 | 4,08E-02 |
| 18 I   | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,41E-02 | 2,75E-02 | 3,73E-02 |
| 18 II  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,21E-02 | 2,26E-02 | 3,10E-02 |
| 18 III | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,42E-02 | 2,78E-02 | 3,77E-02 |
| 18 IV  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,21E-02 | 2,27E-02 | 3,11E-02 |
| 20 I   | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,46E-02 | 2,90E-02 | 3,91E-02 |
| 20 II  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,38E-02 | 2,45E-02 | 3,37E-02 |
| 20 III | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,50E-02 | 2,98E-02 | 4,01E-02 |
| 20 IV  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,42E-02 | 2,56E-02 | 3,49E-02 |
| 21 I   | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 8,57E-03 | 1,43E-02 | 2,00E-02 |
| 21 II  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 7,86E-03 | 1,26E-02 | 1,76E-02 |
| 21 III | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 8,80E-03 | 1,45E-02 | 2,02E-02 |
| 21 IV  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 7,85E-03 | 1,26E-02 | 1,74E-02 |
| 22 I   | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 8,85E-03 | 1,65E-02 | 2,26E-02 |
| 22 II  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,11E-02 | 1,80E-02 | 2,52E-02 |
| 22 III | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 9,37E-03 | 1,73E-02 | 2,37E-02 |
| 22 IV  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,12E-02 | 1,84E-02 | 2,58E-02 |
| 23 I   | Sv-08Ch19N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 1,26E-03 | 2,91E-03 | 3,89E-03 |
| 23 II  | Sv-08Ch19N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 1,82E-03 | 3,65E-03 | 4,93E-03 |
| 23 III | Sv-08Ch19N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 1,35E-03 | 3,06E-03 | 4,09E-03 |
| 23 IV  | Sv-08Ch19N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 1,81E-03 | 3,63E-03 | 4,91E-03 |
| 33 I   | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,46E-02 | 2,84E-02 | 3,97E-02 |

pokračování na další straně



Tab. 5.8 – pokračování z předchozí strany

| bod    | materiál        | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|--------|-----------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 33 II  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 2,32E-02        | 3,66E-02        | 5,17E-02        |
| 33 III | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,44E-02        | 2,85E-02        | 3,98E-02        |
| 33 IV  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | <b>2,42E-02</b> | <b>3,90E-02</b> | <b>5,47E-02</b> |
| 35 I   | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 4,29E-03        | 7,00E-03        | 9,78E-03        |
| 35 II  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 4,57E-03        | 7,35E-03        | 1,03E-02        |
| 35 III | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 4,56E-03        | 7,35E-03        | 1,03E-02        |
| 35 IV  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 3,80E-03        | 6,40E-03        | 8,98E-03        |

Tab. 5.9: Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti nátrubku HCP a SAOZ.

| bod    | materiál  | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|--------|-----------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2      | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,02E-05        | 1,56E-04        | 1,59E-04        |
| 5      | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 8,34E-05        | 5,25E-04        | 5,97E-04        |
| 8      | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,58E-05        | 1,30E-04        | 1,33E-04        |
| 17 I   | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 7,70E-05        | 4,96E-04        | 5,60E-04        |
| 17 II  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,84E-04        | 6,82E-04        | 8,76E-04        |
| 17 III | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,03E-04        | 5,50E-04        | 6,41E-04        |
| 17 IV  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,49E-04        | 8,49E-04        | 1,11E-03        |
| 19 I   | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,01E-04        | 1,04E-03        | 1,21E-03        |
| 19 II  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 7,55E-04        | 1,91E-03        | 2,59E-03        |
| 19 III | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,29E-04        | 1,12E-03        | 1,33E-03        |
| 19 IV  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 7,75E-04        | 1,98E-03        | 2,69E-03        |
| 24 I   | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | <b>9,71E-03</b> | <b>1,49E-02</b> | <b>2,12E-02</b> |
| 24 II  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 6,55E-03        | 1,04E-02        | 1,47E-02        |
| 24 III | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 5,37E-03        | 9,27E-03        | 1,30E-02        |
| 24 IV  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 7,87E-03        | 1,22E-02        | 1,72E-02        |
| 34 I   | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,07E-05        | 1,64E-04        | 1,68E-04        |
| 34 II  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 5,47E-03        | 8,50E-03        | 1,24E-02        |
| 34 III | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,07E-05        | 1,67E-04        | 1,70E-04        |
| 34 IV  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 5,01E-03        | 7,87E-03        | 1,15E-02        |
| 36 I   | PT 30     | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 5,73E-03        | 8,56E-03        | 1,23E-02        |
| 36 II  | PT 30     | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 4,18E-03        | 6,42E-03        | 9,14E-03        |
| 36 III | PT 30     | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 4,97E-03        | 7,43E-03        | 1,07E-02        |
| 36 IV  | PT 30     | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 6,99E-03        | 1,05E-02        | 1,50E-02        |

**Tab. 5.10:** Kumulace únavového poškození  $D$  na vnějším povrchu hrdlové sekce TNR.

| bod    | materiál               | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|--------|------------------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 3      | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 9,95E-06        | 6,53E-05        | 6,68E-05        |
| 6      | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 7,18E-05        | 3,48E-04        | 4,16E-04        |
| 9      | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,47E-04        | 3,88E-04        | 5,12E-04        |
| 25 I   | EA 395/9<br>EA 400/10T | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 1,20E-06        | 2,08E-05        | 2,03E-05        |
| 25 II  | EA 395/9<br>EA 400/10T | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 9,63E-07        | 2,96E-05        | 2,96E-05        |
| 25 III | EA 395/9<br>EA 400/10T | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 9,12E-06        | 4,19E-05        | 4,19E-05        |
| 25 IV  | EA 395/9<br>EA 400/10T | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 1,74E-07        | 2,04E-05        | 2,04E-05        |
| 26 I   | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,24E-03        | 3,54E-03        | 4,97E-03        |
| 26 II  | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 1,83E-03        | 2,99E-03        | 4,19E-03        |
| 26 III | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 1,85E-03        | 3,21E-03        | 4,45E-03        |
| 26 IV  | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 1,81E-03        | 2,92E-03        | 4,09E-03        |
| 27 I   | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,58E-03        | 4,12E-03        | 5,78E-03        |
| 27 II  | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,17E-03        | 3,53E-03        | 4,94E-03        |
| 27 III | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,38E-03        | 4,01E-03        | 5,56E-03        |
| 27 IV  | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,42E-03        | 3,79E-03        | 5,34E-03        |
| 28 I   | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,55E-03        | 4,12E-03        | 5,77E-03        |
| 28 II  | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,28E-03        | 3,70E-03        | 5,18E-03        |
| 28 III | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,02E-03        | 3,34E-03        | 4,65E-03        |
| 28 IV  | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,48E-03        | 3,89E-03        | 5,49E-03        |
| 29 I   | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 5,25E-05        | 2,17E-04        | 2,78E-04        |
| 29 II  | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,20E-05        | 1,59E-04        | 1,70E-04        |
| 29 III | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 4,57E-05        | 2,54E-04        | 3,06E-04        |
| 29 IV  | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 5,64E-06        | 4,01E-05        | 4,52E-05        |
| 30 I   | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,13E-05        | 1,30E-04        | 1,49E-04        |
| 30 II  | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,28E-04        | 8,38E-04        | 1,08E-03        |
| 30 III | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 3,03E-05        | 1,98E-04        | 2,09E-04        |
| 30 IV  | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,54E-05        | 8,72E-05        | 1,18E-04        |
| 31 I   | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 1,39E-02        | 2,25E-02        | 3,14E-02        |
| 31 II  | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 9,46E-03        | 2,51E-02        | 3,30E-02        |
| 31 III | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 7,20E-03        | 1,60E-02        | 2,14E-02        |
| 31 IV  | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | <b>2,46E-02</b> | <b>3,87E-02</b> | <b>5,47E-02</b> |
| 32 I   | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 5,98E-03        | 9,18E-03        | 1,30E-02        |
| 32 II  | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 3,31E-03        | 8,64E-03        | 1,21E-02        |
| 32 III | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 4,97E-03        | 8,30E-03        | 1,16E-02        |
| 32 IV  | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 9,50E-03        | 1,48E-02        | 2,09E-02        |

### 5.3.2 Nátrubek KIP

Výsledné hodnoty kumulace únavového poškození pro nátrubek KIP jsou uvedeny v příloze G. V tabulce G.1 jsou uvedeny hodnoty kumulace únavového poškození v hodnocených bodech (viz obrázek G.1), nacházejících se v oblasti nátrubku KIP. Lze si povšimnout výrazné hodnoty pro oblast přivaření ochranného perforovaného krytu na vnitřním povrchu nátrubku.

Jde o místo styku materiálu s různou teplotní roztažností (feritická nádoba a austenitický kryt) což vede k vysokým hodnotám teplotních napětí. Konstrukce krytu není příliš vhodná, jelikož perforovaný kryt, který je přivařený k vnitřnímu povrchu TNR, má čtvercový tvar (vhodnější by byl tvar oblý, resp. kruhový), viz obrázek A.4. Nicméně samotný kryt není bezpečnostně významná komponenta.

Výsledek hodnocení dle zprávy [36] udává, že se může jednat o významné místo z hlediska nízkocyklové únavy, a proto si tento uzel do budoucna vyžádá detailnější studii (viz kapitolu 9).

## 5.4 Víko reaktoru

Víko reaktoru sestává ze dvou částí. Poměrně masivní příruba je obvodovým „V“ svarem spojena eliptickým vrchlíkem, viz obrázek A.10. V přírubě je 54 otvorů pro šrouby hlavního přírubového spoje (HPS). Ve vrchlíku víka jsou provedeny vertikálně vedené otvory, ve kterých jsou uloženy nátrubky horního bloku (nátrubky TK, EV, SUZ), viz obrázek A.11. Tyto nátrubky jsou uloženy s přesahem a ve spodní části otvorů na úrovni vnitřního povrchu jsou přivařeny k víku. Nátrubky jsou vyrobeny z konstrukční oceli s označením 20 (dle ruského značení) a jsou opatřeny nerezovou košilkou, uloženou s vůlí, viz obrázek A.12. V oblastech okolo otvorů provedených ve vrchlíku víka se při zatížení vnitřním přetlakem koncentruje napětí. Z analýz provedených ve zprávě [37] je ukázáno, že vlivem mechanických ohybových napětí v elipsoidu vrchlíku víka jsou nejvíce namáhány otvory na periférii, kdy se napětí koncentrují na vnitřním povrchu v oblasti přivaření nátrubků. Proto lze v této oblasti očekávat významná namáhání, jak od tlakových tak teplotních zatížení (v oblasti se nalézají různé materiály s různou teplotní roztažností). Pokud by se pro účely hodnocení únavy v oblasti přivaření nátrubku modelovala oblast středového nátrubku v centru elipsoidu (nátrubek na víku v ose reaktoru), bylo by možné využít rotační symetrie a úlohu s výhodou řešit jako rotačně symetrickou úlohu. Bohužel by došlo k zanedbání koncentrace napětí v periferních oblastech. Proto bylo únavové hodnocení provedeno na trojrozměrném modelu [37]. Na řešení této úlohy se autor této práce významně podílel. Výsledky těchto analýz jsou uvedeny v příloze H. Dále ke kraji elipsoidu, za periferní hranicí nátrubků SUZ, TK a EV, se nachází nátrubek odvodu reaktoru, viz obrázek A.12. Tento

nátrubek je obdobně uložen ve vertikálním kanále (viz obrázek A.13). Je vyroben z austenitické oceli s označením 08Ch18N10T. Nátrubek je rovněž přivařen k víku v jeho spodní části (viz obrázek A.14). Jelikož je nátrubek vyroben z austenitické oceli a je vsazen do víka z feriticko-perlitické oceli, lze předpokládat vyšší hodnoty teplotních zatížení v důsledku rozdílných teplotních dilatací. Hodnocení tohoto uzlu je detailně popsáno ve zprávě [37] a výsledky jsou uvedeny v kapitole 5.4.1.

Ve zmíněné kapitole jsou uvedeny výsledky hodnocení únavy pouze pro oblast přivaření a pro těleso nátrubku odvzdušnění. Výsledky hodnocení přírubového spoje nátrubku odvzdušnění, jakož i přírubových spojů nátrubků SUZ, TK a EV, jsou uvedeny v příloze J.

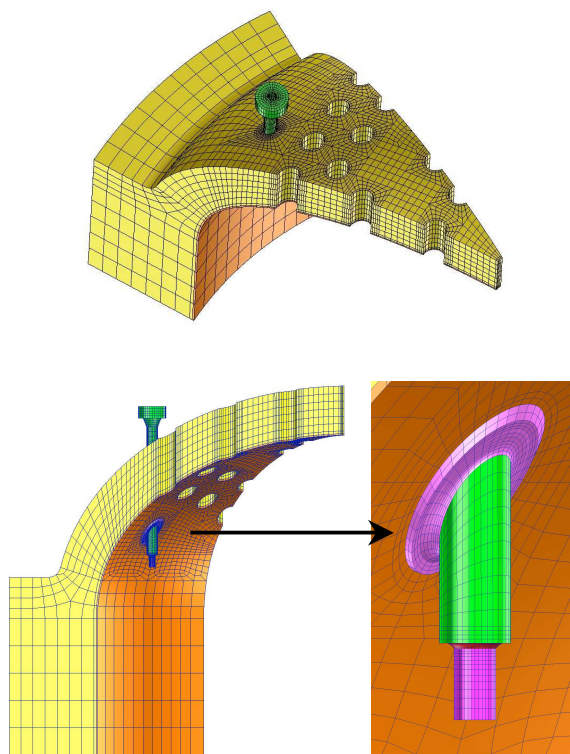
### 5.4.1 Oblast vetknutí nátrubku odvzdušnění do víka TNR

Výpočtový model, který byl použit pro analýzy napjatosti v oblasti přivaření nátrubku odvzdušnění reaktoru, provedených a dokumentovaných ve zprávě [37], je vyobrazen na obrázku 5.12.

Na základě analýzy NDS byla identifikována potenciálně významná místa kumulace únavového poškození. Tato místa jsou vyobrazena na obrázcích 5.13 a 5.14. Hodnocené body ležící v oblasti přivaření nátrubku, byly hodnoceny ve čtyřech vzájemně kolmých rovinách. Polohy těchto definovaných rovin jsou patrné z obrázku 5.15.

Výsledné hodnoty kumulace únavového poškození v nátrubku odvzdušnění a oblasti jeho přivaření k víku TNR jsou uvedeny v tabulce 5.11, kde jsou uvedeny výsledky pouze pro rovinu I. Výsledné hodnoty v bodech (obrázek 5.13) ležících ve zbylých rovinách II, III a IV jsou uvedeny v příloze I v tabulce I.2.

Níže v tabulce jsou uvedeny výsledky pouze pro dominantní směr I, kde se nachází nejvýznamnější hodnoty kumulace únavového poškození. Hodnoty kumulace únavového poškození v hodnocených bodech, které leží ve zbylých rovinách II, III a IV jsou uvedeny v příloze I, v tabulce I.2.

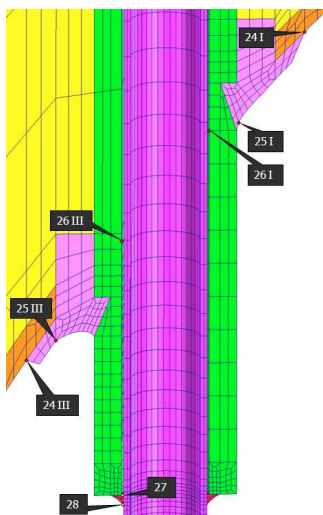


**Obr. 5.12:** Výpočtový MKP model víka TNR s nátrubkem odvodu.

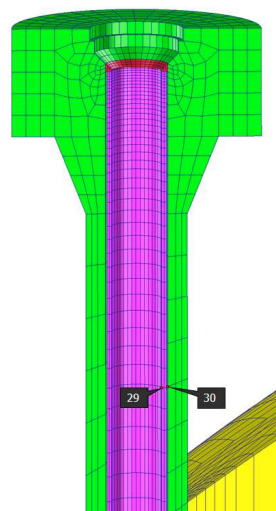
**Tab. 5.11:** Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti přivaření nátrubku vzdušníku k víku reaktoru.

| bod  | materiál                      | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let      |
|------|-------------------------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 24 I | EA-400/10T<br>Sv-08Ch19N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 4,87E-02        | 8,27E-02        | 1,15E-01    |
| 25 I | EA-400/10T<br>Sv-08Ch19N10G2B | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 4,47E-01        | 8,19E-01        | 1,12        |
| 26 I | 08CH18N10T                    | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | <b>4,97E-01</b> | <b>8,88E-01</b> | <b>1,24</b> |
| 27   | EA-400/10T<br>Sv-08Ch19N10G2B | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 6,50E-03        | 9,99E-03        | 1,44E-02    |
| 28   | EA-400/10T<br>Sv-08Ch19N10G2B | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 1,29E-03        | 2,01E-03        | 2,90E-03    |
| 29   | 08CH18N10T                    | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 2,38E-05        | 3,84E-05        | 6,14E-05    |
| 30   | 08CH18N10T                    | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 4,55E-10        | 7,37E-10        | 1,04E-09    |

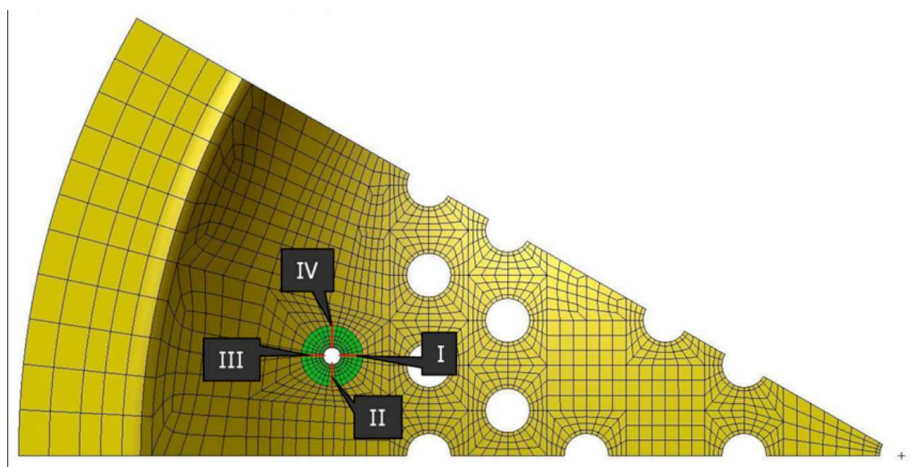
Hodnocení přírubového spoje nátrubku odvodu s přírubou odvodušňovacího potrubí je uvedeno v příloze J.1.1.



**Obr. 5.13:** Hodnocené body v oblasti přivaření nátrubku odvodu k víku.



**Obr. 5.14:** Hodnocené body v oblasti nátrubku odvodu.



**Obr. 5.15:** Směry ve kterých leží hodnocené body v oblasti přivaření nátrubku odvodu k víku TNR.

## 5.5 Hlavní přírubový spoj

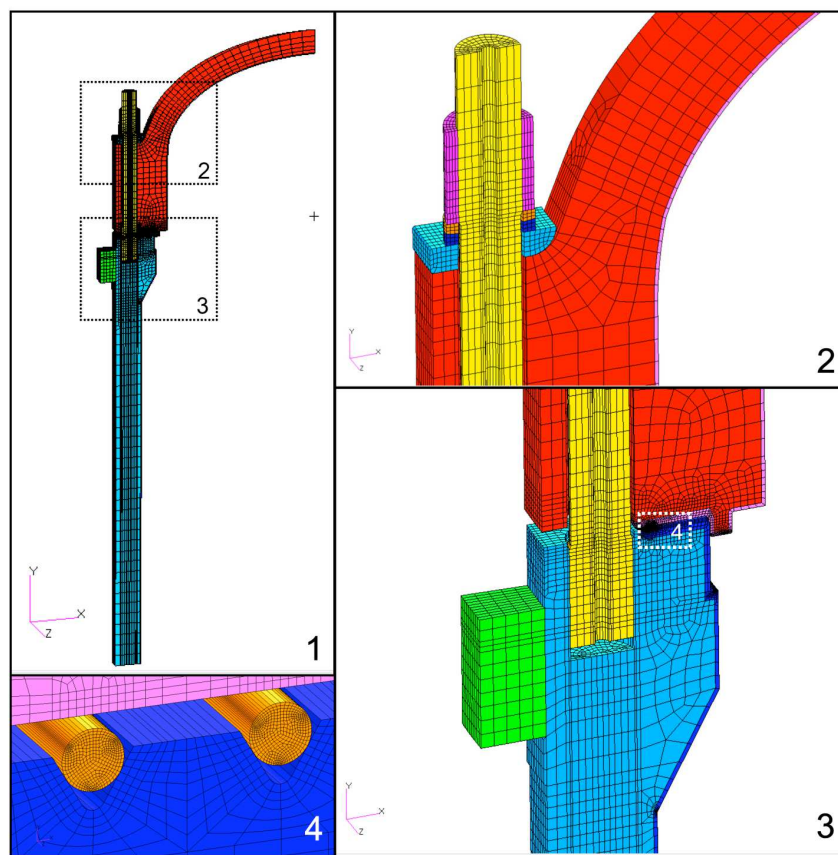
Hlavní přírubový spoj (HPS) slouží (viz obrázek A.8) pro utěsnění reaktoru šroubovým spojením TNR a víka. Spoj se realizuje pomocí 54, po obvodu ekvidistantně rozmístěných šroubů M170, matic a dvojic kulových podložek pro kompenzaci ohybového momentu, viz obrázek A.7. Jedná se o velmi robustní přírubový spoj. Příruba má průměr  $\sim 4\text{m}$ ; šrouby mají délku  $\sim 2\text{m}$  a váží přes 300kg. Naproti tomu velmi malé těsnění je tvořeno dvojicí niklového drátu o průměru 5mm, zasazeného ve dvojici „V“ drážek, viz obrázek A.9.

### 5.5.1 Výpočtový model HPS

Výpočtový MKP model je vyobrazen na obrázku 5.16. Z obrázku je patrné, že byla modelována  $\frac{1}{108}$  obvodu. Bylo zde využito cyklické symetrie geometrie přírubového spoje. V modelu byla zahrnuta 1/2 šroubu a ostatních elementů. Byly využity kvadratické 20uzlové prvky. Detailnější popisy výpočtového modelu, způsob aplikace okrajových podmínek, popis analyzovaných provozních režimů, stejně jako parciálních výsledků jsou uvedeny v technické zprávě [38]. Ta je většinou dílem autora této práce. Pro nedostatek prostoru si níže uvedeme pouze výsledné hodnoty kumulace únavového poškození  $D$ .

Materiál těsnění byl ve výpočtu uvažován jako elasto-plastický, aby došlo k jeho plnému vmáčknutí do drážek a následně ke kontaktu příruby víka s přírubou TNR. Hlavní přírubový spoj je totiž spojen s vedlejším silovým tokem. Správné modelování této funkce je důležité pro zachování reálných tuhostí spoje, a pro správné přerozdělení zátěže od vnitřního přetlaku mezi přitížení šroubů a odlehčení těsnění, resp. odlehčení vzájemného předepnutí přírub. Zbylý materiál, především v oblastech podléhajícím hodnocení, byl ve výpočtu uvažován jako elastický. To je podmínka pro následné využití postupu hodnocení dle kapitoly 3 a použití vytvořené aplikace, popsané v kapitole 4.

Ve výpočtech bylo také uvažováno přitěžování, resp. odlehčení zatížení ve šroubech v důsledku teplotních režimů. Vlivem masivnosti konstrukce HPS dochází v průběhu přechodových režimů k vzniku výrazných teplotních gradientů v tělese HPS. V těchto režimech zůstává šroub významně teplejší při režimech s poklesem teploty, resp. studenější při režimech se zvýšením teploty média. Na obrázku D.1 je vyobrazeno teplotní pole při režimu 1.3 na konci náhřevu (kdy lze vidět, že je šroub chladnější než listy přírub). Na obrázku D.2 je vyobrazeno teplotní pole při režimu 2.12 na konci zchlazení provozního média, kde je patrná výrazně vyšší teplota ve šroubu.



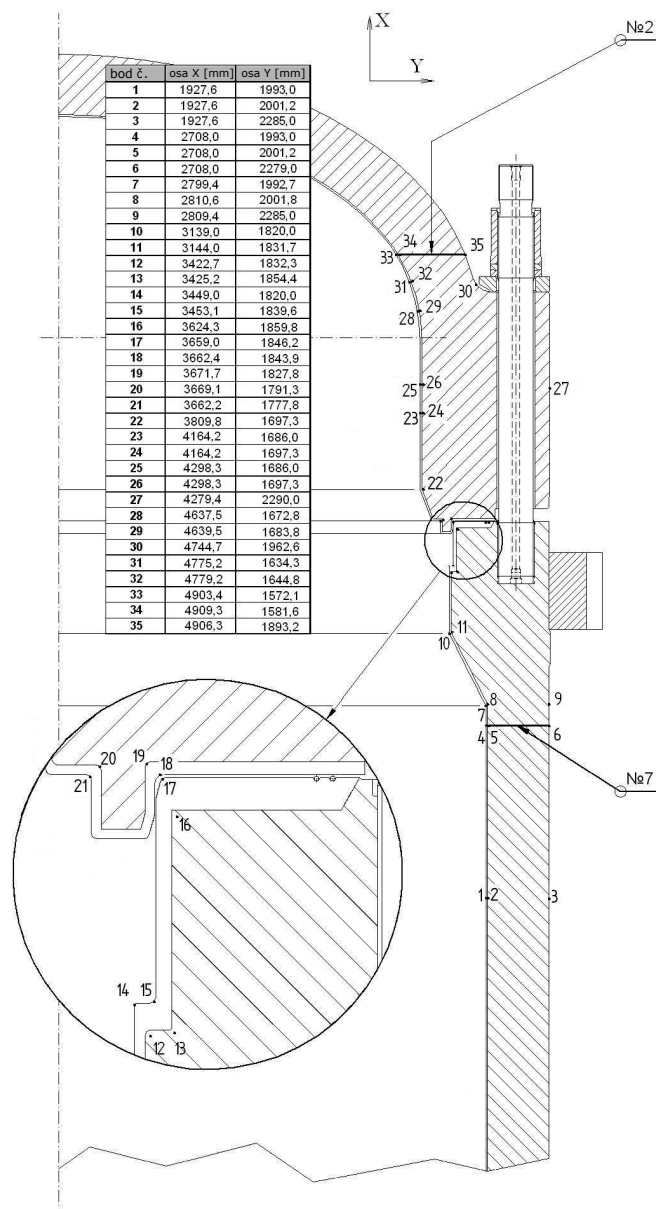
**Obr. 5.16:** Výpočtový MKP model přírubového spoje TNR:  
 1 - celkový pohled na výpočtovou oblast, 2 - oblast normí části šroubu, 3 - oblast dělicí roviny, 4 - oblast těsnění.

## 5.5.2 Výsledky výpočtů pro HPS

Hodnocení se provádělo v bodech situovaných v oblastech koncentrátorů napětí a v oblastech, kde byla na základě MKP výpočtu identifikována maximální napětí v průběhu analyzovaných provozních režimů uvedených v [38]. Body, v nichž byla vyhodnocena hodnota kumulace únavového poškození, jsou vyobrazeny na obrázku 5.17.

Výsledné hodnoty kumulace únavového poškození v hodnocených bodech jsou uvedeny v tabulkách 5.12 až 5.14. Body, které se nacházejí převážně na vnitřním povrchu návaru příruby víka a TNR jsou uvedeny v tabulce 5.12. Hodnoty únavového poškození pro body nacházející se v základním materiálu pod návarem, tedy v blízkosti vnitřního povrchu, jsou uvedeny v tabulce 5.13. Výsledné hodnoty kumulace únavového poškození pro body na vnějším povrchu jsou uvedeny v tabulce 5.14.





**Obr. 5.17:** Hodnocené body v oblasti hlavního přírubového spoje TNR.

V tabulce 5.15 jsou uvedeny výsledné hodnoty kumulace únavového poškození pro šroub a to pro tři oblasti: (1) první aktivní závit šroubu v závitovém spojení s maticí, (2) první aktivní závit šroubu v závitovém spojení se závitovým hnízdem a (3) v hladké části dřívku šroubu.

**Tab. 5.12:** Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti hlavní příruby TNR na vnitřním povrchu návaru.

| bod | materiál        | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|-----------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1   | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,55E-02        | 2,71E-02        | 3,75E-02        |
| 4   | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 2,27E-02        | 3,85E-02        | 5,37E-02        |
| 7   | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | <b>1,75E-01</b> | <b>2,99E-01</b> | <b>4,16E-01</b> |
| 10  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 2,02E-02        | 3,32E-02        | 4,69E-02        |
| 14  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,48E-02        | 2,42E-02        | 3,45E-02        |
| 15  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,01E-01        | 1,81E-01        | 2,49E-01        |
| 17  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,20E-02        | 1,92E-02        | 2,73E-02        |
| 18  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,98E-02        | 3,38E-02        | 4,62E-02        |
| 21  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 3,02E-02        | 4,88E-02        | 6,77E-02        |
| 23  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 3,28E-02        | 5,35E-02        | 7,49E-02        |
| 25  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 3,33E-02        | 5,45E-02        | 7,61E-02        |
| 28  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 2,76E-02        | 4,62E-02        | 6,40E-02        |
| 31  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 2,64E-02        | 4,43E-02        | 6,13E-02        |
| 33  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 3,22E-02        | 5,45E-02        | 7,49E-02        |

**Tab. 5.13:** Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti hlavní příruby TNR pod návarem.

| bod | materiál     | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|--------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2   | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,40E-04        | 9,36E-04        | 1,09E-03        |
| 5   | Sv-08ChGNMTA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,16E-03        | 4,21E-03        | 5,66E-03        |
| 8   | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,95E-04        | 7,74E-04        | 9,14E-04        |
| 11  | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,15E-03        | 4,12E-03        | 5,61E-03        |
| 12  | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,67E-03        | 4,61E-03        | 6,41E-03        |
| 13  | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | <b>7,99E-03</b> | <b>1,22E-02</b> | <b>1,71E-02</b> |
| 16  | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 5,86E-04        | 9,11E-04        | 1,29E-03        |
| 19  | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,60E-03        | 3,97E-03        | 5,60E-03        |
| 20  | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,67E-03        | 2,55E-03        | 3,59E-03        |
| 22  | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,10E-03        | 2,10E-03        | 2,84E-03        |
| 24  | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,24E-03        | 2,62E-03        | 3,47E-03        |
| 26  | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,31E-03        | 2,81E-03        | 3,72E-03        |
| 29  | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 6,33E-04        | 1,73E-03        | 2,19E-03        |
| 32  | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 5,63E-04        | 1,62E-03        | 2,03E-03        |
| 34  | Sv-10ChGNMAA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,33E-03        | 4,68E-03        | 6,20E-03        |

**Tab. 5.14:** Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti hlavní příruby TNR na vnějším povrchu.

| bod | materiál     | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|--------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 3   | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,72E-05        | 1,10E-04        | 1,21E-04        |
| 6   | Sv-08ChGNMTA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | <b>1,92E-03</b> | <b>3,14E-03</b> | <b>4,42E-03</b> |
| 9   | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,97E-06        | 1,69E-05        | 2,55E-05        |
| 27  | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,18E-04        | 4,01E-04        | 5,64E-04        |
| 30  | 15Ch2NMFA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 3,44E-04        | 5,58E-04        | 9,52E-04        |
| 35  | Sv-10ChGNMAA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,55E-04        | 5,52E-04        | 8,02E-04        |

**Tab. 5.15:** Kumulace únavového poškození  $D$  ve šroubech hlavní příruby TNR.

| oblast         | materiál  | $\alpha_\sigma$ | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let      |
|----------------|-----------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-------------|
| dřík šroubu    | 38ChN3MFA | 1,00            | 10    | 2          | –           | 7,30E-03        | 1,20E-02        | 2,03E-02    |
| závit - matice | 38ChN3MFA | 4,62            | 5     | 1,5        | –           | <b>4,17E-01</b> | <b>6,78E-01</b> | <b>1,15</b> |
| závit - hnízdo | 38ChN3MFA | 3,04            | 5     | 1,5        | –           | 9,68E-02        | 1,57E-01        | 2,67E-01    |

Nejvýznamnějších hodnot kumulace únavového poškození  $D$  bylo dosaženo v oblasti „V“ drážek, sloužících pro uložení těsnícího drátu. Tyto hodnoty nejsou v tabulkách výše uvedeny, významně přesahovaly dovolenou hodnotu a zpětná analýza pomocí vytvořené aplikace prokázala, že pro tuto oblast již není aplikovatelný postup pro stanovení kumulace  $D$ , popsáný v kapitole 3. Nejvýznamnější cyklus již způsoboval dílčí poškození  $\frac{1}{N_i} > 0,1$ . Tento cyklus byl charakterizován režimem utěsnění a roztěsnění přírubového spoje. Proto pro tento uzel bylo upuštěno od hodnocení pomocí elastických MKP výpočtů při použití vytvořené aplikace. Tento uzel je vhodné analyzovat při provedení elasto-plastického MKP výpočtu s opakováním dominantního cyklu zatížení (v tomto případě utažení šroubů přírubového spoje<sup>4</sup>), až do doby stabilizace hysterezních smyček. Následně lze do hodnocení na únavu vstupovat s hodnotami amplitudy deformace  $\epsilon_a$  určenými přímo z MKP výpočtu. Další významné hodnoty kumulace únavového poškození byly lokalizovány v oblasti austenitického návaru, v místech: (1) kuželový přechod příruby do hrdlové sekce a (2) rádius v místě osazení sloužícího pro uložení vnitroreaktorové šachty (nosného válce). Místa a jejich vliv na koncentraci napětí jsou vyobrazeny na obrázcích D.3 a D.4 v příloze D. Na obrázcích je vyobrazeno rozložení hodnoty redukovaného elastického napětí v průběhu přechodového provozního režimu 1.3 na konci náhřevu, resp. režimu 2.12 na konci zchlazování.

<sup>4</sup>Při MKP elasto-plastickém výpočtu, pro tento případ, je nutné pro každé opakované utažení uvažovat nové-nedeformované těsnění a zvětšený průměr niklového těsnícího drátu v případě vyšších plastických deformací drážek.

## Kapitola 6

# Porovnání postupů dle rozdílných normativních dokumentů

V této kapitole si (na základě výše uvedených praktických příkladů) uvedeme porovnání jednotlivých normativních postupů. Při porovnání využijeme těch postupů, které byly naprogramovány do vyvinuté počítačové aplikace (viz kapitolu 4). Pro porovnávání byla vybrána tato významnější (z hlediska únavy materiálu) místa konstrukce reaktoru VVER 1000:

1. oblast přivaření dělicího prstence (body 34–44),  
základní materiál: uhlíková ocel 22K;
2. místa koncentrace napětí na vnitřním povrchu příruby TNR (body 1–11),  
základní materiál: nízkolegovaná ocel 15Ch2NMFA;
3. oblast přivaření nátrubku odvodu k víku (body 24–28),  
základní materiál: austenitická ocel 08Ch18N10T;
4. oblast přivaření austenitické košilky nátrubku SAOZ (body 11–15),  
základní materiál: austenitická ocel 08Ch18N10T.

Body byly vybrány tak, aby nereprezentovaly pouze významné hodnoty kumulace únavového poškození  $D > 10^{-1}$ , ale aby (pro účel porovnání) pokrývaly také oblasti s řádově nižšími hodnotami kumulace únavového poškození  $D > 10^{-4}$ .

Porovnání výsledků výpočtu je uvedeno v podkapitole 6.1.

## 6.1 Porovnání výsledků výpočtů při hodnoceních dle rozdílných normativních předpisů

Uvedeme si výsledky hodnocení v podobě hodnot kumulace únavového poškození  $D$  stanovených na základě těchto šesti různých postupů výpočtu:

- **postup dle NTD A.S.I. [4]:**  
Únavová křivka je definována na základě analytických vztahů (3.73) a (3.74); při přepočtu na elasto-plastický stav napjatosti se využívá „Neuberova“ pravidla (viz kapitolu 3.3.1); pro dekompozici časového průběhu redukovaného napětí se používá v normě předepsaná metoda stékání deště - „Rainflow“.
- **společný postup dle norem PNAE [3] a NTD A.S.I. [4]:**  
Analytické vztahy (3.73) a (3.74); metoda ekvivalentní energie - Glinka (viz kapitolu 3.3.2); Metoda stékání deště<sup>1</sup>.
- **postup dle normy ASME [2]:**  
Tabelované únavové křivky; přepočet na elasto-plastický stav pomocí metody ekvivalentní energie<sup>2</sup>; metoda „Rainflow“<sup>1</sup> resp. metoda maximálních rozkmitů (viz kapitolu 3.4.2).
- **postup dle PNAE [3]:**  
Analytické vztahy (3.73) a (3.74); metoda ekvivalentní energie; metoda maximálních rozkmitů.
- **postup dle VERLIFE [5]:** Pro popis křivky životnosti se používají analytické vztahy na základě Manson-Coffinova vztahu, viz [5]; dokumentem je striktně předepsané „Neuberovo“ pravidlo a metoda „Rainflow“ pro dekompozici časového průběhu.

Výsledné hodnoty kumulace únavových poškození stanovené dle uvedených metod jsou uvedeny v tabulkách 6.1 až 6.4. Ty jsou dle různých posuzovaných konstrukčních materiálů rozříděny v následujících podkapitolách 6.1.1, 6.1.2 a 6.1.3. Výsledky provedeného porovnání jsou diskutovány v podkapitole 6.1.4. Hodnoty kumulace únavového poškození  $D$  jsou stanoveny pro reálnou provozní historii, pro 28 let provozu.

---

<sup>1</sup> V normách [2, 3] je předepsána metoda maximálních rozkmitů, nicméně využití metody stékání deště při hodnocení (dle těchto norem) je obecně přijímáno.

<sup>2</sup> Metoda ekvivalentní energie dobře funguje pro jednoosé zatížení, při víceosém stavu zatížení může použití této metody vést k mírně podhodnoceným hodnotám celkové deformace  $\epsilon_t$ . Naopak metoda Neuberova hodnoty celkové deformace  $\epsilon_t$  významně nadhodnocuje.

### 6.1.1 Porovnání hodnot kumulace únavového poškození pro materiál 22K

**Tab. 6.1:** Hodnoty kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti přivaření dělicího prstence (body 34-44), určené pro 28 let provozu (26 kampaní) dle různých přístupů.

| bod | materiál | NTD                | PNAE/NTD           | ASME                      |                    | PNAE               | VERLIFE            |
|-----|----------|--------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|     |          | Neuber<br>RainFlow | Glinka<br>RainFlow | Inelastic -<br>RainFlow / | Glinka<br>MaxRange | Glinka<br>MaxRange | Neuber<br>Rainflow |
| 34  | 22K      | 0,0030             | 0,0030             | 0,0008                    | 0,0018             | 0,0060             | 0,0005             |
| 35  | 22K      | 0,0016             | 0,0007             | 0,0002                    | 0,0011             | 0,0031             | 0,0003             |
| 36  | 22K      | <b>0,6970</b>      | <b>0,2376</b>      | <b>0,0467</b>             | <b>0,1518</b>      | <b>0,7830</b>      | <b>0,1149</b>      |
| 37  | 22K      | 0,5139             | 0,1738             | 0,0307                    | 0,1254             | 0,6176             | 0,0900             |
| 38  | 22K      | 0,0058             | 0,0052             | 0,0006                    | 0,0010             | 0,0097             | 0,0013             |
| 39  | 22K      | 0,0051             | 0,0046             | 0,0005                    | 0,0010             | 0,0087             | 0,0010             |
| 40  | 22K      | 0,0296             | 0,0169             | 0,0032                    | 0,0076             | 0,0403             | 0,0104             |
| 41  | 22K      | 0,0252             | 0,0148             | 0,0024                    | 0,0070             | 0,0409             | 0,0082             |
| 42  | 22K      | 0,0241             | 0,0145             | 0,0023                    | 0,0073             | 0,0430             | 0,0074             |
| 43  | 22K      | 0,0328             | 0,0155             | 0,0026                    | 0,0127             | 0,0707             | 0,0087             |
| 44  | 22K      | 0,0561             | 0,0205             | 0,0088                    | 0,0239             | 0,0578             | 0,0170             |

### 6.1.2 Porovnání hodnot kumulace únavového poškození pro materiál 15Ch2NMFA

**Tab. 6.2:** Hodnoty kumulace únavového poškození  $D$  na vnitřním povrchu TNR v oblasti hlavního přírubového spoje (body 1-11), určené pro 28 let provozu (26 kampaní) dle různých přístupů.

| bod | materiál  | NTD                | PNAE/NTD           | ASME                      |                    | PNAE               | VERLIFE            |
|-----|-----------|--------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|     |           | Neuber<br>RainFlow | Glinka<br>RainFlow | Inelastic -<br>RainFlow / | Glinka<br>MaxRange | Glinka<br>MaxRange | Neuber<br>Rainflow |
| 1   | 15Ch2NMFA | 0,01709            | 0,01548            | 0,00576                   | 0,01081            | 0,03071            | 0,00127            |
| 2   | 15Ch2NMFA | 0,00024            | 0,00024            | 0,00026                   | 0,00047            | 0,00044            | 1,0E-06            |
| 3   | 15Ch2NMFA | 0,00003            | 0,00003            | 0,00025                   | 0,00027            | 0,00003            | 1,0E-06            |
| 4   | 15Ch2NMFA | 0,02500            | 0,02266            | 0,00882                   | 0,01268            | 0,03610            | 0,00231            |
| 5   | 15Ch2NMFA | 0,00052            | 0,00050            | 0,00069                   | 0,00094            | 0,00077            | 1,0E-06            |
| 6   | 15Ch2NMFA | 0,00073            | 0,00073            | 0,00085                   | 0,00086            | 0,00074            | 1,0E-06            |
| 7   | 15Ch2NMFA | <b>0,33051</b>     | <b>0,17459</b>     | <b>0,07145</b>            | <b>0,10356</b>     | <b>0,25276</b>     | <b>0,04618</b>     |
| 8   | 15Ch2NMFA | 0,00020            | 0,00020            | 0,00057                   | 0,00129            | 0,00035            | 1,0E-06            |

pokračování na další straně

Tab. 6.2 – pokračování z předchozí strany

| bod | materiál  | NTD                | PNAE/NTD           | ASME                                      |         | PNAE               | VERLIFE            |
|-----|-----------|--------------------|--------------------|---|---------|--------------------|--------------------|
|     |           | Neuber<br>RainFlow | Glinka<br>RainFlow | Inelastic - Glinka<br>RainFlow / MaxRange |         | Glinka<br>MaxRange | Neuber<br>Rainflow |
| 9   | 15Ch2NMFA | 3,0E-06            | 3,0E-06            | 5,7E-06                                   | 5,7E-06 | 3,0E-06            | 1,0E-06            |
| 10  | 15Ch2NMFA | 0,02137            | 0,02023            | 0,00837                                   | 0,00957 | 0,02517            | 0,00204            |
| 11  | 15Ch2NMFA | 0,00222            | 0,00215            | 0,00206                                   | 0,00209 | 0,00219            | 0,00001            |

### 6.1.3 Porovnání hodnot kumulace únavového poškození pro materiál 08Ch18N10T

**Tab. 6.3:** Hodnoty kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti přivaření nátrubku odvodu k víku TNR (body 24-28), určené pro 28 let provozu (26 kampaní) dle různých přístupů.

| bod  | materiál   | NTD                | PNAE/NTD           | ASME                                      |               | PNAE               | VERLIFE            |
|------|------------|--------------------|--------------------|---|---------------|--------------------|--------------------|
|      |            | Neuber<br>RainFlow | Glinka<br>RainFlow | Inelastic - Glinka<br>RainFlow / MaxRange |               | Glinka<br>MaxRange | Neuber<br>Rainflow |
| 24 I | 08Ch18N10T | 0,0632             | 0,0577             | 0,0086                                    | 0,0126        | 0,0921             | 0,0181             |
| 25 I | 08Ch18N10T | 1,2283             | 0,4472             | 0,0621                                    | 0,1322        | 0,9927             | 0,2205             |
| 26 I | 08Ch18N10T | <b>1,3644</b>      | <b>0,4967</b>      | <b>0,1291</b>                             | <b>0,2237</b> | <b>0,9227</b>      | <b>0,2438</b>      |
| 27   | 08Ch18N10T | 0,0105             | 0,0065             | 0,0005                                    | 0,0005        | 0,0068             | 0,0040             |
| 28   | 08Ch18N10T | 0,00106            | 0,00106            | 0,00004                                   | 0,00004       | 0,00112            | 0,00070            |

**Tab. 6.4:** Hodnoty kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti přivaření austenitické košilky nátrubku SAOZ (body 11-15), určené pro 28 let provozu (26 kampaní) dle různých přístupů.

| bod   | materiál   | NTD                | PNAE/NTD           | ASME                                      |               | PNAE               | VERLIFE            |
|-------|------------|--------------------|--------------------|---|---------------|--------------------|--------------------|
|       |            | Neuber<br>RainFlow | Glinka<br>RainFlow | Inelastic - Glinka<br>RainFlow / MaxRange |               | Glinka<br>MaxRange | Neuber<br>Rainflow |
| 11 I  | 08Ch18N10T | <b>0,4923</b>      | <b>0,1624</b>      | <b>0,0302</b>                             | <b>0,1369</b> | <b>0,6454</b>      | <b>0,0755</b>      |
| 12 IV | 08Ch18N10T | 0,3021             | 0,1007             | 0,0178                                    | 0,0892        | 0,4202             | 0,0469             |
| 13 II | 08Ch18N10T | 0,0585             | 0,0230             | 0,0030                                    | 0,0115        | 0,0767             | 0,0098             |
| 14 II | 08Ch18N10T | 0,0983             | 0,0363             | 0,0055                                    | 0,0224        | 0,1323             | 0,0160             |
| 15 II | 08Ch18N10T | 0,0862             | 0,0320             | 0,0044                                    | 0,0164        | 0,1090             | 0,0142             |

## 6.1.4 Výsledky porovnání

Nejvyšší i nejnižší hodnota kumulace únavového poškození  $D$  pro hodnocená místa není ve všech případech dosažena použitím stejného postupu.

Nejvyšší hodnoty kumulace únavového poškození jsou dosaženy při použití základní koncepce posudku dle NTD (s využitím Neuberova pravidla), nebo postupu dle PNAE (s využitím metody maximálních rozkmitů), a to různě pro různá hodnocená místa.

Přibližně jsou výsledky pro kritická místa 2 až 4 krát vyšší užitím těchto postupů, než při užití společného postupu PNAE/NTD s metodou „Rainflow“ a Glinkovy metody.

Z uvedeného vyplývá, že použití Neuberova pravidla či metody maximálních rozkmitů vede vždy k nadhodnocení výsledných hodnot kumulace únavového poškození. Zda-li je maximální hodnoty  $D$  dosaženo při užití postupu NTD či při užití postupu PNAE, závisí především na tom, který z konzervatismů převládá pro konkrétní hodnocené místo:

- Pokud k celkovému poškození  $D$  významně přispívají cykly s vysokými hodnotami amplitudy deformace  $\epsilon_a$  o nízkých počtech  $n_i$ , pak převládá efekt nadhodnocení vlivem použití „Neuberova“ přístupu.
- A naopak, pokud k celkovému poškození  $D$  významně přispívají cykly s nižšími hodnotami amplitudy deformace  $\epsilon_a$  o vyšších počtech  $n_i$ , pak převládá efekt nadhodnocení vlivem použití metody maximálních rozkmitů.

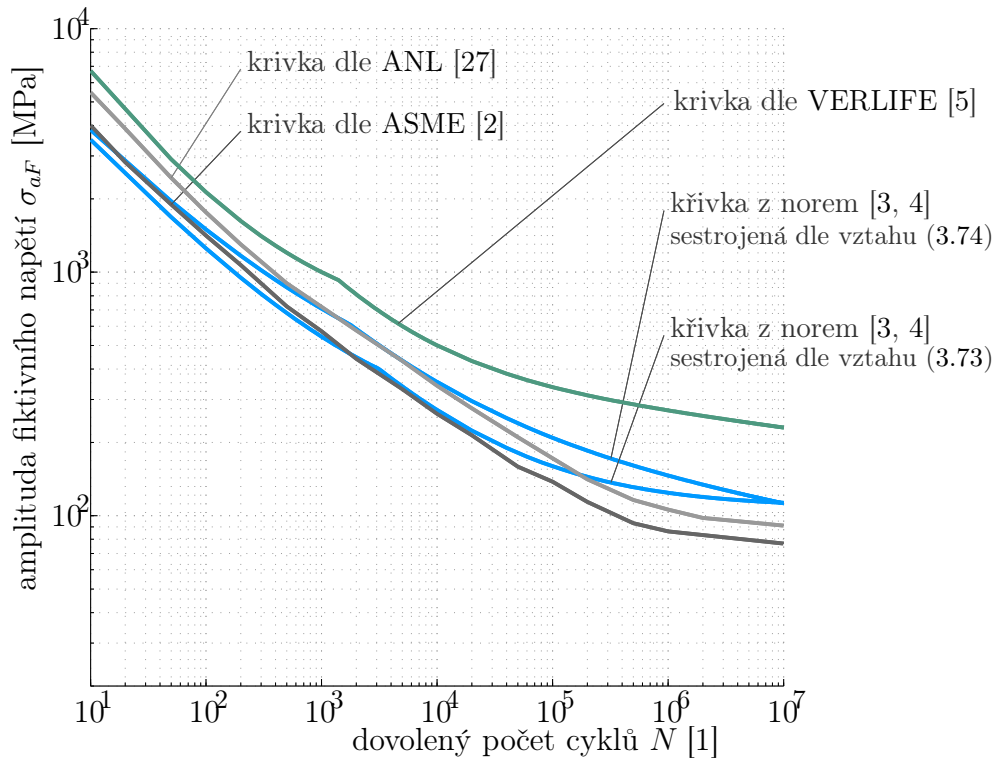
Obecně vždy metoda maximálních rozkmitů dává vyšší hodnotu kumulace únavového poškození než metoda „Rainflow“. To je patrné také při porovnání hodnot  $D$  dle postupu ASME, kde se využilo obou metod. Hodnoty  $D$  bývají průměrně dvojnásobné, při užití metody maximálních rozkmitů. Pro velmi nízké hodnoty  $D$ , které jsou významně tvořeny jen několika dominantními cykly (v našem případě např. od uvažovaných havarijních režimů), je rozdíl mezi výsledky velmi malý. Maximální rozkmity získané metodou „Rainflow“ odpovídají maximálním rozkmitům obdržným metodou „Maximálních rozkmitů“, rozdíly mezi metodami, jsou především u cyklů s menšími či středními amplitudami.

Celkové rozdíly mezi maximální a minimální hodnotou kumulace  $D$  napříč použitými metodami bývají u kritických míst většinou o jeden řád.

Pro základní materiál 22K a 08Ch18N10T leží výsledné hodnoty kumulace únavového poškození stanovené dle postupu VERLIFE mezi hodnotami získanými postupem ASME (s „Rainflow“) a PNAE/NTD.

Pokud bychom při výpočtu dle VERLIFE použili Glinkova přístupu namísto Neuberova pravidla, dostali bychom hodnoty  $D$  velmi blízké hodnotám stanoveným





**Obr. 6.1:** Porovnání únavových křivek dle různých dokumentů pro materiál TNR. Křivky dané vztahy 3.73 a 3.74 byly sestrojeny pro základní materiál 15Ch2NMFA s následujícími parametry:  $R_m = 539\text{MPa}$ ,  $R_{p0.2} = 441\text{MPa}$ ,  $Z = 50\%$ ,  $\max[\sigma_{aF}(t)] = 800\text{MPa}$  a  $r_\sigma = -1$ . Křivka dle VERLIFE je pro materiál 15Ch2NMFA a teplotu ( $T = 350^\circ\text{C}$ ). Křivky dle ASME (černě) a ANL (šedě) jsou pro třídu nízkolegovaných ocelí.

dle postupu ASME (s „Rainflow“). V obou postupech se využívá únavových křivek určených na základě experimentálních zkoušek.

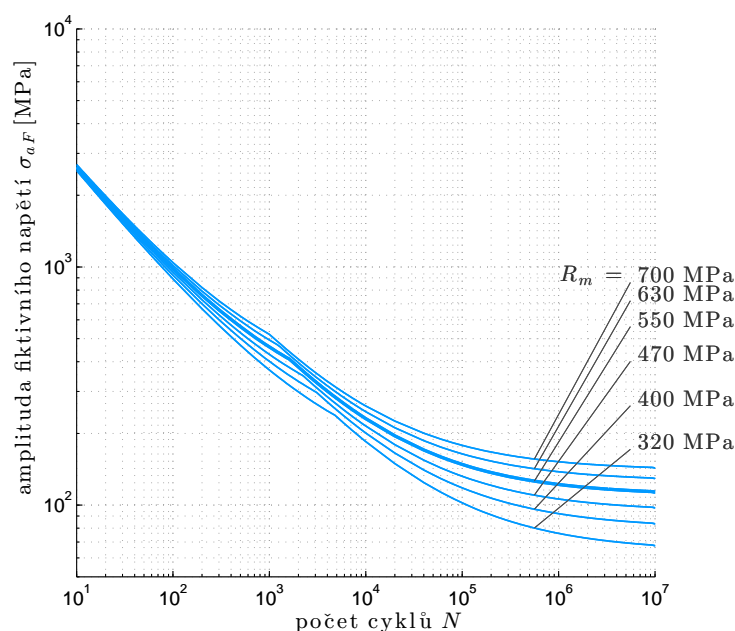
Významně nižších hodnot je obdrženo při použití postupu dle VERLIFE pro základní materiál 15Ch2NMFA. Důvodem je použitím koncepce Neubergera a především relativně velký rozdíl únavových křivek. Únavová křivka pro základní materiál TNR (15Ch2NMFA), která je uvedena v dokumentu VERLIFE, byla stanovena na základě experimentálních zkoušek. Tato křivka leží výrazně nad křivkami nízkolegovaných ocelí uvedených např. v ASME. Nachází se také výše, než analyticky definované křivky dle [3, 4], viz obrázek 6.1.

Oblasti s austenitickou ocelí vykazují také významnou citlivost výsledků na použitém postupu, proto si v následující kapitole ukážeme citlivost na změnu vstupních parametrů (mechanických vlastností ocelí) při určení únavové křivky dle analytických vztahů [3, 4], abychom v kapitole 6.3 mohli poukázat na jisté ne-

srovnalosti při stanovení hodnoty kumulace únavového poškození austenitických ocelí dle postupů [3, 4], využívajících únavové křivky v analytickém tvaru (viz rovnice 3.73 a 3.74).

## 6.2 Závislost únavových křivek na tahových vlastnostech materiálu

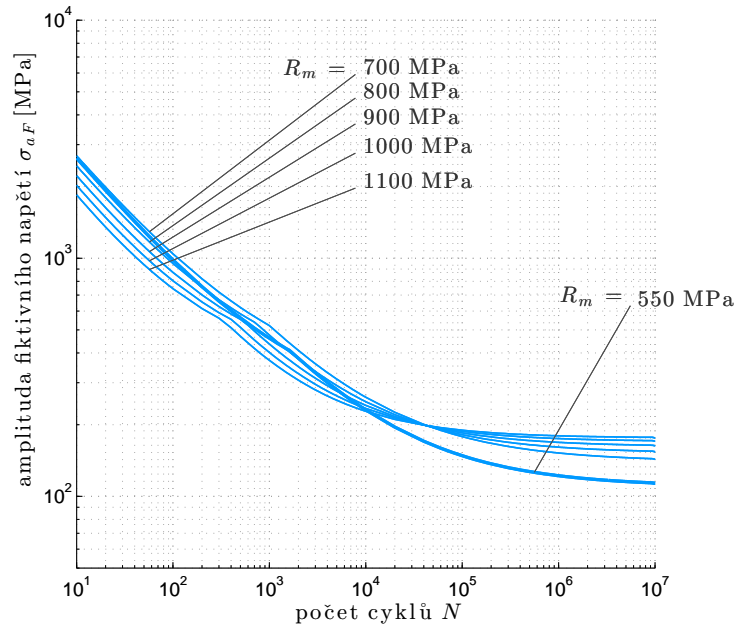
V normách [3, 4], jak jsme si výše ukázali (viz kapitolu 3.6), jsou křivky únavové životnosti stanoveny pomocí analytických vztahů (3.73) a (3.74). Do těchto vztahů vstupují, mimo jiné, hodnoty tahových vlastností materiálu  $R_m$ ,  $Z$  a  $E$  (na hodnotě  $R_{p0.2}$  nejsou křivky citlivé<sup>3</sup>).



**Obr. 6.2:** Závislost únavové křivky na hodnotě meze pevnosti  $R_m$ , pro hodnoty  $R_m < 700$  MPa.

Citlivost na změnu mechanických vlastností můžeme vidět na obrázcích 6.2 - 6.5. Na obrázku 6.6 je vyobrazena změna únavové křivky závisle na hodnotě maximální plastické deformace, dosažené v celé historii zatěžování. Tato hodnota,

<sup>3</sup>Hodnota  $R_{p0.2}$  se používá při stanovení elastické deformace a slouží pro odečtení elastické složky od celkové maximální deformace v průběhu zatížení, viz vztah (3.52).



**Obr. 6.3:** Závislost únavové křivky na hodnotě meze pevnosti  $R_m$ , pro hodnoty  $R_m > 700$  MPa.

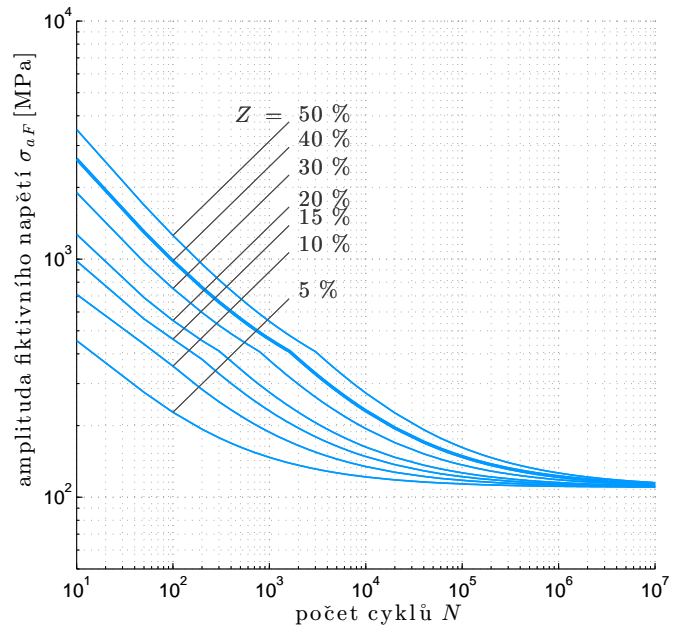
pokud roste, snižuje únavovou křivku. Na uvedených obrázcích je tučnou čarou vyobrazena křivka pro následující mechanické vlastnosti:  $R_m = 550$  MPa,  $R_{p0.2} = 450$  MPa,  $E = 190$  GPa,  $Z = 40$  %; a pro:  $\max_t[\epsilon_p(t)] = \frac{800\text{MPa} - R_{p0.2}}{E}$ .

Hodnota meze pevnosti  $R_m$  významně ovlivňuje především vysokocyklovou část křivky (viz obrázek 6.2), protože vstupuje do určení hodnoty meze únavy  $\sigma_c$  dle vztahu (3.55). Pokles meze únavy je přímo úměrný změně hodnoty meze pevnosti. Pokud hodnota meze pevnosti  $R_m > 700$  MPa, pak změna hodnoty meze pevnosti ovlivňuje únavovou křivku také v nízkocyklové části, viz obrázek 6.3. Důvodem je změna hodnoty exponenciálního koeficientu  $m_p$  dle vztahu (3.54).

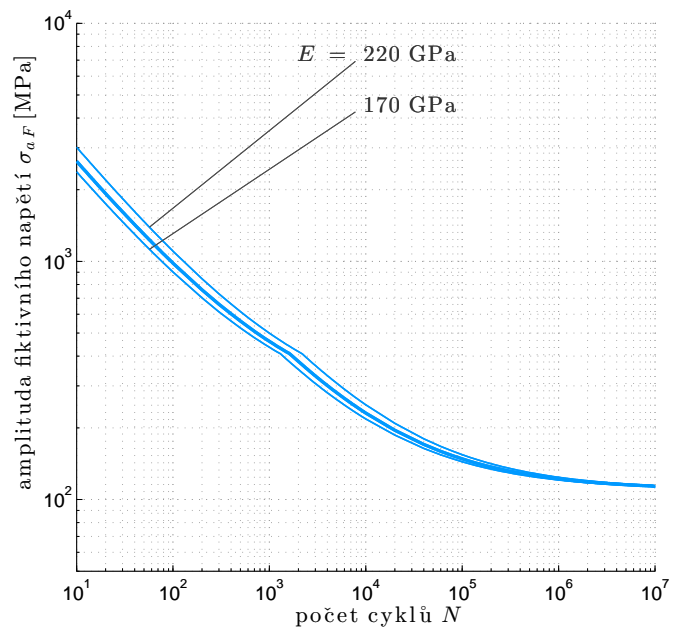
V rámci obvyklých změn hodnot modulu pružnosti  $E$  (pro běžné oceli) se únavová křivka příliš nemění, viz obrázek 6.5.

Křivky jsou závislé také na hodnotě maximální dosažené hodnoty plastické deformace  $\epsilon_p$  v průběhu zatěžování, což je dáno vztahem (3.51), resp. (3.52). Změna její hodnoty ovlivňuje nízkocyklovou část únavové křivky tím významněji, čím víc se maximální plastická deformace přiblíží hodnotě deformace při přetržení vzorku  $\epsilon_{fr}$ , určené dle rovnice (3.6). Závislost je vyobrazená na obrázku 6.6.

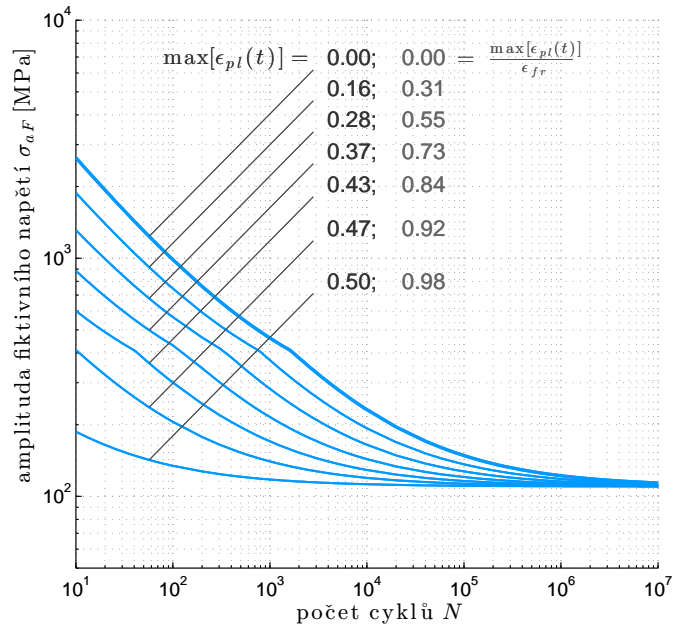
Hodnoty mechanických vlastností jsou teplotně závislé, proto jsou teplotně závislé také analyticky sestavené křivky dle [3, 4], na rozdíl od tabelovaných křivek dle [2], které se uvažují jako teplotně indiferentní. Experimentálně bylo prokázáno



Obr. 6.4: Závislost únavové křivky na hodnotě kontrakce  $Z$ .



Obr. 6.5: Závislost únavové křivky na hodnotě modulu pružnosti  $E$ .



**Obr. 6.6:** Závislost únavové křivky na hodnotě maximální dosažené plastické deformace  $\epsilon_{pl}$  v průběhu zatěžování.

[27, 39], že výsledky únavových zkoušek austenitických ocelí prováděných za vyšších teplot leží přibližně ve stejném rozmezí jako výsledky zkoušek za pokojové teploty. Křivky uvedené v [2] jsou proto použitelné pro teploty do  $400^\circ\text{C}$ <sup>4</sup>. Navíc křivka dle [2] je určena také na základě dat ze zkoušek prováděných při teplotách vyšších než pokojová.

Pro garantované hodnoty  $R_m$ ,  $Z$  a  $E$  pro pokojovou teplotu leží křivky dle (3.73) a (3.74) výrazně pod křivkou dle [2], viz obrázek 3.14. Hodnoty  $R_m$ ,  $E$  a mnohdy i  $Z$  s teplotou klesají. Dosadíme-li do vztahů hodnoty snížené, je z uvedených závislostí zřejmé, že únavová křivka pro zvýšenou teplotu leží níže než křivka pro pokojovou teplotu. To v případě austenitického materiálu není dle [27, 39] korektní předpoklad. Proto v následující kapitole 6.3 provedeme porovnání únavové křivky pro austenitickou nerezovou ocel s křivkou stanovenou na základě analýzy experimentálních dat.

<sup>4</sup>Použitelnost do teplot při kterých se neuplatňuje efekt materiálového tečení.

## 6.3 Křivka životnosti austenitické oceli, určená na základě výsledků experimentů

Výsledky únavových experimentů pro austenitický materiál byly převzaty ze zprávy [40]. Tyto hodnoty odpovídají experimentům na hladkých vzorcích při tahově-tlakovém namáhání. Zatěžování probíhalo za kontrolované deformace (tvrdé zatěžování). Výsledky provedených zkoušek dle [40] jsou vyobrazeny na obrázku 6.7. Testovaný materiál byla austenitická nerezová ocel s označením X10-CrNiNb-18-9 a X-10-CrNiTi-18-9 dle německé DIN. Tyto materiály odpovídají stejné třídě<sup>5</sup> jako austenitická ocel s označením 321 či 316T dle amerického AISI, resp. s označením 08Ch18N10T dle ruské ГОСТ, která se běžně používá při výrobě komponent jaderných reaktorů typu VVER. Zkoušky byly prováděny pro teploty mezi pokojovou teplotou ( $T \approx 20^\circ\text{C}$ ) a teplotu  $T = 350^\circ\text{C}$ .

Aproximace experimentálních dat byla uvažována křivkou v Langerově tvaru, viz vztah (3.70). Při použití upravené metody nejmenších čtverců [27] byly identifikovány hodnoty parametrů:  $A_1 = 20,7866$ ,  $A_2 = 0,10254$  a  $n_1 = 0,4568$ . Výsledná aproximační křivka má následující tvar:

$$\epsilon_a = 20,7866N^{-0,4568} + 0,10254. \quad (6.1)$$

Pokud chceme vyjádřit křivku v rozměrech amplitudy fiktivního napětí  $\sigma_{aF}$ , postačí vynásobit hodnoty amplitudy deformace  $\epsilon_a$  modulem pružnosti materiálu  $E$ , tedy:

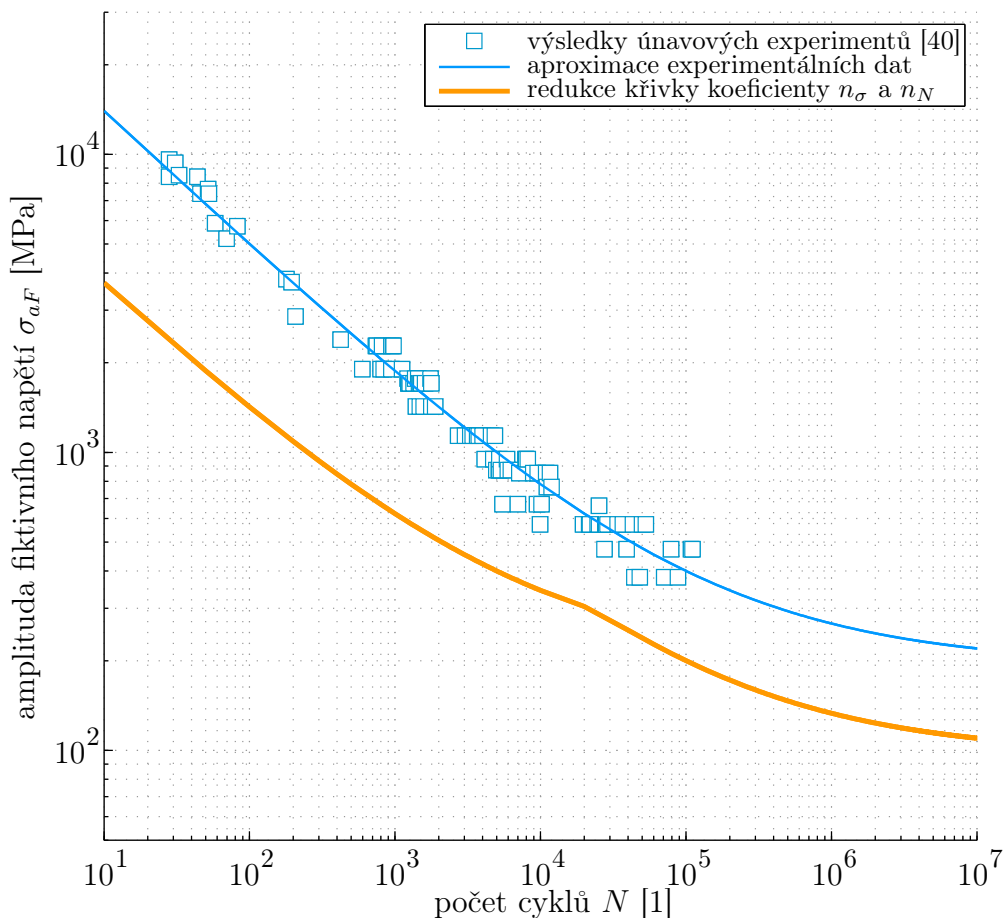
$$\sigma_{aF} = E 20,7866N^{-0,4568} + E 0,10254. \quad (6.2)$$

Identifikovaná křivka, dána vztahem (6.2), je vyobrazena na obrázku 6.7 tenkou modrou čarou. Pro definování únavové křivky redukovujeme aproximační křivku koeficienty  $n_\sigma$  a  $n_N$ , viz kapitolu 3.7, při použití konzervativních hodnoty redukčních koeficientů  $n_\sigma = 2$  a  $n_N = 20$  v souladu s postupem ASME [2]. Výsledná křivka únavové životnosti austenitické oceli, kterou jsme takto stanovili, je vyobrazena na obrázku 6.7 tlustou oranžovou čarou.

Zde identifikovanou křivku únavové životnosti pro austenitickou ocel porovnáme v následující kapitole 6.4 s ekvivalentními únavovými křivkami austenitické oceli, určenými dle norem [2, 3, 4].

---

<sup>5</sup>Testované materiály mají obdobné chemické složení.

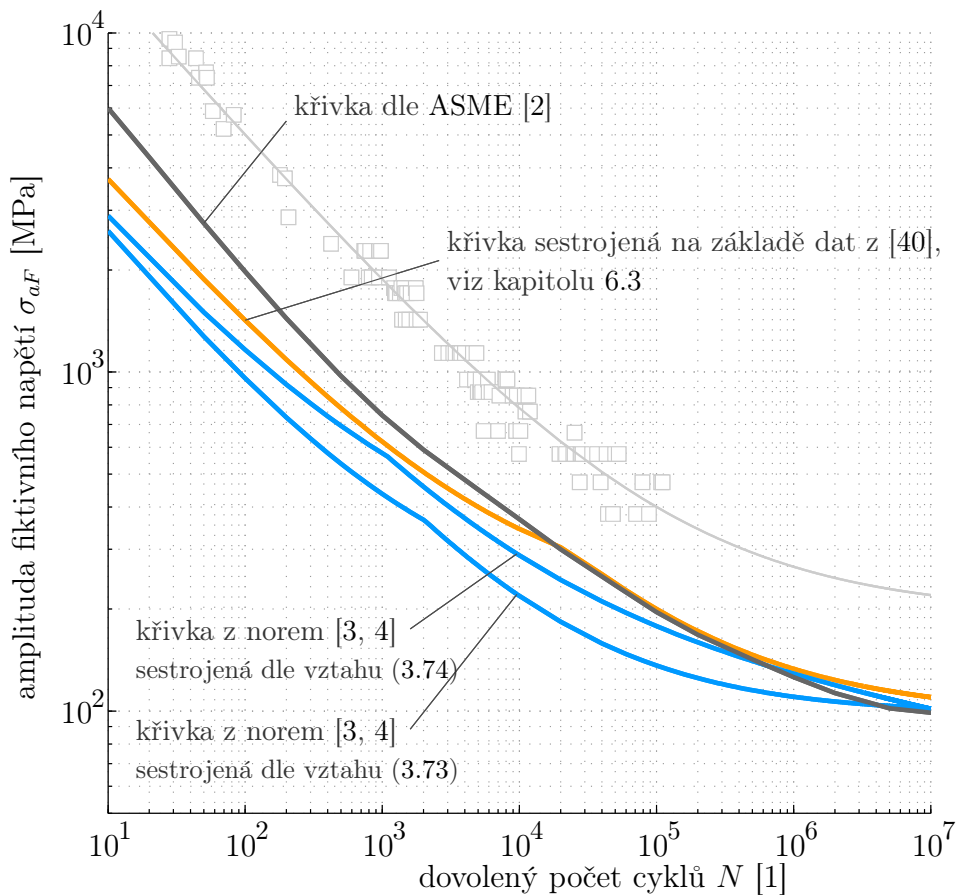


**Obr. 6.7:** Aproximace výsledků únavových zkoušek (za kontrolované deformace) materiálů X10-CrNiNb-18-9 a X-10-CrNiTi-18-9 prováděných v rozmezí teplot 20-350°C [40].

## 6.4 Porovnání křivek pro austenitickou ocel

Křivky limitní únavové životnosti austenitické oceli definované dle rozdílných normativních dokumentů ([2, 3, 4]) jsou vyobrazeny na obrázku 6.8. Na obrázku 6.8 je vykreslena křivka, kterou jsme na základě experimentálně určených hodnot (převzatých z [40]) identifikovali v předchozí kapitole 6.3.

Z obrázku je patrné že únavová křivka ASME [2] je ve vysokocyklové části relativně shodná s křivkou stanovenou v předchozí kapitole na základě experimentálních dat. Především je velmi dobrá shoda v oblasti vyšších počtů cyklu  $N > 10^4$ . V oblasti nízkocyklové části ( $N < 10^4$ ) se křivky začínají rozcházet směrem k nižšímu počtu cyklů. Důvodem je rozdílná hodnota použitého redukčního koeficientu  $n_N$ , který se uplatňuje především v nízkocyklové oblasti, jak jsme si



**Obr. 6.8:** Porovnání únavových křivek pro austenitickou ocel dle různých normativních předpisů [2, 3, 4] s křivkou stanovenou v kapitole 6.3. Na pozadí jsou vykreslena experimentálně stanovená data pro austenitickou ocel (převzata z [40]).

ukázali v kapitole 3.7. Při konstrukci únavové křivky austenitických ocelí dle ASME se použil faktor  $n_N = 12$  (viz [27, 28]), zatímco při konstrukci křivky dle experimentálních hodnot jsme konzervativně použili dřívější ASME přístup kdy  $n_N = 20$ . Pokud bychom použili stejné hodnoty redukčního koeficientu  $n_N = 12$ , pak bychom dostali velmi dobrou shodu křivek také v nízkocyklové oblasti, viz obrázek 6.10. Vysokocyklová část je poměrně shodná díky redukčního faktoru  $n_\sigma$ , který je  $n_\sigma = 2$  dle ASME i [27].

Křivky sestrojené na základě analytických vztahů (3.73) a (3.74) dle norem [3, 4] leží výrazně pod oběma dříve zmíněnými únavovými křivkami. Křivky byly sestrojeny pro mechanické vlastnosti austenitické oceli:  $R_m = 491\text{MPa}$ ,  $R_{p0.2} = 196\text{MPa}$ ,  $Z = 40\%$  a  $E = 190\text{GPa}$ .

Jedním z důvodů je fakt, že pro konstrukci únavových křivek používáme ga-



rantované hodnoty mechanických vlastností (uvedené v normativních dokumentech), ty jsou dány spodními kvantily reálných hodnot a nikoliv středními hodnotami plynoucími z tahových zkoušek. Například hodnota kontrakce  $Z$  austenitické oceli 08Ch18N10T se běžně při tahových zkouškách pohybuje v rozmezí  $Z \in (50\%, 60\%)$ , zatímco garantovaná hodnota uvedená v normě [3, 4] je pouze  $Z = 40\%$ . Toto nabalování různých koeficientů bezpečnosti a konzervatismů vede v případech postupů dle norem [2, 3] k výraznému nadhodnocení výsledku únavových výpočtů. Česká norma [4] předepisuje použití přístupu Neubergera pro přepočítání na elasto-plastický stav napjatosti, namísto metody ekvivalentní energie, jak je uvedeno v [3]. To vede ve finále k ještě vyššímu nadhodnocení výsledku únavových výpočtů.

I přes prvotní skepsi při porovnání analytických vztahů z [3, 4] s únavovými křivkami austenitické oceli dle [2] můžeme konstatovat, že pro křivky stanovenou dle vztahu (3.74) není rozdíl, vůči experimentálně určeným křivkám, tak výrazný. V oblasti vyššího počtu cyklů  $N > 10^3$  je křivka dosti blízko křivkám určeným dle [2], resp. křivce stanovené v kapitole 6.3.

Křivka stanovená dle vztahu (3.73) je nejnižší položená. Tato křivka je rovněž křivkou, která se při hodnocení únavy dle norem [3, 4] obecně uplatňuje, jelikož je vždy (v oblasti  $N \leq 10^7$  cyklů) níže položená než křivka daná vztahem (3.74). Normy [3, 4] vyžadují použití té nejkonzervativnější (nejnižší položené) křivky při určení dovoleného počtu cyklů  $N$ , či dovolené amplitudy zatížení  $\sigma_{aF}$ .

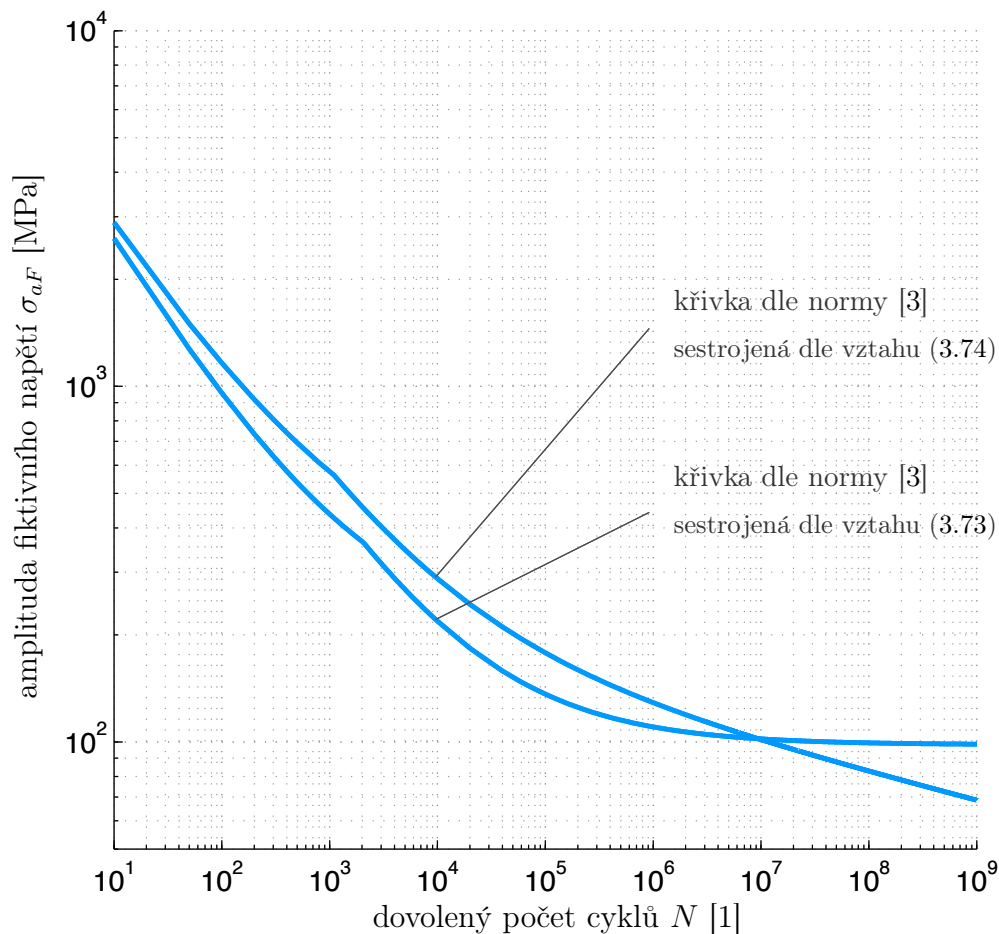
V ruské normě [3] se křivka dle (3.74) uplatní jen v oblasti vysokocyklové únavy pro  $N > 10^7$  cyklů, kdy klesá pod křivku (3.73), viz obrázek 6.9. Z tohoto důvodu (hodnocení vysokocyklové únavy) byla tato křivka do normativního dokumentu [3] začleněna. Křivku dle (3.74) lze totiž využít pro oblast  $N \leq 10^{12}$  cyklů, zatímco křivku (3.73) pouze pro  $N \leq 10^6$ .

V české normě [4] je platnost křivek dle vztahu (3.74) omezena pouze pro oblast  $N \leq 10^7$  cyklů<sup>6</sup>. V této oblasti křivka (3.74) leží vždy nad křivkou Langerova typu dle vztahu (3.73). Tím se křivka (3.74) stává v normě [4] redundantní, neboť se při hodnocení nízkocyklové únavy neuplatní<sup>7</sup>.

Nicméně, jak jsme si ukázali výše, křivka (3.74) lépe vystihuje reálně stanovené únavové křivky pro austenitické oceli. Naopak při hodnocení austenitických ocelí s využitím křivky dané vztahem (3.73) je výsledek únavového hodnocení austenitických ocelí příliš nadhodnocen. Jak by byl ovlivněn výsledek při hodnocení únavy austenitických ocelí pouze na základě vztahu (3.74), oproti aktuálnímu postupu (užitím křivky dle (3.73)), si ukážeme na reálném příkladu v následující podkapitole 6.5.

<sup>6</sup>Vysokocyklová únava pro oblast  $N > 2 \cdot 10^5$  je v normě [4] řešena jiným způsobem.

<sup>7</sup>Aktuálně vztahy (3.74) tvoří v normě [4] pouze historický relikv přenesený z normy [3], při hodnocení se neuplatňují.



**Obr. 6.9:** Porovnání analyticky definovaných únavových křivek dle [3, 4] pro austenitickou ocel 08Ch18N10T s  $R_m = 491\text{MPa}$ ,  $R_{p0.2} = 196\text{MPa}$ ,  $Z = 40\%$  a  $E = 190\text{GPa}$ , pro oblast  $N \leq 10^9$  cyklů. Na obrázku je patrný průsečík obou křivek na hodnotě  $N = 10^7$ . Křivky mají vždy stejný charakter, který plyne z teoretického základu. Ten jsme si uvedli v kapitole 3.6.

## 6.5 Výpočet pro navrženou změnu a porovnání s výsledky dle ASME a VERLIFE

V této kapitole si ukážeme, jak se změní výsledná hodnota kumulace únavového poškození  $D$  v případě, že při posouzení nízkocyklové únavy (dle NTD A.S.I. [4]) komponent vyrobených z austenitické oceli použijeme pouze křivku (3.74), tedy křivku dle vztahu (3.73) při hodnocení vynecháme.

Pro účely porovnání využijeme opět příkladu kritických míst konstrukce TNR VVER 1000, na které jsme se zaměřili již při porovnávání jednotlivých přístupů, v kapitole 6.1. Jde o místa: 1) přivaření austenitické košilky k nátrubku SAOZ a 2) přivaření nátrubku odvzdušnění k víku reaktoru.

Pro lepší komparaci výsledných hodnot  $D$  je vhodnější použít stejný postup výpočtu až do úrovně zformování cyklů zatížení. Pro výpočet použijeme Glinkovy metody a dekompozice pomocí „Rainflow“. V rámci této kapitoly takto postupujeme také v případech hodnocení dle ASME i VERLIFE. Pro posouzení dle ASME byla použita návrhová křivka pro austenitickou nerezovou ocel a pro posouzení dle VERLIFE byla využita křivka pro materiál 08Ch18N10T pro teplotu 350°C.

Výsledné hodnoty kumulace únavového poškození jsou uvedeny v tabulkách 6.5 a 6.6. Pro oblast košilky nátrubku SAOZ byly hodnoty kumulace únavového poškození stanoveny pro 28 let provozu obdobně, jako při provedeném porovnání, které jsme si uvedli v kapitole 6.1. Pro oblast přivaření nátrubku odvzdušnění k víku reaktoru byly hodnoty kumulace únavového poškození stanoveny pro uvažovaných 60 let provozu, abychom si ukázali, jak se změnil výsledek pro body, ve kterých původně nevyhověl limitní podmínce (3.78).

**Tab. 6.5:** Hodnoty kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti přivaření nátrubku odvzdušnění k víku TNR (body 24-28), určené pro 60 let provozu dle různých přístupů.

| bod  | materiál   | NTD křivka (3.73)  | NTD křivka (3.74)  | ASME               | VERLIFE            |
|------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|      |            | Glinka<br>RainFlow | Glinka<br>RainFlow | Glinka<br>RainFlow | Glinka<br>Rainflow |
| 24 I | 08Ch18N10T | 0,1336             | 0,0578             | 0,0202             | 0,0387             |
| 25 I | 08Ch18N10T | 1,1234             | 0,7015             | 0,1550             | 0,2081             |
| 26 I | 08Ch18N10T | <b>1,2358</b>      | <b>0,7801</b>      | <b>0,3058</b>      | <b>0,2254</b>      |
| 27   | 08Ch18N10T | 0,0144             | 0,0058             | 0,0011             | 0,0059             |
| 28   | 08Ch18N10T | 0,00238            | 0,00063            | 0,00009            | 0,00156            |

**Tab. 6.6:** Hodnoty kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti přivaření austenitické košilky nátrubku SAOZ (body 11-15), určené pro 28 let provozu dle různých přístupů.

| bod   | materiál   | NTD křivka (3.73)  | NTD křivka (3.74)  | ASME               | VERLIFE            |
|-------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|       |            | Glinka<br>RainFlow | Glinka<br>RainFlow | Glinka<br>RainFlow | Glinka<br>Rainflow |
| 11 I  | 08Ch18N10T | <b>0,1624</b>      | <b>0,1032</b>      | <b>0,0302</b>      | <b>0,0258</b>      |
| 12 IV | 08Ch18N10T | 0,1007             | 0,0627             | 0,0178             | 0,0166             |
| 13 II | 08Ch18N10T | 0,0230             | 0,0120             | 0,0030             | 0,0040             |
| 14 IV | 08Ch18N10T | 0,0364             | 0,0203             | 0,0054             | 0,0064             |
| 15 II | 08Ch18N10T | 0,0320             | 0,0173             | 0,0044             | 0,0057             |

Z hodnot uvedených v tabulkách 6.5 a 6.6 je patrné, že výsledné hodnoty kumulace únavového poškození, určené pomocí křivek dle ASME [2] a VERLIFE [5], vykazují velmi dobrou vzájemnou shodu pro většinu hodnocených míst. Obě křivky jsou určené na základě experimentálních hodnot a jsou tak přibližně v souladu také s křivkou, kterou jsme na základě experimentálních dat stanovili v kapitole 6.3. Pro úplnost je porovnání těchto únavových křivek pro austenitické oceli vyobrazeno na obrázku 6.10. Křivka, kterou jsme si stanovili v kapitole 6.3 je na obrázku 6.10 vykreslena pro jinou hodnotu redukčního koeficientu  $n_N = 12$ , v souladu s nově definovanými postupy<sup>8</sup> dle [27, 28]. Z obrázku je patrné, že křivka<sup>9</sup> dle VERLIFE velmi dobře koinciduje s křivkou pro austenitické oceli dle ASME a také křivkou stanovenou v kapitole 6.3.

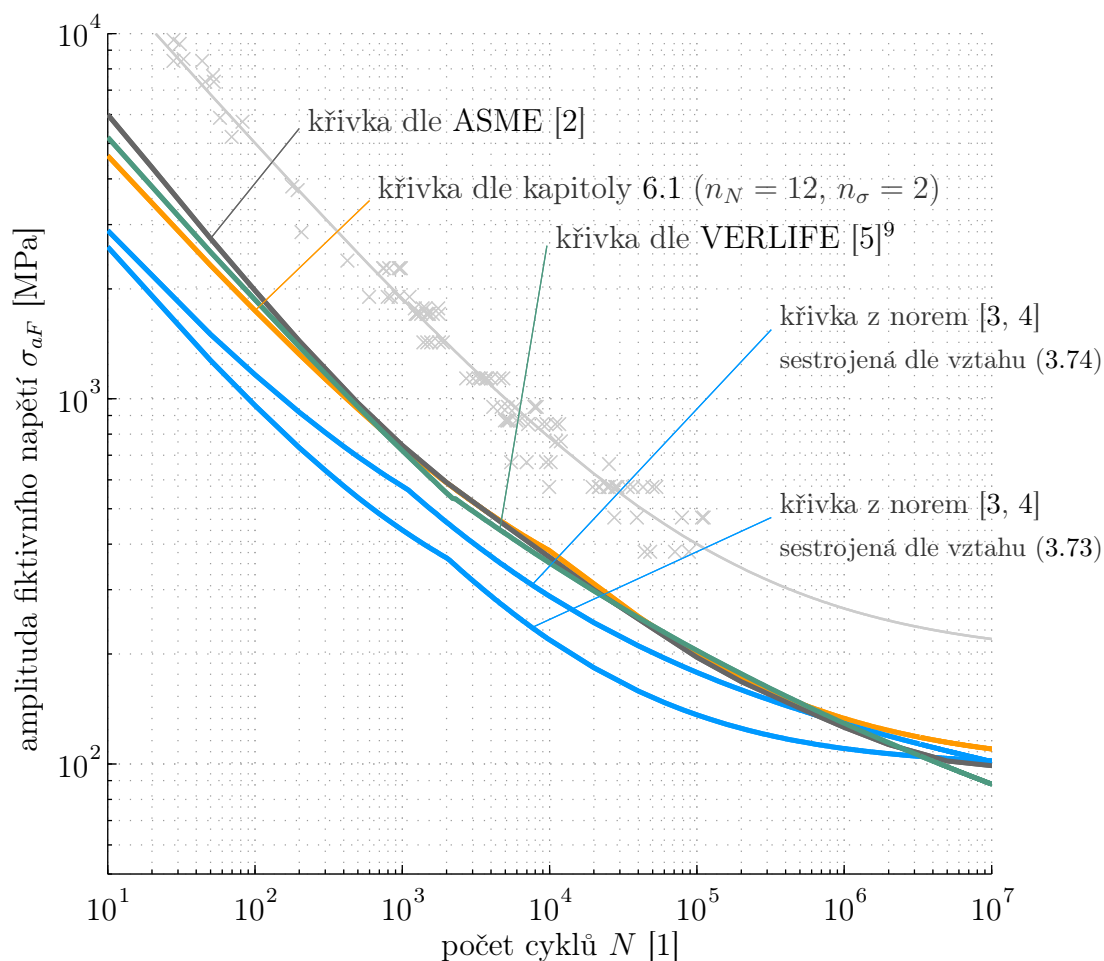
Výsledné hodnoty kumulace únavového poškození, určené na základě únavové křivky dle vztahu (3.73) dle [4], jsou výrazně vyšší než hodnoty určené na základě únavových křivek ASME [2] a VERLIFE [5]. Rozdíl pro významná místa je více než čtyřnásobný.

Pokud při hodnocení použijeme pouze křivky dané vztahem (3.73) dle [4], dostáváme výsledné hodnoty kumulace únavového poškození ve významných místech přibližně o polovinu nižší, a tedy podstatně blíže hodnotám získaným při použití křivek dle ASME [2] a VERLIFE [5]. Stále jsou ovšem až dvakrát vyšší.

Z výše uvedeného vyplývá, že hodnocení nízkocyklové únavy austenitických ocelí, při použití pouze únavové křivky dle vztahu 3.74, by si stále zachovalo konzervativní charakter.

<sup>8</sup>Návrhová únavová křivka austenitických ocelí dle ASME [2] je od roku 2009 stanovena s použitím redukčních koeficientů  $n_\sigma = 2$  a  $n_N = 12$ , zatímco návrhová únavová křivka pro uhlíkové a nízkolegované oceli zůstala po roce 2009 beze změny a je určena pomocí hodnot redukčních koeficientů  $n_\sigma = 2$ ,  $n_N = 20$ , viz [27, 28].

<sup>9</sup>Pozn.: únavová křivka pro ocel 08Ch18N10T dle VERLIFE [5] byla vykreslena dle popisu pro  $T = 350^\circ\text{C}$  pro  $N \leq 2300$  a  $T = 20^\circ\text{C}$  pro  $N > 2300$ .



**Obr. 6.10:** Porovnání únavových křivek austenitických ocelí určených dle různých standardů. Křivky, dané vztahy 3.73 a 3.74, byly sestrojeny pro základní materiál 08Ch18N10T s následujícími parametry:  $R_m = 491\text{MPa}$ ,  $R_{p0.2} = 196\text{MPa}$ ,  $Z = 40\%$ ,  $\max[\sigma_{aF}(t)] = 800\text{MPa}$  a  $r_\sigma = -1$ . Křivka dle VERLIFE je pro materiál 08Ch18N10T a teplotu ( $T = 350^\circ\text{C}$  pro  $N \leq 2300$  a  $T = 20^\circ\text{C}$  pro  $N > 2300$ ). Křivka dle ASME je pro austenitické nerezové oceli.

# Kapitola 7

## Dosažené poznatky

Práce dává teoretické odvození vztahů používaných v PNAE a NTD A.S.I., které nebylo v českém prostředí dostupné a normy se doposud přijímaly „nekriticky“. Odvození vztahů umožnilo odhalit případné nesrovnalosti (viz kapitolu 7.3) a porozumět postupům předepisovaným normou, což umožní vyvarovat se chyb při interpretaci normy (v normách je postup mnohdy popsán nejasně a nejednoznačně a může snadno dojít k mylné interpretaci). Důležité poznatky získané při vypracování této práce si uvedeme v následujících podkapitolách.

### 7.1 Hodnoty dílčích poškození reaktoru při zaprojektové době života

Pomocí vytvořené aplikace byly analyzovány různé konstrukční části reaktoru VVER 1000. Vyhodnocená dílčí poškození jsou uvedena v kapitole 5. Ne všechny hodnocené oblasti vyhověly limitní podmínce  $D \leq 1$  dle (3.78) pro předpokládaných 60 let provozu. To bylo především způsobeno konzervativností aplikovaného postupu ve shodě s normou, nežli extrémní náchylností konstrukce k poškození nízkocyklovou únavou. Pro tato místa se doporučuje provedení přesnějšího elasto-plastického MKP výpočtu pro významné provozní režimy<sup>1</sup>. Ty lze pro definované oblasti určit, mimo jiné využitím v rámci této práce vyvinuté počítačové aplikace popsané v kapitole 4. Na základě vypočtených plastických deformací lze následně reálněji určit hodnotu kumulace únavového poškození.

---

<sup>1</sup>Pro hodnocení je vhodné posloupnost významných provozních režimů opakovat až do stabilizace hysterezních křivek. Rovněž je vhodné při takových analýzách správně definovat chování materiálu při cyklickém zatěžování.

Na základě výsledků uvedených v kapitole 5 byla, pro konstrukci TNR VVER 1000, identifikována tato významná místa (z hlediska kumulace únavového poškození):

- drážky hlavního přírubového spoje,
- oblast přivaření košilky nátrubku SAOZ,
- rádius v osazení pro uložení šachty v přírubě TNR,
- rádius na konci kuželového přechodu pod přírubou TNR,
- závit šroubu M170 v HPS - v závitovém spojení s maticí,
- přivaření austenitické košilky nátrubků SUZ, TK a EV,
- přivaření nátrubku odvodu k víku reaktoru,
- přivaření austenitického perforovaného krytu u nátrubku KIP,
- rádius v přírubách nátrubků SUZ, TK a EV,
- oblast přivaření dělicího prstence.

Významné kumulace únavového poškození se nachází především v blízkosti oblastí styku ocelí s výrazně rozdílnou hodnotou koeficientu teplotní roztažnosti (především austenitická ocel vs. perliticko-feritická).

Většina výše jmenovaných oblastí se nachází na vnitřním povrchu TNR a jsou tak přístupná pro možnost kontroly v průběhu odstávek. Některá významná místa se nalézají také v nepřístupných oblastech. Většinou se ovšem jedná o oblasti přivaření bezpečnostně nevýznamných komponent, jako např. oblast přivaření austenitické košilky nátrubku SAOZ.

## 7.2 Porovnání postupů dle rozdílných norem

V kapitole 6.1 bylo provedeno porovnání postupů dle různých normativních standardů ([2, 3, 4, 5]). Bylo provedeno pro (z hlediska nízkocyklové únavy) nejvýznamnější místa konstrukce tlakové nádoby reaktoru VVER 1000. Dle jednotlivých postupů byly vypočteny kumulace únavového poškození  $D$ . Z porovnání vyplývají následující poznatky:

- Nejvyšších hodnot bylo dosaženo při použití základních postupů dle NTD [4] a PNAE [3].

- Použití metody Neubergera při výpočtu elasto-plastického stavu napjatosti vede přibližně k dvojnásobnému až čtyřnásobnému navýšení hodnoty kumulace únavového poškození pro nejvýznamnější místa konstrukce, než při použití metody ekvivalentní energie.
- Celkové rozdíly mezi maximální a minimální hodnotou kumulace únavového poškození  $D$  napříč použitými metodami bývají u významných míst až o jeden řád.
- Pro některá porovnávaná místa<sup>2</sup> jsou hodnoty dle postupu ASME dosti podobné hodnotám určeným dle VERLIFE.
- Výsledné hodnoty  $D$  určené dle postupu NTD A.S.I. [4] či PNAE [3] jsou vždy vyšší než hodnoty určené dle ASME [2] nebo VERLIFE [5].

### 7.3 Oprava postupu v normě NTD A.S.I.

Při zpracovávání teoretické části této práce uvedené v kapitole 3 byl v normě [4] objeven chybný popis algoritmu pro hledání počátku hysterezní větve. Tento postup se používá při přepočtu elastického napěťového stavu na stav elasto-plastický ve vrubu konstrukce (viz kapitolu 3.3). Nalezení počátku hysterezní větve je důležité pro zjištění výchozího posuvu plochy plasticity při kinematickém zpevnění.

V normě PNAE [3] je tento postup popsán textovým výkladem, který při správné interpretaci vede ke korektnímu určení polohy počátku větve. V normě NTD A.S.I. [4] bylo snahou autorů tento popis osvětlit matematickou podmínkou danou vztahem 3.35, nicméně ve zbylém textovém výkladu se počátek větve označil jako první okamžik výskytu lokálního extrému na „zatopené“ oblasti a nikoliv globální extrém této oblasti, viz obrázek 7.1.

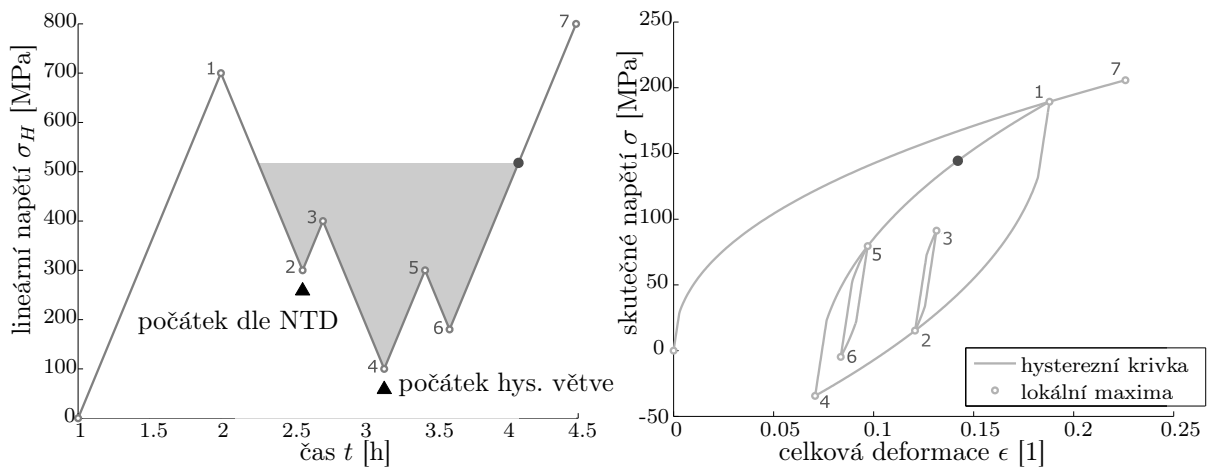
Při komplexním průběhu zatěžování pak tento postup vede k nesprávnému určení elasto-plastického napěťově deformačního stavu, a tím ke zkreslení výsledných hodnot kumulace únavového poškození. Na obrázku 7.2 jsou vyobrazeny hysterezní smyčky určené a) nesprávným a b) opraveným postupem. Lze si povšimnout, že na obrázku a) je napěťově-deformační stav určen nesprávně pro časové okamžiky 5, 6, 13 a 14.

Oprava textu normy byla navržena u příslušné komise normy NTD A.S.I. sekce III a na základě iniciativy autora této práce byly příslušnou komisí navržené změny v textu normy [4] přijaty a nedostatek bude v příštím vydání dokumentu opraven.

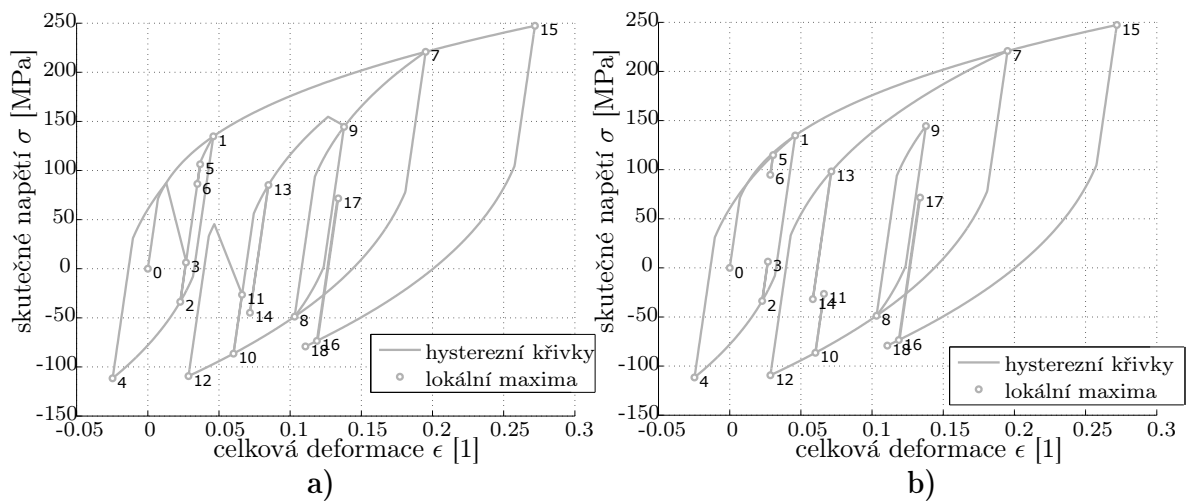
---

<sup>2</sup>Vyjma míst se základním materiálem 15Ch2NMFA, kdy je únavová křivka dle VERLIFE [5] významně nad ekvivalentní křivkou pro nízkolegované oceli dle ASME [2].





**Obr. 7.1:** Určení polohy počátku větve hysterezní smyčky v posloupnosti lokálních extrémů lineárního napětí  $\sigma_{He}(t)$ .



**Obr. 7.2:** Průběh elasto-plastického napětově deformačního stavu určeného: a) dle chybně zapsaného postupu v NTD, b) dle opraveného postupu s korektním dohledáním počátku větve hysterezní křivky.

## 7.4 Doporučení při hodnocení únavy materiálu austenitických ocelí

Pomocí porovnání provedeného v kapitole 6.5 jsme si ukázali, že únavové křivky austenitických ocelí dané ASME [2] a VERLIFE [5] si vzájemně odpovídají jak na grafické úrovni (viz obrázek 6.10), tak z hlediska výsledných hodnot kumulace únavového poškození  $D$  (viz tabulky 6.6 a 6.5).

Na základě experimentálních dat jsme v kapitole 6.3 stanovili únavovou křivku austenitických ocelí, která byla následně využita pro validaci postupů hodnocení únavy dle norem [3, 4].

Ukázali jsme si, že postup ve zmíněných normách je výrazně konzervativní a definovali možnou úpravu konstrukce návrhové křivky únavové životnosti austenitických ocelí dle NTD A.S.I., aby křivka věrněji popisovala chování reálného austenitického materiálu při současném zachování dostatečné bezpečnosti.

Úprava spočívá ve vypuštění křivky Langerovy konstrukce dle vztahu (3.73) při hodnocení nízkocyklové únavy komponent JE vyrobených z austenitických ocelí. Křivka by se takto stanovila pouze při použití vztahu 3.74, který se jindy při hodnocení nízkocyklové únavy nepoužívá a je tak v normě nadbytečný. Navržená úprava bude navržena ke zvážení u příslušné komise NTD A.S.I. sekce III (viz kapitolu 9).

# Kapitola 8

## Shrnutí a závěr

Práce byla zaměřena na teoretické a praktické aspekty hodnocení nízkocyklové únavy komponent reaktoru VVER 1000 a byla členěna do několika logických celků. V první části práce byly na teoretické úrovni diskutovány postupy hodnocení únavy dle několika normativních standardů. Snahou autora bylo uvedené postupy algoritmizovat. Pro tento účel byla vyvinuta počítačová aplikace, ve které byly diskutované postupy naprogramovány.

Vyvinutá aplikace byla následně využita při řešení některých úloh praxe. Úlohy jsou stručně (spolu s dosaženými výsledky) uvedeny v praktické části této práce. Praktická část práce je velmi široká a reflektuje bohatou působnost autora na problémech svázaných s hodnocením tlakové nádoby reaktoru VVER 1000 některých Ukrajinských bloků, především pro potřeby prodloužení jejich provozu (výhledově až na 60 let). Pro oblast praktického využití jsou přínosy práce detailněji diskutovány v podkapitole 8.1.

Při zpracovávání práce byly rovněž dosaženy některé teoretické poznatky vztahující se ke vzájemnému porovnání postupů předepsaných v rozdílných normativních dokumentech a identifikovány některé nesrovnalosti v normách obsažené, které jsou blíže popsány v podkapitole 8.2

## 8.1 Přínos pro využití v praxi

Byla vytvořena funkční počítačová aplikace, která umožňuje provádět hodnocení únavové životnosti komponent JE. Tato aplikace také umožňuje různé vizualizace dílčích výsledků (např.: hysterezních smyček), což dosavadní SW neumožňovaly. Tyto vizualizace vedou k:

- hlubšímu pochopení normativních předpisů a předepsaných postupů hodnocení,
- identifikaci nejvýznamnějších režimů z hlediska únavy, což potenciálně umožní doporučení nápravných opatření pro provoz JE,
- odhalení a odstranění případných chyb či chybných předpokladů ve výpočtech.

Byly stanoveny hodnoty celkového únavového poškození mnoha komponent tlakové nádoby reaktoru VVER 1000, což posloužilo, mimo jiné, při licencování provozu ukrajinských bloků za projektovou životnost.

Na základě výsledků výpočtů byl rozšířen plán provozních kontrol TNR 3. bloku Rovenské JE. Do plánu provozních kontrol byly zařazeny identifikované významné oblasti TNR s vyšší hodnotou kumulace únavového poškození.

V ÚJV Řež aktuálně probíhají v součinnosti s Kijevskou Národní univerzitou Tarase Ševčenko<sup>1</sup> intenzivní práce na vývoji software pro on-line monitoring únavy (ASUS TMO), který je plánován pro instalaci na Rovenské JE. V rámci těchto prací byl pomocí vytvořené aplikace proveden ověřovací výpočet (benchmark), který pomohl ověřit připravovaný skript pro vyhodnocování kumulace únavového poškození, který bude součástí zmíněného vyvíjeného monitorovacího software.

---

<sup>1</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

## 8.2 Vědecký přínos práce

Bylo provedeno vzájemné porovnání postupů jednotlivých metod dle norem [2, 3, 4, 5] až do úrovně výsledných hodnot kumulace únavového poškození. Porovnání bylo provedeno pro kritická místa tlakové nádoby reaktoru VVER 1000. Výsledné hodnoty prokázaly konzervativnost postupů definovaných v normách NTD A.S.I. a PNAE. Provedeným porovnáním jsme si specifikovali rozdíly výsledných hodnot kumulace únavového poškození obdržných při použití různých metod výpočtu (např. Neuber vs. Glinka či „Rainflow“ vs. dekompozice pomocí metody maximálních rozkmitů). Porovnání bylo také provedeno kvalitativně na úrovni grafického porovnání použitých únavových křivek materiálů TNR.

Na základě teoretického i praktického rozboru byl lépe pochopen postup hodnocení únavy materiálu dle norem [3, 4]. V normě [4] byl upraven postup pro identifikaci počátku větví hysterezích smyček v podobě nalezení časového okamžiku na posloupnosti lineárních redukovaných napětí. uvedený v dokumentu [4].

Na základě experimentálních dat byla stanovena únavová křivka austenitických ocelí, která byla následně využita pro validaci postupů hodnocení únavy dle norem [3, 4]. Ukázali jsme si, že postup ve zmíněných normách je výrazně konzervativní (významněji než u jiných materiálů) a definovali jsme možnou úpravu konstrukce křivky životnosti austenitických ocelí tak, aby postup dle NTD A.S.I. věrněji popisoval chování reálného austenitického materiálu při současném zachování dostatečné bezpečnosti.

# Kapitola 9

## Výhledy dalších prací

Výhledy pro pokračování prací v řešené oblasti přímo navazující na poznatky této práce. Na základě uvedených poznatků vyvstávají některé neřešené úlohy a výzvy. Ty jsou diskutovány v následujících podkapitolách.

### 9.1 Provedení elastoplastického hodnocení kritických míst TNR pomocí MKP

V kapitole 5 jsme si uvedli komplexní zhodnocení významných uzlů tlakové nádoby reaktoru VVER 1000. Na základě uvedených výsledků byly následně v kapitole 7.1 přesněji specifikovány ty oblasti, ve kterých byla hodnota celkové kumulace únavového poškození pro 60 let provozu  $D > 0,1$ . Oblastem s vyšší hodnotou výsledné kumulace únavového poškození  $D$  je vhodné věnovat více pozornosti.

Normy [2, 3, 4] umožňují provedení detailnějšího elasto-plastického výpočtu (pomocí MKP) s realisticky modelovaným chováním materiálu při cyklickém zatěžování a vstoupit pak do hodnocení únavy materiálu s hodnotami skutečných amplitud deformace  $\epsilon_a$ .

Zdá se vhodné provést takto koncipované hodnocení pro oblasti konstrukce s nejvýznamnější koncentrací napětí:

1. drážky pro uložení těsnění v hlavním přírubovém spoji,
2. přivaření austenitické košilky k nátrubku SAOZ,
3. oblast přivaření perforovaného krytu nátrubku KIP,
4. oblast přivaření nátrubků k víku reaktoru - kořen svaru s neúplným průvarem.

Pro vyhodnocení bude nutné vyvinutou aplikaci (viz kapitolu 4) doplnit o možnost posudku únavy materiálu na základě průběhů složek tenzoru deformace vy počítaných na úrovni MKP.

Při elasto-plastického výpočtu závisí napětově-deformační stav na historii zatěžování. Při takto koncipovaném výpočtu by bylo velmi náročné analyzovat všechny provozní režimy v celé provozní historii jaderného zařízení. Elasto-plastický výpočet pomocí MKP je vhodné provést pouze pro nejvýznamnější cyklická zatížení v režimech, které nejvíce přispívají k výsledné hodnotě kumulace únavového poškození. Výběr významných provozních režimů lze dopředu provést pomocí vytvořené aplikace a aktuálně již naprogramovaného postupu, který jsme si ukázali v kapitole 5. Výpočet pomocí elasto-plastického chování materiálu je nutné provést až do úrovně stabilizace hysterezích křivek při opakovaném zatěžování významnými přechodovými režimy.

## 9.2 Zapracování problematiky řešení únavy s vlivem prostředí do vytvořené aplikace

Jelikož se některá významná místa (z hlediska potenciální degradace nízkocyklovou únavou) nacházejí na vnitřním povrchu TNR, jsou přirozeně v kontaktu s provozním médiem. Proto při hodnocení únavy těchto oblastí je vhodné uvážit vliv prostředí.

Aktuálně je hodnocení únavy s vlivem prostředí ve světě velmi řešenou problematikou [26, 28, 41]. Problematika vlivu korozního prostředí (vlivem působení provozního média) lehkovodních reaktorů na nízkocyklovou únavu materiálu byla již zapracována do normy NTD A.S.I.. Realizuje se použitím redukčního faktoru, který je (mimo jiné) závislý na rychlosti deformace na cyklu. Vliv provozního média na nízkocyklovou únavu se významněji uplatňuje u velmi nízkých rychlostí deformace [27, 26]. Změny teplotních napětí v průběhu přechodových režimů reaktoru VVER 1000 tento charakter vykazují.

Pro možnost širšího použití postupů při hodnocení vlivu korozního prostředí na nízkocyklovou únavu je vhodné vyvinutou počítačovou aplikaci o tuto problematiku rozšířit.

### 9.3 Schválení vyvinutého programu v rámci komise č.5 SÚJB

Vyvinutá počítačová aplikace byla v praxi již využita při řešení různých úloh svázaných s posouzením nízkocyklové únavy pro jaderné elektrárny na Ukrajině. Pokud by měla být aplikace využita pro obdobné úlohy řešené pro jaderné elektrárny v České republice musí legislativně projít nezávislým hodnocením příslušné komise<sup>1</sup> pod záštitou SÚJB.

### 9.4 Navržení změny normy NTD A.S.I. z hlediska použití únavových křivek pro austenitické oceli

V kapitole 6.1 jsme si uvedli, že postup hodnocení dle normy PNAE [3], resp. NTD A.S.I. [4] vede k významnému nadhodnocení výsledných hodnot kumulací únavového poškození v komponentách vyrobených z austenitických ocelí. To jsme také ověřili na úrovni porovnání křivek stanovených na základě výsledků experimentů a křivek určených dle vztahů z [3, 4].

Ukázali jsme si, že postup ve zmíněných normách je výrazně konzervativní a definovali možnou úpravu konstrukce návrhové únavové křivky pro austenitické oceli tak, aby křivka věrněji popisovala chování austenitického materiálu, při současném zachování dostatečné bezpečnosti.

Úprava spočívá v možnosti použití křivky dané vztahem (3.74), namísto křivky dle (3.73)<sup>2</sup>. Aktuálně jsou křivky dle vztahu (3.74) v normě NTD A.S.I. uvedeny, ale při hodnocení nízkocyklové únavy se neuplatňují.

Úprava bude navržena příslušné komisi NTD A.S.I. sekce III ke zvážení jejího zapracování, případně bude komisi navrženo vypuštění nadbytečné křivky dle vztahu 3.74.

---

<sup>1</sup>Programy využívanými pro hodnocení pevnosti komponent JE se zabývá komise č.5.

<sup>2</sup>Technicky vzato norma předepisuje použití konzervativnější z obou křivek. Tou je ovšem v oblasti jejich použití (pro  $N \leq 10^6$ ) vždy křivka Langerovy konstrukce (3.73).



# Literatura

- [1] Bečvář, J. a kol.: Jaderné elektrárny, SNTL/ALFA, Praha 1981, druhé vydání.
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III: Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Article NB-3000, American Society of Mechanical Engineers, ISBN 9780791832370.
- [3] PNAE G-7-002-86, Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86, Энергоатомиздат, Moskva, 1989.
- [4] NTD ASI-III-Z-5/01-R05, Normativně technická dokumentace A.S.I., Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, sekce III, Praha, 2014.
- [5] Guidelines for Integrity and Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER Nuclear Power Plants, VERLIFE, 2008.
- [6] Stanovisko SÚJB k NTD A.S.I., sekce I – VI, 2013.
- [7] Vejvoda, S.: Programový systém STATES 5.1, Metodika hodnocení konstrukcí při opakovaném zatěžování, e.č. 3/1/94-JE/Z, P-2.3, Podklady pro programový systém STATESF - Fatigue, Brno, 1996.
- [8] Ustanovení § 2i) zákona č. 18/1997 Sb. a § 33 vyhlášky SÚJB č. 214/1997 Sb.
- [9] Callister, W.: Fundamentals of Materials Science and Engineering, 5. vydání, ISBN 0-471-39551-X, 2001.
- [10] Neuber, H.: Theory of notch stress, Kerbspannungslehre, Springer, 1958, Berlin.
- [11] Molski, K., Glinka, H.: A Method of Elastic-Plastic Stress and Strain Calculation at a Notch Root, Material Science and Engineering, Vol. 50, No. 2, 1981, pp. 90-100.

- [12] Prager, W.: A New Method of Analyzing Stress and Strains in Work-Hardening Solids, *Journal of Applied Mechanics*, ASME 23, pp. 493-496, 1956.
- [13] BS5400: Part 10, 1980, "Cycle counting by the reservoir method", Appendix B, p. 9/22.
- [14] Masing, G.: Eigenspannungen und verfestigung beim messing (Self stretching and hardening for brass), *Proceedings of the Second International Congress for Applied Mechanics*, pp. 332-335, Zurich, Switzerland, 1926.
- [15] Matsuiski, M. & Endo, T.: *Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress*, Japan Soc. Mech. Engrg., Japan, 1969.
- [16] Klesnil, L., Lukáš, P.: *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*, Praha, 1975.
- [17] ASTM E-1049-85, *Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*, ASTM International, 2005.
- [18] Manson, S. S.: *Behavior of Materials under Conditions of Thermal Stress*, Heat Transfer Symposium, University of Michigan Engineering Research Institute, 1953.
- [19] Coffin, L. F.: *A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal*, *Trans. ASME*, Vol. 76, 1954.
- [20] ASTM International, *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*, Chapter 14 - Fatigue, 05224G, Materials Park, Ohio, 2008.
- [21] Dowling, N. E., Calhoun, C. A., Arcari, A.: Mean stress effect in stress-life fatigue and the Walker equation. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structure* 32, 163-179, 2008.
- [22] Morrow, J.D.: Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals, In: *Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity*, ASTM STP 378, Philadelphia, PA, str. 45 - 84, 1965.
- [23] Langer, B. F.: *Design of Pressure Vessels for Low-Cycle Fatigue.*, *ASME Journal, Basic Engineering* 84, pp. 389 - 402, 1962.
- [24] *Criteria of ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis in Section III and VIII, Division 2*, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1969.

- [25] Cooper, W.E.: The initial Scope and Intent of the Section III Fatigue Design Procedure, Technical Information from Workshop on Cyclic Life and Environmental Effects in Nuclear Applications, Florida, 1992.
- [26] Technical Note on Fatigue of Components and Structures, Fourth International Conference on Fatigue of Nuclear Reactor Components, Seville, Spain, 2015.
- [27] NUREG/CR-6909 Rev. 1, ANL-12/60  
Chopra, O.K., Stevens, G.L.: Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials
- [28] Regulatory Guide 1.207, Guidelines for Evaluating Fatigue Analyses Incorporating the Life Reduction of Metal Components due to the Effects of the Light-Water Reactor Environment for New Reactors, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC000179, 2007.
- [29] Palmgren, A.: Durability of Ball Bearings, ZVDI,68(14), pp. 339-341, 1924.
- [30] Miner, M.A.: Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics, 12, Vol. 67, pp. 159-164, 1945.
- [31] MATLAB, The Language of Technical Computing, 7th ed., The MathWorks Inc., MA, 2006.
- [32] Pištora, V. a kol.: Анализ условий эксплуатации реактора, technická zpráva ÚJV Řež, DITI 2301/159, 2012, Revize 3.
- [33] Технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока №3 Ривненской АЭС, 3-Р-РАЭС, 2011.
- [34] Pištora, V. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность цилиндрической части корпуса реактора, technická zpráva ÚJV Řež, DITI 2301/180, 2013, Revize 1.
- [35] Pištora, V. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность патрубков ГЦТ и САОЗ, technická zpráva ÚJV Řež, DITI 2301/220, 2014, Revize 1.
- [36] Pištora, V. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность патрубка КИР корпуса реактора, technická zpráva ÚJV Řež, DITI 2301/219, 2014, Revize 1.

- [37] Švrček, M. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность крышки с патрубками, *technická zpráva ÚJV Řež*, DITI 2301/324, 2014, Revize 1.
- [38] Švrček, M. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность узла уплотнения реактора, *technická zpráva ÚJV Řež*, DITI 2301/291, 2013, Revize 1.
- [39] Timofeev B.T. a kol.: *Low Cycle Fatigue of Materials in Nuclear Industry*, *Mechanika*, ISSN 1392-1207, 2008.
- [40] Roos E. a kol.: *Proof of Fatigue Strength of Ferritic and Austenitic Nuclear Components*, MPA, Stuttgart, 2009
- [41] Long-Term Low-Cycle Corrosion Fatigue of Steel 08Kh18N10T and its Welded Joints in Water of High Parameters, *Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology SMiRT 17*, Paper WG01-4, Prague, 2003.
- [42] Švrček, M. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность фланцевого соединения патрубка SUZ, *technická zpráva ÚJV Řež*, DITI 2302/320, 2014, Revize 1.
- [43] Švrček, M. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность фланцевого соединения патрубка ТК, *technická zpráva ÚJV Řež*, DITI 2302/321, 2014, Revize 1.
- [44] Švrček, M. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность фланцевого соединения патрубка EV, *technická zpráva ÚJV Řež*, DITI 2302/322, 2014, Revize 1.
- [45] Švrček, M. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность фланцевого соединения патрубка воздушника, *technická zpráva ÚJV Řež*, DITI 2302/323, 2014, Revize 1.

# Publikace autora

## Konferenční příspěvky

1. Pištora V., Švrček M., Lauerová D., Vandlík S.: Assessment of Irradiation Swelling Effects on VVER-1000 Core Shroud, 22nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT-22, San Francisco, ISBN: 978-1-63266-762-5, 2013.
2. Pištora V., Švrček M., Lauerová D.: Irradiation Swelling of VVER 1000 Core Shroud, 15th International Conference Applied Mechanics, Velké Karlovice, ISBN: 978-80-248-2978-4, 2013.
3. Pecinka L., Svrcek M., Zeman V.: Dynamic criterion of the VVER 1000/320 core barrel stability in vertical direction, Safety Assurance of NPP with WWER, OKB „Gidropress“, ISBN: 978-5-94883-092-6, Podolsk, 2009.
4. Pecinka L., Svrcek M.: Comparison of Existing Criteria of Piping Gigacyclic Vibration Assessment, Computational Mechanics, ISBN: 978-80-7043-824-4, Pilsen, 2009.
5. Pištora V., Wandrol J., Švrček M.: Assessment of Technical State of Reactor Pressure Vessel, Reactor Internals and Reactor Support Elements of 1st Unit of South Ukrainian NPP. Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Srní, 2014.
6. Pecinka L., Svrcek M.: Sliding Wear and Friction Behaviour of Fuel Rod Zr Cladding, Safety Assurance of NPP with WWER, OKB „Gidropress“, ISBN: 978-5-94883-130-5, Podolsk, 2013.

7. Pištora V., Švrček M.: Оценка технического состояния корпуса, ВКУ и опорных элементов реактора энергоблока №1 ОП ЮУАЭС с целью продления срока эксплуатации, Safety Assurance of NPP with WWER, ОКБ „Gidropress“, Podolsk, 2011.
9. Švrček M. a kol.: Výpočetní posouzení namáhání hlavního přírubového spoje tlakové nádoby reaktoru VVER 1000, Setkání uživatelů programů MSC.Software, ISBN: 978-80-260-4173-3, Brno, 2013.
12. Pecinka L., Svrcek M.: A Study of Fuel Rod Vibration Induced by Coolant Cross Flow in the Reactor Core, Engineering Mechanics, ISBN: 978-80-87012-47-5, ISSN: 1805-8256, Svratka, 2013.
8. Švrček M: Assessment of flanges and nozzles of WWER Reactor Types. The 13th International Conference on Material Issues in Design, Manufacturing and Operation of Nuclear Power Plants Equipment, Saint-Petersburg, 2014.
10. Pecinka L., Svrcek M.: Parametric Oscillation of the Fuel Assembly TVSA-T, Computational Mechanics, ISBN: 978-80-261-0429-2, Špičák, 2014.
11. Pecinka L., Svrcek M.: Acoustic Frequencies of Coolant in Primary Circuit of NPP Temelin and Possibility of Resonances with Fuel Assembly TVSA-T, Engineering Mechanics, ISBN: 978-80-214-4872-8, ISSN: 1805-8256, Svratka, 2014.
12. Pištora V., Stacha D., Švrček M.: Hodnocení životnosti reaktoru 1. bloku Jižně-ukrajinské JE pro dlouhodobý provoz, Zvyšování životnosti energetických zařízení v elektrárnách, ISBN: 978-80-7043-730-8, Srní, 2008.

## Publikované články

1. Pečínka L., Švrček M.: Application of Reliability Analysis on the LBB Methodology, Applied and Computational Mechanics, Vol.2, pp. 91-100, ISSN: 1802-680X, 2008.

2. Švrček M., Krásný I., Leština J.: Assessment of the Integrity of Channel Shelter of the Experimental Reactor, Proceeding of the ASME 2009 Pressure Vessel and Piping Division Conference, paper PVP2009-77306, 2009.

## Technické zprávy

1. Pečínka L., Stulík P., Zeman V., Švrček M.: Analýza životnosti reaktoru VVER 1000/320 ETE, bloky 1 a 2 při zvýšeném průtoku a práci dvou, tří a čtyř hlavních cirkulačních čerpadel, ÚJV Řež, DITI 300/361, 2008.
2. Pištora V., Švrček M., Stacha D.: Расчеты на статическую и циклическую прочность узла уплотнения реактора энергоблока №1 ОП ЮУАЭС, ÚJV Řež, DITI 2301/21, 2009.
3. Pečínka L., Švrček M.: Оценка прочности элементов ВКУ, Оценка прочности шахты внутрикорпусной реактора энергоблока №1 ОП ЮУАЭС, ÚJV Řež, DITI 2300/4, 2010.
4. Pečínka L., Švrček M.: Оценка прочности элементов ВКУ, Оценка прочности блока защитных труб реактора энергоблока №1 ОП ЮУАЭС, ÚJV Řež, DITI 2300/2, 2010.
5. Pečínka L., Švrček M.: Оценка прочности опорных элементов реактора энергоблока №1 ОП ЮУАЭС, ÚJV Řež, DITI 2300/11, 2010.
6. Pištora V., Švrček M., Ferko P., Šimek O.: Оценка статической и циклической прочности элементов верхнего блока реактора и патрубков корпуса реактора энергоблока №1 ОП ЮУАЭС, ÚJV Řež, DITI 2301/41, 2010.
7. Pečínka L., Švrček M.: Расчет на воздействие при максимальной проектной аварии (большая течь) для шахты и БЗТ и расчет на прогрессирующее формоизменение выгородки реактора энергоблока №1 ОП ЮУАЭС, ÚJV Řež, DITI 2301/117, 2011.

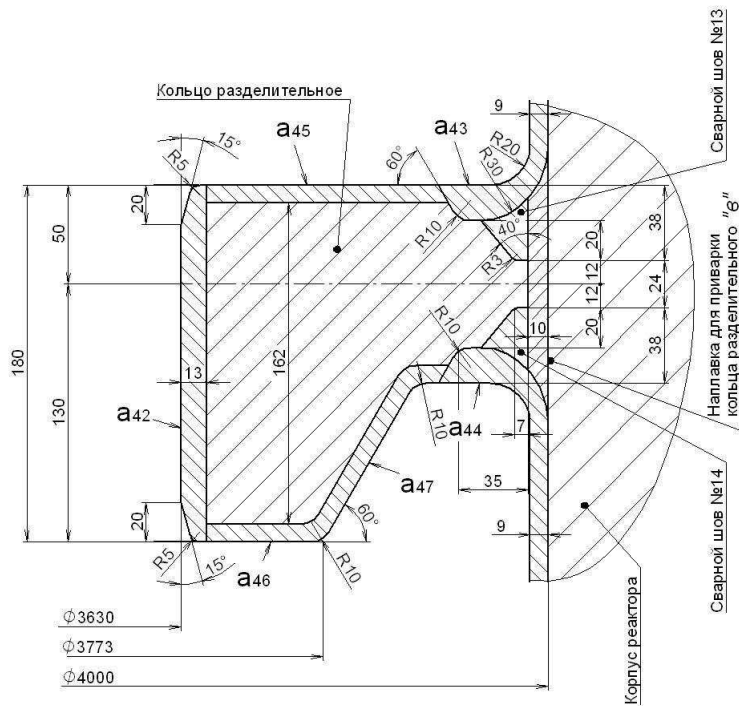
8. Pečínka L., Švrček M., Stulík P.: Vliv vibrací vnitřních částí reaktorů VVER 1000/320 ETE bloky 1 a 2 na spolehlivost při využití projektových rezerv, ÚJV Řež, DITI 2300/27, 2011.
9. Švrček M. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность фланцевого соединения патрубка SUZ, ÚJV Řež, DITI 2302/320, 2014.
10. Švrček M. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность фланцевого соединения патрубка ТК, ÚJV Řež, DITI 2302/321, 2014.
11. Švrček M. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность фланцевого соединения патрубка EV, ÚJV Řež, DITI 2302/322, 2014.
12. Švrček M. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность патрубка воздушника, ÚJV Řež DITI 2302/323, 2014.
13. Pištora V., Švrček M., a kol.: Анализ условий эксплуатации реактора, ÚJV Řež DITI 2301/159, 2012.
14. Pištora V., Švrček M., a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность цилиндрической части корпуса реактора, ÚJV Řež, DITI 2301/180, 2013.
15. Pištora, V., Švrček M. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность патрубков ГЦТ и САОЗ, ÚJV Řež, DITI 2301/220, 2014.
16. Pištora V., Švrček M., a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность патрубка КИР корпуса реактора, ÚJV Řež, DITI 2301/219, 2014.
17. Švrček M. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность крышки с патрубками, ÚJV Řež, DITI 2301/324, 2014.
18. Švrček M. a kol.: Расчеты на статическую и циклическую прочность узла уплотнения реактора, ÚJV Řež, DITI 2301/291, 2013.
18. Švrček M., Gál P.: Расчеты на циклическую прочность корзины выемной, ÚJV Řež, DITI 2301/650, 2015.



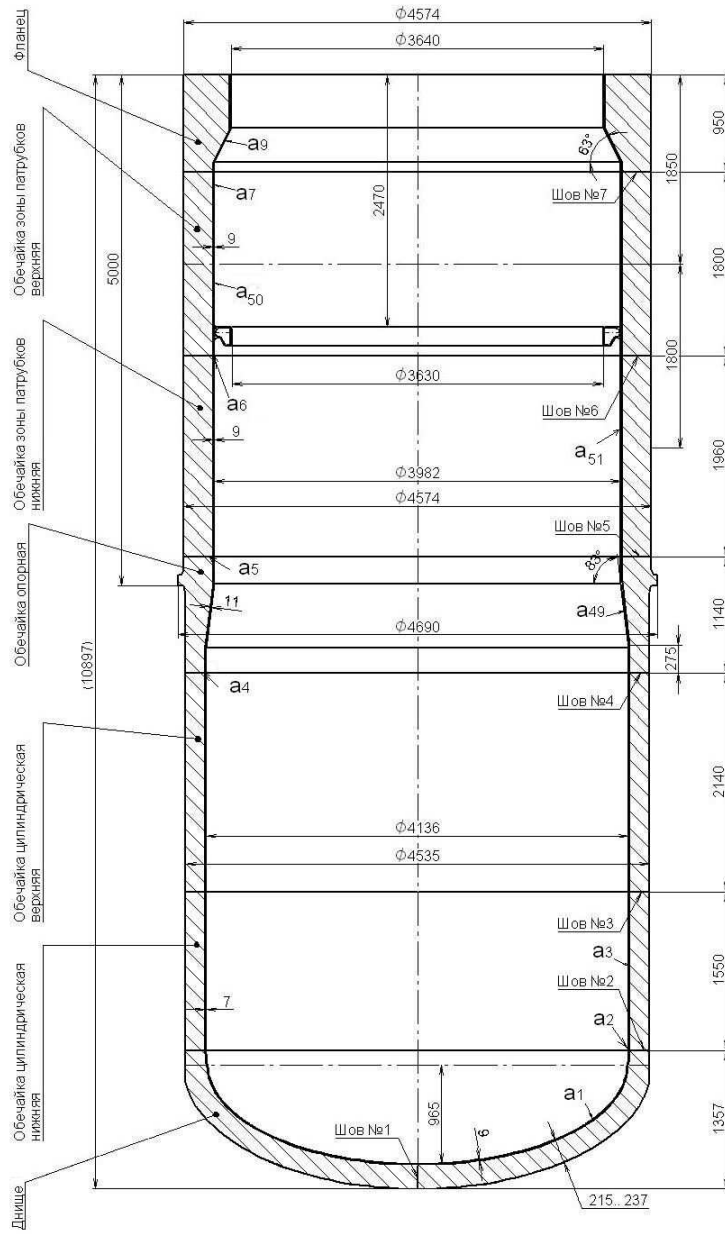


# Пříloha A

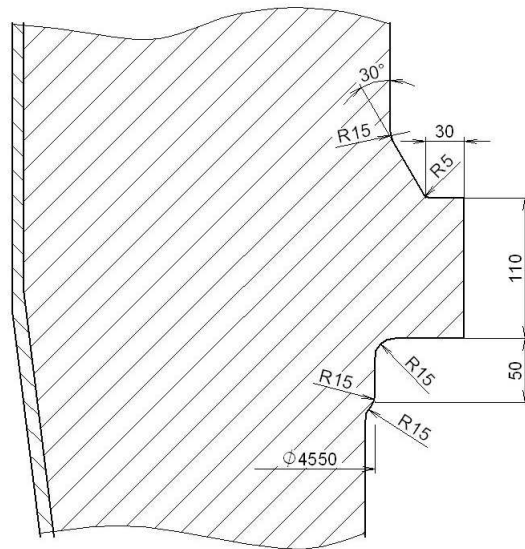
## Розмѣровѣ вѣкресы TNR 3. Блоку Ровенскѣ JE



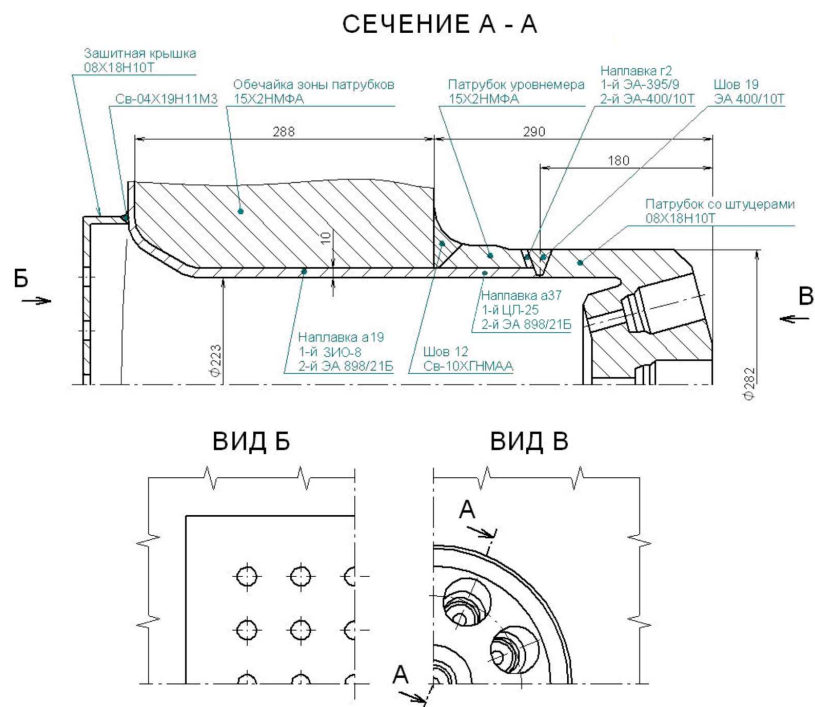
Обр. А.1: Розмѣровѣ вѣкресы прѣваѣненѣ дѣлѣчѣго прѣстенце.



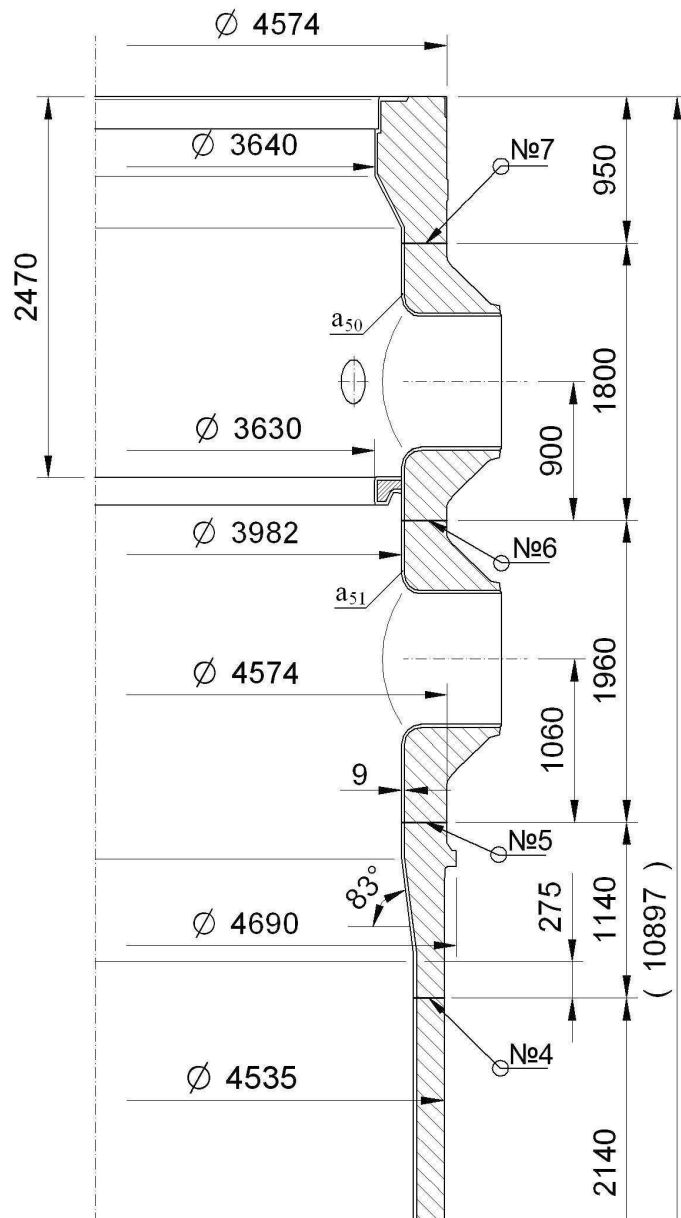
**Обр. А.2:** Rozměrový výkres tlakové nádoby reaktoru.



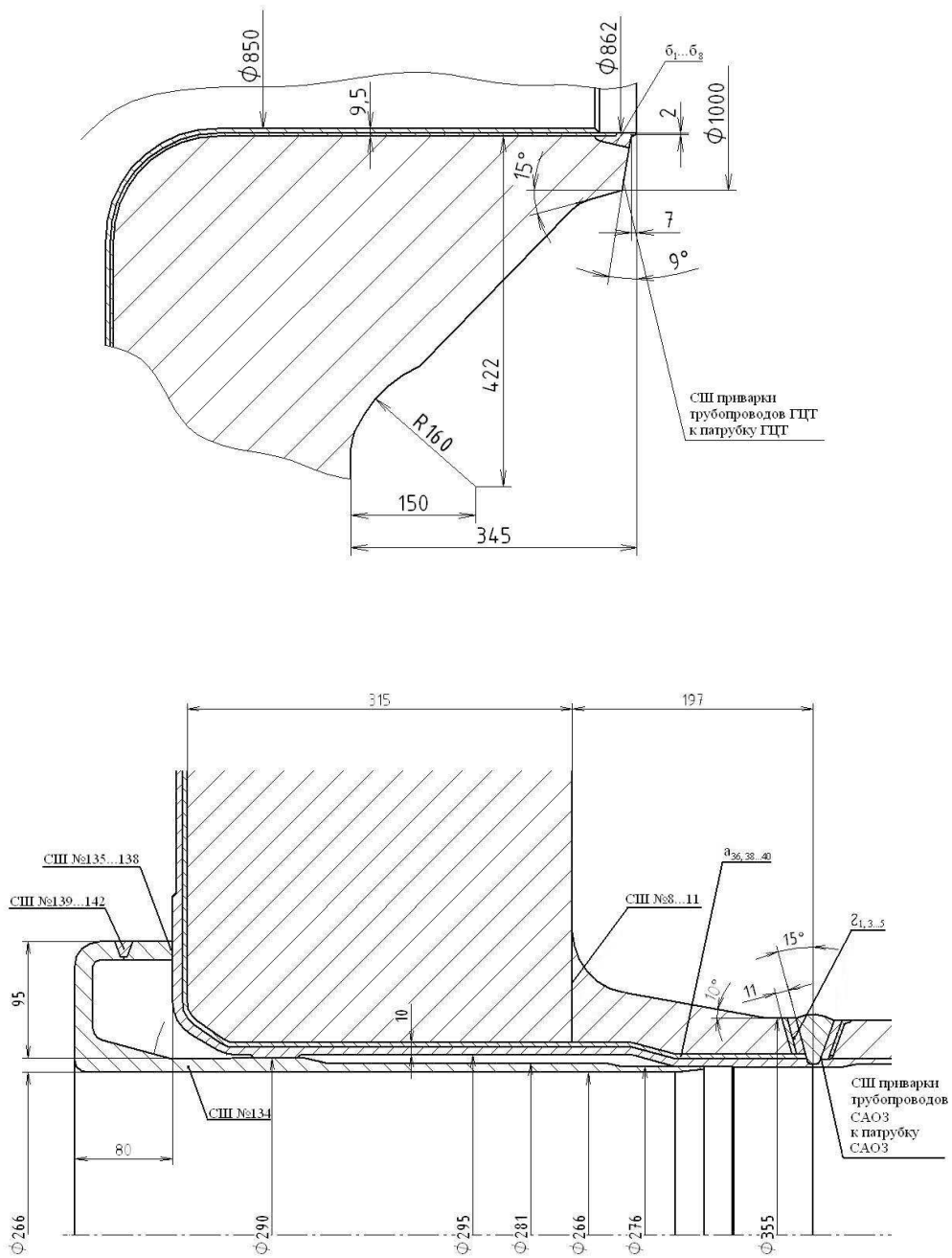
**Obr. A.3:** Rozměrový výkres osazení na opěrném nákržku, sloužící pro uložení TNR na opěrných elementech.



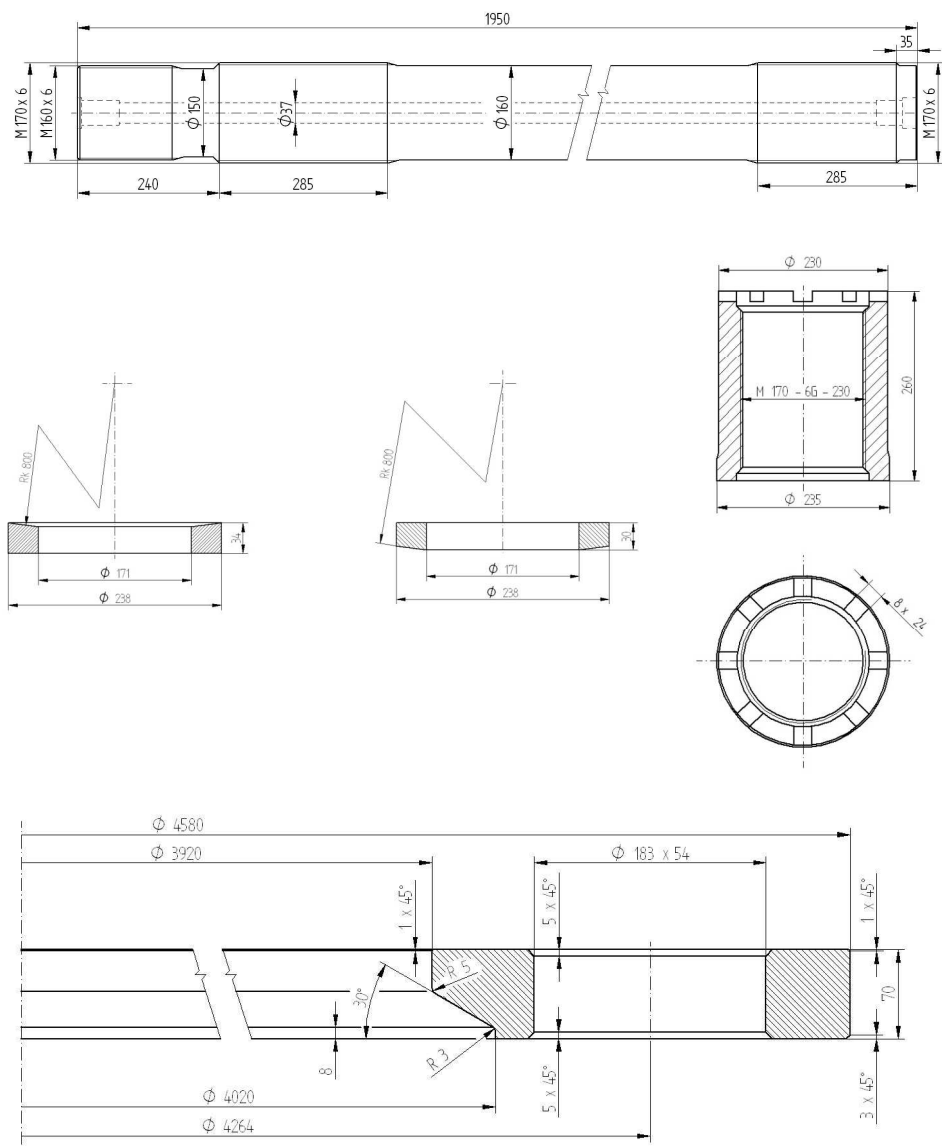
**Obr. A.4:** Rozměrový výkres nátrubku KIP v hrdlové sekci TNR.



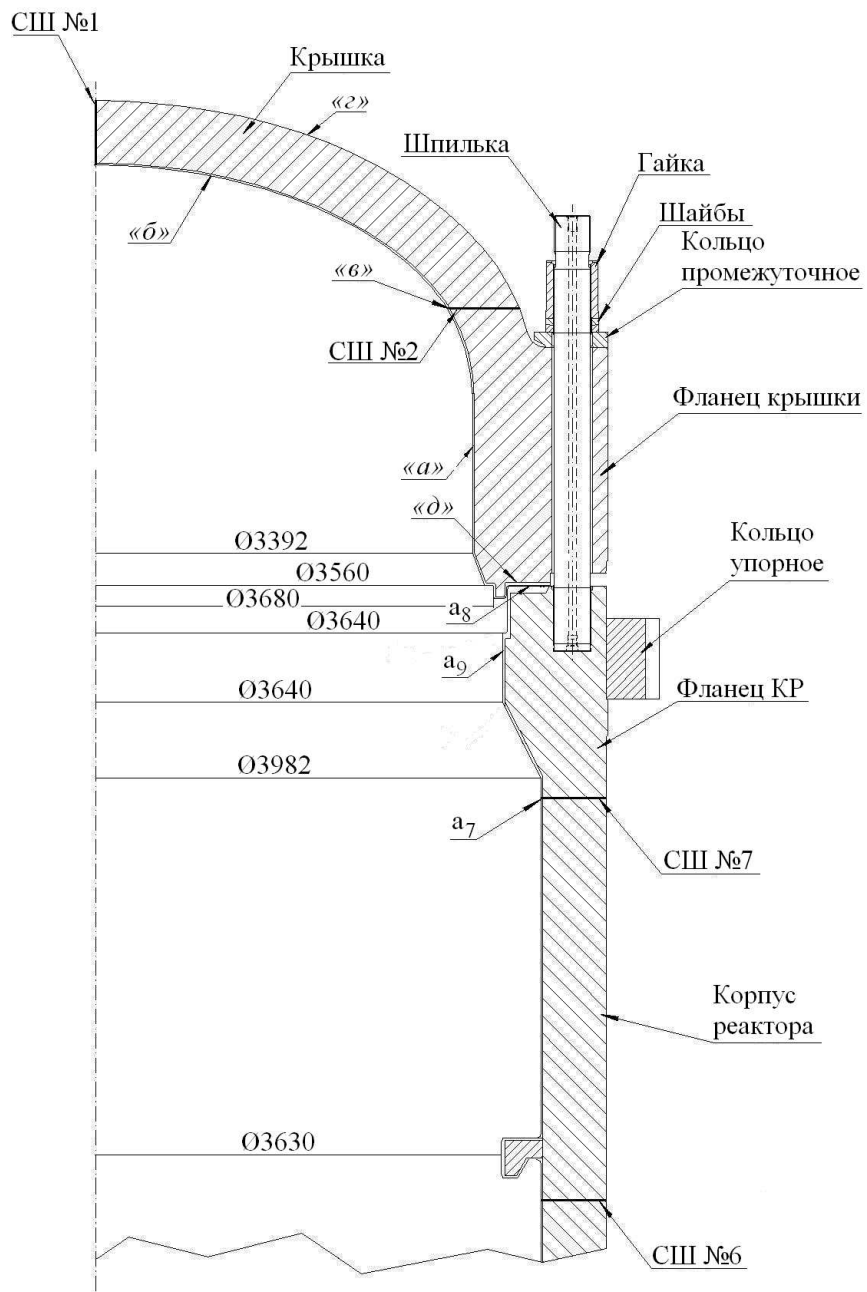
Obr. A.5: Rozměrový výkres provedení hrdlové sekce TNR.



Obr. A.6: Rozměrový výkres provedení nátrubků HCP a SAOZ.

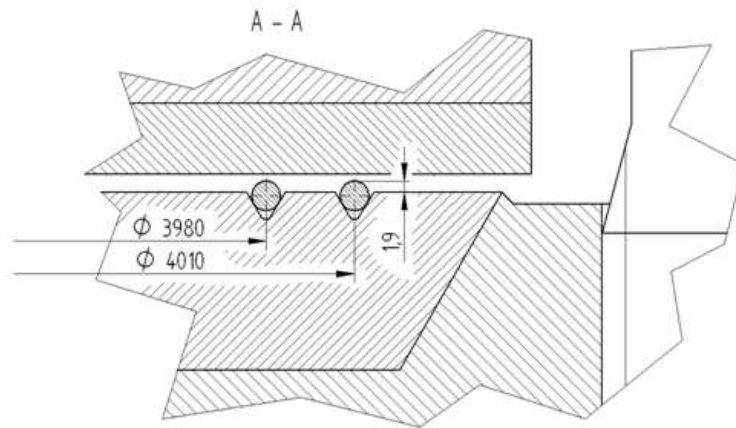


**Obr. A.7:** Rozměrový výkres spojovacích elementů hlavního přírubového spoje TNR.

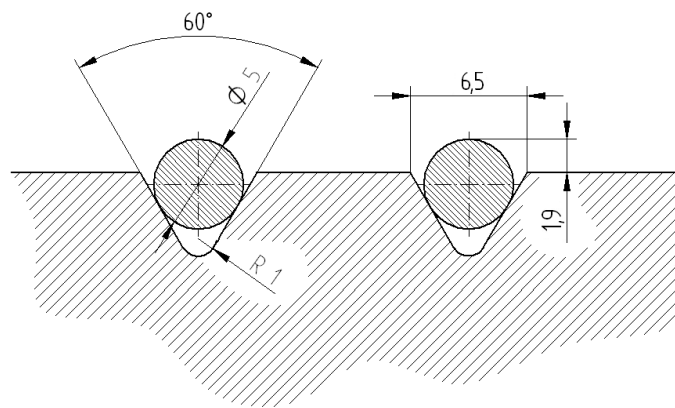


Обр. А.8: Rozměrový výkres hlavního přírubového spoje TNR.

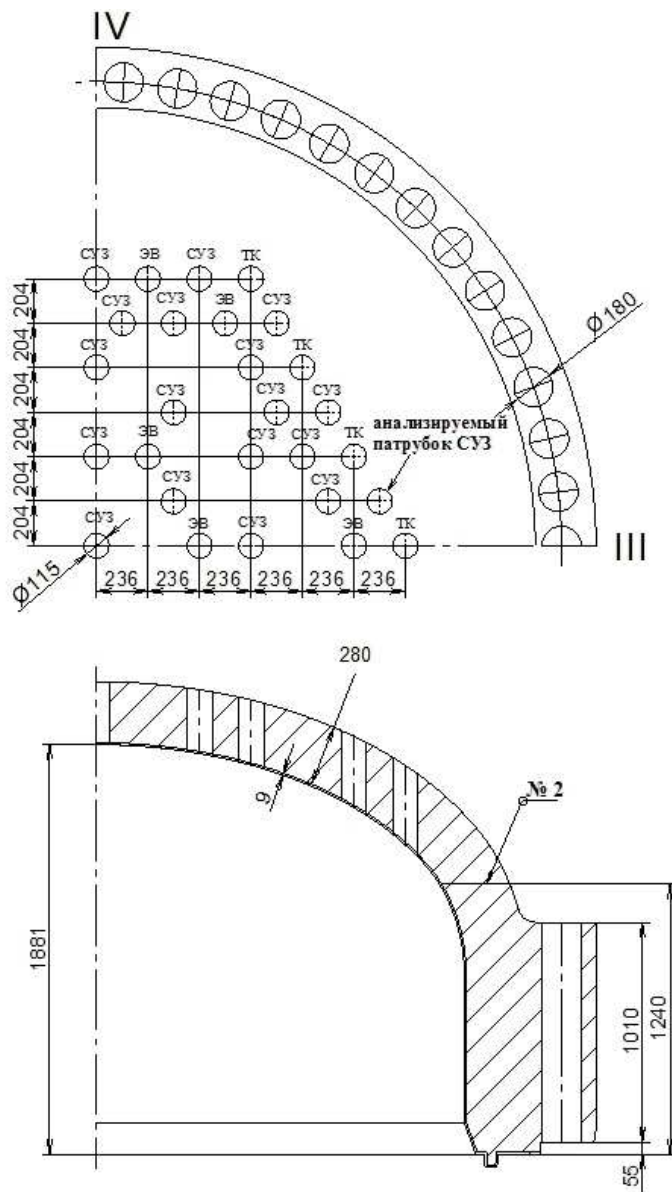




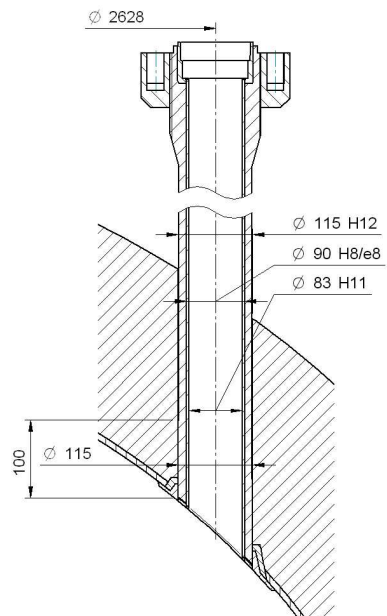
A - A



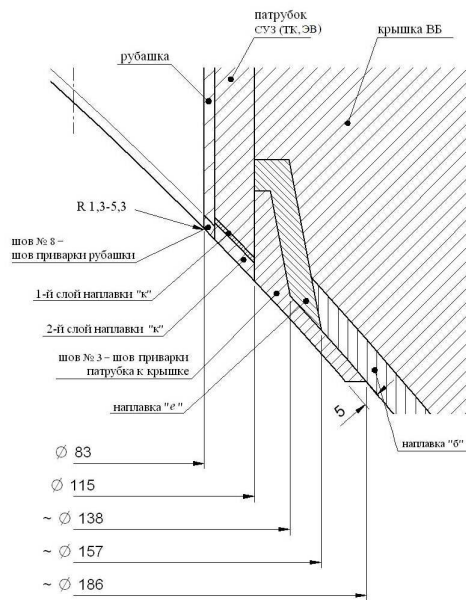
Obr. A.9: Rozměrový výkres těsnění hlavního přírubového spoje TNR.



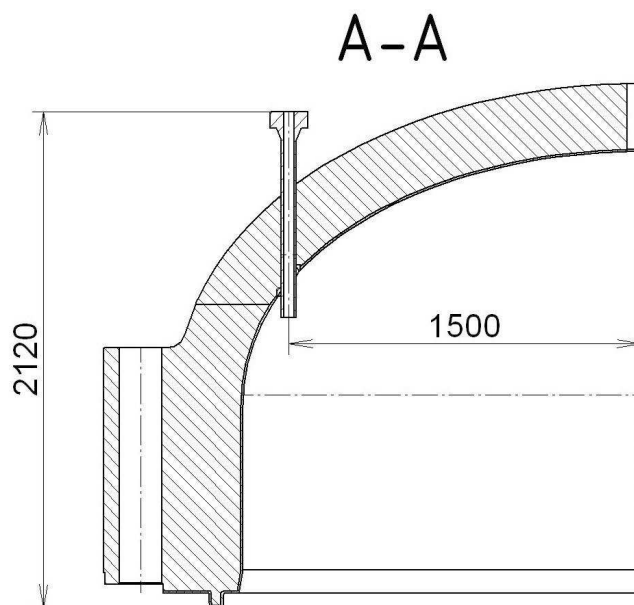
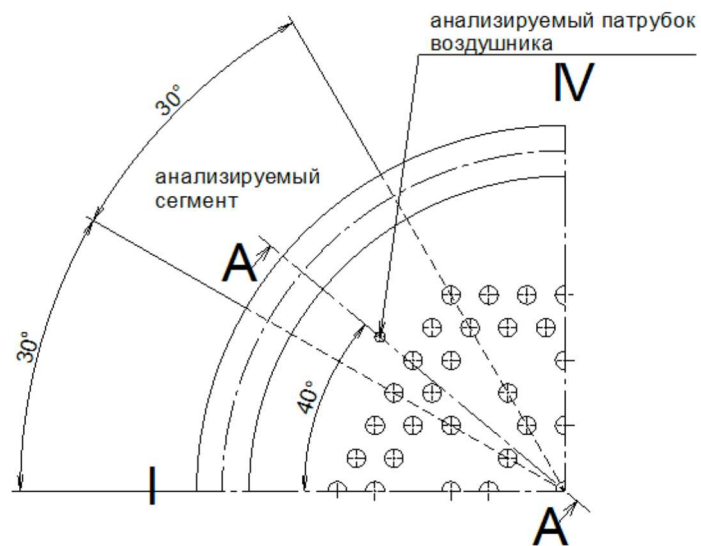
Обр. А.10: Rozměrový výkres víka TNR.



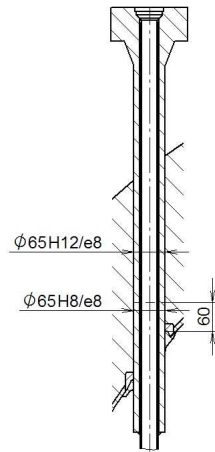
Obr. A.11: Rozměrový výkres víka TNR. Nátrubek na víku (TK, SUZ, EV).



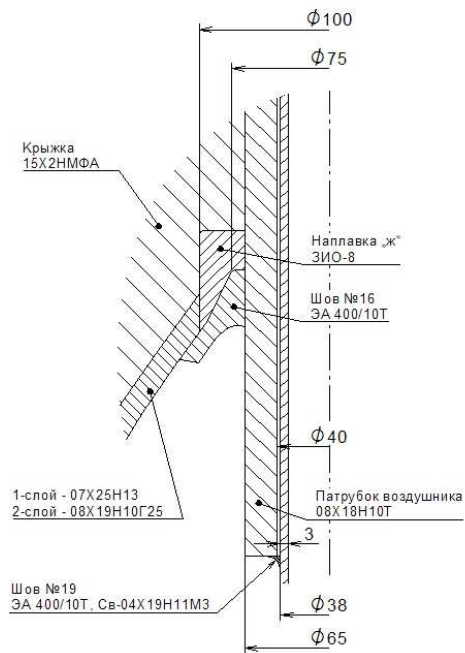
Obr. A.12: Rozměrový výkres víka TNR. Oblast přivaření nátrubku k víku.



**Obr. A.13:** Rozměrový výkres víka TNR. Poloha nátrubku odvzdušnění.

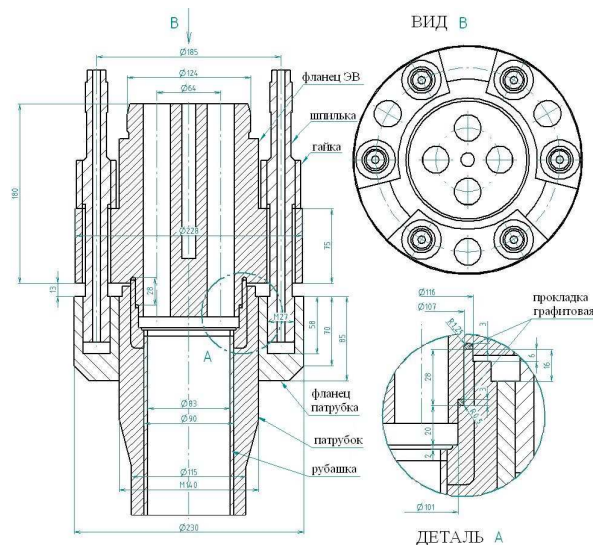


Obr. A.14: Rozměrový výkres víka TNR. Nátrubek odvodu vzdušnění.

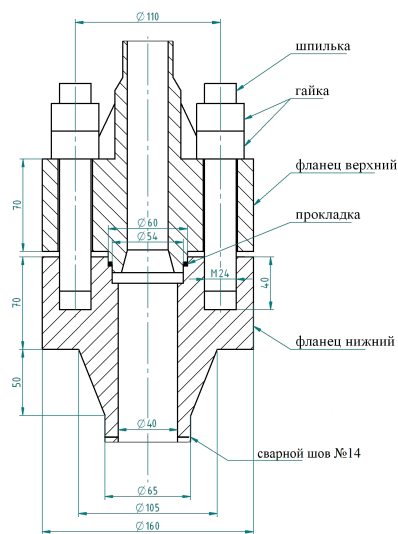


Obr. A.15: Rozměrový výkres víka TNR. Oblast přivaření nátrubku odvodu vzdušnění.





Obr. A.18: Rozměrový výkres přírubového spojení nátrubku EV.



Obr. A.19: Rozměrový výkres přírubového spojení nátrubku odvodu s navazujícím potrubím.

# Příloha B

## Prognóza posloupnosti provozních režimů 3. Bloku Rovenské JE na 40, resp. 60 let provozu

**Tab. B.1:** Prognóza posloupnosti režimů 3. Bloku Rovenské JE na 60 let provozu.

| Kamp. | Posloupnost režimů   |
|-------|--|
| 27    | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.9 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 2.2 1.4.1 2.13 1.4.1 3.1 2.12 1.14.1.1 |
| 28    | 1.1.1 1.2.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.4 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.13 1.4.1 3.3 1.13 1.14.1.1                                      |
| 29    | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.5 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.4.1 3.6 1.13 1.14.1.1                                     |
| 30    | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.6 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 3.7 1.13 1.14.1.1                 |
| 31    | 1.1.1 1.2.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.9 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.4.1 3.1 2.12 1.14.1.1                      |
| 32    | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.4 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 3.8 1.13 1.14.1.1  |
| 33    | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.5 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.13 1.13 1.14.1.1   |
| 34    | 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.6 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.13 1.14.1.1                            |

pokračování na další straně



Tab. B.1 – pokračování z předchozí strany

| Kamp. Posloupnost režimů |   |
|--------------------------|---|
| 35                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.3<br>1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.9 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.4.1<br>3.1 1.13 1.14.1.1                  |
| 36                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1<br>1.7.2 1.8.2 2.4 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 1.4.2<br>1.4.1 2.13 1.4.1 3.8 1.13 1.14.1.1 |
| 37                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2<br>1.8.2 2.7 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.13<br>1.14.1.1                           |
| 38                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.8<br>1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 2.13 1.4.1 2.13 1.13<br>1.14.1.1                            |
| 39                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2<br>2.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 2.9 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.4.1 3.1 1.13<br>1.14.1.1                          |
| 40                       | 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.4 1.4.1<br>1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.4.1 3.8<br>1.13 1.14.1.1                       |
| 41                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.5<br>1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 2.11 1.4.1 2.13 1.13 1.14.1.1   |
| 42                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2<br>2.6 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.13 1.14.1.1                                       |
| 43                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2<br>1.8.2 2.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.9 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.13<br>1.14.1.1                           |
| 44                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.4<br>1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1<br>2.13 1.4.1 3.1 2.12 1.14.1.1       |
| 45                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2<br>1.8.2 2.7 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.13 1.4.1 3.6 1.13 1.14.1.1                                     |
| 46                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.8<br>1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.4.1 3.7 1.13<br>1.14.1.1                                |
| 47                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.3<br>1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.9 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 3.8 2.12<br>1.14.1.1                            |
| 48                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1<br>1.7.2 1.8.2 2.4 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 2.11<br>1.4.1 2.13 2.12 1.14.1.1            |

pokračování na další straně

Tab. B.1 – pokračování z předchozí strany

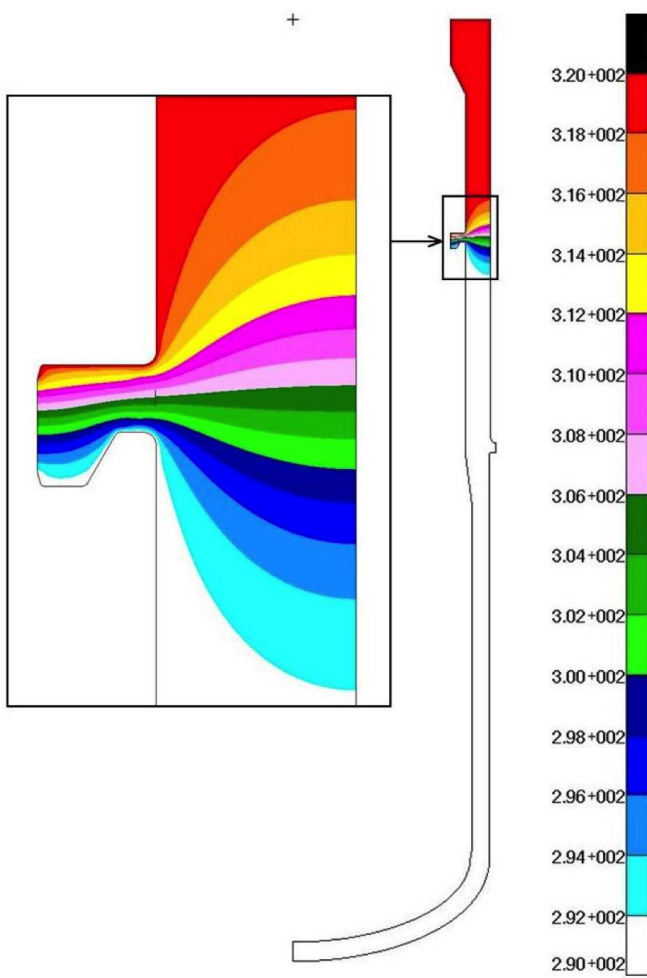
| Kamp. Posloupnost režimů |  |
|--------------------------|--|
| 49                       | 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.5 1.4.1<br>1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.4.1 3.1 1.13 1.14.1.1                                       |
| 50                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.6<br>1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13<br>1.13 1.14.1.1                |
| 51                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2<br>1.8.2 2.7 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.9 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1<br>2.13 1.13 1.14.1.1       |
| 52                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1<br>1.7.2 1.8.2 2.8 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 2.11<br>1.4.1 2.13 2.12 1.14.1.1 |
| 53                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.7.2<br>1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.13 1.14.1.1  |
| 54                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2<br>1.8.2 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 2.12 1.14.1.1                              |
| 55                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.7.2 1.8.2<br>1.4.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13 1.13 1.14.1.1  |
| 56                       | 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2<br>2.7 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 2.11 1.4.1 2.2 1.4.1 2.13<br>1.13 1.14.1.1            |
| 57                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2<br>1.8.2 2.8 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 3.2 1.13<br>1.14.1.1                 |
| 58                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.7.2 1.8.2<br>1.4.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 2.13 1.4.1 2.13 1.13 1.14.1.1                                    |

**Tab. B.2:** Prognóza posloupnosti režimů 3. Bloku Rovenské JE na 40 let provozu.

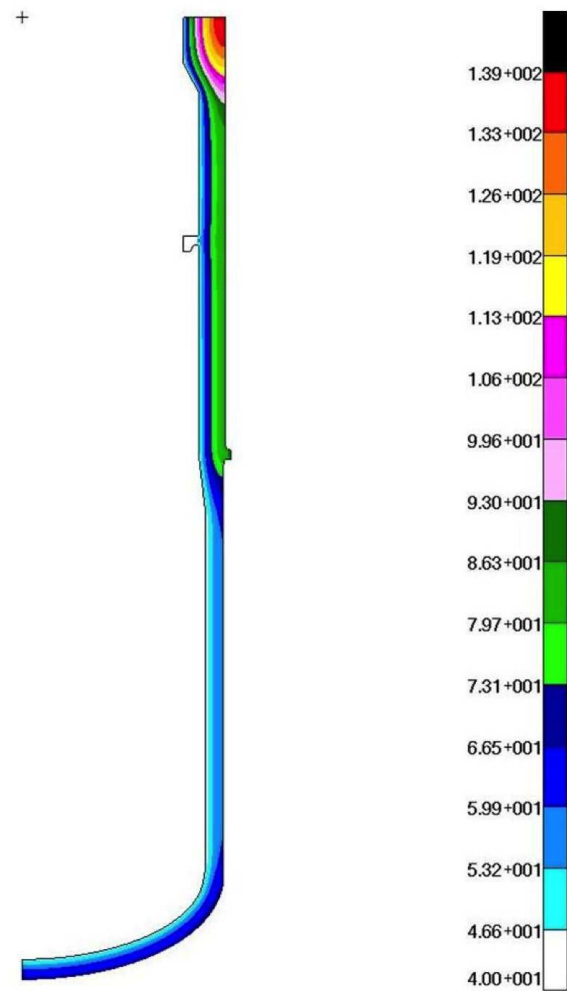
| Kamp. Posloupnost režimů |  |
|--------------------------|--|
| 27                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.8 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 3.1 1.13 1.14.1.1  |
| 28                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.7.2 1.8.2 2.4 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.4.1 3.8 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.9 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 3.3 1.13 1.14.1.1       |
| 29                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 2.5 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 2.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 3.1 2.12 1.14.1.1                                       |
| 30                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.9 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 3.6 1.13 1.14.1.1  |
| 31                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.7.2 1.8.2 2.6 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 3.7 1.13 1.14.1.1                |
| 32                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.5 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 2.8 1.4.1 2.11 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 3.1 2.12 1.14.1.1                                  |
| 33                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.7 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.9 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 3.6 1.13 1.14.1.1  |
| 34                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 1.8.2 2.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.4.1 3.8 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 3.7 1.13 1.14.1.1        |
| 35                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.7.2 1.8.2 2.6 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.1 2.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 2.9 1.4.1 2.11 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 3.1 2.12 1.14.1.1                           |
| 36                       | 1.1.1 1.2.1 1.2.3 1.12 1.3 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.4.2 1.13 1.3 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.4 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 3.8 1.13 1.14.1.1 |
| 37                       | 1.1.1 1.2.1 1.12 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.6 1.4.1 2.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 1.7.2 1.8.2 2.7 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.14.1.1 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 2.9 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 3.2 1.13 1.14.1.1                             |
| 38                       | 1.1.1 1.2.1 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.2 1.7.2 1.8.2 1.7.2 1.8.2 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.2 1.13 1.2.1 1.3 1.4.1 2.10 1.4.1 1.4.2 1.4.1 1.7.2 1.8.2 2.13 1.13 1.3 1.4.1 1.4.2 1.4.1 2.13 1.4.1 1.7.2 1.8.2 3.8 1.13 1.14.1.1   |

## Příloha C

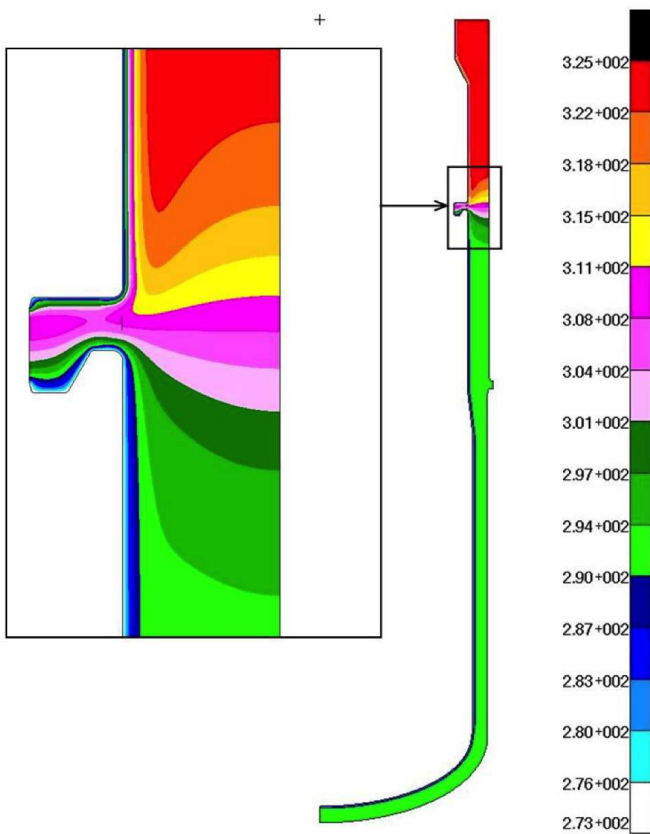
Grafické výstupy z MKP výpočtu  
teplotních a napěťových polí ve  
válnové části, dně a dělicím prstenci  
TNR



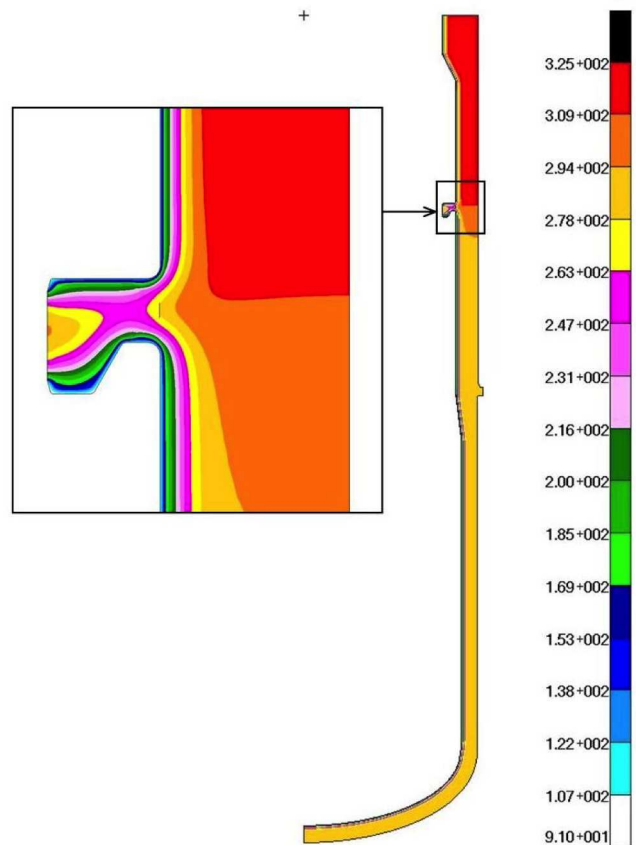
**Obr. C.1:** Rozložení teploty  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) v TNR při nominálním provozu.



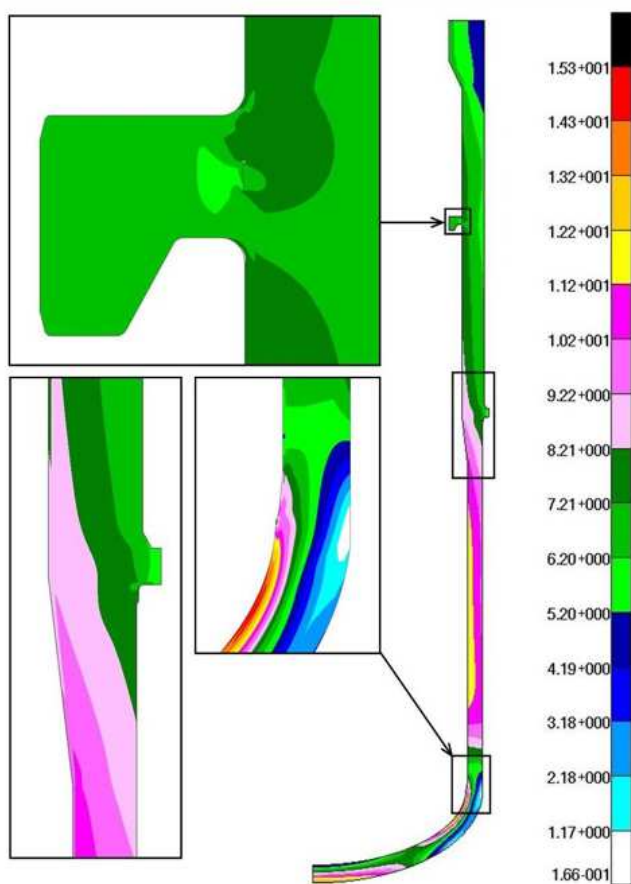
**Obr. C.2:** Rozložení teploty  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) v průběhu režimu 1.13 v čase  $t = 30000\text{s}$ .



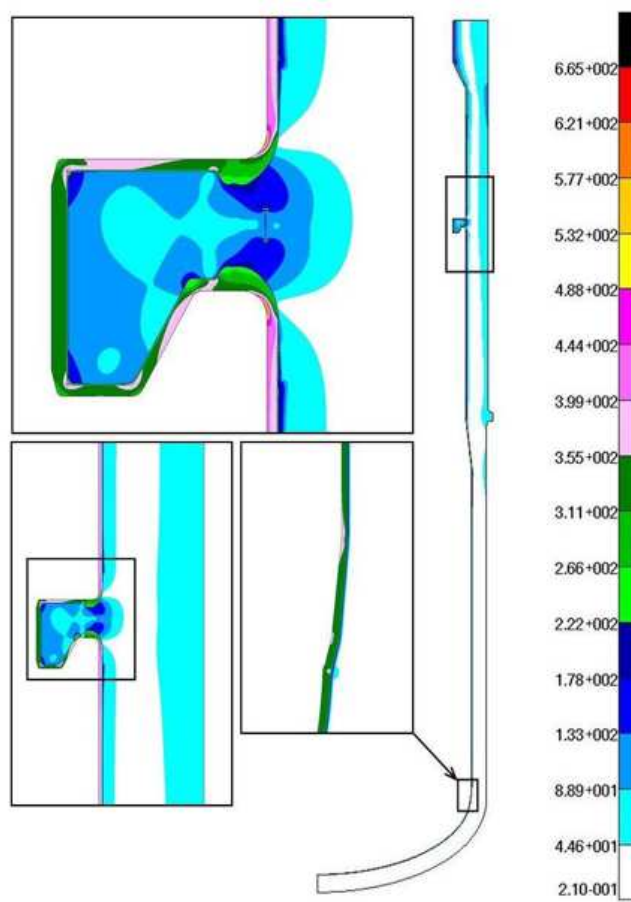
**Obr. C.3:** Rozložení teploty  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )  
v průběhu režimu 2.6 v čase  $t = 3090\text{s}$ .



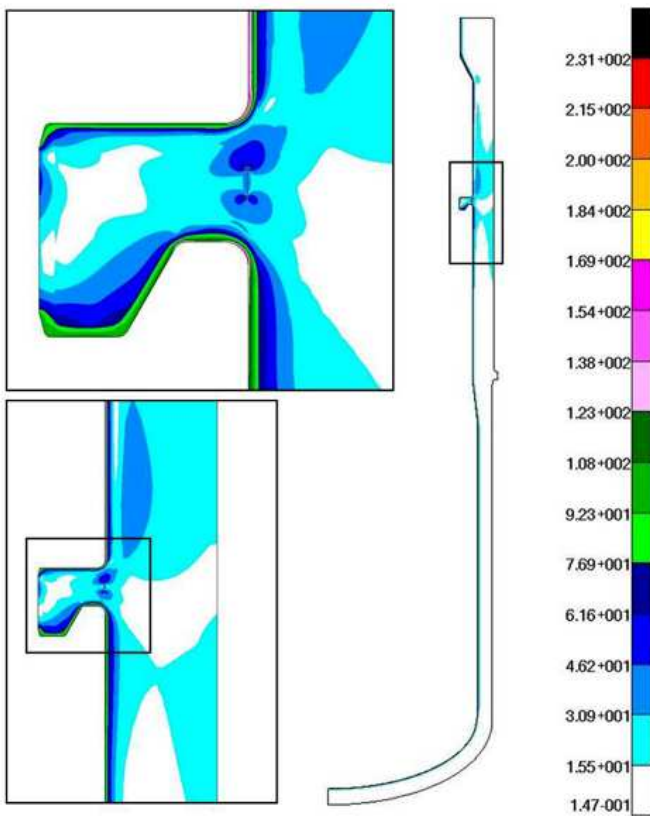
**Obr. C.4:** Rozložení teploty  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )  
v průběhu režimu 3.2 v čase  $t = 120\text{s}$ .



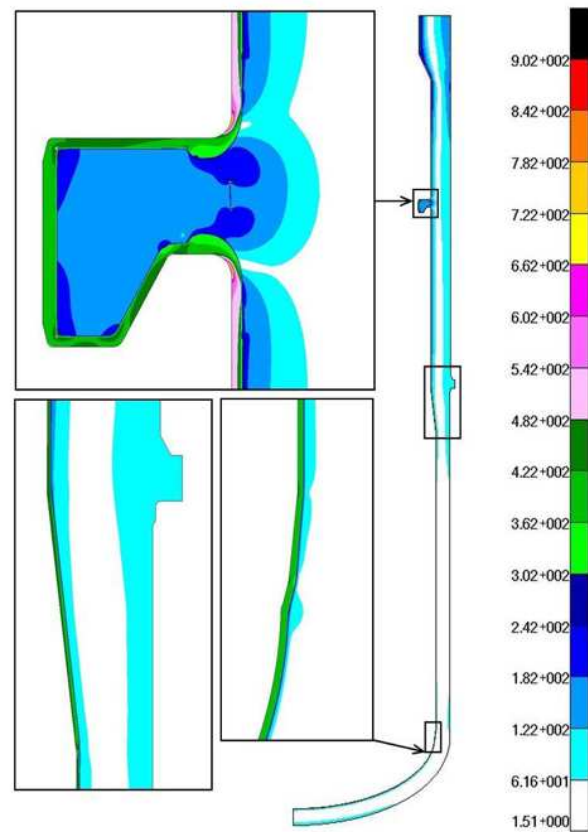
**Obr. C.5:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) v TNR při zatížení vnitřním přetlakem  $p = 1\text{MPa}$ .



**Obr. C.6:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) v průběhu režimu 1.13 v čase  $t = 30000\text{s}$ .

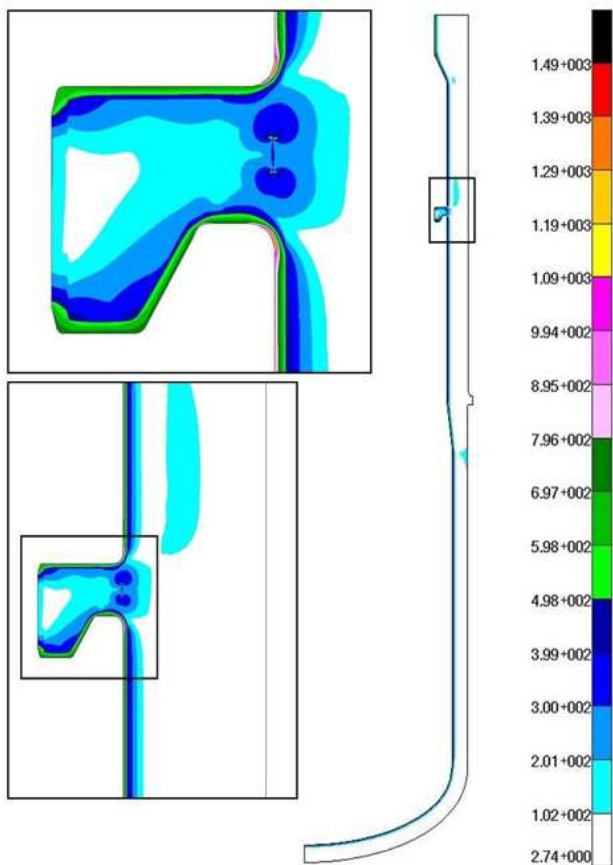


**Obr. C.7:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) v průběhu režimu 2.6 v čase  $t = 3090s$ .

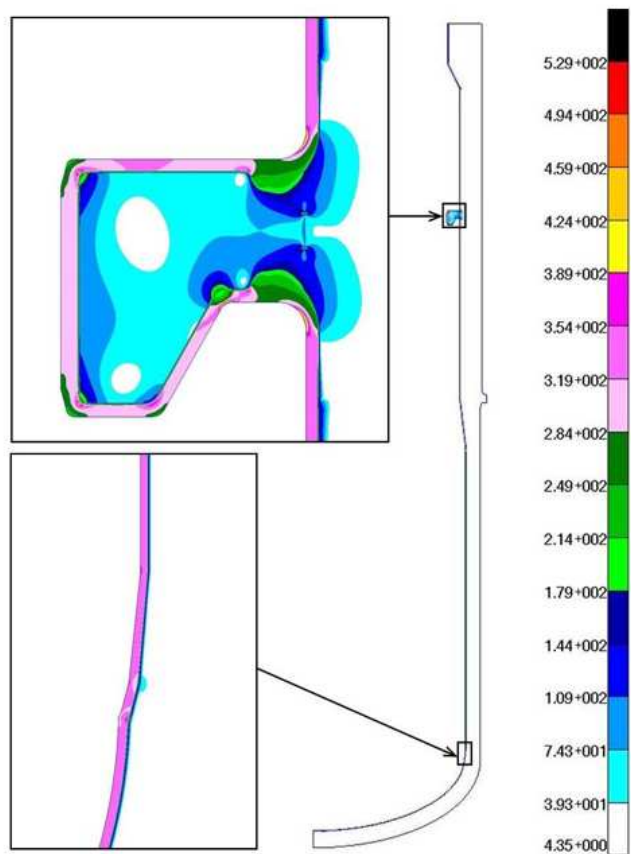


**Obr. C.8:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) v průběhu režimu 2.12 v čase  $t = 15000s$ .

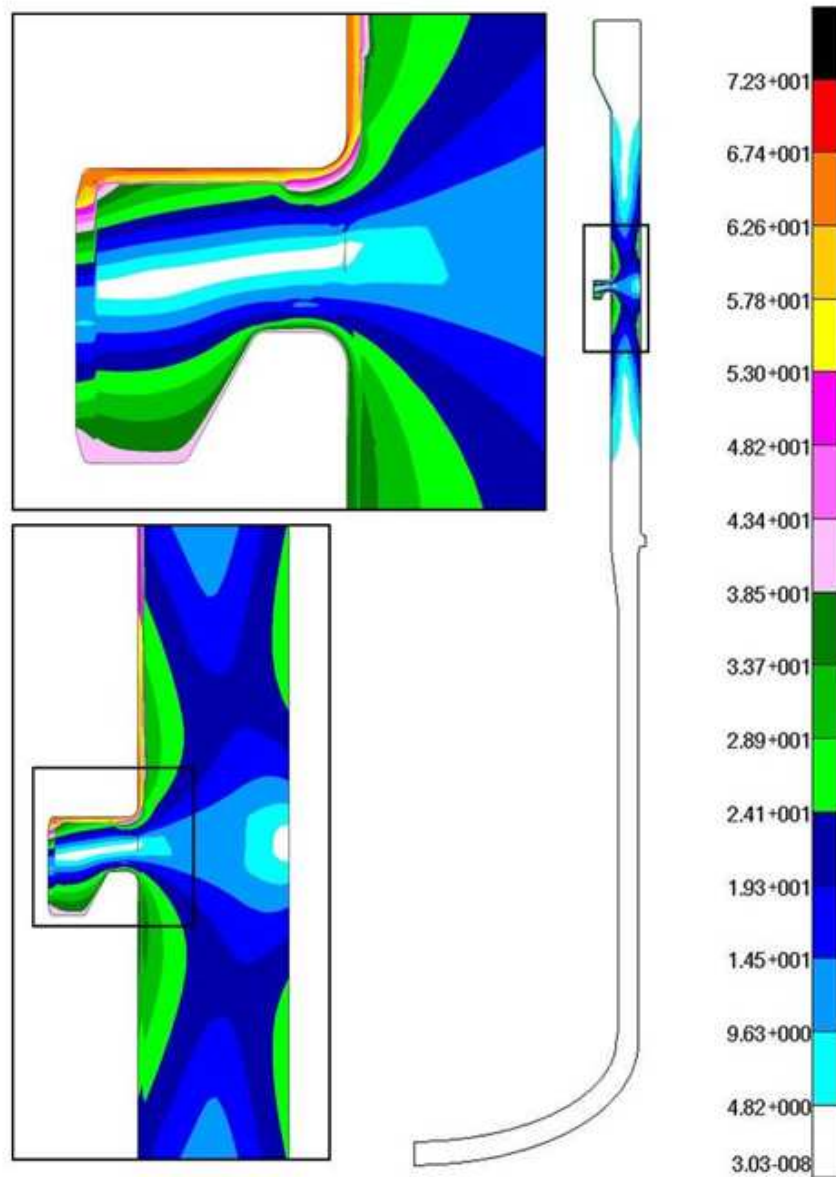




**Obr. C.9:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) v průběhu režimu 3.2 v čase  $t = 120\text{s}$ .



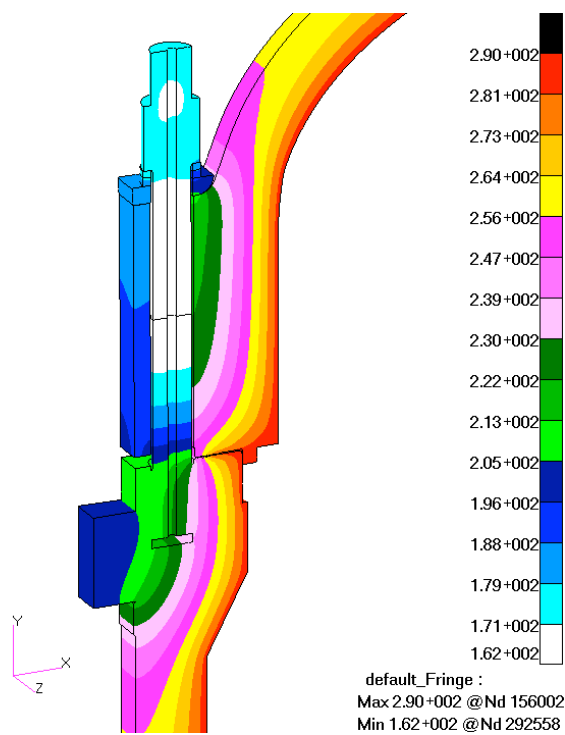
**Obr. C.10:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) ve „studeném stavu“  $T = 20^\circ\text{C}$ .



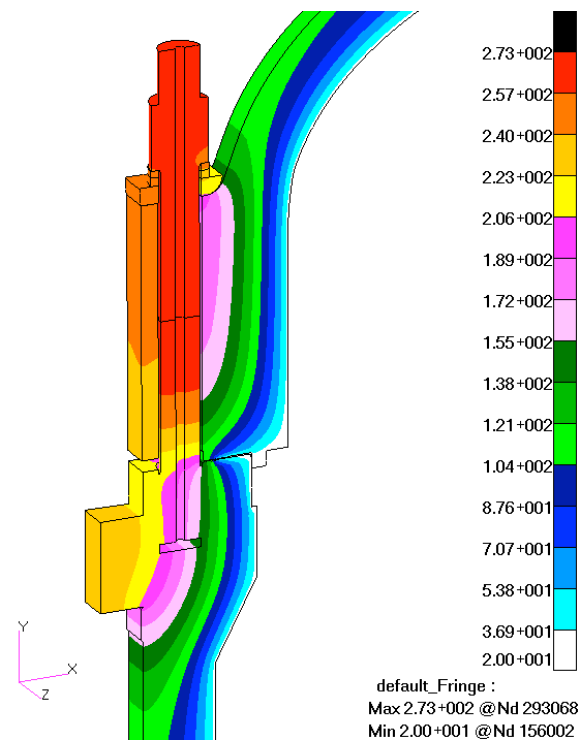
**Obr. C.11:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) v TNR při nominálním výkonu bloku.

## Příloha D

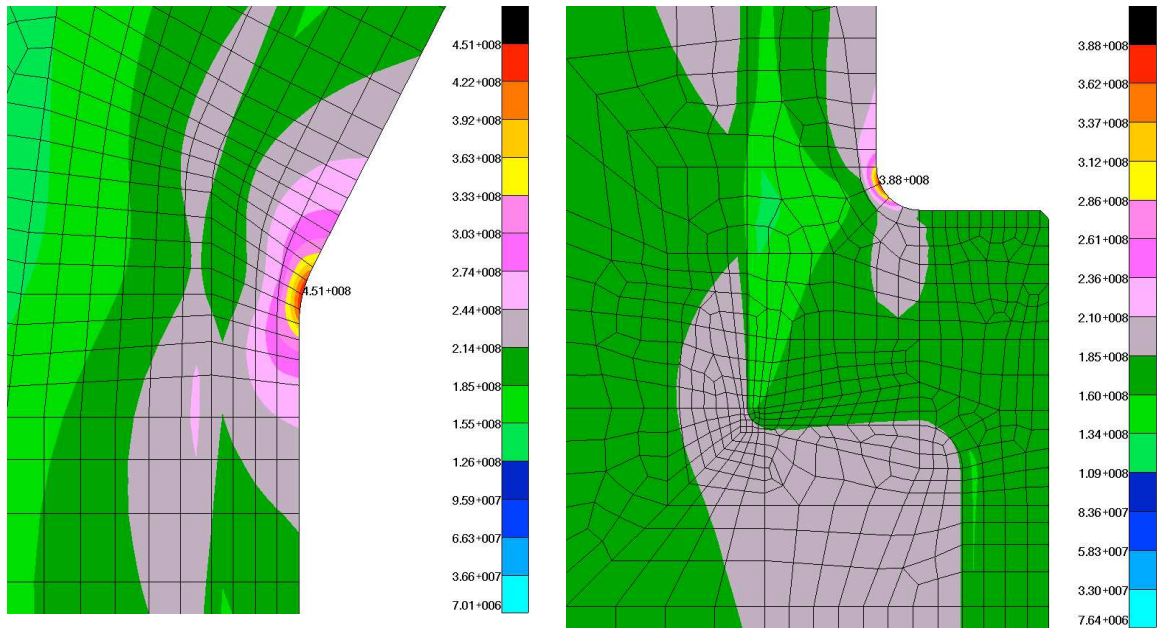
Grafické výstupy z MKP výpočtu  
teplot a napjatosti v hlavním  
přírubovém spoji TNR



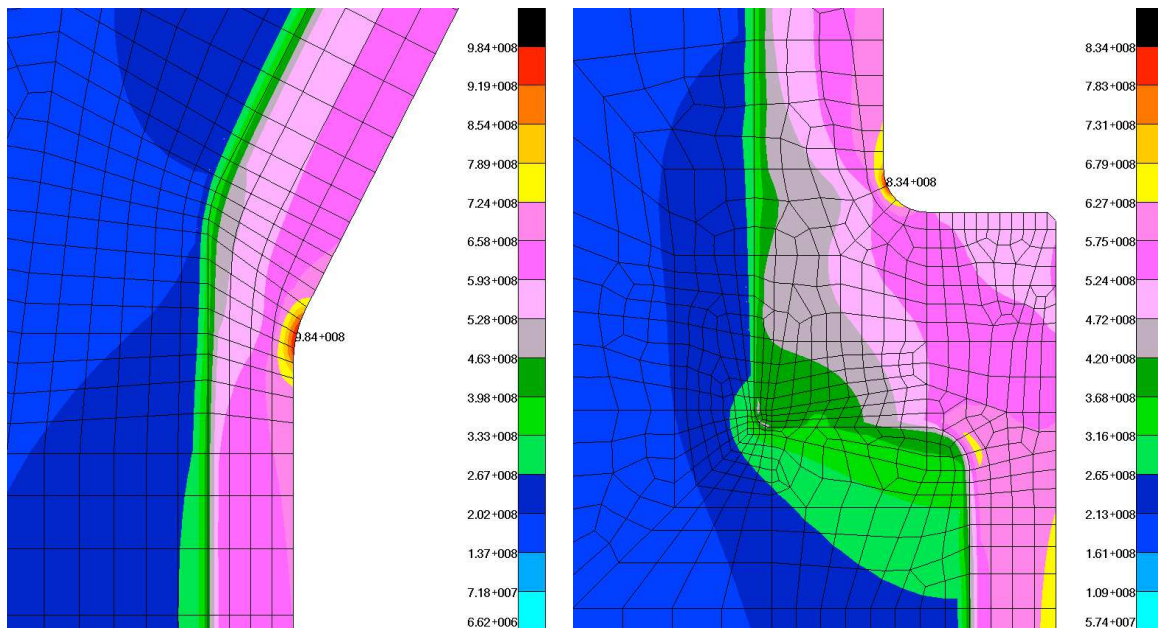
**Obr. D.1:** Rozložení teploty (°C) v HPS, režim 1.3 na konci náhřevu.



**Obr. D.2:** Rozložení teploty (°C) v HPS, režim 2.12 na konci zchlazení.



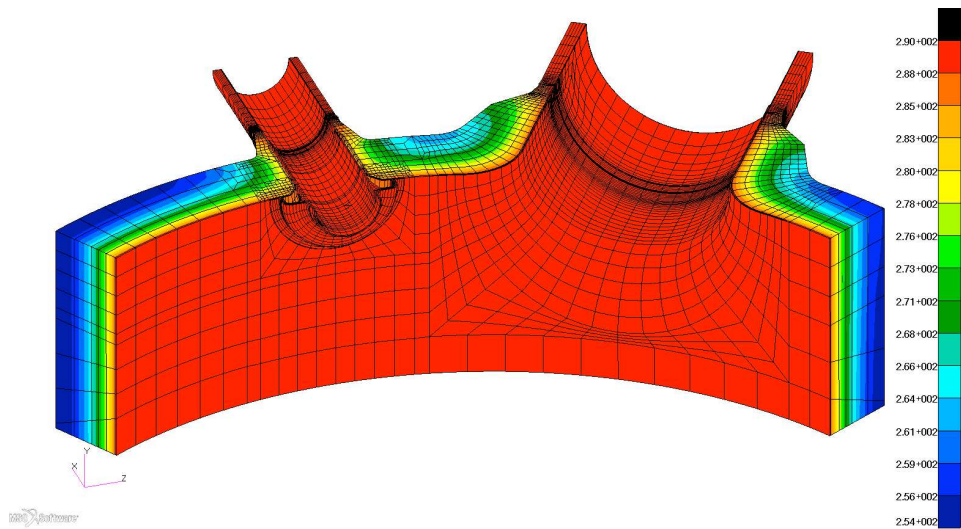
**Obr. D.3:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (Pa) v oblasti konstrukčních míst koncentrace napětí pod přírubou TNR, při režimu 1.3 na konci náhřevu.



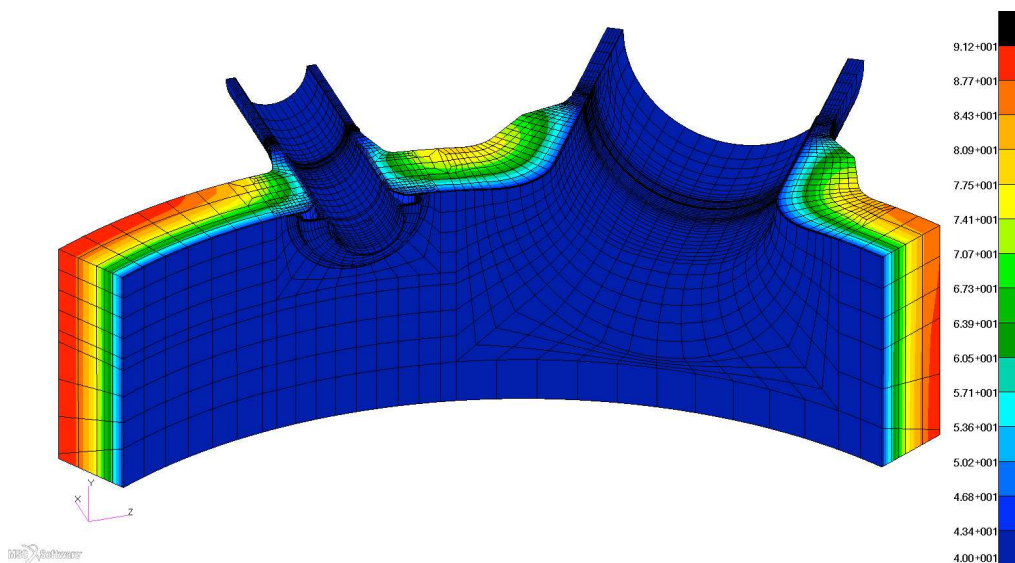
**Obr. D.4:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (Pa) v oblasti konstrukčních míst koncentrace napětí pod přírubou TNR, při režimu 2.12 na konci zchlazení.

## Příloha E

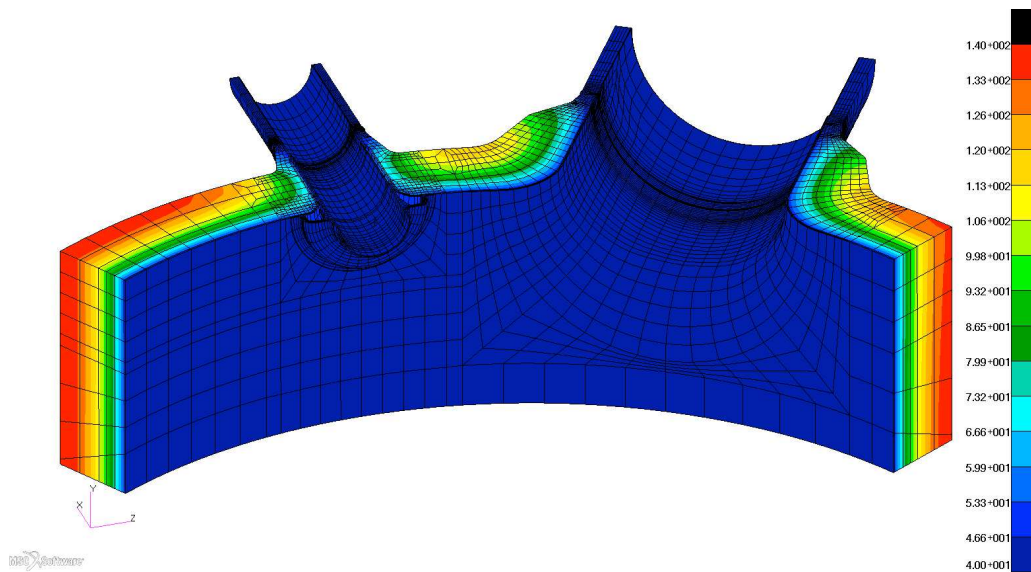
Grafické výstupy z MKP výpočtu  
teplot a napjatosti v hrdlové sekci  
TNR



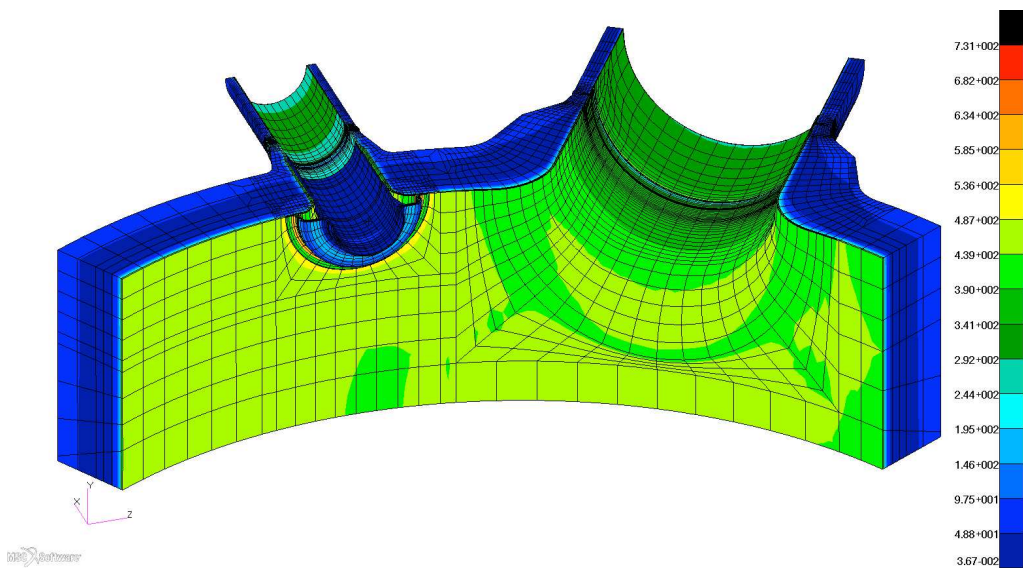
**Obr. E.1:** Rozložení teploty ( $^{\circ}\text{C}$ ) v oblasti horní hrdlové sekce TNR, při režimu 1.3 „Plánovaný ohřev ze studeného stavu s rychlostí do  $20^{\circ}\text{C}/\text{hod.}$ “ na konci ohřevu.



**Obr. E.2:** Rozložení teploty ( $^{\circ}\text{C}$ ) v oblasti horní hrdlové sekce TNR, při režimu 1.13 „Plánované vychlazování do studeného stavu s rychlostí  $30^{\circ}\text{C}/\text{hod.}$ “ na konci vychlazování.

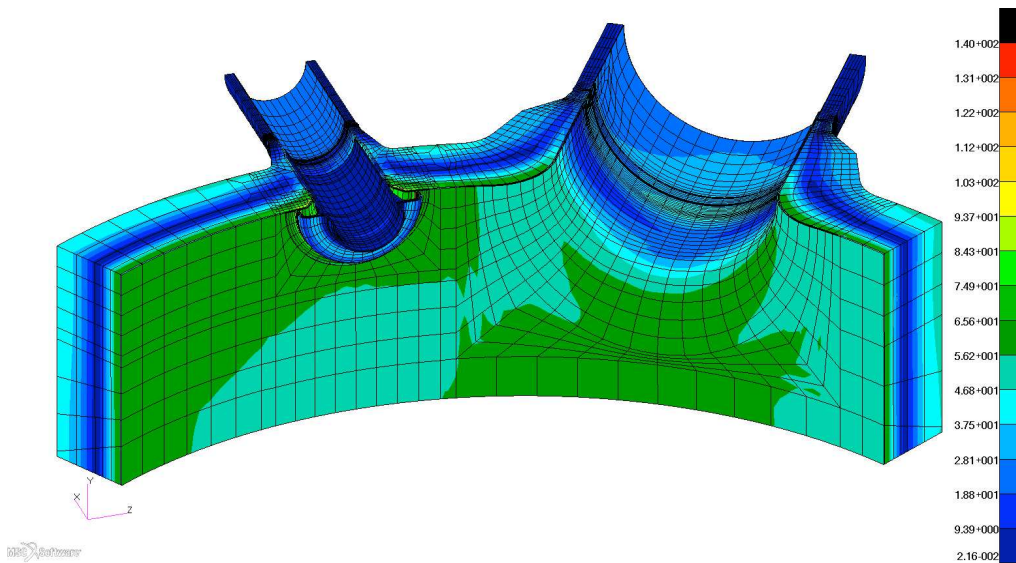


**Obr. E.3:** Rozložení teploty ( $^{\circ}\text{C}$ ) v oblasti horní hrdlové sekce TNR, při režimu 2.12 „Zrychlené vychlazování s rychlostí  $60^{\circ}\text{C}/\text{hod.}$ “ na konci vychlazování.

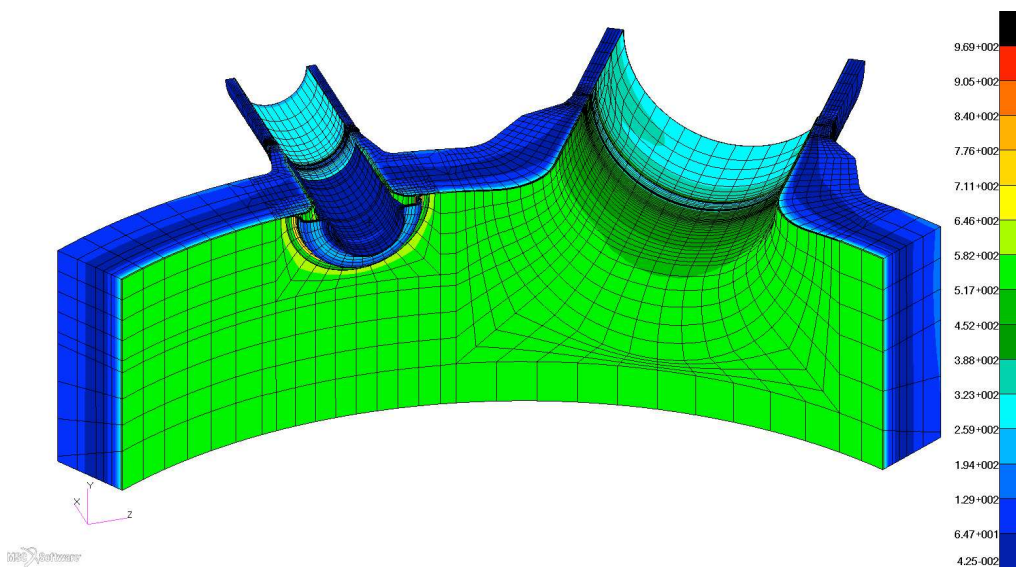


**Obr. E.4:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) v oblasti horní hrdlové sekce TNR, při režimu 1.13 „Plánované vychlazování do studeného stavu s rychlostí  $30^{\circ}\text{C}/\text{hod.}$ “ na konci vychlazování.

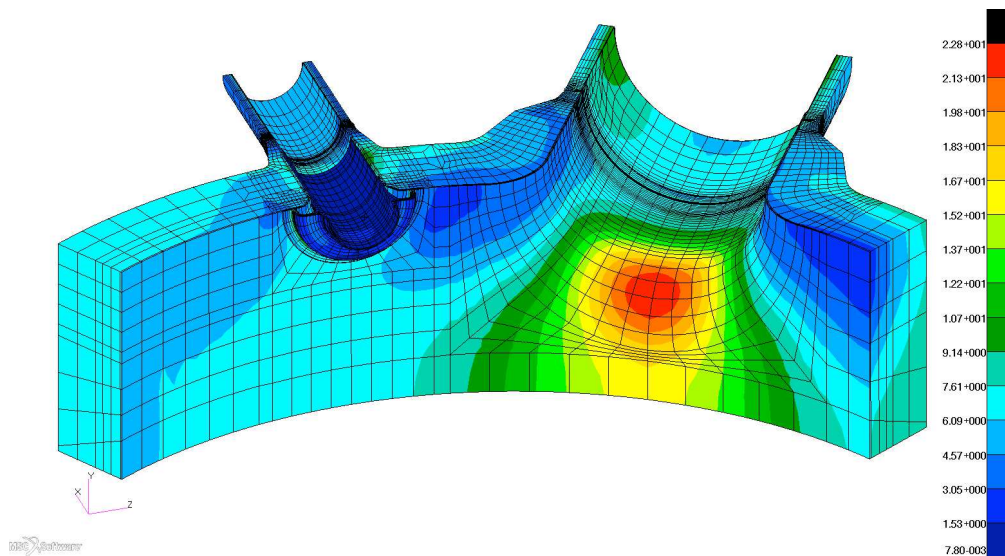




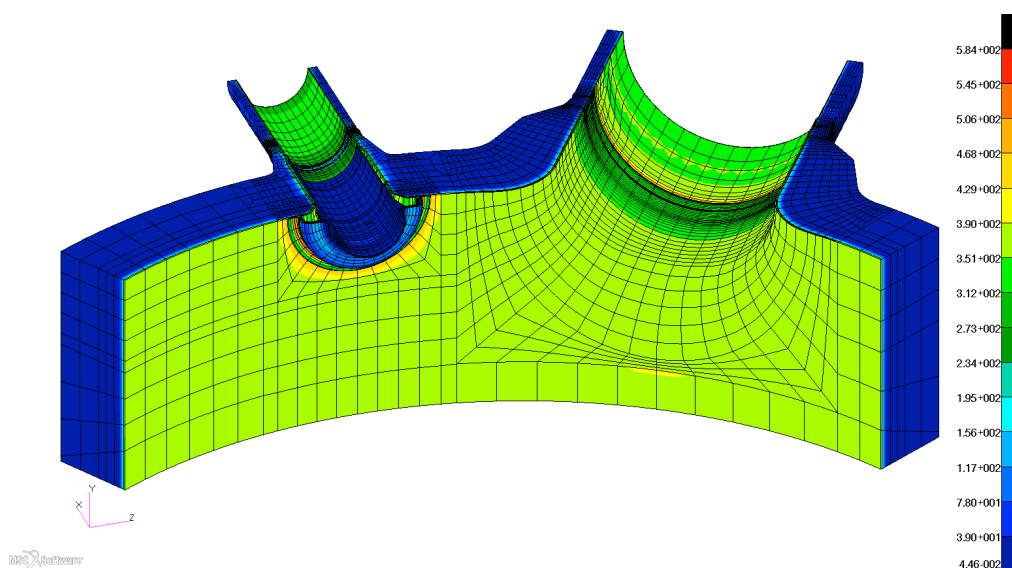
**Obr. E.5:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) v oblasti horní hrdlové sekce TNR, při režimu 1.3 „Plánovaný ohřev ze studeného stavu s rychlostí do 20°C/hod.“ na konci ohřevu.



**Obr. E.6:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) v oblasti horní hrdlové sekce TNR, při režimu 2.12 „Zrychlené vychlazování s rychlostí 60°C/hod.“ na konci vychlazování.



**Obr. E.7:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) v oblasti horní hrdlové sekce, při zatížení vnitřním přetlakem 1 MPa.



**Obr. E.8:** Rozložení hodnoty redukovaného napětí (MPa) v oblasti horní hrdlové sekce, ve „studeném“ stavu při pokojové teplotě.

## Příloha F

# Nátrubek HCP a SAOZ v oblasti spodní hrdlové sekce - „studený“ nátrubek HCP

**Tab. F.1:** Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti návaru hrdlové sekce TNR; oblast „studených“ nátrubků.

| bod    | materiál        | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let   | 40 let   | 60 let   |
|--------|-----------------|-----------------|-------|------------|-------------|----------|----------|----------|
| 1      | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,17E-02 | 2,30E-02 | 3,09E-02 |
| 4      | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,46E-02 | 2,76E-02 | 3,70E-02 |
| 7      | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,23E-02 | 2,35E-02 | 3,17E-02 |
| 10     | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,51E-02 | 2,83E-02 | 3,84E-02 |
| 16 I   | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,88E-02 | 3,52E-02 | 4,70E-02 |
| 16 II  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,52E-02 | 2,88E-02 | 3,85E-02 |
| 16 III | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,60E-02 | 3,12E-02 | 4,13E-02 |
| 16 IV  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,49E-02 | 2,80E-02 | 3,74E-02 |
| 18 I   | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,27E-02 | 2,69E-02 | 3,54E-02 |
| 18 II  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,05E-02 | 2,21E-02 | 2,96E-02 |
| 18 III | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,32E-02 | 2,78E-02 | 3,66E-02 |
| 18 IV  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,12E-02 | 2,33E-02 | 3,12E-02 |
| 20 I   | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,35E-02 | 2,84E-02 | 3,72E-02 |
| 20 II  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,32E-02 | 2,55E-02 | 3,43E-02 |
| 20 III | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,42E-02 | 2,95E-02 | 3,88E-02 |
| 20 IV  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,38E-02 | 2,67E-02 | 3,59E-02 |
| 21 I   | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 7,91E-03 | 1,28E-02 | 1,78E-02 |
| 21 II  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 9,22E-03 | 1,48E-02 | 2,10E-02 |
| 21 III | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 7,53E-03 | 1,24E-02 | 1,73E-02 |
| 21 IV  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 8,99E-03 | 1,45E-02 | 2,05E-02 |

pokračování na další straně

Tab. F.1 – pokračování z předchozí strany

| bod    | materiál        | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|--------|-----------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 22 I   | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 8,28E-03        | 1,62E-02        | 2,18E-02        |
| 22 II  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,17E-02        | 2,04E-02        | 2,83E-02        |
| 22 III | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 8,70E-03        | 1,68E-02        | 2,26E-02        |
| 22 IV  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,18E-02        | 2,06E-02        | 2,85E-02        |
| 23 I   | Sv-08Ch19N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 1,30E-03        | 2,95E-03        | 3,96E-03        |
| 23 II  | Sv-08Ch19N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 1,91E-03        | 3,82E-03        | 5,21E-03        |
| 23 III | Sv-08Ch19N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 1,26E-03        | 2,90E-03        | 3,90E-03        |
| 23 IV  | Sv-08Ch19N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 1,77E-03        | 3,60E-03        | 4,90E-03        |
| 33 I   | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,14E-02        | 2,29E-02        | 3,07E-02        |
| 33 II  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | <b>2,48E-02</b> | <b>4,24E-02</b> | <b>5,80E-02</b> |
| 33 III | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,10E-02        | 2,21E-02        | 2,96E-02        |
| 33 IV  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 2,44E-02        | 4,26E-02        | 5,80E-02        |
| 35 I   | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 3,36E-03        | 6,17E-03        | 8,28E-03        |
| 35 II  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 2,68E-03        | 5,27E-03        | 7,02E-03        |
| 35 III | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 3,45E-03        | 6,26E-03        | 8,42E-03        |
| 35 IV  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 3,30E-03        | 6,11E-03        | 8,21E-03        |

Tab. F.2: Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti přivaření austenitické košilky nátrubku SAOZ; oblast „studených“ nátrubků.

| bod    | materiál                     | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|--------|------------------------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 11 I   | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,44E-01        | 3,99E-01        | 4,95E-01        |
| 11 II  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,06E-01        | 3,09E-01        | 3,79E-01        |
| 11 III | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | <b>1,46E-01</b> | <b>4,09E-01</b> | <b>5,07E-01</b> |
| 11 IV  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,13E-01        | 3,20E-01        | 3,95E-01        |
| 12 I   | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 6,11E-02        | 1,82E-01        | 2,23E-01        |
| 12 II  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 8,78E-02        | 2,65E-01        | 3,24E-01        |
| 12 III | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 6,19E-02        | 1,87E-01        | 2,29E-01        |
| 12 IV  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 9,31E-02        | 2,72E-01        | 3,35E-01        |
| 13 I   | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,66E-02        | 5,53E-02        | 6,64E-02        |
| 13 II  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,07E-02        | 6,26E-02        | 7,64E-02        |
| 13 III | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,72E-02        | 5,94E-02        | 7,11E-02        |
| 13 IV  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,01E-02        | 5,96E-02        | 7,30E-02        |
| 14 I   | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,97E-02        | 1,02E-01        | 1,22E-01        |

pokračování na další straně

Tab. F.2 – pokračování z předchozí strany

| bod    | materiál                     | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let   | 40 let   | 60 let   |
|--------|------------------------------|-----------------|-------|------------|-------------|----------|----------|----------|
| 14 II  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 3,24E-02 | 1,00E-01 | 1,23E-01 |
| 14 III | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 3,11E-02 | 1,09E-01 | 1,31E-01 |
| 14 IV  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 3,15E-02 | 9,63E-02 | 1,18E-01 |
| 15 I   | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,13E-02 | 6,21E-02 | 7,57E-02 |
| 15 II  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,76E-02 | 7,35E-02 | 9,13E-02 |
| 15 III | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,18E-02 | 6,53E-02 | 7,93E-02 |
| 15 IV  | EA-400/10T<br>Sv-04Ch19N11M3 | 08Ch18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 3,26E-02 | 8,59E-02 | 1,07E-01 |

Tab. F.3: Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti nátrubku HCP a SAOZ; oblast „studených“ nátrubků.

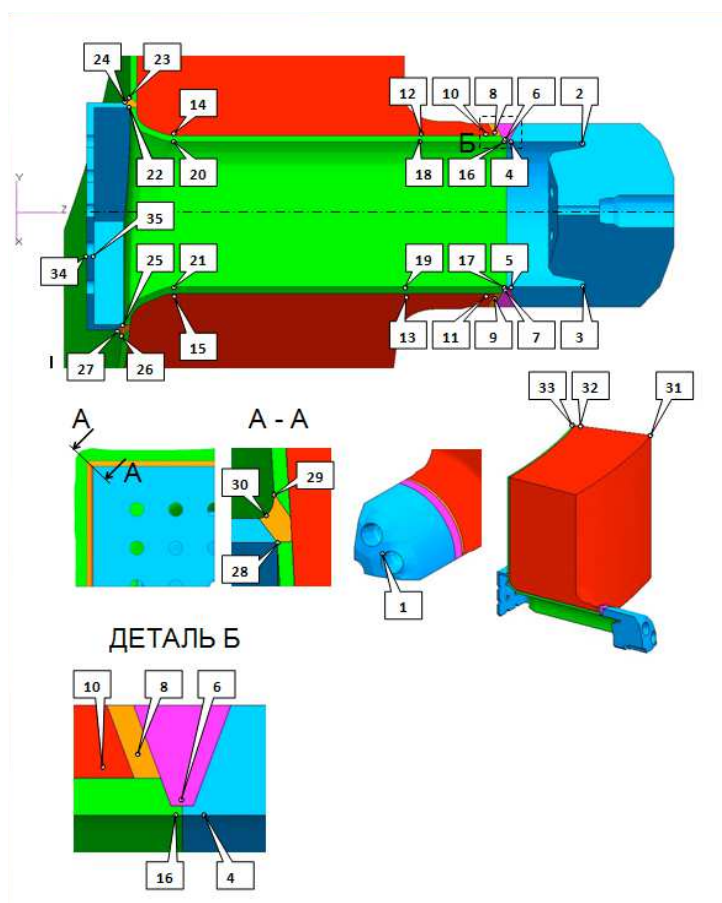
| bod    | materiál  | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|--------|-----------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2      | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 3,04E-05        | 3,15E-04        | 3,26E-04        |
| 5      | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 7,36E-05        | 7,86E-04        | 8,33E-04        |
| 8      | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,78E-05        | 2,83E-04        | 2,92E-04        |
| 17 I   | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 7,05E-05        | 7,54E-04        | 7,96E-04        |
| 17 II  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 6,30E-05        | 7,58E-04        | 7,97E-04        |
| 17 III | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 7,12E-05        | 7,68E-04        | 8,12E-04        |
| 17 IV  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 6,10E-05        | 7,30E-04        | 7,67E-04        |
| 19 I   | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,27E-04        | 1,28E-03        | 1,36E-03        |
| 19 II  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 3,79E-04        | 1,65E-03        | 2,01E-03        |
| 19 III | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,30E-04        | 1,30E-03        | 1,39E-03        |
| 19 IV  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 4,32E-04        | 1,78E-03        | 2,18E-03        |
| 24 I   | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 4,42E-03        | 7,39E-03        | 1,04E-02        |
| 24 II  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 4,57E-03        | 7,12E-03        | 1,01E-02        |
| 24 III | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 7,46E-03        | 1,13E-02        | 1,60E-02        |
| 24 IV  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | <b>8,31E-03</b> | <b>1,33E-02</b> | <b>1,86E-02</b> |
| 34 I   | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 3,24E-05        | 3,30E-04        | 3,40E-04        |
| 34 II  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 5,79E-03        | 9,08E-03        | 1,31E-02        |
| 34 III | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,97E-05        | 3,13E-04        | 3,23E-04        |
| 34 IV  | 15Ch2NMFA | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 5,15E-03        | 8,29E-03        | 1,19E-02        |
| 36 I   | PT 30     | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 5,96E-03        | 8,83E-03        | 1,26E-02        |
| 36 II  | PT 30     | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 6,44E-03        | 9,59E-03        | 1,36E-02        |
| 36 III | PT 30     | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 5,44E-03        | 8,07E-03        | 1,15E-02        |
| 36 IV  | PT 30     | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 5,61E-03        | 8,32E-03        | 1,18E-02        |

**Tab. F.4:** Kumulace únavového poškození  $D$  na vnějším povrchu hrdlové sekce TNR; oblast „studených“ nátrubků.

| bod    | materiál               | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|--------|------------------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 3      | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,33E-05        | 8,78E-05        | 9,08E-05        |
| 6      | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 7,76E-05        | 4,45E-04        | 5,13E-04        |
| 9      | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,30E-04        | 3,54E-04        | 4,65E-04        |
| 25 I   | EA 395/9<br>EA 400/10T | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 3,76E-06        | 2,51E-05        | 2,51E-05        |
| 25 II  | EA 395/9<br>EA 400/10T | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 1,57E-06        | 1,73E-05        | 1,73E-05        |
| 25 III | EA 395/9<br>EA 400/10T | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,35E-07        | 1,29E-05        | 1,20E-05        |
| 25 IV  | EA 395/9<br>EA 400/10T | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 1,24E-07        | 1,82E-05        | 1,82E-05        |
| 26 I   | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,38E-03        | 3,83E-03        | 5,34E-03        |
| 26 II  | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,13E-03        | 3,41E-03        | 4,75E-03        |
| 26 III | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,65E-03        | 4,21E-03        | 5,88E-03        |
| 26 IV  | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,02E-03        | 3,30E-03        | 4,57E-03        |
| 27 I   | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,74E-03        | 4,45E-03        | 6,20E-03        |
| 27 II  | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,29E-03        | 3,75E-03        | 5,19E-03        |
| 27 III | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 3,02E-03        | 4,77E-03        | 6,68E-03        |
| 27 IV  | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,62E-03        | 4,18E-03        | 5,84E-03        |
| 28 I   | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,77E-03        | 4,53E-03        | 6,29E-03        |
| 28 II  | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,43E-03        | 4,01E-03        | 5,57E-03        |
| 28 III | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,62E-03        | 4,04E-03        | 5,70E-03        |
| 28 IV  | Sv-10ChGNMAA           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 2,73E-03        | 4,35E-03        | 6,06E-03        |
| 29 I   | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 5,28E-05        | 2,20E-04        | 2,79E-04        |
| 29 II  | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,28E-05        | 1,43E-04        | 1,56E-04        |
| 29 III | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 4,75E-05        | 2,77E-04        | 3,25E-04        |
| 29 IV  | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 9,63E-06        | 5,63E-05        | 6,39E-05        |
| 30 I   | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,75E-05        | 1,71E-04        | 1,85E-04        |
| 30 II  | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,18E-05        | 1,47E-04        | 1,61E-04        |
| 30 III | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,66E-05        | 1,66E-04        | 1,72E-04        |
| 30 IV  | 15Ch2NMFA              | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 3,46E-05        | 2,64E-04        | 2,74E-04        |
| 31 I   | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 1,12E-02        | 1,91E-02        | 2,62E-02        |
| 31 II  | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | <b>1,42E-02</b> | <b>2,35E-02</b> | <b>3,28E-02</b> |
| 31 III | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 7,46E-03        | 1,34E-02        | 1,81E-02        |
| 31 IV  | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 4,25E-03        | 1,07E-02        | 1,37E-02        |
| 32 I   | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 6,28E-03        | 9,67E-03        | 1,36E-02        |
| 32 II  | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 6,31E-03        | 1,01E-02        | 1,41E-02        |
| 32 III | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 5,63E-03        | 8,74E-03        | 1,22E-02        |
| 32 IV  | PT 30                  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,6         | 3,43E-03        | 5,62E-03        | 7,74E-03        |

## Příloha G

### Hodnoty kumulace únavového poškození v oblasti nátrubku KIP



**Obr. G.1:** Body ve kterých byla vyhodnocena hodnota kumulace únavového poškození v oblasti nátrubku KIP.

**Tab. G.1:** Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti nátrubku KIP.

| bod | materiál   | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let   | 40 let   | 60 let   |
|-----|------------|-----------------|-------|------------|-------------|----------|----------|----------|
| 1   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,37E-03 | 2,07E-03 | 2,98E-03 |
| 2   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 4,10E-03 | 7,31E-03 | 1,04E-02 |
| 3   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 6,54E-03 | 1,12E-02 | 1,59E-02 |
| 4   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 2,03E-04 | 4,29E-04 | 6,53E-04 |
| 5   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,01E-04 | 2,07E-04 | 2,86E-04 |
| 6   | EA-400/10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 3,56E-04 | 5,27E-04 | 7,66E-04 |
| 7   | EA-400/10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 2,07E-04 | 3,20E-04 | 4,53E-04 |
| 8   | EA-400/10T | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 2,57E-04 | 4,18E-04 | 6,04E-04 |
| 9   | EA-400/10T | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,87E-04 | 3,04E-04 | 4,39E-04 |
| 10  | 15Ch2NMFA  | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 6,62E-04 | 1,08E-03 | 1,55E-03 |

pokračování na další straně



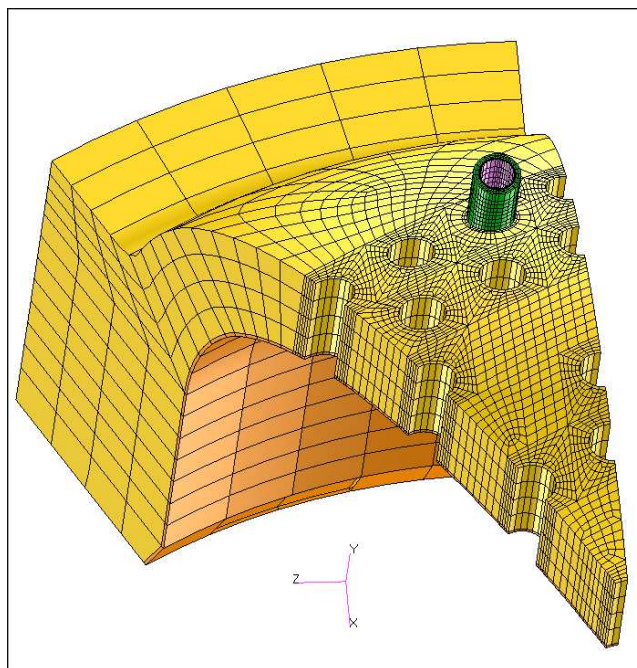
Tab. G.1 – pokračování z předchozí strany

| bod | materiál        | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let      | 40 let      | 60 let      |
|-----|-----------------|-----------------|-------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 11  | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 5,84E-04    | 9,47E-04    | 1,37E-03    |
| 12  | Sv-10ChGNMAA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 4,34E-03    | 6,44E-03    | 9,21E-03    |
| 13  | Sv-10ChGNMAA    | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 1           | 1,28E-03    | 1,94E-03    | 2,76E-03    |
| 14  | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 3,32E-03    | 5,68E-03    | 8,11E-03    |
| 15  | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,22E-04    | 7,17E-04    | 7,69E-04    |
| 16  | EA 898/21B      | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 1,15E-03    | 1,89E-03    | 2,73E-03    |
| 17  | EA 898/21B      | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 4,10E-04    | 7,72E-04    | 1,07E-03    |
| 18  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 4,19E-03    | 5,89E-03    | 8,51E-03    |
| 19  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 5,14E-03    | 8,20E-03    | 1,15E-02    |
| 20  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 8,45E-03    | 1,35E-02    | 1,87E-02    |
| 21  | EA 898/21B      | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,24E-02    | 2,37E-02    | 3,22E-02    |
| 22  | Sv-04Ch19N11M3  | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 1           | 2,70E-02    | 6,49E-02    | 7,91E-02    |
| 23  | Sv-04Ch19N11M3  | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 1           | 2,28E-02    | 3,93E-02    | 5,30E-02    |
| 24  | Sv-04Ch19N11M3  | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 1           | 9,33E-03    | 2,30E-02    | 2,75E-02    |
| 25  | Sv-04Ch19N11M3  | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 1           | 3,20E-02    | 7,78E-02    | 9,49E-02    |
| 26  | Sv-04Ch19N11M3  | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 1           | 2,66E-02    | 4,69E-02    | 6,26E-02    |
| 27  | Sv-04Ch19N11M3  | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 1           | 2,02E-02    | 4,15E-02    | 5,17E-02    |
| 28  | Sv-04Ch19N11M3  | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 1           | 1,56E-02    | 3,40E-02    | 4,22E-02    |
| 29  | Sv-04Ch19N11M3  | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 1           | 6,89E-01    | 1,45E-01    | 1,85E-01    |
| 30  | Sv-04Ch19N11M3  | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 1           | <b>1,09</b> | <b>2,41</b> | <b>3,10</b> |
| 31  | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 3,51E-05    | 1,76E-04    | 2,22E-04    |
| 32  | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 3,25E-04    | 9,21E-04    | 1,20E-03    |
| 33  | Sv-04Ch20N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 4,68E-03    | 8,25E-03    | 1,15E-02    |
| 34  | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 7,20E-05    | 3,45E-04    | 4,80E-04    |
| 35  | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,62E-03    | 3,37E-03    | 4,29E-03    |

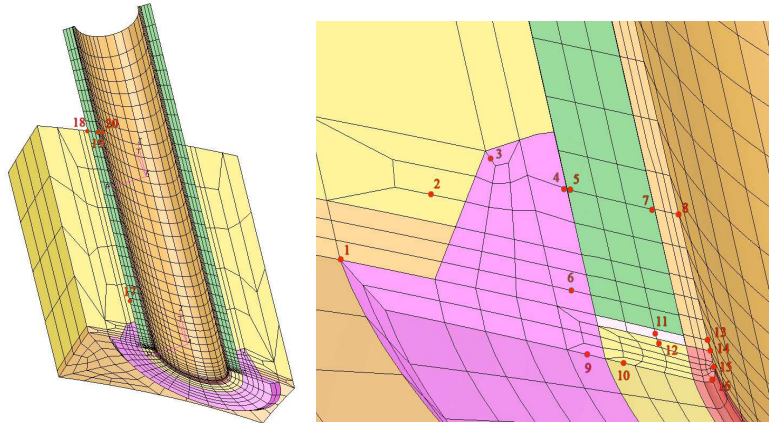
V tabulce G.1 jsou uvedeny hodnoty kumulace únavového poškození v hodnocených bodech (viz obrázek G.1), nacházejících se v oblasti nátrubku KIP.

## Příloha H

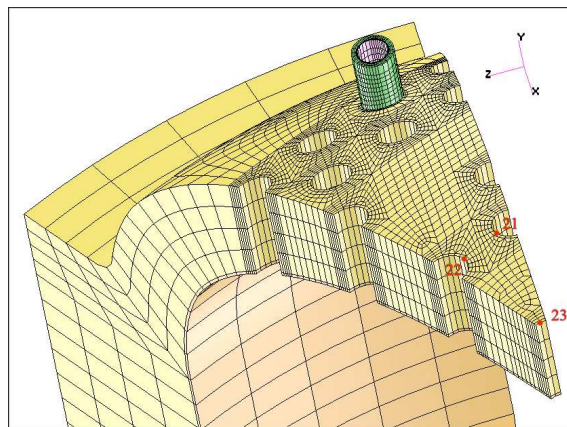
### Víko reaktoru a oblast přivaření nátrubků SUZ, TK a EV



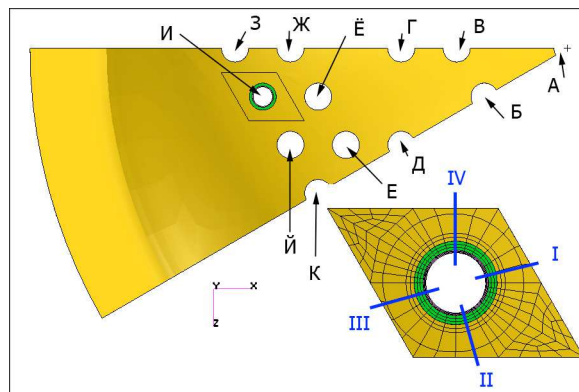
Obr. H.1: Výpočtový MKP model víka TNR s nátrubkem TK (EV, SUZ).



**Obr. H.2:** Hodnocené body v oblasti přivaření nátrubků TK (EV, SUZ).



**Obr. H.3:** Hodnocené body v oblasti víka TNR.



**Obr. H.4:** Směry ve kterých leží hodnocené body v oblasti přivaření nátrubku k víku TNR.

**Tab. H.1:** Kumulace únavového poškození  $D$  ve víku reaktoru, v oblasti přivaření nátrubků HB.

| bod  | materiál        | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|------|-----------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 I  | Sv-08Ch19N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,21E-02        | 2,17E-02        | 2,98E-02        |
| 2 I  | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 8,89E-05        | 6,19E-04        | 6,61E-04        |
| 3 I  | ZIO-8           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,82E-03        | 3,86E-03        | 5,06E-03        |
| 4 I  | Sv-10Ch16N25AM6 | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 7,99E-03        | 1,41E-02        | 1,95E-02        |
| 5 I  | 20              | 20              | 10    | 2          | –           | 4,02E-03        | 5,72E-03        | 8,24E-03        |
| 6 I  | ZIO-8           | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 2,72E-02        | 5,64E-02        | 7,12E-02        |
| 7 I  | 20              | 20              | 10    | 2          | –           | 2,79E-02        | 8,04E-02        | 9,35E-02        |
| 8 I  | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 2,67E-04        | 4,27E-04        | 5,98E-04        |
| 9 I  | ZIO-8           | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 3,89E-02        | 8,31E-02        | 1,04E-01        |
| 10 I | EA-400/10T      | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,11E-01        | 2,20E-01        | 2,85E-01        |
| 11 I | EA-395/9        | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 2,09E-01        | 4,02E-01        | 5,26E-01        |
| 12 I | EA-400/10T      | 20              | 10    | 2          | 0,8         | <b>2,63E-01</b> | <b>5,00E-01</b> | <b>6,59E-01</b> |
| 13 I | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 1,06E-01        | 2,15E-01        | 2,80E-01        |
| 14 I | EA-400/10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,21E-01        | 2,44E-01        | 3,17E-01        |
| 15 I | EA-400/10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 8,63E-02        | 1,70E-01        | 2,22E-01        |
| 16 I | EA-400/10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 1,03E-01        | 2,05E-01        | 2,67E-01        |
| 17 I | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,58E-04        | 7,03E-04        | 7,80E-04        |
| 18 I | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,32E-05        | 1,11E-04        | 1,18E-04        |
| 19 I | 20              | 20              | 10    | 2          | –           | 1,10E-03        | 1,88E-03        | 2,68E-03        |
| 20 I | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 4,13E-06        | 6,88E-06        | 9,96E-06        |
| 21   | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 3,02E-03        | 5,99E-03        | 8,10E-03        |
| 22   | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 3,68E-03        | 6,46E-03        | 8,96E-03        |
| 23   | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 8,96E-04        | 1,83E-03        | 2,49E-03        |

V tabulkách výše, byly uvedeny hodnoty kumulace únavového poškození v nátrubcích pro směr I, viz obrázek H.4. Hodnoty kumulace únavového poškození ve zbylých směrech II, III a IV jsou uvedeny v následující příloze I.

Zde byly uvedeny výsledky hodnocení pouze spodní části nátrubků. Přesněji oblasti jejich přivaření k víku reaktoru. Hodnocení přírubových spojů nátrubků na víku reaktoru je zmíněno v příloze J.

# Příloha I

## Víko reaktoru a oblast přivaření nátrubků, směry II, III a IV

**Tab. I.1:** Kumulace únavového poškození  $D$  ve víku reaktoru, především v oblasti přivaření nátrubků (směr II, III a IV).

| bod   | materiál        | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let   | 40 let   | 60 let   |
|-------|-----------------|-----------------|-------|------------|-------------|----------|----------|----------|
| 1 II  | Sv-08Ch19N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,05E-02 | 1,85E-02 | 2,56E-02 |
| 2 II  | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 3,98E-04 | 1,07E-03 | 1,31E-03 |
| 3 II  | ZIO-8           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,79E-03 | 3,10E-03 | 4,17E-03 |
| 4 II  | Sv-10Ch16N25AM6 | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 9,69E-03 | 1,48E-02 | 2,11E-02 |
| 5 II  | 20              | 20              | 10    | 2          | –           | 2,87E-03 | 6,09E-03 | 7,64E-03 |
| 6 II  | ZIO-8           | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,21E-02 | 2,53E-02 | 3,21E-02 |
| 7 II  | 20              | 20              | 10    | 2          | –           | 1,01E-02 | 2,25E-02 | 2,79E-02 |
| 8 II  | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 4,33E-04 | 8,09E-04 | 1,12E-03 |
| 9 II  | ZIO-8           | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 2,57E-02 | 6,00E-02 | 7,47E-02 |
| 10 II | EA-400/10T      | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 6,07E-02 | 1,31E-01 | 1,67E-01 |
| 11 II | EA-395/9        | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,10E-01 | 2,17E-01 | 2,83E-01 |
| 12 II | EA-400/10T      | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,08E-01 | 2,17E-01 | 2,81E-01 |
| 13 II | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 9,96E-03 | 2,26E-02 | 2,73E-02 |
| 14 II | EA-400/10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 3,71E-02 | 8,02E-02 | 1,00E-01 |
| 15 II | EA-400/10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,13E-02 | 4,52E-02 | 5,71E-02 |
| 16 II | EA-400/10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,50E-02 | 5,06E-02 | 6,56E-02 |
| 17 II | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,04E-03 | 3,31E-03 | 4,77E-03 |
| 18 II | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,43E-03 | 2,85E-03 | 3,82E-03 |
| 19 II | 20              | 20              | 10    | 2          | –           | 1,02E-03 | 1,76E-03 | 2,51E-03 |
| 20 II | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 3,22E-06 | 5,80E-06 | 8,67E-06 |
| 1 III | Sv-08Ch19N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,33E-02 | 2,37E-02 | 3,25E-02 |
| 2 III | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 4,95E-05 | 4,09E-04 | 4,33E-04 |

pokračování na další straně

Tab. I.1 – pokračování z předchozí strany

| bod    | materiál        | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|--------|-----------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 3 III  | ZIO-8           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,37E-03        | 2,33E-03        | 3,23E-03        |
| 4 III  | Sv-10Ch16N25AM6 | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 7,60E-03        | 1,25E-02        | 1,77E-02        |
| 5 III  | 20              | 20              | 10    | 2          | –           | 1,08E-03        | 3,47E-03        | 3,98E-03        |
| 6 III  | ZIO-8           | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,64E-02        | 3,67E-02        | 4,62E-02        |
| 7 III  | 20              | 20              | 10    | 2          | –           | 6,62E-03        | 2,20E-02        | 2,47E-02        |
| 8 III  | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 1,42E-04        | 2,98E-04        | 3,95E-04        |
| 9 III  | ZIO-8           | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,99E-02        | 4,90E-02        | 6,04E-02        |
| 10 III | EA-400/10T      | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 4,68E-02        | 1,01E-01        | 1,29E-01        |
| 11 III | EA-395/9        | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,28E-01        | 2,42E-01        | 3,23E-01        |
| 12 III | EA-400/10T      | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,21E-01        | 2,31E-01        | 3,07E-01        |
| 13 III | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 1,95E-02        | 3,89E-02        | 5,08E-02        |
| 14 III | EA-400/10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 9,83E-02        | 2,01E-01        | 2,63E-01        |
| 15 III | EA-400/10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,19E-01        | 4,47E-01        | 5,88E-01        |
| 16 III | EA-400/10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 7,43E-02        | 1,51E-01        | 1,98E-01        |
| 17 III | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 8,04E-05        | 3,82E-04        | 4,32E-04        |
| 18 III | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,43E-06        | 4,03E-05        | 4,16E-05        |
| 19 III | 20              | 20              | 10    | 2          | –           | 1,12E-03        | 1,90E-03        | 2,71E-03        |
| 20 III | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 3,86E-06        | 1,01E-05        | 1,39E-05        |
| 1 IV   | Sv-08Ch19N10G2B | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,05E-02        | 1,90E-02        | 2,62E-02        |
| 2 IV   | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 6,99E-04        | 1,71E-03        | 2,14E-03        |
| 3 IV   | ZIO-8           | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 1,90E-03        | 3,46E-03        | 4,62E-03        |
| 4 IV   | Sv-10Ch16N25AM6 | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 9,45E-03        | 1,45E-02        | 2,06E-02        |
| 5 IV   | 20              | 20              | 10    | 2          | –           | 2,81E-03        | 6,25E-03        | 7,76E-03        |
| 6 IV   | ZIO-8           | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,69E-02        | 3,63E-02        | 4,60E-02        |
| 7 IV   | 20              | 20              | 10    | 2          | –           | 1,05E-02        | 2,40E-02        | 2,96E-02        |
| 8 IV   | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 5,51E-04        | 9,94E-04        | 1,35E-03        |
| 9 IV   | ZIO-8           | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 2,94E-02        | 6,92E-02        | 8,60E-02        |
| 10 IV  | EA-400/10T      | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 8,68E-02        | 1,81E-01        | 2,34E-01        |
| 11 IV  | EA-395/9        | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,24E-01        | 2,47E-01        | 3,23E-01        |
| 12 IV  | EA-400/10T      | 20              | 10    | 2          | 0,8         | <b>1,30E-01</b> | <b>2,62E-01</b> | <b>3,41E-01</b> |
| 13 IV  | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 1,01E-02        | 2,32E-02        | 2,78E-02        |
| 14 IV  | EA-400/10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 3,87E-02        | 8,46E-02        | 1,05E-01        |
| 15 IV  | EA-400/10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,34E-02        | 5,03E-02        | 6,33E-02        |
| 16 IV  | EA-400/10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | 0,8         | 2,58E-02        | 5,28E-02        | 6,81E-02        |
| 17 IV  | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 2,29E-03        | 3,72E-03        | 5,30E-03        |
| 18 IV  | 15Ch2NMFA       | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | –           | 1,71E-03        | 3,54E-03        | 4,70E-03        |
| 19 IV  | 20              | 20              | 10    | 2          | –           | 1,01E-03        | 1,76E-03        | 2,51E-03        |
| 20 IV  | 08CH18N10T      | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 3,19E-06        | 5,78E-06        | 8,69E-06        |

**Tab. I.2:** Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti přivaření nátrubku vzdušníku k víku reaktoru (směr II, III a IV).

| bod    | materiál   | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|--------|------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 24 II  | EA-400/10T | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 8,06E-02        | 1,37E-01        | 1,91E-01        |
| 24 III | EA-400/10T | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 7,23E-02        | 1,22E-01        | 1,69E-01        |
| 24 IV  | EA-400/10T | 15Ch2NMFA       | 10    | 2          | 0,8         | 8,10E-02        | 1,38E-01        | 1,92E-01        |
| 25 II  | EA-400/10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 2,09E-02        | 4,40E-02        | 5,80E-02        |
| 25 III | EA-400/10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 2,19E-01        | 3,89E-01        | 5,36E-01        |
| 25 IV  | EA-400/10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 3,74E-02        | 7,31E-02        | 9,84E-02        |
| 26 II  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 7,76E-02        | 1,44E-01        | 1,97E-01        |
| 26 III | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | <b>1,42E-01</b> | <b>2,52E-01</b> | <b>3,51E-01</b> |
| 26 IV  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 8,03E-02        | 1,49E-01        | 2,03E-01        |

# Příloha J

## Příruby nátrubků horního bloku

### J.1 Přírubové spoje nátrubků SUZ, TK a EV

Na víku reaktoru se nachází několik typů nátrubků. Jedná se o následující typy:

**nátrubek SUZ** prochází jím člen pro pohyb regulačního svazku, pomocí něhož se řídí výkon reaktoru,

**nátrubek TK** slouží k vývodu vnitro-reaktorového měření teploty,

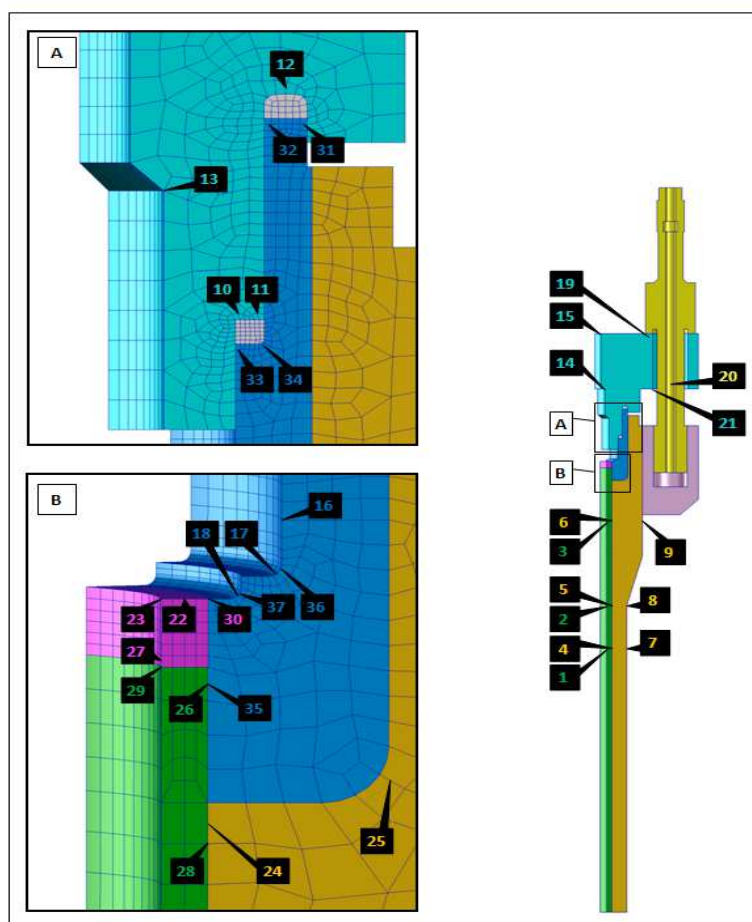
**nátrubek EV** slouží k vývodu vnitro-reaktorového měření neutronového toku v AZ.

**nátrubek odvzdušnění** slouží k odvodu vzduchu a vodíku z reaktoru, skrze připojené potrubí.

Jak jsme si ukázali výše, nátrubky TK, EV a SUZ se od sebe vzájemně neliší, jak v typu provedení jejich přivaření k víku reaktoru, tak z hlediska příruby v jejich horní části. Ovšem rozdílné jsou příruby navazujících částí. Z tohoto důvodu, byly nátrubky horního bloku řešeny separátně [42, 43, 44] a jsou obsahem následujících podkapitol.



### J.1.0.1 Příruba nátrubku TK



Obr. J.1: Body pro vyhodnocení kumulace únavového poškození v oblasti přírubového spoje nátrubku TK

Tab. J.1: Kumulace únavového poškození  $D$  v austenitické košilce TK.

| bod | materiál   | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 6,04E-06        | 8,54E-06        | 1,27E-05        |
| 2   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 6,42E-06        | 9,06E-06        | 1,35E-05        |
| 3   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 2,47E-06        | 3,48E-06        | 5,17E-06        |
| 26  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | <b>9,70E-03</b> | <b>1,36E-02</b> | <b>2,02E-02</b> |
| 28  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 4,31E-10        | 6,72E-10        | 9,67E-10        |
| 29  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 2,87E-03        | 4,04E-03        | 5,99E-03        |

**Tab. J.2:** Kumulace únavového poškození  $D$  v návaru a svaru košilky TK.

| bod | materiál | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|----------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 16  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 6,42E-03        | 8,99E-03        | 1,34E-02        |
| 17  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 4,50E-02        | 6,35E-02        | 9,57E-02        |
| 18  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 4,93E-03        | 6,90E-03        | 1,02E-02        |
| 22  | ZIO-8    | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 2,71E-03        | 3,79E-03        | 5,62E-03        |
| 23  | ZIO-8    | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 2,84E-03        | 3,98E-03        | 5,90E-03        |
| 27  | ZIO-8    | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 1,35E-02        | 1,89E-02        | 2,81E-02        |
| 30  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 4,87E-03        | 6,81E-03        | 1,01E-02        |
| 31  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,03E-03        | 1,41E-03        | 2,12E-03        |
| 32  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,59E-03        | 2,25E-03        | 3,46E-03        |
| 33  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 3,09E-03        | 4,34E-03        | 6,53E-03        |
| 34  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 2,08E-03        | 2,92E-03        | 4,33E-03        |
| 35  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 3,46E-02        | 4,85E-02        | 7,19E-02        |
| 36  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | <b>1,43E-01</b> | <b>2,01E-01</b> | <b>3,04E-01</b> |
| 37  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 5,73E-03        | 8,01E-03        | 1,19E-02        |

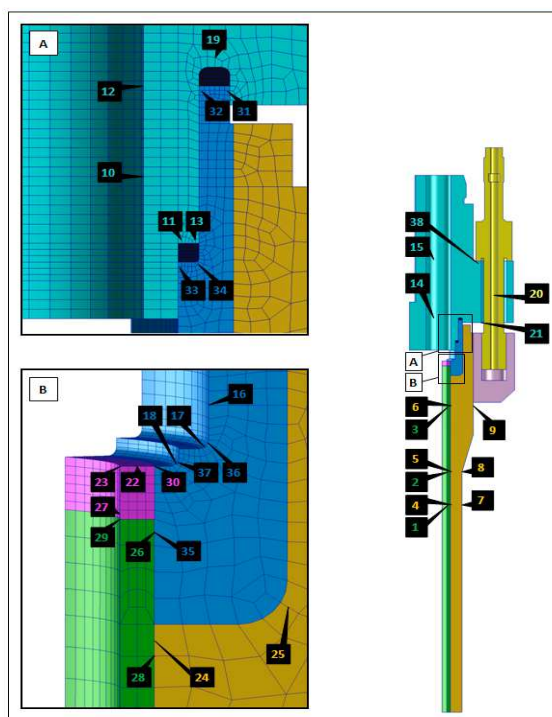
**Tab. J.3:** Kumulace únavového poškození  $D$  v základním materiálu nátrubku a příruby TK.

| bod | materiál | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|----------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 4   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 2,11E-08        | 3,08E-08        | 4,75E-08        |
| 5   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 1,76E-08        | 2,57E-08        | 3,94E-08        |
| 6   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 4,58E-09        | 6,64E-09        | 1,02E-08        |
| 7   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 1,03E-09        | 1,53E-09        | 2,25E-09        |
| 8   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 3,19E-08        | 4,49E-08        | 6,65E-08        |
| 9   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 3,27E-09        | 4,77E-09        | 7,33E-09        |
| 24  | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 3,28E-04        | 4,63E-04        | 6,94E-04        |
| 25  | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | <b>2,79E-03</b> | <b>3,91E-03</b> | <b>5,81E-03</b> |

**Tab. J.4:** Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti příruby kanálu TK.

| bod | materiál   | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | <b>4,62E-04</b> | <b>6,55E-04</b> | <b>1,01E-03</b> |
| 11  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,90E-04        | 2,72E-04        | 4,24E-04        |
| 12  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 3,04E-04        | 4,15E-04        | 6,19E-04        |
| 13  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 4,48E-10        | 7,16E-10        | 1,04E-09        |
| 14  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,67E-05        | 2,50E-05        | 3,95E-05        |
| 15  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 8,39E-05        | 1,20E-04        | 1,87E-04        |
| 19  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 2,42E-04        | 3,40E-04        | 5,22E-04        |
| 21  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 4,48E-09        | 6,48E-09        | 1,00E-08        |

### J.1.0.2 Příruba nátrubku EV



**Obr. J.2:** Body pro vyhodnocení kumulace únavového poškození v oblasti přířubového spoje nátrubku EV

**Tab. J.5:** Kumulace únavového poškození  $D$  v austenitické košilce EV.

| bod | materiál   | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 6,05E-06        | 8,55E-06        | 1,27E-05        |
| 2   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 6,41E-06        | 9,04E-06        | 1,35E-05        |
| 3   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 2,64E-06        | 3,72E-06        | 5,54E-06        |
| 26  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | <b>9,70E-03</b> | <b>1,36E-02</b> | <b>2,02E-02</b> |
| 28  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 4,31E-10        | 6,72E-10        | 9,67E-10        |
| 29  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 2,90E-03        | 4,08E-03        | 6,05E-03        |

**Tab. J.6:** Kumulace únavového poškození  $D$  v návaru a svaru košilky EV.

| bod | materiál | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let   | 40 let   | 60 let   |
|-----|----------|-----------------|-------|------------|-------------|----------|----------|----------|
| 16  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 6,51E-03 | 9,12E-03 | 1,36E-02 |

pokračování na další straně

Tab. J.6 – pokračování z předchozí strany

| bod | materiál | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|----------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 17  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 4,59E-02        | 6,47E-02        | 9,75E-02        |
| 18  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 4,99E-03        | 6,98E-03        | 1,04E-02        |
| 22  | ZIO-8    | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 2,74E-03        | 3,83E-03        | 5,68E-03        |
| 23  | ZIO-8    | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 2,87E-03        | 4,02E-03        | 5,96E-03        |
| 27  | ZIO-8    | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 1,36E-02        | 1,91E-02        | 2,83E-02        |
| 30  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 4,92E-03        | 6,89E-03        | 1,02E-02        |
| 31  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 9,39E-04        | 1,30E-03        | 1,96E-03        |
| 32  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,35E-03        | 1,91E-03        | 2,94E-03        |
| 33  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 3,52E-03        | 4,94E-03        | 7,44E-03        |
| 34  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 2,26E-03        | 3,15E-03        | 4,68E-03        |
| 35  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 3,47E-02        | 4,87E-02        | 7,22E-02        |
| 36  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | <b>1,45E-01</b> | <b>2,05E-01</b> | <b>3,10E-01</b> |
| 37  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 5,80E-03        | 8,11E-03        | 1,20E-02        |

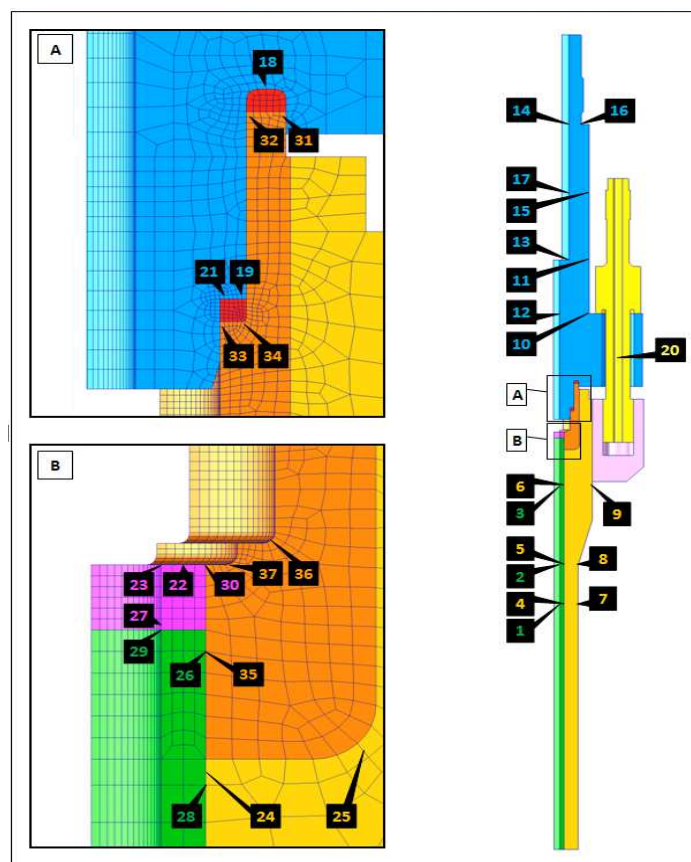
Tab. J.7: Kumulace únavového poškození  $D$  v základním materiálu nátrubku a příruby EV.

| bod | materiál | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|----------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 4   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 2,12E-08        | 3,09E-08        | 4,77E-08        |
| 5   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 1,76E-08        | 2,57E-08        | 3,94E-08        |
| 6   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 4,77E-09        | 6,92E-09        | 1,06E-08        |
| 7   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 1,03E-09        | 1,54E-09        | 2,25E-09        |
| 8   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 3,18E-08        | 4,48E-08        | 6,64E-08        |
| 9   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 3,67E-09        | 5,33E-09        | 8,20E-09        |
| 24  | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 3,32E-04        | 4,69E-04        | 7,02E-04        |
| 25  | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | <b>2,79E-03</b> | <b>3,92E-03</b> | <b>5,82E-03</b> |

Tab. J.8: Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti příruby kanálu EV.

| bod | materiál   | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,12E-07        | 1,59E-07        | 2,46E-07        |
| 11  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | <b>5,89E-04</b> | <b>8,13E-04</b> | <b>1,23E-03</b> |
| 12  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 5,35E-08        | 7,68E-08        | 1,20E-07        |
| 13  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,73E-04        | 2,48E-04        | 3,87E-04        |
| 14  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,43E-06        | 2,05E-06        | 3,18E-06        |
| 15  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 6,30E-09        | 9,02E-09        | 1,39E-08        |
| 19  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 3,03E-04        | 4,17E-04        | 6,28E-04        |
| 21  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 3,47E-10        | 5,75E-10        | 8,22E-10        |
| 38  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,27E-04        | 1,81E-04        | 2,81E-04        |

### J.1.0.3 Příruba nátrubku SUZ



**Obr. J.3:** Body pro vyhodnocení kumulace únavového poškození v oblasti přírubového spoje nátrubku SUZ

**Tab. J.9:** Kumulace únavového poškození  $D$  v austenitické košilce SUZ.

| bod | materiál   | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 6,04E-06        | 8,53E-06        | 1,27E-05        |
| 2   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 6,40E-06        | 9,03E-06        | 1,34E-05        |
| 3   | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 2,46E-06        | 3,47E-06        | 5,16E-06        |
| 26  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | <b>1,78E-02</b> | <b>2,50E-02</b> | <b>3,71E-02</b> |
| 28  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 4,88E-10        | 7,51E-10        | 1,08E-09        |
| 29  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 3     | 1,5        | –           | 2,80E-03        | 3,94E-03        | 5,84E-03        |

**Tab. J.10:** Kumulace únavového poškození  $D$  v návaru a svaru košilky SUZ.

| bod | materiál | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|----------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 22  | ZIO-8    | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 2,70E-03        | 3,78E-03        | 5,61E-03        |
| 23  | ZIO-8    | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 2,82E-03        | 3,95E-03        | 5,86E-03        |
| 27  | ZIO-8    | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 0,8         | 1,33E-02        | 1,87E-02        | 2,77E-02        |
| 30  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 4,86E-03        | 6,80E-03        | 1,01E-02        |
| 31  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,09E-03        | 1,49E-03        | 2,23E-03        |
| 32  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 1,63E-03        | 2,31E-03        | 3,54E-03        |
| 33  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 3,07E-03        | 4,30E-03        | 6,48E-03        |
| 34  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 2,05E-03        | 2,88E-03        | 4,27E-03        |
| 35  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 5,10E-02        | 7,15E-02        | 1,06E-01        |
| 36  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | <b>1,26E-01</b> | <b>1,78E-01</b> | <b>2,69E-01</b> |
| 37  | ZIO-8    | 20              | 10    | 2          | 0,8         | 5,49E-03        | 7,68E-03        | 1,14E-02        |

**Tab. J.11:** Kumulace únavového poškození  $D$  v základním materiálu nátrubku a příruby SUZ.

| bod | materiál | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|----------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 4   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 2,17E-08        | 3,16E-08        | 4,87E-08        |
| 5   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 1,76E-08        | 2,56E-08        | 3,93E-08        |
| 6   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 4,41E-09        | 6,40E-09        | 9,81E-09        |
| 7   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 9,81E-10        | 1,47E-09        | 2,15E-09        |
| 8   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 4,40E-08        | 6,20E-08        | 9,19E-08        |
| 9   | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 4,53E-10        | 7,27E-10        | 1,06E-09        |
| 24  | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | 4,20E-04        | 5,92E-04        | 8,87E-04        |
| 25  | 20       | 20              | 10    | 2          | –           | <b>3,57E-03</b> | <b>5,01E-03</b> | <b>7,45E-03</b> |

**Tab. J.12:** Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti příruby kanálu SUZ.

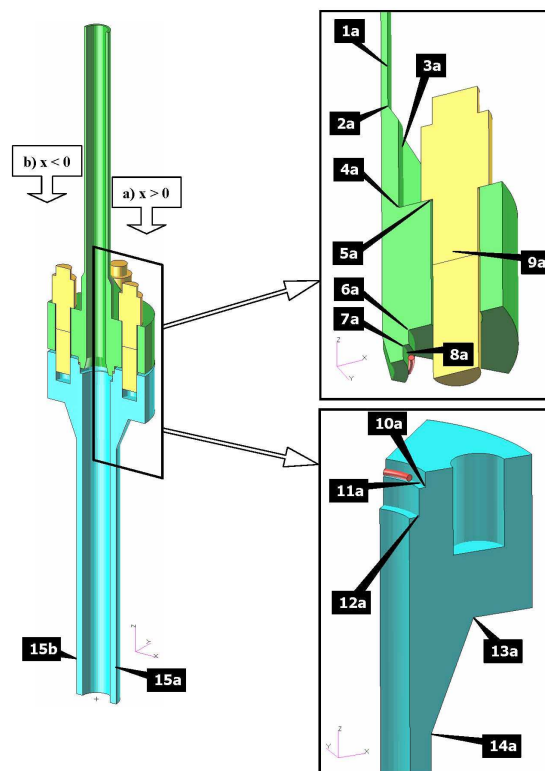
| bod | materiál   | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 2,30E-08        | 3,28E-08        | 5,08E-08        |
| 11  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 3,59E-10        | 5,75E-10        | 8,22E-10        |
| 12  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,16E-08        | 1,66E-08        | 2,56E-08        |
| 13  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 2,89E-09        | 4,36E-09        | 6,78E-09        |
| 14  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 8,34E-06        | 1,25E-05        | 1,97E-05        |
| 15  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,59E-07        | 2,36E-07        | 3,70E-07        |
| 16  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 2,17E-08        | 3,23E-08        | 5,07E-08        |
| 17  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 3,81E-10        | 6,06E-10        | 8,71E-10        |
| 18  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | <b>2,80E-04</b> | <b>3,81E-04</b> | <b>5,69E-04</b> |
| 19  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,91E-04        | 2,73E-04        | 4,25E-04        |
| 21  | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 7,19E-06        | 1,03E-05        | 1,60E-05        |

### J.1.1 Příruba nátrubku odvzdušnění

Hodnocení příruby nátrubku odvzdušnění je předmětem zprávy [45]. Na tvorbě této zprávy se autor této práce podílel na úrovni výpočtů únavy a MKP analýz.

Geometrie nátrubku je zjednodušeně vyobrazena v příloze A na obrázku A.19.

Jelikož je k nátrubku odvzdušnění připojeno navazující potrubí, byly hodnocené body definovány ve dvou oblastech *a*) a *b*), viz obrázek J.4. Tyto oblasti leží v rovině kde působí maximální klopný moment od připojeného potrubí odvzdušnění.



**Obr. J.4:** Hodnocené body v oblasti přírubového spojení nátrubku odvzdušnění s navazujícím potrubím.

Výsledné hodnoty kumulace únavového poškození v přírubě připojeného potrubí jsou uvedeny v tabulce J.13 a hodnoty kumulace únavového poškození v přírubě nátrubku odvzdušnění jsou uvedeny v tabulce J.14.

**Tab. J.13:** Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti příruby potrubí od-vzdušnění.

| bod | materiál   | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|-----|------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 a | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 5,94E-08        | 8,81E-08        | 1,38E-07        |
| 1 b | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 5,93E-08        | 8,79E-08        | 1,38E-07        |
| 2 a | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 2,01E-08        | 2,99E-08        | 4,69E-08        |
| 2 b | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,04E-07        | 1,48E-07        | 2,20E-07        |
| 3 a | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 4,32E-10        | 6,84E-10        | 9,79E-10        |
| 3 b | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 3,47E-10        | 5,75E-10        | 8,22E-10        |
| 4 a | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 4,01E-10        | 6,35E-10        | 9,17E-10        |
| 4 b | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 4,31E-10        | 6,69E-10        | 9,62E-10        |
| 5 a | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,70E-05        | 2,45E-05        | 3,80E-05        |
| 5 b | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 9,04E-05        | 1,24E-04        | 1,86E-04        |
| 6 a | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 2,69E-04        | 3,67E-04        | 5,48E-04        |
| 6 b | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 5,50E-06        | 7,50E-06        | 1,12E-05        |
| 7 a | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 8,09E-05        | 1,10E-04        | 1,65E-04        |
| 7 b | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,08E-04        | 1,47E-04        | 2,19E-04        |
| 8 a | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,64E-03        | 2,24E-03        | 3,33E-03        |
| 8 b | 08CH18N10T | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | <b>2,07E-03</b> | <b>2,81E-03</b> | <b>4,19E-03</b> |

**Tab. J.14:** Kumulace únavového poškození  $D$  v oblasti příruby nátrubku od-vzdušnění.

| bod  | materiál       | materiál křivky | $n_N$ | $n_\sigma$ | $\varphi_S$ | 28 let          | 40 let          | 60 let          |
|------|----------------|-----------------|-------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10 a | 08CH18N10T     | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 7,84E-04        | 1,07E-03        | 1,60E-03        |
| 10 b | 08CH18N10T     | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 2,72E-04        | 3,70E-04        | 5,48E-04        |
| 11 a | 08CH18N10T     | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | <b>3,07E-03</b> | <b>4,17E-03</b> | <b>6,21E-03</b> |
| 11 b | 08CH18N10T     | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,83E-03        | 2,48E-03        | 3,70E-03        |
| 12 a | 08CH18N10T     | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,29E-08        | 1,87E-08        | 2,90E-08        |
| 12 b | 08CH18N10T     | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 1,56E-07        | 2,13E-07        | 3,18E-07        |
| 13 a | 08CH18N10T     | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 4,74E-10        | 7,32E-10        | 1,06E-09        |
| 13 b | 08CH18N10T     | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 4,01E-10        | 6,35E-10        | 9,17E-10        |
| 14 a | Sv-04Ch19N11M3 | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 1           | 3,78E-10        | 5,96E-10        | 8,52E-10        |
| 14 b | Sv-04Ch19N11M4 | 08CH18N10T      | 10    | 2          | 1           | 4,88E-10        | 7,50E-10        | 1,08E-09        |
| 15 a | 08CH18N10T     | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 3,78E-10        | 5,96E-10        | 8,52E-10        |
| 15 b | 08CH18N10T     | 08CH18N10T      | 10    | 2          | –           | 3,78E-10        | 5,96E-10        | 8,52E-10        |