

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta strojní  
Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky



Diplomová práce

**Výpočet únavového poškození drážek hlavní dělicí roviny  
tlakové nádoby reaktoru**

*Bc. Tadeáš Jakub*

Vedoucí práce: doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.

Studijní program: Strojní inženýrství, Magisterský

15. augusta 2019

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jakub** Jméno: **Tadeáš** Osobní číslo: **473506**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Aplikovaná mechanika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Výpočet únavového poškození drážek hlavní dělicí roviny tlakové nádoby reaktoru.**

Název diplomové práce anglicky:

**Fatigue damage calculation in the grooves of reactor pressure vessel - reactor closure head interface.**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s modelováním elasticko-plastické odezvy materiálů (s důrazem na modely s kinematickým zpevněním) a s hodnocením únavového poškození se zaměřením na přístupy v NTD ASI.
- 2) Vytvořte rotačně symetrický MKP model hlavního přírubového spoje tlakové nádoby reaktoru VVER 440 s detailním modelováním těsnění a drážek pro jeho uložení. Odladte opakovaný elasticko-plastický výpočet cyklu utažení – roztěsnění (případně s vloženým cyklem ohřátí vychladnutí) se simulací výměny těsnění v každém cyklu.
- 3) Proveďte výpočet většího počtu cyklů s výměnou těsnění a pro kritická místa přírubového spoje stanovte únavové poškození.
- 4) Proveďte diskusi výsledků a formulujte závěry

Seznam doporučené literatury:

- 1) Manuály MKP programu Simulia/Abaqus
- 2) NTD ASI-III-2017, Normativně technická dokumentace A.S.I., Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, sekce III, Praha, 2017
- 3) Švrček M.: Spolehlivost reaktoru VVER 1000 s ohledem na poškození vlivem nízkocyklové únavy, Disertační práce, 2016

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


**doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc., odbor pružnosti a pevnosti FS**

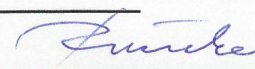
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

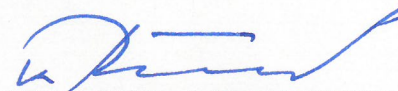
Datum zadání diplomové práce: **25.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **16.08.2019**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

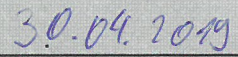
  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

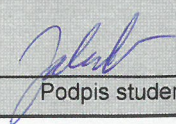
  
prof. Ing. Milan Růžička, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

# Anotační list

**Jméno autora:** Bc. Tadeáš Jakub

**Název DP:** Výpočet únavového poškození drážek hlavní dělicí roviny tlakové nádoby reaktoru

**English title:** Fatigue damage calculation in the grooves of reactor pressure vessel reactor closure head interface.

**Rok:** 2019

**Studijní program:** Strojní inženýrství

**Ústav/odbor:** Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.

## **Bibliografické údaje:**

počet stran: 61

počet obrázků: 42

počet tabulek: 7

počet příloh: 1

**Klíčová slova:** MKP, plasticita, nízkocyklova únava, tlaková nádoba reaktora

**Keywords:** FEM, plasticity, low-cycle fatigue, reactor pressure vessel

**Anotace:** Diplomová práca sa venuje problematike únavového poškodenia drážok hlavnej deliacej roviny reaktora. Pre riešenie sa využil 2D elasto-plastický axisymetrický konečno-prvkový model a následne bol použitý submodel pre detailne skúmanie záujmovej oblasti - drážky hlavnej deliacej roviny. Jedna z kapitol sa venuje teoretickému pozadiu teórie plasticity a únave. Následná kapitola je venovaná procesu vzniku výpočtového modelu, kde sú popísané jednotlivé interakcie v modeli, sieť a použité materiálové vlastnosti. Výpočet je rozdelený na tri časti a to z globálneho modelu sú získané deformačné pomery, ktoré sú následne použité pre zadefinovanie okrajových podmienok submodela. Z detailného výpočtu sú exportované deformácie, ktoré sa následne použijú na vyhodnotenie únavového poškodenia vo vybraných miestach.

**Abstract:** The diploma thesis deals with the problem of fatigue damage of the grooves of closure head interface of the reactor. 2D elasto-plastic axisymmetric finite-element model was used for the solution and subsequently a submodel was used for detailed examination of the area of interest - groove of of closure head interface. One of the chapters is devoted to the theoretical background of theory of plasticity and fatigue. The following chapter is devoted to the process of creating a computational model, which describes the individual interactions in models, mesh and used material properties. The calculation is divided into three parts and the deformation ratios are obtained from the global model, which are then used to define the boundary conditions of the submodel. From the detailed calculation, the deformations are exported, which are then used to evaluate the fatigue damage at selected locations.

# Pod'akovanie

V nasledujúcich pár riadkoch by som chcel srdečne poďakovať ľuďom, ktorí mi pomohli počas štúdia a pri písaní tejto diplomovej práce. V prvom rade by som chcel úprimne poďakovať vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Miroslavovi Španielovi, CSc. a kolegom z ÚJV Řež, a.s. Ing. Petrovi Gálovi a RNDr. Vladislavovi Pištorovi CSc. za ich vecné typy a rady pri písaní tejto práce. Následne patri veľká vďaka mojej najbližšej rodine a kamarátom, ktorí ma sprevádzali a podporovali počas úžasných piatich rokov štúdia.

# Prehlásenie

Ja, Tadeáš Jakub čestne prehlasujem, že túto diplomovú prácu som vypracoval samostatne s pomocou uvedenej literatúry.

Praha  
15. augusta 2019

Bc. Tadeáš Jakub .

# Obsah

Zoznam použitého značenia . . . . .	1
<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>1 Aktuálny stav problematiky</b>	<b>4</b>
1.1 Reaktor typu VVER-440 . . . . .	4
1.1.1 Dizajn VVER-440 . . . . .	5
1.1.2 Záťažové cykly reaktora . . . . .	6
1.2 Prístupy . . . . .	7
<b>2 Ciele</b>	<b>9</b>
<b>3 Použité teórie</b>	<b>10</b>
3.1 Úvod do teórie plasticity . . . . .	10
3.1.1 Modely plasticity . . . . .	10
3.1.1.1 Ideálne plastický model plasticity . . . . .	11
3.1.1.2 Elastický - lineárne spevňujúci model plasticity . . . . .	11
3.1.1.3 Elastický - exponenciálne spevňujúci model plasticity . . . . .	12
3.1.1.4 Ramber-Osgoodov model . . . . .	12
3.1.2 Bauschingerov efekt . . . . .	13
3.1.3 Modely spevnenia . . . . .	13
3.1.3.1 Izotropné spevnenie . . . . .	14
3.1.3.2 Kinematické spevnenie . . . . .	15
3.1.3.3 Kombinované spevnenie . . . . .	15
3.2 Vlastnosti únavy . . . . .	16
3.2.1 Vlastnosti materiálu pri cyklickom namáhaní . . . . .	16
3.2.2 Únavové krivky . . . . .	18
3.2.3 Vplyvy na medzu únavy . . . . .	19
<b>4 Výpočtový model</b>	<b>23</b>
4.1 Globálny model . . . . .	23
4.1.1 Popis konštrukcie . . . . .	23
4.1.2 Sieť výpočtového modelu . . . . .	26
4.1.3 Okrajové podmienky . . . . .	28
4.1.4 Zaťaženie . . . . .	29
4.1.5 Definovanie kontaktných párov a väzieb . . . . .	30
4.2 Fyzikálno-mechanické vlastnosti . . . . .	33
4.2.1 Modifikácia modulu pružnosti . . . . .	35
4.3 Submodel . . . . .	36

<b>5</b>	<b>Výsledky</b>	<b>39</b>
5.1	Elasto-plastický výpočet . . . . .	39
5.1.1	Globálny model . . . . .	39
5.1.2	Submodel . . . . .	43
5.2	Únava drážky tesnenia . . . . .	48
5.3	Diskusia výsledkov . . . . .	54
	<b>Záver</b>	<b>56</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>58</b>
	<b>Príloha</b>	<b>61</b>



# Zoznam obrázkov

1.1	Generácie VVER 440 [3] . . . . .	5
1.2	Rez reaktorom VVER 440 V-213 [20] 1. tlaková nádoba, 2. veko tlakovej nádoby, 3. voľná príruha, 4. šachta, 5. dno šachty, 6. aktívna zóna, 7. blok ochranných rúr, 8. horný blok, 9. ochranné rúry s tlmičmi, 10. pohony regulačných kaziet, 11. vstupný nátrubok, 12. výstupný nátrubok . . . . .	6
3.1	Modely plasticity [7] . . . . .	11
3.2	Ideálna plastizácia [9] . . . . .	14
3.3	Izotropné spevnenie [9] . . . . .	14
3.4	Kinematické spevnenie [9] . . . . .	15
3.5	Cyklická deformačná krivka a jej formy spevnenia[18] . . . . .	17
3.6	Chovanie cyklicky namáhaného materiálu [2] . . . . .	17
3.7	Wohlerova krivka [18] . . . . .	18
3.8	Manson-Coffinova krivka [18] . . . . .	19
3.9	Haighov diagram [22] . . . . .	20
3.10	Súčiniteľ akosti povrchu[18] . . . . .	22
4.1	Konštrukcia hlavnej deliacej roviny . . . . .	25
4.2	Ľavý obrázok definuje vnútornú sadu tesnenia a pravý obrázok vonkajšiu sadu . . . . .	25
4.3	Sieť globálneho modelu . . . . .	26
4.4	Detail siete v oblasti kontaktu voľnej príruby a veka . . . . .	27
4.5	Detail siete v oblasti drážok tesnenia . . . . .	27
4.6	Sieť submodela (vnútorná sada V-dražok) . . . . .	27
4.7	Okrajové podmienky . . . . .	28
4.8	Vykreslenie posunutí jednotlivých bodov skrutiek a celkové predĺženie skrutky . . . . .	30
4.9	Kontaktné páry, globálny model . . . . .	30
4.10	Kontaktné páry, Detail A . . . . .	33
4.11	Detaily oblasti tesnení . . . . .	33
4.12	Ťahové diagramy . . . . .	35
4.13	Schématické zobrazenie modifikovaných oblastí . . . . .	36
4.14	Umiestnenie vnútorných V-dražok v globálnom modeli a pohľad na submodel . . . . .	37
4.15	Posuvy návaru veka a príruby v globálnom modeli . . . . .	38
5.1	Priebeh sily a utiahnutia v skrutke . . . . .	39
5.2	Redukované napätia podľa Trescu po utiahnutí v $MPa$ . . . . .	40
5.3	Ohyb skrutky pri jej utiahnutí, zväčšené 5-krát . . . . .	41
5.4	Redukované napätia podľa Trescu po prvom utiahnutí v oblasti tesnení . . . . .	41
5.5	Zbytkové redukované napätia podľa Trescu po prvom uvoľnení v oblasti tesnení . . . . .	42
5.6	<i>Contact status</i> . . . . .	42



5.7	PEEQ vo vnútornej sade tesnení . . . . .	43
5.8	PEEQ pre vonkajšiu sadu tesnenia . . . . .	43
5.9	Redukované napätia podľa Trescu po prvom utiahnutí . . . . .	44
5.10	Zvyškové redukované napätia podľa Trescu po prvom uvoľnení . . . . .	45
5.11	PEEQ v submodely . . . . .	46
5.12	Miesta vykreslenia rozvoja plastickej deformácie po jednotlivých kampaniach	47
5.13	Rozvoj plastickej deformácie vo vybraných bodoch . . . . .	47
5.14	Miesta hodnotenia únavového poškodenia . . . . .	50
5.15	Rozvoj plasticity s najväčšou hodnotou únavového poškodenia . . . . .	61

# Zoznam tabuliek

4.1	Vlastnosti kontaktov <i>surface-to-surface</i> . . . . .	31
4.2	Kontaktné väzby . . . . .	32
4.3	Materiálové vlastnosti . . . . .	34
4.4	Mechanické vlastnosti . . . . .	34
5.1	Únavové poškodenie vo vybraných bodoch . . . . .	50
5.2	Rozvoj $\sigma_{aF}$ a jej vplyv na únavové poškodenia v bode 1 . . . . .	52
5.3	Rozvoj $\sigma_{aF}$ a jej vplyv na únavové poškodenia v bode 6 . . . . .	53

---

## Zoznam použitého značenia

$\sigma$	napätie	[MPa]
$E$	Youngov modul pružnosti	[MPa]
$R_e, \sigma_0$	medza sklzu	[MPa]
$E_t$	tangentný modul	[MPa]
$a, b, m, n, k$	konštanty	[-]
$K$	parameter spevnenia	[-]
$A$	ťažnosť	[%]
$Z$	kontrakcia	[%]
$\sigma_m$	stredná hodnota napätia	[MPa]
$\sigma_a$	amplitúda napatia	[MPa]
$\sigma'_f$	súčiniteľ únavovej pevnosti	[MPa]
$\sigma_c$	medza únavy	[MPa]
$\sigma_{cn}$	medza únavy vrubovaného telesa	[MPa]
$\sigma'_c$	medza únavy na opracovanom materiály	[MPa]
$\sigma_F$	fiktívne napaie	[MPa]
$\sigma_{aF}$	amplitúda fiktívneho napätia	[MPa]
$\sigma_{maxF}$	max. hodnota fiktívneho napätia	[MPa]
$\sigma_{minF}$	min. hodnota fiktívneho napätia	[MPa]
$\sigma_{FR}$	lomová pevnosť	[MPa]
$\epsilon$	deformácia	[MPa]
$N, N_i$	počet cyklov	[-]
$b$	exponent únavovej pevnosti	[-]
$\epsilon'_f$	súčiniteľ únavovej ťažnosti	[-]
$c$	exponent únavovej ťažnosti	[-]
$\beta$	súčiniteľ vrubu	[-]
$\eta_P$	súčiniteľ akosti povrchu	[-]
$u$	posunutie	[mm]
$\nu$	Poissonovo číslo	[-]
$e_c$	charakteristika plasticity	[-]
$N_o$	počet cyklov, kedy vznikne trhlina o hodnote 0.5 - 1 mm	[-]
$m, m_e$	exponent životnosti	[-]
$n_\sigma$	súčiniteľ bezpečnosti voči napätiu	[-]
$n_N$	súčiniteľ bezpečnosti voči počtu cyklov	[-]
$r_\sigma$	súčiniteľ asymetrie cyklu	[-]
$\phi_s$	súčiniteľ zníženia únavovej pevnosti	[-]
$D$	kumulácia únavového poškodenia	[-]

---

---

# Úvod

Jadrová energetika zohráva dôležitú úlohu pri tvorbe elektrickej energie potrebnej pre pokrytie požiadavok užívateľskej siete. Jednou z najdôležitejších častí tvorby energie v jadrovej elektrárni je tlaková nádoba reaktora. Tá je vystavená nielen vysokým teplotám, ale aj ostatným fyzikálno-chemickým javom prebiehajúcim počas štiepnej reakcie. Preto je nutné vykonať legislatívne opatrenia, ktoré zabezpečia maximálnu bezpečnosť prevádzky tlakovej nádoby reaktora. Jedna z legislatívnych požiadaviek zabezpečenia bezpečnosti je predikcia únavového poškodenia jednotlivých komponentov tlakovej nádoby reaktora.

Táto diplomová práca analyzuje únavové poškodenie V-drážok tesnenia v oblasti hlavnej deliacej roviny tlakovej nádoby reaktora. Tá je vystavená nasledovnému cyklickému zaťažovaniu:

- 1) utiahnutie skrutkového spoja, ktorý spôsobí dosadnutie veka na prírubový prstenec s plasticky deformovanými niklovými tesneniami,
- 2) uvoľnenie skrutkového spoja, pri čom nastane vrátenie veka do pôvodnej polohy,
- 3) výmena plasticky zdeformovaného tesnenia za novú nepoškodenú sadu tesnení,
- 4) opäť proces od bodu 1.

Opísané cyklické zaťažovanie je vykonané 30-krát, čo reprezentuje približne 30 rokov prevádzkovej činnosti. Oblasť V-drážky je vystavená nízkocyklovej únave a bude zhodnotená podľa normy NTD ASI [5].

Diplomová práca je rozdelená do piatich kapitol. V prvej kapitole je stručne opísaný stav problematiky únavového poškodenia V-drážky v hlavnej deliacej roviny tlakovej nádoby reaktora. V rámci tejto kapitoly je v jednoduchosti opísaný reaktor VVER-440 a jeho záťažové

---

režimy, ktorým je vystavený. Nasledujúca kapitola v krátkosti opisuje ciele tejto diplomovej práce.

Tretia kapitola opisuje použité teórie, ktoré sú použité pri riešení diplomovej práce. Definujú sa základné poznatky z teórie plasticity ako modely plasticity, Bauschingerov efekt a modely spevnenia. Pre vyhodnotenie únavového poškodenia sú opísané vlastnosti únavy. Teda ako sa správa materiál pri cyklickom namáhaní, základné únavové krivky pre vyhodnotenie únavového poškodenia a jednotlivé faktory vplývajúce na medzu únavy.

V kapitole *Výpočtový model* je opísaná tvorba výpočtového modelu v softvéri *Abaqus 2019*. Taktiež sú definované materiálové vlastnosti jednotlivých komponentov. Submodel je použitý z dôvodu detailného skúmania vzniku napätových a deformačných polí v oblasti vnútornej V-drážky hlavnej deliacej roviny reaktora.

Post-processing je zhrnutý v kapitole *Výsledky*. V nej sú najprv opísané výsledky globálneho modelu v podobe opisu redukovaných polí napätí podľa Trescu a vzniknuté plastické deformácie. V obdobnom duchu je opísaný aj submodel, ktorý ma navyše popis šírenia plastickej deformácie počas jednotlivých kampaní. Následne je zhodnotené únavové poškodenie vo vybraných kritických bodoch. V diskusii výsledkov sú vyvodené závery zo získaných analýz a taktiež návrhy a možné riešenia ako zlepšiť výpočtový model pre dosiahnutie čo najhodnovernejších výsledkov.

Záver zhrňuje výstup diplomovej práce.

# Kapitola 1

## Aktuálny stav problematiky

Pre zaistenie životnosti reaktora je potrebné vhodným výpočtom určiť hodnotu kumulácie únavového poškodenia. Jedným z miest, kde nastáva značný vplyv cyklického namáhania je hlavná deliaca rovina, a to najmä v oblasti drážok, do ktorých sú opakovane vtláčané niklové tesnenia.

Výpočtové hodnotenie drážok po založení tesnenia je značne komplikované. V priebehu utiahnutí skrutky dochádza k dosadnutiu príruby veka reaktora a tlakovej nádoby reaktora. To spôsobuje silnú plastickú deformáciu niklového tesnenia, ktorý sa prispôbuje tvaru V-drážok. Tá je vďaka tomu silne namáhaná a spolu s ňou aj návar na veku reaktora, ktorý je avšak bez drážok. Po každej kampani sú vkladane nové niklové tesnenia.

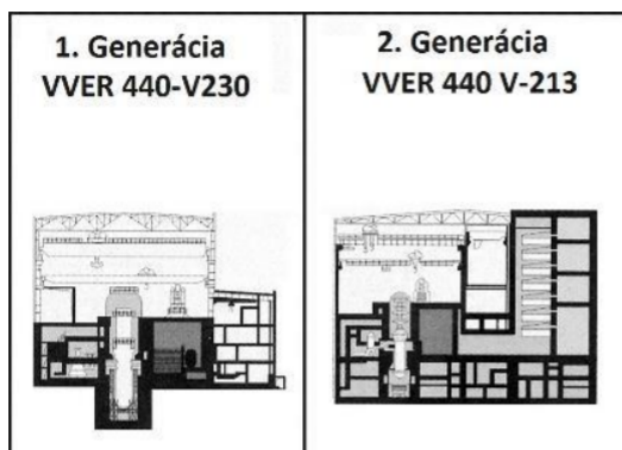
Z uvedených dôvodov vyplýva, že je potrebné zostaviť zodpovedajúci konečno-prvkový model, na ktorom bude možné detailne analyzovať správanie drážky vzhľadom na cykly zaťaženia, ktorým je vystavený reaktor počas jeho životnosti.

### 1.1 Reaktor typu VVER-440

Reaktory VVER sú ľahko-vodné tlakové energetické reaktory sovietského typu. Prvé prototypy tohto druhu reaktora sa objavili v šesťdesiatych rokoch minulého storočia. Do sériovej výroby sa dostali dva typy reaktorov a to VVER-440 a VVER-1000. Ich prevádzka je sústredená v krajinách bývalého Sovietskeho zväzu, východnej Európy a vo Fínsku [14] [3]. V diplomovej práci sa rieši únava drážky tesnenia hlavnej deliacej roviny reaktora typu VVER-440.

### 1.1.1 Dizajn VVER-440

Dizajn reaktora VVER-440 prešiel generačným vývojom, viď Obr. 1.1. Prvá generácia niesla označenie VVER 440 V-230, ktorá však úplne nespĺňala legislatívne normy, teda mala nepostačujúce bezpečnostné prvky voči nehode.

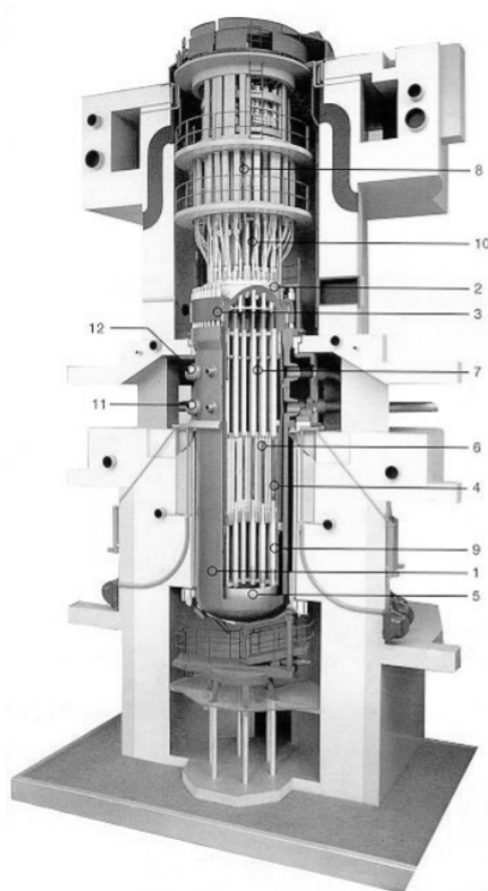


Obr. 1.1: Generácie VVER 440 [3]

Zdokonalená druhá generácia nesie označenie VVER 440 V-213. V tejto generácii nastali výrazne zlepšenia v spôsobe riadenia prevádzky a zároveň vylepšenie jednotlivých bezpečnostných systémov. Napríklad kontajntment je vybavený systémom potlačenia tlaku, aby v prípade havárie so stratou chladiva nedošlo k jeho poškodeniu.

Primárny okruh sa skladá z tlakovej nádoby a šiestich slučiek, z ktorých každá obsahuje chladnú vetvu s hlavným cirkulačným čerpadlo, horúcu vetvu a horizontálny parogenerátor. Medzi nádobou reaktora a parogenerátorom je umiestnená hlavná uzatváracia armatúra, tá je taktiež situovaná aj medzi parogenerátorom a čerpadlom. To umožňuje jednotlivým slučkám ich vypustenie pre prípad vykonania potrebných kontrol a opráv. Teplota v horúcej vetve je približne 297°C, v studenej 267°C a v tlak v reaktore 12,3 MPa [20] [4] [10]. Obr. 1.2 v jednoduchosti popisuje konštrukciu reaktora.





Obr. 1.2: Rez reaktorom VVER 440 V-213 [20]

1. tlaková nádoba, 2. veko tlakovej nádoby, 3. voľná príruha, 4. šachta, 5. dno šachty, 6. aktívna zóna, 7. blok ochranných rúr, 8. horný blok, 9. ochranné rúry s tlmičmi, 10. pohony regulačných kaziet, 11. vstupný nátrubok, 12. výstupný nátrubok

### 1.1.2 Závažové cykly reaktora

Pri skúmaní statickej pevnosti a únavy jednotlivých komponentov reaktora je potrebné, aby podstúpili tieto definované záťažové cykly avšak pre únavové poškodenie drážky majú zanedbateľný vplyv:

- Havarijné odstavenie
- Náhle zníženie z nominatívneho výkonu na výkon vlastnej spotreby
- Skokové zníženie výkonu z nominatívneho výkonu na 50% výkonu - výpadok jedného turbogenerátora

- Skokové zníženie výkonu z nominatívneho výkonu na 80% výkonu
- Skokové zníženie výkonu z nominatívneho výkonu na 70% výkonu po páde kazety
- Odpojenie cirkulačnej slučky od primárneho okruhu
- Odpojenie hlavného cirkulačného čerpadla
- Naštartovanie hlavného cirkulačného čerpadla
- Úplná strata napájania vlastnej spotreby
- Výpadok troch zo šiestich hlavných cirkulačných čerpadiel
- Rýchle zastavenie jedného hlavného cirkulačného čerpadla
- Neuzavretie poistného ventila v parogenerátore
- Činnosť poistného ventila v parogenerátore pri výkone nižšom než 5% nominatívneho výkonu

Na únavové poškodenie drážky majú značný vplyv režimy utesnenie tlakovej nádoby reaktora a následne odtesňovanie, ktoré je riešené v tejto diplomovej práci.

## 1.2 Prístupy

V ÚJV Řež, a.s. sa doteraz podrobne neskúmalo únavové poškodenie v oblasti drážok hlavnej deliacej roviny. Vykonalo sa niekoľko prípadových štúdií, v ktorých sa skúmal vplyv jednotlivých záťažových cyklov na únavové poškodenie v mieste drážok. Jednou zo štúdií bolo jednoduché zaťaženie jedného z tesnení kvádom, ktorého pohyb bol riadený posuvom. V danej štúdií sa zistilo, že najväčšie deformácie vznikajú v oblasti pod povrchom kontaktu tesnenia s drážkou. Predpoklad bol, že najväčšia deformácia je v rádiuse drážky tesnenia z dôvodu rozťahovania drážky vplyvom vtláčania tesnenia.

To motivuje k hlbšiemu preskúmaniu danej oblasti na zjednodušenom 2D axisymetrickom modeli, čo je pre danú oblasť kvalitatívne rovnocenné zjednodušenie modelu v porovnaní s 3D modelom. K zjednodušeniu sa pristupuje z dôvodu geometrickej robustnosti modelu, ale aj dôvodu výskytu všetkých typov nelinearít nelinearít, ktorými sú vznik veľkých deformácií

a pretvorení, materiálové nelinearity a v neposlednom rade štrukturálne nelinearity v podobe kontaktov. Taktiež pre výpočet únavy je nutné zistiť špičkové hodnoty napätí alebo deformácií a preto je žiadúce použiť veľmi zjemnenú sieť.

Pri uvažovaní elastického modelu nie je možné doceliť dosadenie veka príruby na prírubový prstenec, ku ktorému reálne dochádza. Celý silotok vzniknutý pomocou utiahnutia sa prenáša cez veko to pôsobí na tesnenie a to na návar prírubového prstenca. To spôsobuje kvalitatívne iné chovanie, neopisuje reálne správanie utiahnutia veka ku príрубе. Aby sa daný efekt odstránil je potrebné pracovať s elasticko-plastickým modelom čo pridáva na robustnosti výpočtu. Dosadenie listov veka na prírubu sa dosiahne už približne pri polovičnom utiahnutí skrutkového spoja a následne zaťaženie sa neprenáša len cez tesnenia, ale aj kontaktné plochy veka a príruby.

Taktiež počas života reaktora dochádza k jeho odstávkam z dôvodu ako výmena paliva, technické kontroly a podobne. To sa deje približne jeden krát za rok, čo predstavuje jednu záťažovú kampaň. Pri týchto procesoch dochádza k uvoľneniu skrutkového spoja. Aby sa pri následnom utiahnutí udržala tesnosť reaktora je potrebné staré tesnenie vymeniť za nové. To vyvoláva opätovné zaťaženie drážok tesnenia. Keďže týchto výmen nastane niekoľko desiatok je nutné preskúmať riziko vzniku nízkokyckového únavového poškodenia drážok pri určitom počte utiahnutí a uvoľnení či nie je riziko vzniku defektu v danej oblasti. Daná výmena tesnení v prípadne numerického riešenia pridáva ďalšiu numerickú robustnosť problému.

# Kapitola 2

## Ciele

Cieľom tejto diplomovej práce je preskúmanie únavového poškodenia drážok príruby. Aby daná problematika mohla byť vyriešená je rozdelená na tri menšie míľniky:

- vytvorenie elasto-plastického 2D modelu hlavnej deliacej roviny, definovanie materiálových vlastností, definovanie okrajových podmienok a kontaktných párov, definovanie zaťaženia - utiahnutie skrutky,
- cyklická výmena tesnenia po každom záťažovom cykle (utiahnutie,uvoľnenie),
- detailne skúmanie drážok tesnenia hlavnej deliacej roviny v podobe plastickej deformácie drážky i tesnenia, následne vyhodnotenie únavy po finálnom počte cyklov vo vybraných kritických bodoch v mieste drážok.

Účelom týchto troch míľnikov je si osvojiť zhotovenie konečno-prvkového modelu, ktorý má opisovať reálne chovanie systému. Pri formulovaní cyklickej výmeny tesnenia je potrebné vhodne definovať kontaktné páry a veľkosť adjustovaného utiahnutia pre inicializáciu definovaných kontaktných párov z dôvodu vzniku plastických deformácií v telese. Tretí míľnik je oboznámenie sa s metodikou hodnotenia únavového poškodenia podľa normy NTD ASI.

# Kapitola 3

## Použité teórie

Pre vhodné zhotovenie konečno-prvkového modelu bolo potrebné sa oboznámiť s teóriou plasticity a s faktormi, ktoré vplývajú na únavové poškodenie a jeho hodnotenie pomocou únavových kriviek.

### 3.1 Úvod do teórie plasticity

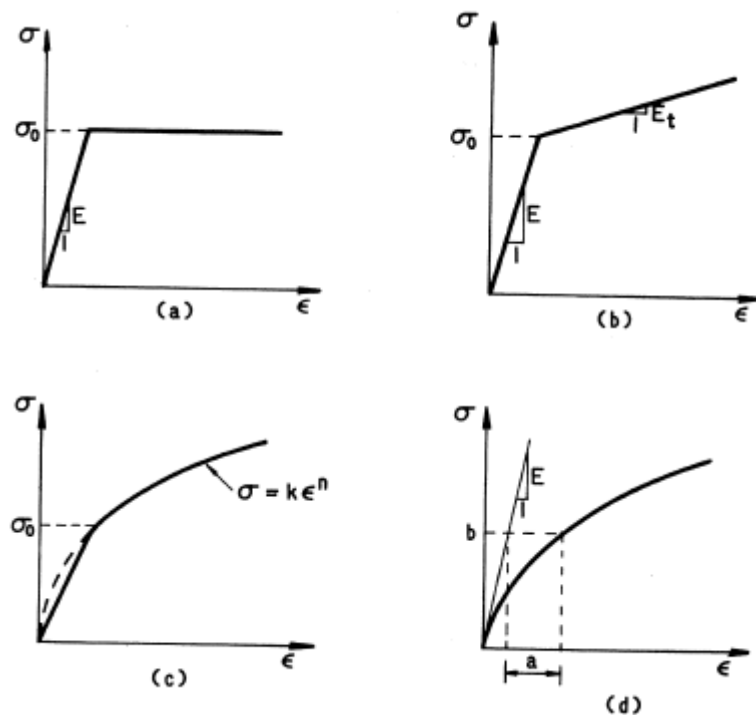
V tejto podkapitole sú opísané jednotlivé zjednodušené modely plasticity .

Obecne plasticita alebo plastickosť vyjadruje vlastnosť materiálu pri ktorej daný materiál pod vplyvom účinku vonkajších síl trvale zmení svoj tvar.

#### 3.1.1 Modely plasticity

Pri riešení deformácie je potrebné si idealizovať správanie materiálu pre dosiahnutie výsledkov . To sa vykonáva idealizáciou napäťovo-deformačnej krivky. Najčastejšie sa reprezentujú potrebné krivky pomocou nasledujúcich zjednodušení, viď Obr. 3.1:

- a) Ideálne plastický model plasticity
- b) Elastický - lineárne spevňujúci model plasticity
- c) Elastický - exponenciálne spevňujúci model plasticity
- d) Ramberg - Osgoodov model



Obr. 3.1: Modely plasticity [7]

### 3.1.1.1 Ideálne plastický model plasticity

V niektorých prípadoch je prípustné a vhodné zanedbať spevňujúci efekt, ktorý vzniká pri plastickej deformácii. Uvažuje sa, že plastické tečenie nastane vtedy, keď vzniknuté napätie sa rovná hodnote medze sklzu. Takéto chovanie je možné vyjadriť v tvare

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{\sigma}{E}, & \text{ak } \sigma < \sigma_0, \\ \epsilon &= \frac{\sigma}{E} + \lambda, & \text{ak } \sigma = \sigma_0, \end{aligned} \quad (3.1)$$

kde  $E$  je Youngov modul pružnosti a  $\lambda > 0$  je neznámy skalár, ktorý je potrebné určiť a musí byť väčší ako 0. Model je vhodný pre materiály so výraznou medzou sklzu.

### 3.1.1.2 Elastický - lineárne spevňujúci model plasticity

Pri pevnostných výpočtoch je prípustná istá miera vzniku plasticity na priereze. Preto sa využíva aproximácia krivky, ktorá je zložená z dvoch lineárnych priamok s ostrým bodom prechodu. Tento bod je určený medzou klzu. Uhol sklonu prvej priamky je určený Youngovým modulom pružnosti,  $E$ , a na danej oblasti oblasti uvažujeme elastické chovanie. Druhá vetva,

plastická oblasť, reprezentuje idealizovanú krivku deformačného spevnenia, ktorej sklon definuje podmienka  $E_t < E$ .  $E_t$  je tangtentý modul popísaný rovnicou

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\epsilon}. \quad (3.2)$$

Deformačno-napätový vzťah pre monotónne zatažovanie v ťahu je

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{\sigma}{E}, & \text{ak } \sigma \leq \sigma_0, \\ \epsilon &= \frac{\sigma_0}{E} + \frac{1}{E_t}(\sigma - \sigma_0), & \text{ak } \sigma > \sigma_0. \end{aligned} \quad (3.3)$$

### 3.1.1.3 Elastický - exponenciálne spevňujúci model plasticity

Daný model plasticity uvažuje krivku s matematickým popisom

$$\begin{aligned} \sigma &= \epsilon E, & \text{pre } \sigma \leq \sigma_0, \\ \sigma &= k\epsilon^n, & \text{pre } \sigma > \sigma_0. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Pre definovanie neznámych konštánt,  $k$  a  $n$ , je potrebné ich hodnotu určiť pomocou krivky získanej z experimentálnych hodnôt. Ak zohľadníme, že  $\epsilon$  reprezentuje maximálnu deformáciu, Obr. 3.1 c), tak daná krivka, by mala prechádzať cez bod s hodnotou medze sklzu a jej danej hodnoty elastickej deformácie.

### 3.1.1.4 Ramber-Osgoodov model

Na Obr.3.1 d) je definovaná nelineárna krivka, ktorú je možné popísať vzťahom

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + a \left( \frac{\sigma}{b} \right)^n, \quad (3.5)$$

kde  $a, b$  a  $n$  sú materiálové konštanty. Počiatok krivky je definovaný v hodnote Youngovho modulu keď  $\sigma = 0$  a jej pokles je definovaný monotónnym poklesom pri zvyšujúcom sa zatažení. Výhodou tohto modelu je možnosť určenia materiálových konštánt na základe experimentálnych podkladov alebo výsledkov a následne vytvorenie odpovedajúcej reálnej napäťovo - deformačnej krivky [21] [7].



### 3.1.2 Bauschingerov efekt

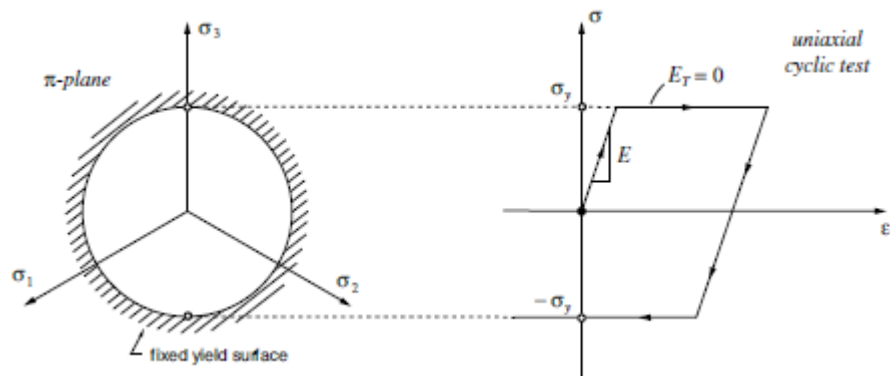
Uvažujme testovací exemplár, ktorý je zaťažovaný jednoosovým ťahom. Pri prekročení medzi sklzu a následnom uvoľnení zaťaženia k nule v testovanom exemplári zostanú zvyškové napätia. Následne ten istý exemplár zaťažíme tlakom, tak proces vzniku plastickej deformácie začne pri nižšej hodnote ako pri exemplári, v ktorom nenastala plastická deformácia. Ten istý proces nastáva v exemplári, ktorý je prv zaťažovaný tlakom a následne ťahom. Tento fenomén nám opisuje jeden z najznámejších poznatkov pri cyklickej plasticite *Bauschingerov efekt*, ktorý nastane kedykoľvek ak plasticky deformovaný prvok je vystavený opačnému napätiu [6].

### 3.1.3 Modely spevnenia

Aby sa mohli jednotlivé modely spevnenia definovať je potrebné objasniť pojem plocha plasticity. Tá nám zobrazuje podmienku plasticity, napr. von Missesova podmienka, v súradnicovom systéme hlavných napätí [19].

Spevnenie je charakterizované ako zmena plochy plasticity spôsobená zaťažovaním nad medzu sklzu, ktorá nastala v telese počas namáhania. Počas tohto deja je možná zmena tvaru, ale aj plochy plasticity. Ak sa uvažuje materiálový model ideálne elasticko - plastický (3.1.1.1), tak je v danom modely plocha plasticity konštantná, Obr.3.2 . V iných prípadoch môže byť zmena plochy plasticity definovaná pomocou týchto modelov:

- izotropné,
- kinematické,
- kombinované[9].



Obr. 3.2: Ideálna plastizácia [9]

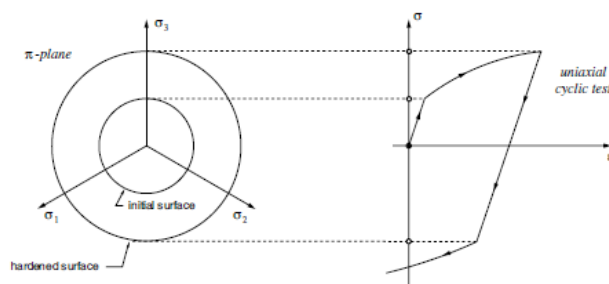
### 3.1.3.1 Izotropné spevnenie

Plocha plasticity sa rovnomerne zväčšuje a jej počiatok je pevne zviazaný so začiatkom súradnicovej sústavy, viď Obr. 3.3. Z dôvodu, že diameter plastickej plochy je závislý len na sile, ktorá spôsobuje plasticú deformáciu. Proces spevnenia je funkciou ekvivalentnej plastickej deformácie. Ak je teleso odľahčené a následne je zaťažované v opačnom smere, tak plasticá deformácia nastane až vtedy, keď napätie dosiahne maximálnej zápornej hodnoty. Užitie tohto modelu je v prípadoch ako simulácia tvárnenie. Pre iné formy namáhania izotropné spevnenie nie je vhodné, z dôvodu atypického chovania tvárneho materiálu [12][17].

Spevnenie matematicky vyjadríme v tvare

$$|\sigma| = |\sigma(K)|, \quad (3.6)$$

kde  $\sigma(K)$  je funkciou spevnenia parametra  $K$ , ktorý je definovaný ako kladný skalár [7].



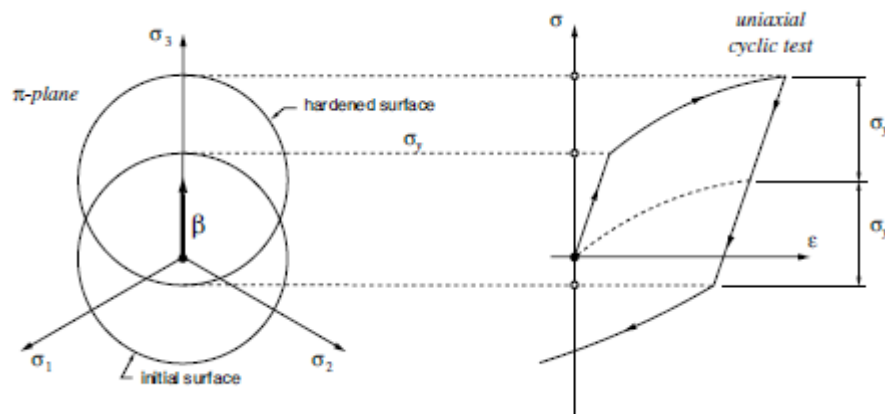
Obr. 3.3: Izotropné spevnenie [9]

### 3.1.3.2 Kinematické spevnenie

Pri kinematickom spevnení sa uvažuje, že stred plochy plasticity je posúvaný v priestore hlavných napätí, avšak plocha nemení svoju veľkosť. Taktiež pomocou kinematického spevnenia je možné zachytiť Bauschingerov efekt. Pri symetrickom jednoosom namáhaní vzniká odozva v podobe uzavrenej hysteréznej slučky [12][17]. Kinematické spevnenie má matematický tvar

$$|\sigma - \beta(K)| = \sigma_0, \quad (3.7)$$

kde  $\beta$  je funkciou spevňujúceho parametra  $K$  [7].



Obr. 3.4: Kinematické spevnenie [9]

### 3.1.3.3 Kombinované spevnenie

Vo všeobecnosti izotropné a kinematické spevnenie je možné skombinovať využitím princípu superpozície. To má najmä zmysel, ak je cyklické zaťažovanie popísané hlavne kinematickým spevnením a po určitej počte cyklov dochádza v materiáloch aj k izotropickému spevneniu [17]. Tento efekt sa sleduje pri materiáloch, ktoré vykazujú rozdiely v hodnote medzi sklzu pre statickú a cyklickú deformáciu.

Modelom kombinovaného spevnenia sa dajú vhodne definovať prechodné javy pri začiatku cyklického namáhania, cyklickom spevnení alebo zmäkčení, ratchetting a podobne [13].

## 3.2 Vlastnosti únavy

### 3.2.1 Vlastnosti materiálu pri cyklickom namáhaní

Pomocou statickej ťahovej skúšky, z ktorej získame ťahový diagram je možné určiť mechanické vlastností materiálov a to:

- medza sklzu materiálu  $R_e$ ,
- medza pevnosti materiálu v ťahu  $R_m$ ,
- ťažnosť materiálu  $A$ ,
- kontrakcia materiálu  $Z$ .

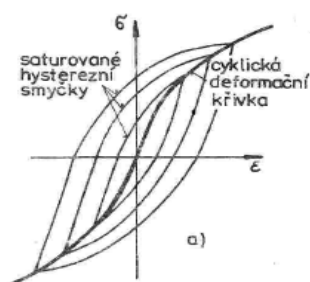
Ak skúšobnú tyč zaťažujeme cyklickou deformáciou (tvrdé zaťažovanie) a tak, aby nedošlo k pretrhnutiu, je možné získať deformačnú odozvu materiálu, ktorá sa dá zobrazit' pomocou hysteréznej slučky, vid'. Obr. 3.6a, a cyklickej deformačnej krivky, vid'. Obr. 3.5a. Obecne deformáciu definujeme z dvoch pomerných zložiek deformácie a to z elastickej a plastickej, ktoré matematicky definujeme ako:

$$\epsilon_a = \epsilon_{ael} + \epsilon_{apl} \quad (3.8)$$

Pri takomto cyklickom zaťažovaní má na únavu materiálu významný vplyv amplitúdy plastickej deformáciej  $\epsilon_{apl}$ .

Taktiež je počas cyklického zaťažovania možné spozorovať dva fenomény, ktoré sa prejavujú zmenou tvaru hysteréznej slučky a cyklickej deformačnej krivky. Tieto deje definujeme ako:

- cyklické spevňovanie, ktoré je charakteristické pre materiály vyžíhané a tie, ktorých pomer medzi medzou pevnosti a medzou sklzu je rovný alebo väčší ako 1,4, vid'. Obr. 3.5b,
- cyklické zmäkčenie je typické pre materiály s vyššou pevnosťou a s pomerom medzi medzou pevnosti a sklzu o hodnote menšej ako 1,2, vid'. Obr. 3.5b.



(a) Saturované hysterézne slučky

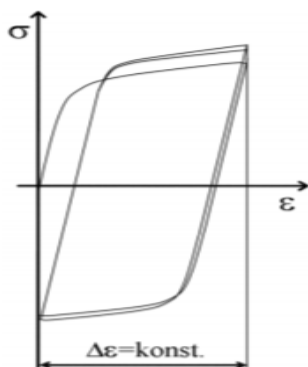


(b) Spevňovanie v materiály pri monotónnom zaťažovaní

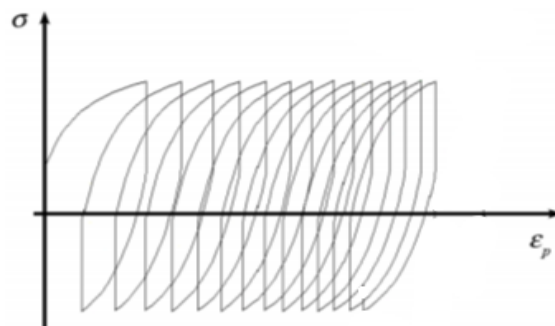
Obr. 3.5: Cyklická deformačná krivka a jej formy spevnennia[18]

Ak je materiál cyklicky zaťažovaný a po niekoľko desiatkach, prípadne stovkách cyklov, nastane stav, keď už nedochádza k žiadnym cyklickým zmenám, hovoríme o tzv. saturovanom stave [18]. Ak je materiál namáhaný cyklicky, môže nastať chovanie:

- dokonalo pružné - nedochádza k porušeniu materiálu,
- po určitom počte cyklov v materiáli nastane elastické prispôsobenie,
- plastické prispôsobenie - tento jav je možné vykresliť v podobe hysteréznej slučky, Obr. 3.6a,
- ratcheting - pri každom jednom cykle dochádza k akumulácii deformácie v materiáli za predpokladu mäkkého zaťažovania (silového), Obr. 3.6b [2].



(a) hysterézna slučka



(b) ratcheting

Obr. 3.6: Chovanie cyklicky namáhaného materiálu [2]

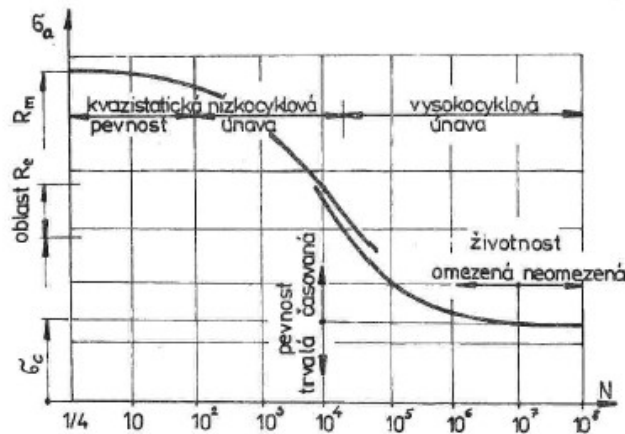
### 3.2.2 Únavové krivky

#### Wöhlerova krivka

Reprezentuje závislosť počtu cyklov do porušenia pri definovanej napäťovej amplitúdy pri symetrickom cykle zaťažovania,  $\sigma_m$  je konštantná stredná hodnota napätia, pre vysoko-cyklovú únavu. Získava sa zo sady experimentov, kde sa na určitých veľkostiach zaťaženia vykoná testovanie niekoľkých vzoriek. Taktiež udáva hodnotu medzi únavy  $\sigma_c$ , čo je hodnota napätia pri ktorej komponent vydrží viac ako  $10^7$  počet cyklov. Matematicky popis životnosti pomocou Wohlerovej krivky je daný vzťahom:

$$\sigma_a^m \cdot N = \sigma_C^m \cdot N_C = A. \quad (3.9)$$

Neznámu hodnotu exponenta  $m$  a  $A$  získame zo štatického vyhodnotenia experimentálnych dát. Veľkosť exponenta  $m$  definuje strmlosť Wohlerovej krivky a závisí od typu materiálu, alebo taktiež aj od vrubovitosti komponenta [16] [18].



Obr. 3.7: Wohlerova krivka [18]

#### Manson-Coffinova krivka

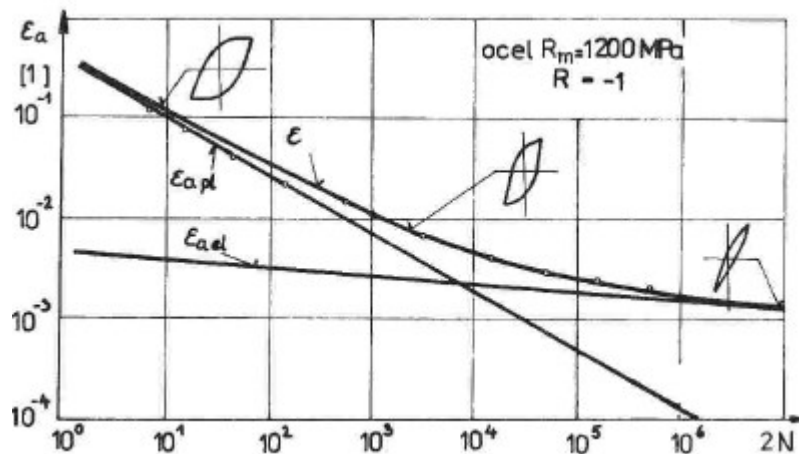
Využíva sa pri nízko-cyklovej únave a je vyjadrená formou logaritmickej závislosti  $\log \epsilon_a - \log N$ . Jej matematický popis sa skladá z elastickej a plastickej zložky amplitúdy deformácie

$$\epsilon_a = \epsilon_{ael} + \epsilon_{apl} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_C)^b + \epsilon'_f (2N_C)^c, \quad (3.10)$$

kde  $\sigma'_f$  reprezentuje súčiniteľa únavovej pevnosti,  $b$  exponent únavovej pevnosti,  $\epsilon'_f$  súčiniteľ únavovej ťažnosti a  $c$  je exponent únavovej ťažnosti.

Manson-Coffinova krivka má výhodu v tom, že pri cyklickom zaťažovaní berie v úvahu aktuálnu napäťovo-deformačnú odozvu. Taktiež pri plastickej deformácii a mechanizmoch, ktoré vedú k inicializácii trhliny, je možné ich vhodne namodelovať a pri zložitých geometriách modelu je možné danú krivku ľahko extrapolovať [1][11].

Na Obr.3.8 je znázornená príslušná Manson-Coffinova krivka, kde na zvislej osi je vyňášaná amplitúda pomerného predĺženia  $\epsilon_a$  a na horizontálnej osi je počet polkmitov  $2N$  do poruchy a popisuje elastoplastickú odozvu materiálu v podobe hysterézných slučiek. Z Obr.3.8 je zrejmé, že v nízkocyklovej oblasti je plastická deformácia väčšia než elastická a pri vysokocyklovej oblasti nastáva opačný efekt [18].



Obr. 3.8: Manson-Coffinova krivka [18]

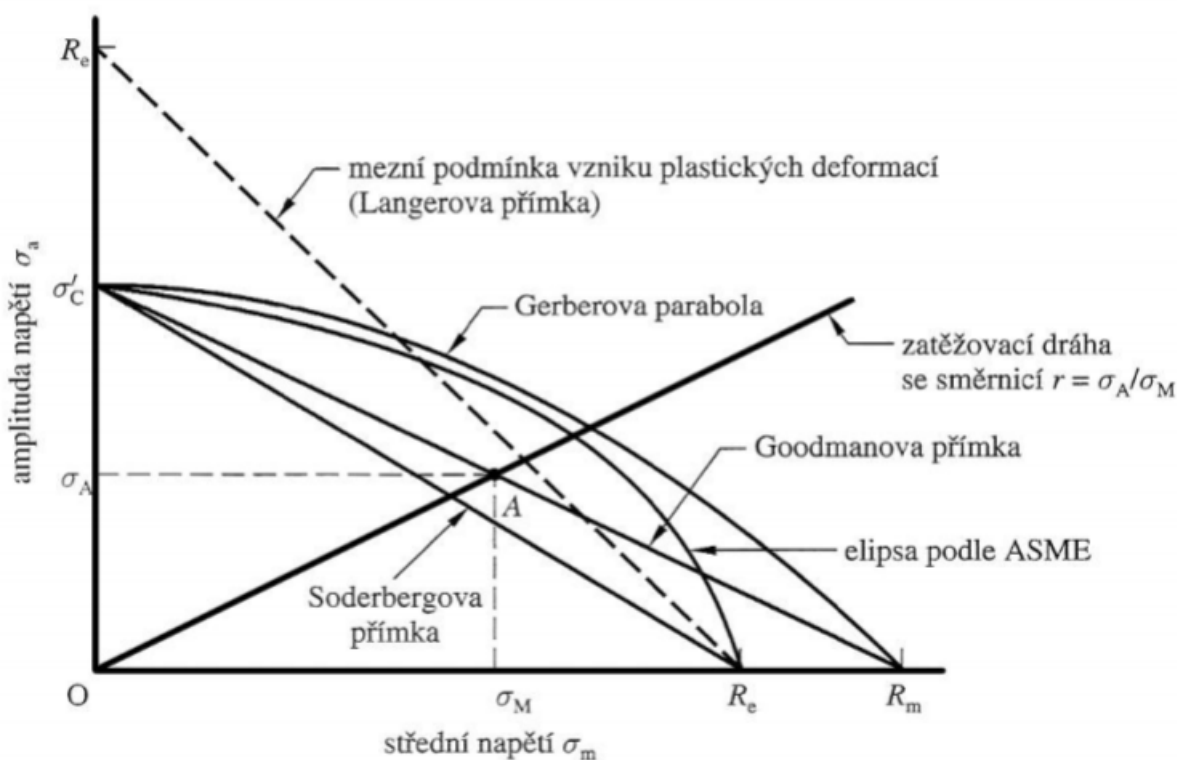
### 3.2.3 Vplyvy na medzu únavy

Interné a externé faktory majú značný vplyv na veľkosť hodnoty medze únavy reálnych komponentov v porovnaní s hodnotami získanými laboratórnymi meraniami. Nízkocyklová únava je ovplyvnená typom zaťažovania ako je tvrdé (deformačne riadené) a mäkké zaťažovanie (silovo riadené). Ďalším faktorom je veľkosť amplitúdy zaťaženia a druhom zaťaženia ako je uniaxiálne alebo multiaxiálne, čo môže byť proporcionálnom alebo neproporcionálne [13].



## Vplyv strednej zložky napätia

Veľká časť Wöhlerových kriviek je udávaná v tvare  $\sigma_a = f(N)$ , kde stredné napätie  $\sigma_m$  má konštantnú hodnotu pre všetky amplitúdy napätia  $\sigma_a$ . Wöhlerovu krivku je potrebné upraviť pri prípadných zmenách  $\sigma_m$ . Pri náraste stredného napätia dochádza k poklesu amplitúdy napätia [16]. Taktiež stredné napätia má významný vplyv na celkovú životnosť. Pri kladných hodnotách dochádza k poklesu počtu cyklov do lomu čo sa prejavuje rýchlejšim vznikom a rastom trhliny. Negatívna veľkosť strednej zložky napätia má pozitívny vplyv na životnosť. Jednou z možností ako vyjadriť závislosť medzi mezou únavy a strednou zložkou napätia je Haighov diagram, Obr. 3.9 [22].



Obr. 3.9: Haighov diagram [22]

## Vplyv veľkosti telesa

Je známe, že pri zväčšovaní skúšobných vzoriek z toho istého materiálu vykazujú vzorky menšiu hodnotu medzi únavy. To sa dá odôvodniť vyššou pravdepodobnosťou výskytu trhliny s kritickou dĺžkou na povrchu. Tento jav je ovplyvnený:

- technologickým vplyvom,

- štatistickým vplyvom,
- vplyv rozdelenia napätia - napríklad pri namáhaní malých vzoriek ohybom sa dosahujú najvyššie hodnoty medze únavy [23] [18].

### Vplyv koncentrátora napätia

Zo skúsenosti sa vie, že v miestach koncentrátorov napätia je vyššia pravdepodobnosť porušenia komponentu. Koncentrátorm sa rozumie napr. drážka, rádius a iné tvarové prechody. z dôvodu lepšej ťažnosti ocele s nízkou pevnosťou sú menej náchylné na vplyv koncentrátorov ako ocele s vysokou pevnosťou [18]. Pre koncentrátory napätia bol zavedený súčiniteľ vrubu  $\beta$ , ktorý nám vyjadruje pomer medzi medzou únavy hladkého telesa  $\sigma_C$  a medzou únavy vrubovaného telesa  $\sigma_{Cn}$  [22], teda

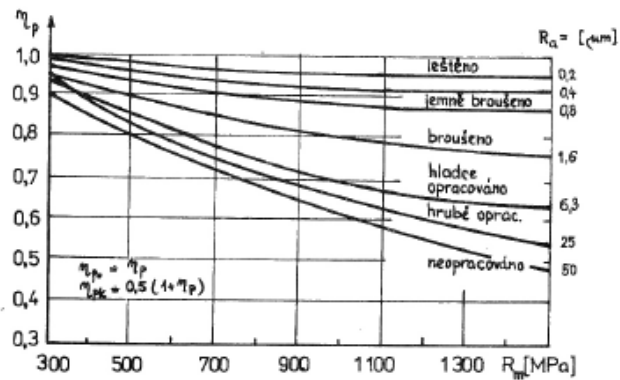
$$\beta = \frac{\sigma_C}{\sigma_{Cn}}. \quad (3.11)$$

### Vplyv akosti kvality povrchu

Jedným z rozhodujúcich faktorov pre vznik únavovej trhliny je kvalita povrchu materiálu na ktorú má vplyv jeho technológia úpravy. Na kvantifikovanie sa používa súčiniteľ akosti povrchu  $\eta_P$ , ktorý vyjadruje pomer medze únavy na vzorke s daným spôsobom opracovania  $\sigma'_C$  a lešteným etalónom  $\sigma_C$

$$\eta_P = \frac{\sigma'_C}{\sigma_C} < 1. \quad (3.12)$$

Nekvalitné spracovanie povrchu má za následok, hlavne u ocelí s vyššou statickou pevnosťou, značný pokles hodnoty súčiniteľa, ale aj pokles celkovej životnosti komponenta. Nielen zle opracovaný povrch znižuje únavovú pevnosť, ale aj korózne prostredie ma negatívny vplyv. Preto je nutné mať namáhané komponenty kvalitne opracované pre zabezpečenie čo najvyššej životnosti. Avšak materiály, ktoré vykazujú nižšiu medzu pevnosti sú menej citlivé na tento vplyv. Taktiež tlakové reziduálne pnutia pomáhajú zvyšovať únavovú pevnosť, a to hlavne u komponentov, ktoré majú veľký gradient napätia [23] [18].



Obr. 3.10: Súčiniteľ akosti povrchu[18]

## Vplyv teploty

Pre uhlíkové a legované ocele je únava relatívne neovplyvnená prevádzkovou teplotou v rozmedzí  $-70^{\circ}\text{C}$  až  $300^{\circ}\text{C}$ . Pri nižších teplotách oceľ zvyšuje svoju ohybovú pevnosť avšak pri teplotách vyšších ako  $400^{\circ}\text{C}$  dochádza k znižovaniu pevnosti ocele [15].

# Kapitola 4

## Výpočtový model

Tvorba výpočtového modelu, jeho pre a post-postprocessing a výpočet napätových polí je vykonaná v softvéri *Abaqus 2019*. V nasledujúcich sekciách je postupne opísaná geometria globálneho modelu, jeho sieť, okrajové podmienky a zaťaženia, definované kontakty, materiálové vlastnosti. Submodel je využitý pre detailne skúmanie napätových a deformačných polí v oblasti vnútornej sady v-drážok tesnenia v návare prírubového prstenca.

### 4.1 Globálny model

Globálny model bol vytvorený pre získanie silových pomerov, ktoré nastanú pri uťahovaní skrutkového spoja. Výsledné posuvy sú interpolované do definovaného zostaveného submodelu.

#### 4.1.1 Popis konštrukcie

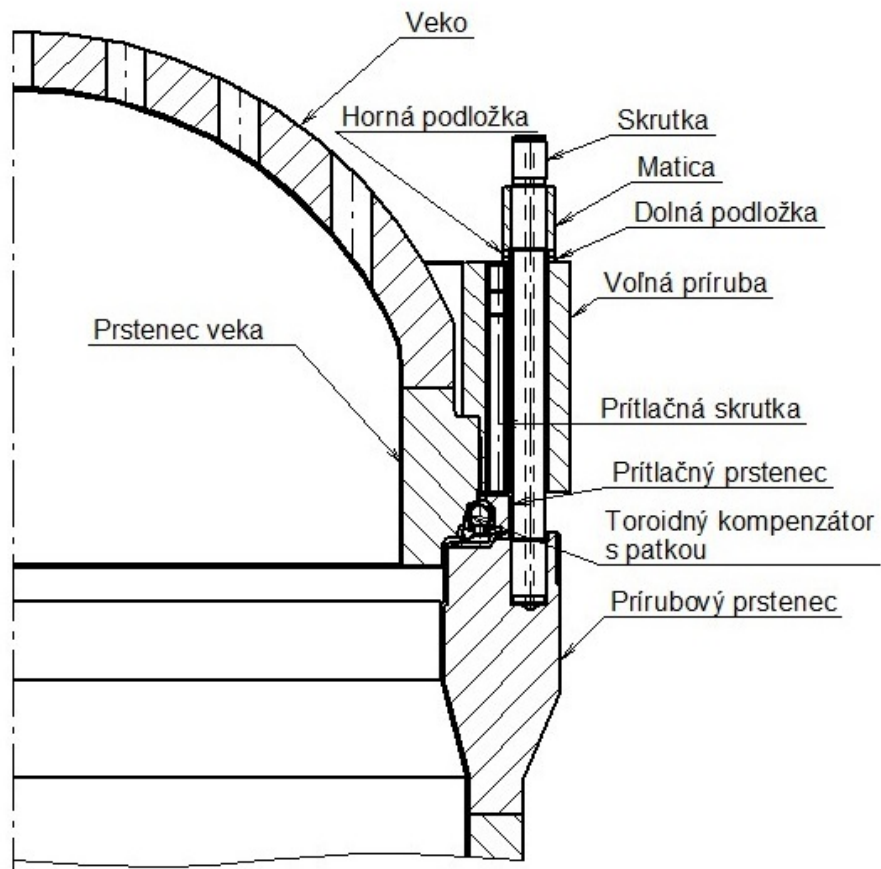
Do skúmanej oblasti tesnenia nádoby reaktora je zahrnutá vrchná časť nádoby, ktorý je zložený komponentov:

- 60 kusov skrutiek M140,
- 60 kusov matíc,
- 60 kusov spodných podložiek,
- 60 kusov horných podložiek,

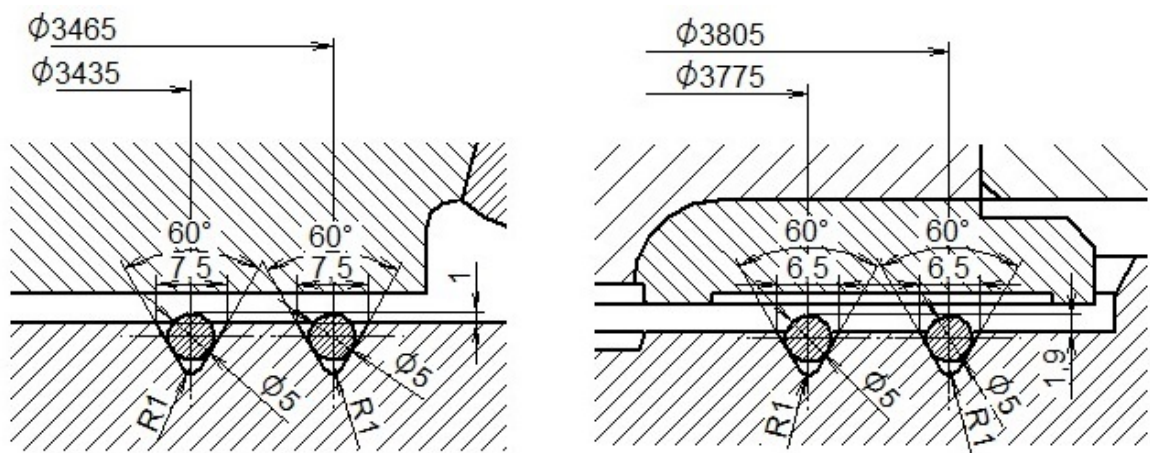
- 60 kusov prítlačných skrutiek vrátane puzdra M85,
- voľná príruha,
- prírubový prstenec
- toroidný kompenzátor s vonkajšou a vnútornou patkou.
- veko reaktora,
- prítlačný prstenec,
- 4 kusy niklového tesnenia.

Vnútorná časť celej tlakovej nádoby reaktora a veka je pokrytá nerezovým návarom. Ten je zložený z dvoch vrstiev, ktoré sú automatickým strojom navarované.

Oblasť tesnenia ma splňať úlohu zabezpečenia tesnosti hlavnej deliacej roviny reaktora pred únikom média do prostredia a následnou stratou tlaku v reaktore. Aby daný požiadavok bol splnený tak musí byť splnený následný silotok. Pomocou skrutiek M140 je uťahovaná voľná príruha a veko tlakovej nádoby. Takto skrutkou generovaný silotok vtláča jednotlivé sady tesnenia do V-drážok návaru prírubového prstenca. Najprv veko vtláča vnútornú sadu tesnení a taktiež pomocou vonkajšej patky toroidného kompenzátora sa sila prenáša aj na vonkajšiu sadu tesnení. Tá je ešte pritlačovaná pritlačovacou skrutkou, ktorá je upevnená vo voľnej príruhe. Pritlačovacia skrutka neposôbi priamo na tesnenie, ale silotok je prenášaný cez prítlačný prstenec a vonkajšiu patku toroidného kompenzátora. Daný silotok zabezpečí potrebnú tesnosť hlavnej deliacej roviny reaktora. Konštrukcia je zobrazená na nasledujúcich obrázkoch Obr. 4.1 a Obr. 4.2.



Obr. 4.1: Konštrukcia hlavnej deliacej roviny

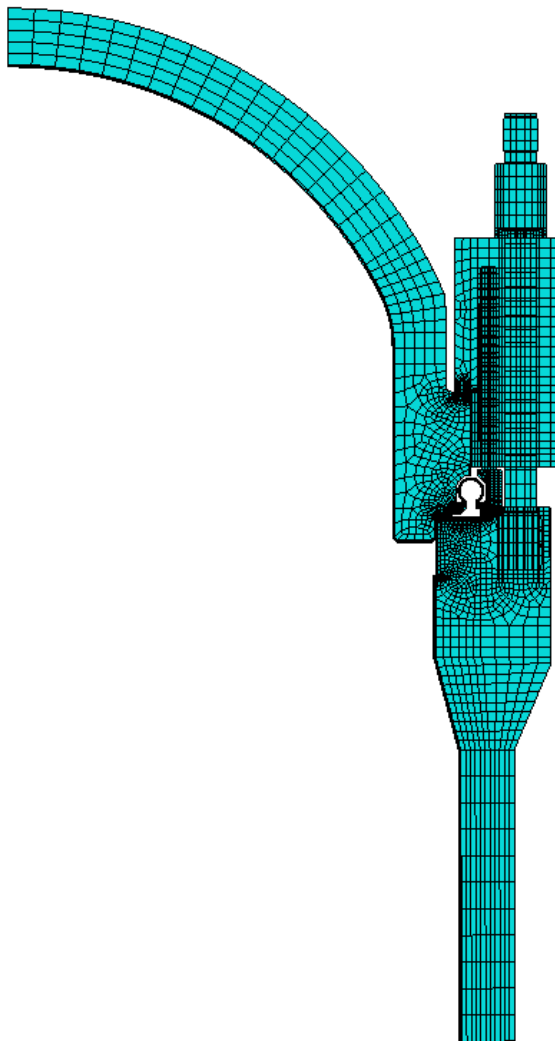


Obr. 4.2: Ľavý obrázok definuje vnútornú sadu tesnenia a pravý obrázok vonkajšiu sadu

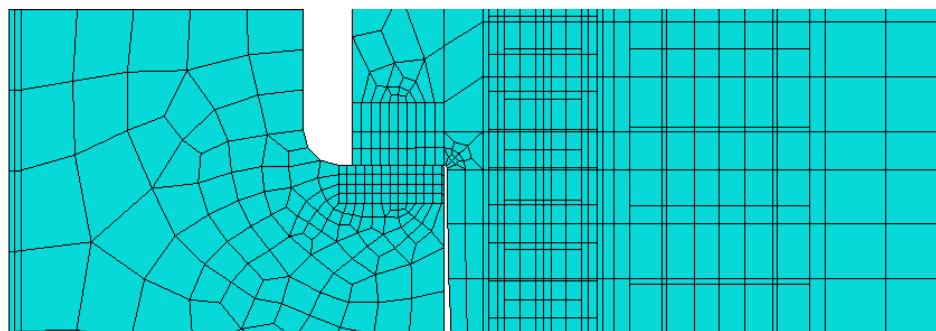
### 4.1.2 Sieť výpočtového modelu

V globálnom modeli sú použité lineárne štvoruhlové rotačne symetrické elementy typu *CAX4R*. Sieť je zobrazená na Obr. 4.3. Detailné zobrazenie siete v oblasti kontaktu veka a voľnej príruby je na Obr. 4.4. V rádiuse nie je jemná sieť z dôvodu nezáujmu riešenie únavového poškodenia v danom mieste. Na Obr. 4.5 je zobrazená kvalita siete v oblasti tesnení a ich drážok.

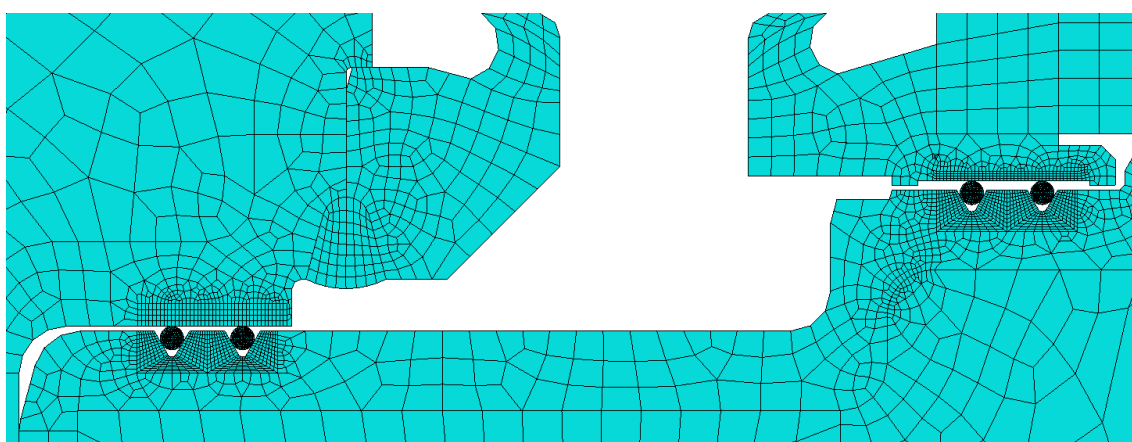
Obr. 4.6 zobrazuje sieť použitú v submodely, ktorý bol vytvorený z dôvodu väčšieho zaťaženia V-drážok v oblasti vnútornej sady tesnení, vid'. Obr. 5.8. Sieť je kvadratická so štvoruhlovými rotačno symetrickými elementami typu *CAX8R*. V oblasti veko-tesnenie-drážky došlo k značnému zhutneniu siete.



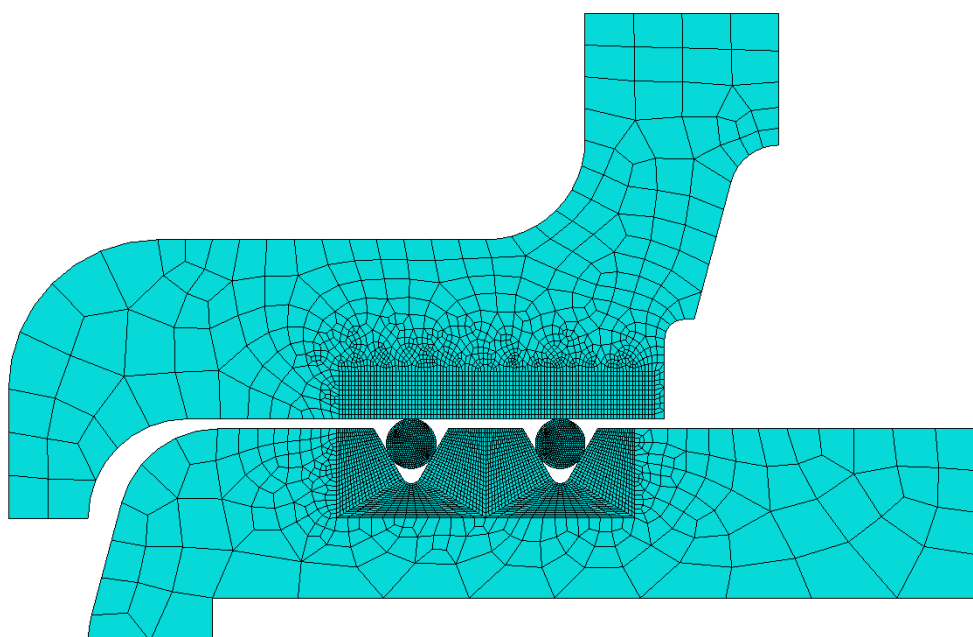
Obr. 4.3: Sieť globálneho modelu



Obr. 4.4: Detail siete v oblasti kontaktu voľnej príruby a veka



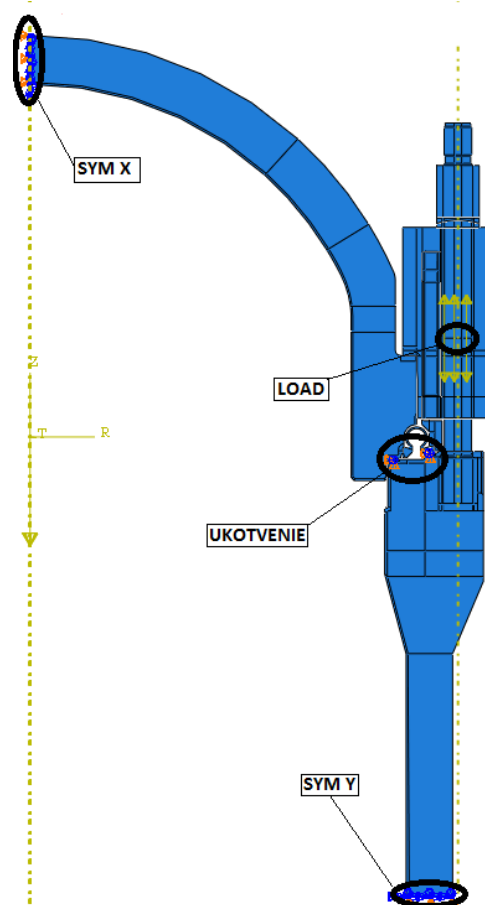
Obr. 4.5: Detail siete v oblasti drážok tesnenia



Obr. 4.6: Sieť submodela (vnútorná sada V-dražok)



### 4.1.3 Okrajové podmienky



Obr. 4.7: Okrajové podmienky

Na Obr.4.7 sú definované okrajové podmienky použité vo výpočtovom modeli. Okrajová podmienka symetrie podľa roviny  $ZT$  ( $SYM X$ ) na vybranej ploche veka definuje nulový posun v smere osi  $R$  a nulové rotácie okolo osi  $R$  a  $Z$ . Následná okrajová podmienka podľa roviny  $RT$  ( $SYM Y$ ) na vybranej ploche príruby má nulový posun v smere osi  $Z$  a rotácie okolo osi  $R$  a  $Z$ . Okrajová podmienka  $UKOTVENIE$  definuje nulové posuvy v smere  $R$ ,  $Z$  a nulovú rotáciu okolo osi  $T$ . Tá je definovaná pre jednotlivé sady tesnení v prípade, ak nie sú vystavené záťažovému cyklu. V globálnom modeli sú naimportované dve dvojsady tesnení (sada je pár tesnení, resp. pár drážok). V submodeli je importovaných 30 sád tesnení. Jedna sada reprezentuje jednu kampaň. Preto pre každú kampaň sú aktivované kontakty medzi danou sadou tesnení, návarom veka a návarom prírubového prstenca.

#### 4.1.4 Zataženie

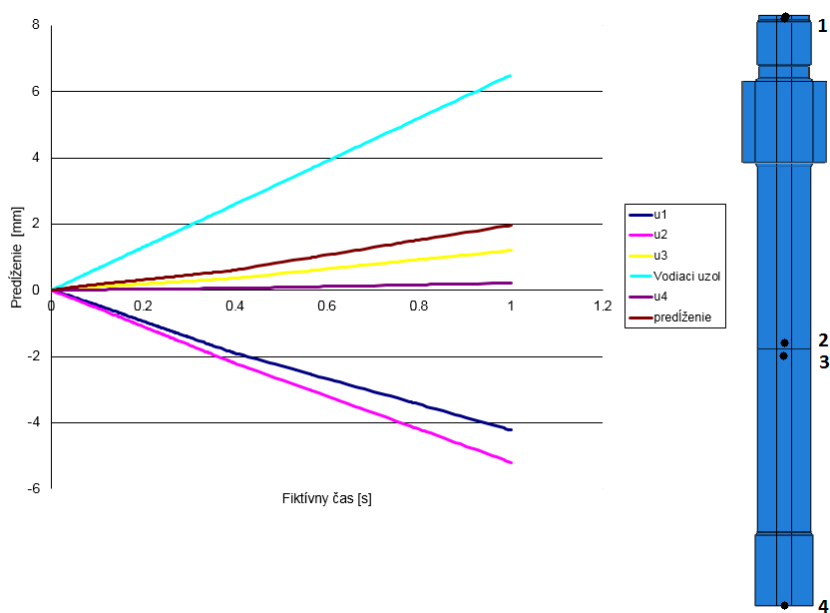
Vyvodenie utiahnutia skrutky je definované v okrajovej podmienke *LOAD*. V skrutke je vybraný rez, v ktorom je využitá funkcia softvéru *Abaqus*, a to *Bolt Load*. Tá ponúka na výber či v skrutke bude vyvodená sila, alebo o akú hodnotu sa má skrutka predĺžiť, prípadne skrútiť. Montážny predpis výrobcu udáva, aby skrutka bola predĺžená o hodnotu  $1,95 \text{ mm}$  pri teplote  $20^\circ\text{C}$  pomocou hydraulického zariadenia. Danej hodnote zodpovedá osové posunutie uzlov v definovanej rovine skrutky o hodnotu  $6,5 \text{ mm}$ . Toto zázajomné osové posunutie v definovanej rovine je dané vzťahom

$$\Delta u = u_2 - u_3. \quad (4.1)$$

Výsledné predĺženie skrutky na  $1,95 \text{ mm}$  definujeme ako

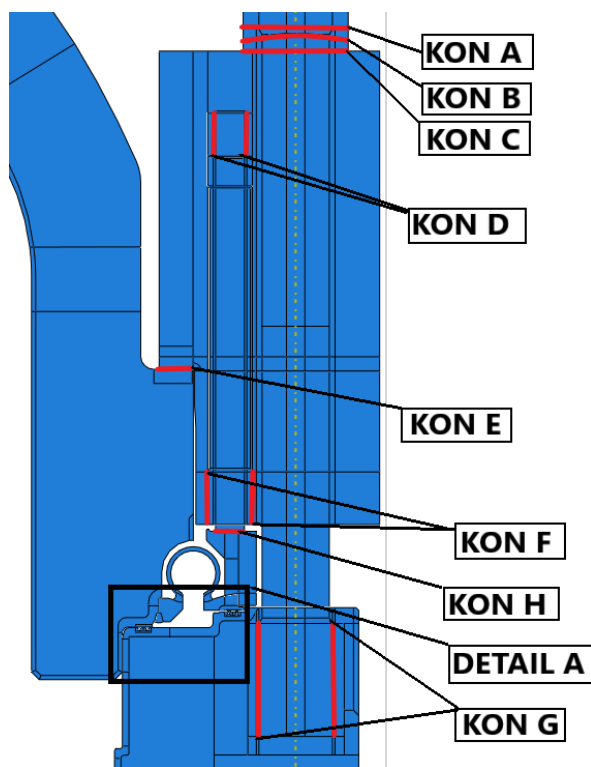
$$\Delta u = |u_4 - u_3| + |u_2 - u_1|, \quad (4.2)$$

kde  $u_1, u_2, u_3, u_4$  reprezentujú posunutie vybraných uzlov na ose skrutky, viď. Obr. 4.8. Vo-  
diaci uzol reprezentuje potrebné skrátenie skrutky o  $6,5 \text{ mm}$  tak, aby došlo k reálnemu predĺženiu skrutky na požadovanú hodnotu  $1,95 \text{ mm}$ . To je na Obr. 4.8 reprezentované krivkou "predĺženie". Skrutka je ťahaná vo fiktívnom čase  $1 \text{ s}$  na požadovanú hodnotu. Keďže sa simuluje cyklická zámerna tesnení, je potrebné uvoľniť skrutkový spoj z požadovanej hodnoty na predĺženie  $0 \text{ mm}$ , čo sa tiež vykoná vo fiktívnom čase  $1 \text{ s}$ . Takáto cyklická výmena sa vykoná 4-krát v globálnom modeli.



Obr. 4.8: Vykreslenie posunutí jednotlivých bodov skrutiek a celkové predĺženie skrutky

#### 4.1.5 Definovanie kontaktných párov a väzieb



Obr. 4.9: Kontaktné páry, globálny model

V modely je použitý typ kontaktu *surface-to-surface* (*s-t-s*). Je to kontaktný algoritmus založený na definovaní dvojice povrchov, ktoré potencionálne môžu byť v kontakte a to v podobe kontaktných párov *master* - *slave*. Preto je potrebné definovať požiadavku nepriestupnosti tak, aby priemerná penetrácia *slave* povrchu do *master* povrchu bola menej ako 0 [8]. Na pevné väzby, ktoré simulujú skrutkový spoj, prípadne zvar je použitá väzba *Tie* a v definovaných plochách viaže všetky stupne voľnosti. *Surface-to-surface* (*s-t-s*) definuje interakciu medzi dvoma plochami. Vlastnosti interakcii sa dajú definovať a v modely boli použité vlastnosti popísané v Tabuľke 4.1.

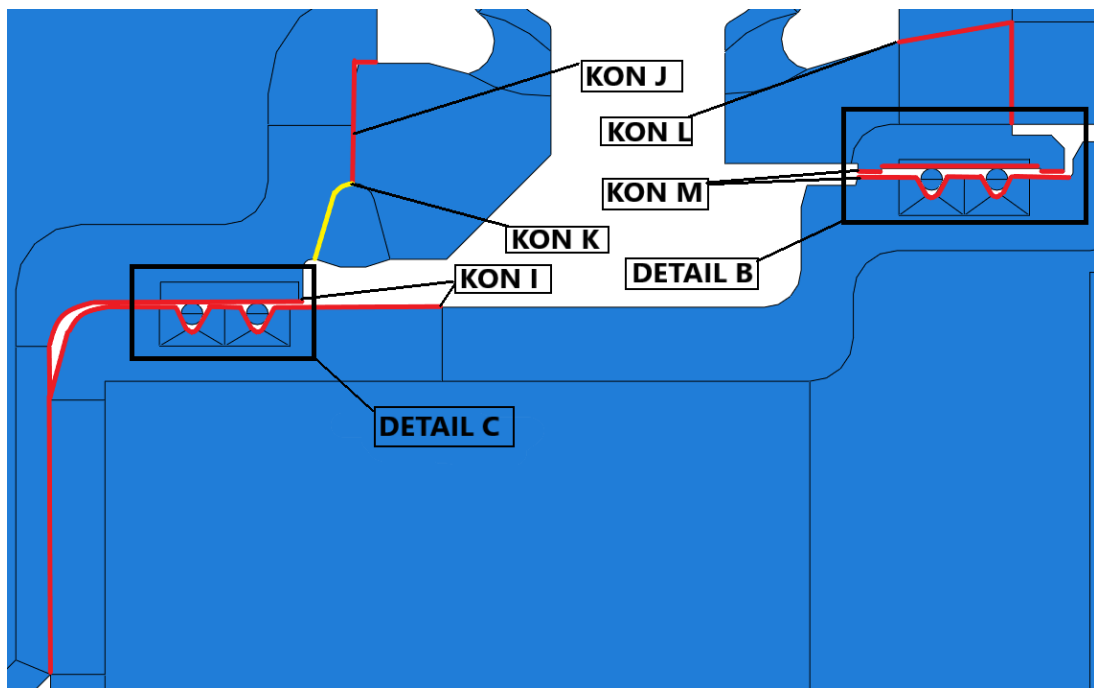
Názov vlastnosti interakcie	Vlastnosť kontaktu
A	- zavedené trenie v tangente smere o hodnote 0,2 - v normálovom smere je definovaný <i>Hard</i> kontakt
B	- zavedené trenie v tangente smere o hodnote 0,1 - v normálovom smere je definovaný <i>Hard</i> kontakt

Tabuľka 4.1: Vlastnosti kontaktov *surface-to-surface*

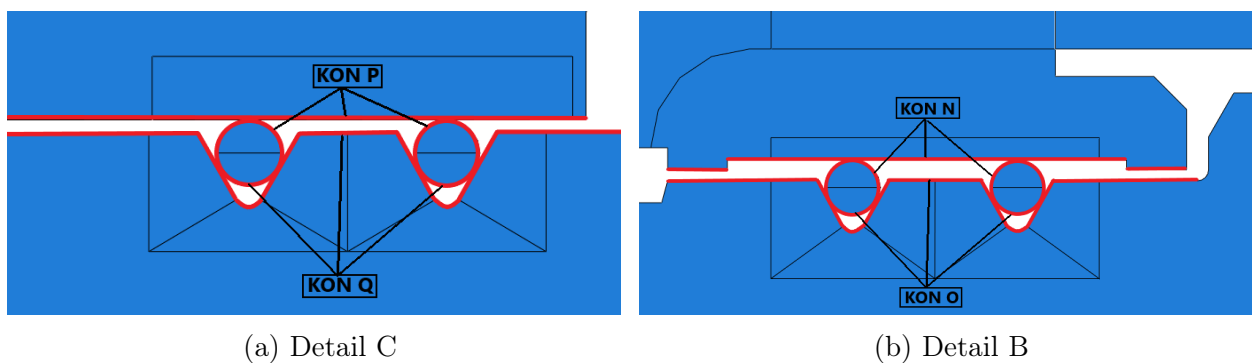
*Hard* kontakt nám zabezpečí prenos akéhokoľvek kontaktného tlaku medzi dvoma plochami. V Tabuľke 4.2 sú popísané jednotlivé kontaktné páry použité vo výpočtovom modely. Ich jednotlivé umiestnenia sú znázornené na Obr. 4.9, Obr. 4.10, Obr. 4.11. V oblasti medzi vonkajšou patkou toroidného kompenzátora a vekom je spojená v spodnej časti zvarom a vrchná oblasť je vo voľnom kontakte. Daný zvar je súčasťou geometrie vonkajšej patky toroidného kompenzátora a preto je *tie* definovaný len pre väzbu medzi zvarom a vekom reaktora.

Názov kontaktu	Kontaktný pár	Typ kontaktu	Názov vlastnosti interakcie
KON A	Matica-Horná podložka	s-t-s	A
KON B	Horná Podložka - Dolná Podložka	s-t-s	A
KON C	Dolná Podložka - Voľná Príruba	s-t-s	A
KON D	Prítlačná skrutka - Puzdro	tie	-
KON E	Voľná príruha - Veko	s-t-s	A
KON F	Puzdro - Voľna príruha	tie	-
KON G	Skrutka M140 - Príruba	tie	-
KON H	Prítlačná skrutka - Prítlačný Prstenec	s-t-s	A
KON I	Veko - Príruba	s-t-s	A
KON J	Veko - Vnútoraná patka	s-t-s	A
KON K	Veko - Zvar	tie	-
KON L	Prítlačný prstenec - Vonkajšia patka	s-t-s	A
KON M	Vonkajšia patka - Príruba	s-t-s	A
KON N	Vonkajšia patka - Vonkajšia sada tesnení	s-t-s	B
KON O	Vonkajšia sada tesnení - Drážky v príruhe	s-t-s	B
KON P	Veko - Vnútoraná sada tesnení	s-t-s	B
KON Q	Vnútoraná sada tesnení - Drážky v príruhe	s-t-s	B

Tabuľka 4.2: Kontaktné väzby



Obr. 4.10: Kontaktné páry, Detail A



(a) Detail C

(b) Detail B

Obr. 4.11: Detaily oblasti tesnení

## 4.2 Fyzikálno-mechanické vlastnosti

Pre výpočty napäťových polí sú použité hodnoty modulu pružnosti v ťahu  $E$  a  $\nu$  uvedené v NTD A.S.I. [5], sekcia II. Elasticko- plastické materiálové vlastnosti boli priradené len niklovému tesneniu a návaru, ktoré sú v skúmanej oblasti. Pre výpočet únavového poškodenia sú použité mechanické vlastnosti z vykonaných meraní v ÚJV Řež, a.s., vid'. Tabuľka 4.4.

Pre zvarové spoje boli použité vlastnosti austenitických ocelí alebo vlastnosti zodpovedajúce základnému materiálu nádoby reaktora.

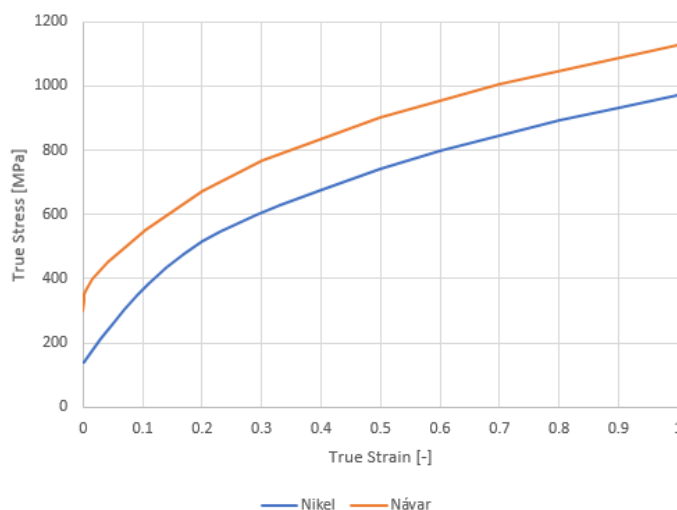
Materiál	T [°C]	E [10 <sup>3</sup> MPa]	$\nu$
Prítlačná skrutka M64, vložka prítlačnej skrutky, matica M140, dolná podložka, vnútorná a vonkajšia patka toroidného kompenzátora 25Ch1MF	20	210	0.3
Základný materiál telesa TNR, zvarový kov TNR, prítlačný prstenec 15Ch2MFA, základný materiál veka 18Ch2MFA	20	210	0.3
Voľná príruha 25Ch3MFA	20	215	0.3
Prítlačná skrutka M64, vložka prítlačnej skrutky, matica M140, podložka dolná, vnútorná a vonkajšia patka toroidného kompenzátora 25Ch1MF	20	215	0.3
Skrutka M140, podložka horná 38ChN3MFA	20	210	0.3
Toroidný kompenzátor 12Ch1MF	20	210	0.3
Tesnenie - Nikel (Ni 99,6)	20	220	0.28
Návar	20	165	0.3

Tabuľka 4.3: Materiálové vlastnosti

Materiál	Teplota [° C]	$R_e$ [MPa]	$R_M$ [MPa]	Z [%]
Návar	20	364	593	52.6

Tabuľka 4.4: Mechanické vlastnosti

Pre návar a niklové tesnenia je použitá experimentálna ťahová krivka poskytnutá ÚJV Řež, a.s.. Pre návar by bola vhodnejšia krivka, ktorá opisuje chovanie pri nízkocyklovom zaťažovaní, takéto dáta neboli dostupné a pre momentálne riešenie je krivka postačujúca. Ako model spevnenia materiálu bolo zvolené kombinované spevnenie.



Obr. 4.12: Ťahové diagramy

### 4.2.1 Modifikácia modulu pružnosti

Keďže model hlavnej deliacej roviny je modelovaný ako axisymetrický 2D model, čo vytvára rotačné symetrické prstence, je potrebné zachovať reálne tuhostné pomery v modeli. To sa dosiahne pomocou zmeny materiálových vlastností z izotropných na anizotropné. Tieto úpravy je potrebné vykonať v nasledujúcich komponentoch: skrutka M140, matica M140, v oboch podložkách, prítlačnej skrutke a jeho puzdre.

Pre ich reálne chovanie je potrebné definovať veľmi nízky modul pružnosti v obvodovom smere,  $E_z \approx 0$ . Aby softvér bol schopný spustiť výpočet, matica tuhosti musí byť plne definovaná, preto je v smere  $E_z$  je zadaná hodnota 1. Modul pružnosti v smere osovom  $E_y$  a radiálnom  $E_x$  je definovaný, tak aby reprezentoval tuhosť všetkých 60 dielov po obvode.

Znižovaním tuhosti neprešli len spomínané komponenty, ale aj jednotlivé otvory v oblasti skrutiek a puzdra skrutky. To bolo vypočítané pomocou uplatnenia pomerov objemov, ktoré je možné matematicky popísať. Pre diery v prírube veka, voľnej prírube, voľnej prírube pre



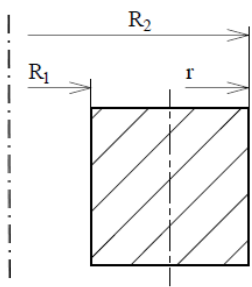
odtlačovaciu skrutku a dieru v puzdre platí

$$\frac{V - V_0}{V} = \frac{R_2^2 - R_1^2 - nr^2}{R_2^2 - R_1^2}, r = \frac{R_2 - R_1}{2}. \quad (4.3)$$

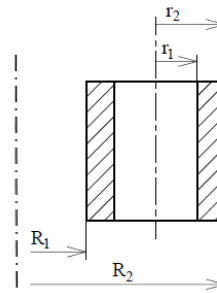
Pre časti ako driek skrutky, skrutka s navlečenou matkou, podložky, odtlačovacia skrutka a puzdro platí

$$\frac{V_0}{V} = \frac{n(r_2^2 - r_1^2)}{R_2^2 - R_1^2}, r_2 = \frac{R_2 - R_1}{2}, \quad (4.4)$$

kde  $n$  v oboch prípadoch prezentuje počet otvorov v danom komponente,  $R_2, R_1$  reprezentujú polomer od osi rotácie nádoby a  $r_2, r_1$  a  $r$  sú polomery od osi daného komponentu. Získané pomery objemov sa následne prenášobia s reálnymi hodnotami modulu pružnosti.



(a) Rovnica (4.3)



(b) Rovnica (4.4)

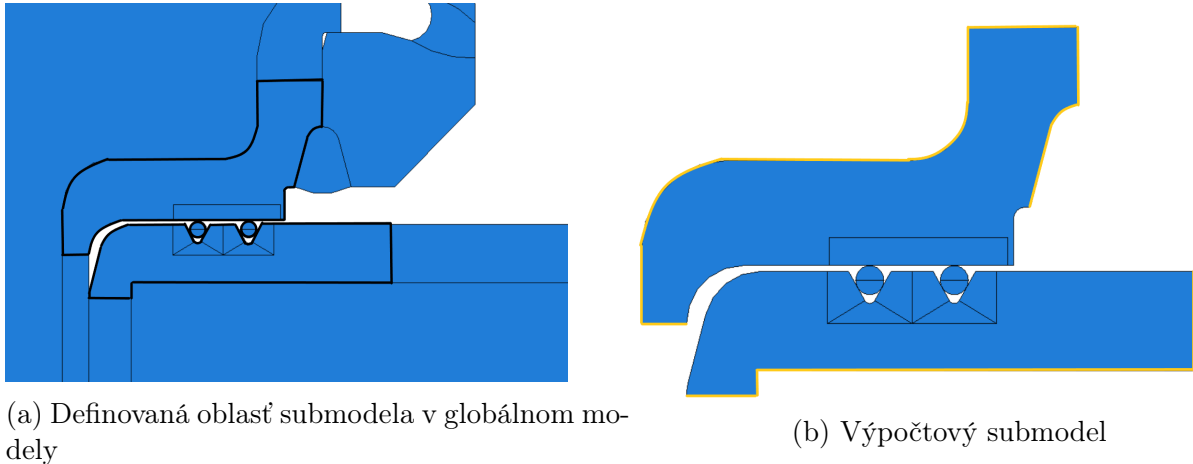
Obr. 4.13: Schématické zobrazenie modifikovaných oblastí

### 4.3 Submodel

Pre dôkladnú štúdiu oblasti tesnenia bol zvolený prístup pomocou submodelu. Ten sa využíva pri detailnejšom skúmaní definovanej oblasti modelu, v ktorom je vygenerovaná jemnejšia sieť pre vyššiu kvalitu výsledkov. Na skúmanej podoblasti sa definujú silové alebo deformačné okrajové podmienky získané z globálneho modelu, kde sa na definovanej oblasti interpolujú výsledky [8]. V použitom submodely je využitá deformačná okrajová podmienka.

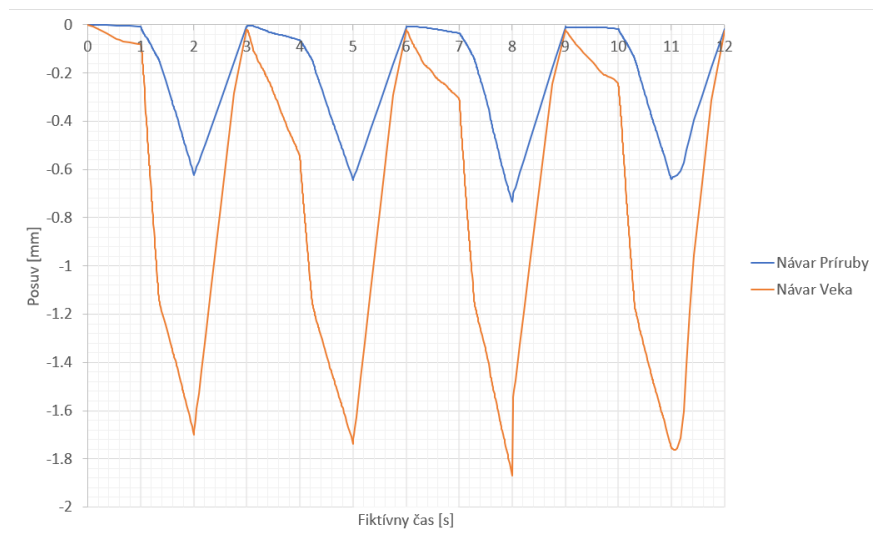
Na Obr. 4.14 je znázornená oblasť submodela. Definovaná oblasť reprezentuje návar na veku a prírubu, kde sú definované elasto-plastické materiálové vlastnosti. Vo vnútornej sade tesnení sú pozorované vyššie koncentrácie plastickej deformácie, čo vedie k vyššej kumulácii poškodenia, viď Obr. 5.8. Preto daná oblasť bude bližšie preskúmaná v nasledujúcej kapitole.

Okrajové podmienky, kde budú interpolované hodnoty z globálneho modelu, boli definované len na žltých čiarach, vid' Obr. 4.14b. Tie predtým boli viazané na zvyšnú časť globálneho modelu.



Obr. 4.14: Umiestnenie vnútorných V-drážok v globálnom modeli a pohľad na submodel

Počet analyzovaných kampaní výmeny tesnenia v globálnom modeli je 4-krát. Na Obr. 4.15 je možné vidieť, že posuvy v globálnom modeli na hraniciach vo vybranej oblasti sú takmer totožné. Toto chovanie je ovplyvnené faktom, že elasto-plastické vlastnosti sú definované len v oblasti návaru nádoby. Zvyšok modelu má definované elastické vlastnosti čo vedie k takmer lineárnemu správaniu modelu. Z grafu je zrejmé, že chovanie je z pohľadu vzájomného posunutia prírub totožné a v nasledujúcich cykloch sa očakáva saturované chovanie materiálu bez nejakých výrazných zmien. Z globálneho modelu sú importované hodnoty zo všetkých štyroch cyklov. Interpolácia hodnôt z globálneho modelu na submodel pre počiatkové štyri cykly je totožná. V submodely sú použité, pre piatu sadu tesnenia a ďalšie sady sú interpolované hodnoty z posledného štvrtého cyklu globálneho modelu. V časoch  $0\text{ s} - 1\text{ s}$ ,  $3\text{ s} - 4\text{ s}$ ,  $6\text{ s} - 7\text{ s}$  a  $9\text{ s} - 10\text{ s}$  je definovaná adjustácia kontaktov pomocou predpísaného predĺženia skrutky. Pre každú adjustáciu je definovaná iná hodnota z dôvodu lepšej konvergenencie, pretože po každej kampani dochádza k plastickému deformovaniu kontaktu, čo vedie k problémom inicializácie kontaktov. Kontaktné páry ostali rovnaké ako v globálnom modeli.



Obr. 4.15: Posuvy návaru veka a prírubby v globálnom modeli

# Kapitola 5

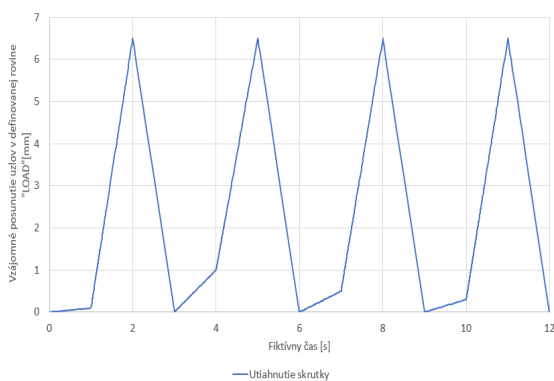
## Výsledky

### 5.1 Elasto-plastický výpočet

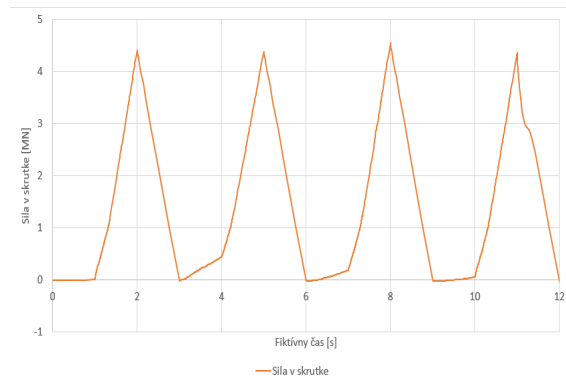
V nasledujúcich podkapitolách sú opísané získané výsledky prv pre globálny model a následne pre submodel.

#### 5.1.1 Globálny model

Pre získanie napäťových a deformačných polí bola skrutka predĺžená o potrebnú hodnotu  $6,5 \text{ mm}$ , viď podkapitola 4.1.4 a Obr. 4.8 . Ako už bolo vyššie spomínané, v globálnom modeli prebehla výmena tesnenia 4-krát, viď. Obr. 5.1a. Zadefinované predĺženie skrutky nám generuje osovú silu v skrutke, ktorá je znázorná na Obr. 5.1b. Priebeh veľkosti sily v skrutke je na Obr. 5.1b, kde maximálna hodnota je približne  $4,2 \text{ MN}$ .

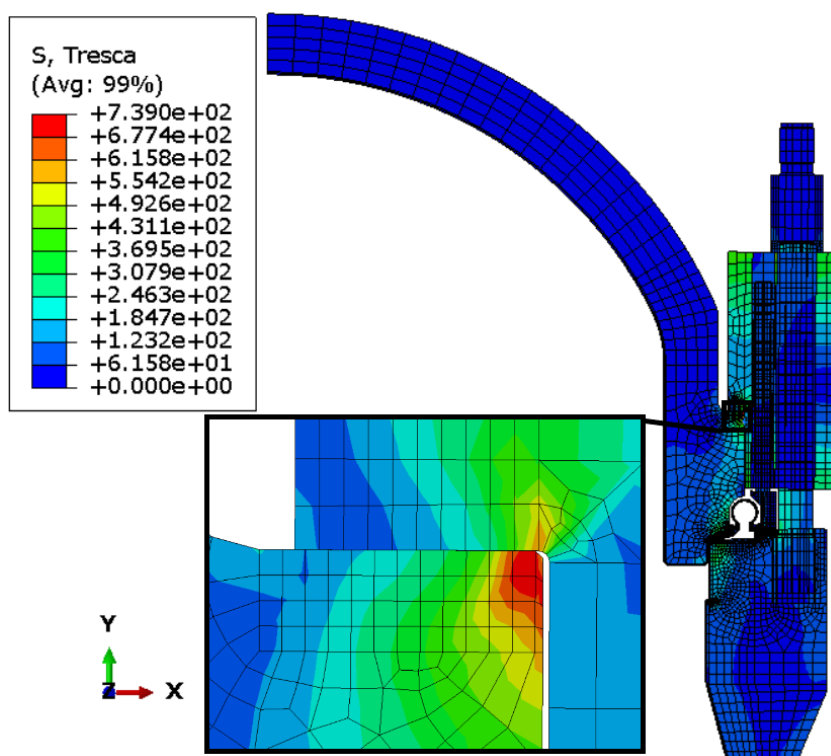


(a) Utiahnutie Skrutky



(b) Sila v skrutke

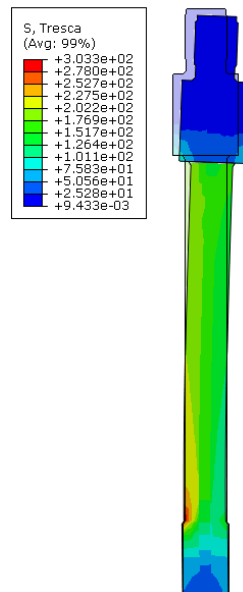
Obr. 5.1: Priebeh sily a utiahnutia v skrutke

Obr. 5.2: Redukované napätia podľa Trescu po utiahnutí v  $MPa$ 

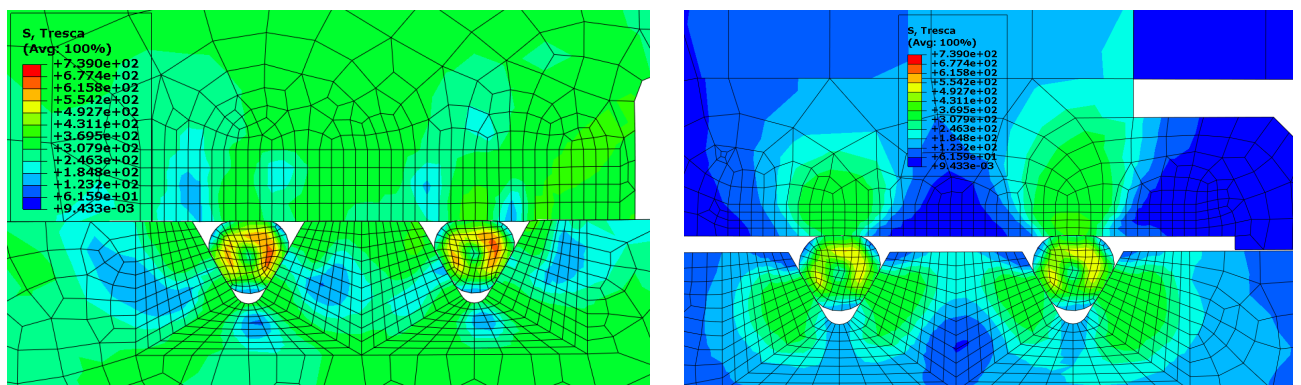
Na Obr. 5.2 je zobrazené redukované napätí podľa Trescu z dôvodu uplatnenia NTD A.S.I. [5], ktorá definuje konzervatívne určovanie redukovaných napätí podľa Trescu. Najväčšie pole napätí sa nachádza v oblasti kontaktu veka s voľnou prírubou. V danom mieste je ostrých tvarový prechod a v kombinácii s nedostatočnou sieťou je výsledkom koncentrácia napätia, ktoré je zobrazené v detailnom zobrazení na Obr. 5.2. Taktiež je možné sledovať na danom obrázku ako skrutka ide do mierneho ohybu pri jej maximálnom predĺžení z dôvodu tuhostných pomerov v modeli, čo je detailnejšie zobrazené na Obr. 5.3, kde daný ohyb je zväčšený 5-krát voči skutočnosti. Obr. 5.4 detailne zobrazuje vzniknuté redukované pole napätí v oblasti vnútornej a vonkajšej sady tesnení. Napätia sa oblasti V-drážok pohybujú v rozmedzí 250 - 300  $MPa$ . Taktiež je možné vidieť ako jednotlivé tesnenia prispôbia svoj tvar jednotlivým drážkam. Vo vnútornej sade tesnení dochádza k úplnému vtlačeniu do V-drážok a k dosadnutiu prírub, čo je zobrazené na Obr. 5.6. Červená vyjadruje úplné "prilepenie" veka na prírubový prstenec a zelená znázorňuje preklzávanie kontaktu v danej oblasti.

Zobrazenie zvyškových napätí je na Obr. 5.5, ktoré sa dosiahnu po uvoľnení skrutkového

spoja. Najväčšie hodnoty sú v oblasti vnútornej vonkajšej V-drážky o hodnote približne 300 *MPa*. Po uvoľnení je postačujúce detailné zobrazenie V-drážok, pretože v danom mieste je definovaná plastická vlastnosť materiálu, ktorá zachytí zvyškové napätia. Keďže pre zvyšné komponenty sú definované elastické vlastnosti materiálu, ich hodnoty napätí po uvoľnení sa vrátia k nulovej hodnote.



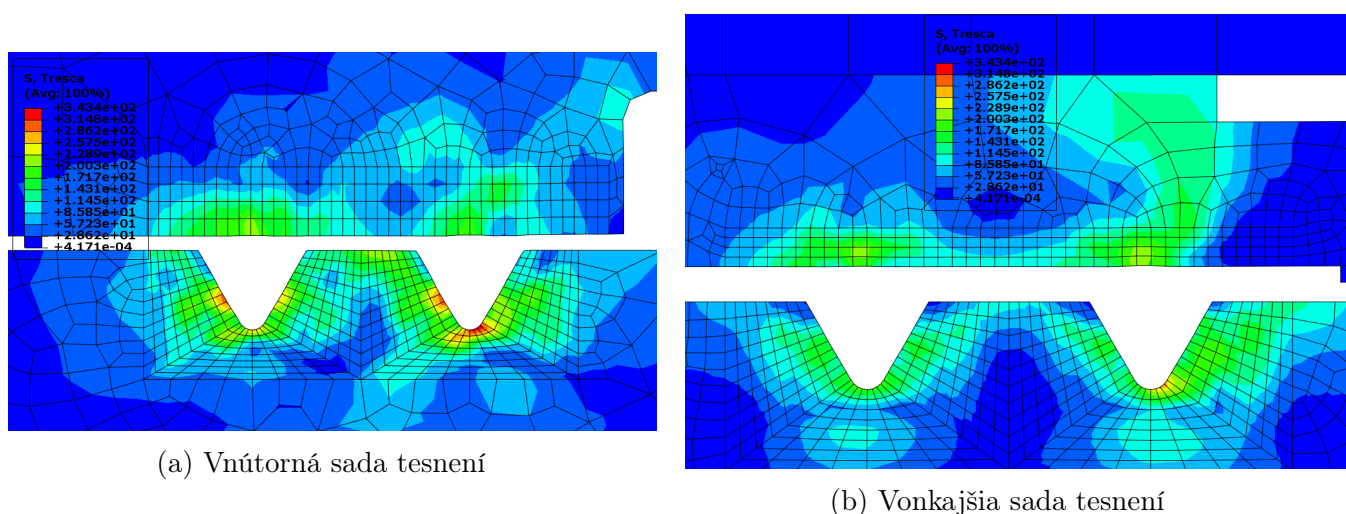
Obr. 5.3: Ohyb skrutky pri jej utiahnutí, zväčšené 5-krát



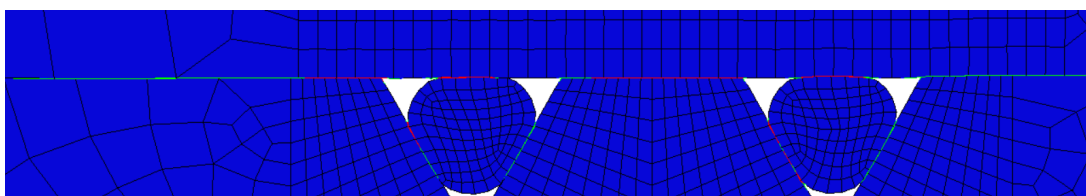
(a) Vnútorná sada tesnení

(b) Vonkajšia sada tesnení

Obr. 5.4: Redukované napätia podľa Trescu po prvom utiahnutí v oblasti tesnení

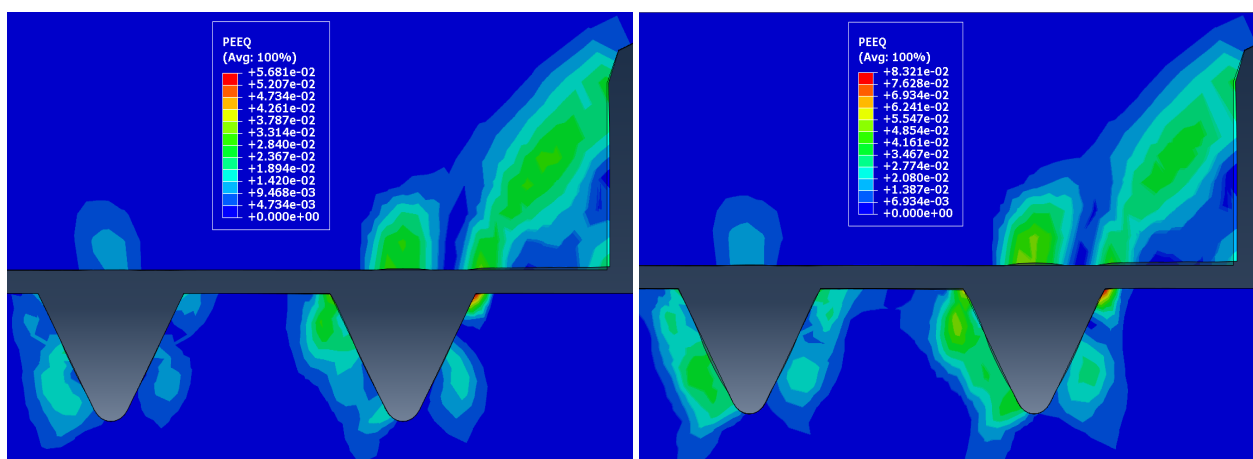


Obr. 5.5: Zbytkové redukované napätia podľa Trescu po prvom uvoľnení v oblasti tesnení

Obr. 5.6: *Contact status*

Na Obr. 5.7 je znázornená ekvivalentná plastická deformácia (PEEQ) vo vnútorných V-drážkach prírubového prstenca po prvom a štvrtom uvoľnení skrutkového spoja. Je možné vidieť akumuláciu plastickej deformácie a zmenu tvaru drážky, kde vznikajú menšie vtlačenia, hlavne na vnútornej vonkajšej V-drážke. Najväčšie hodnoty plastickej deformácie sa pohybujú okolo hodnoty 4%. Taktiež v ostrom prechode vnútornej V-drážky vzniká kontaktná špička plastickej deformácie, ktorá je zapríčinená numerickou chybou. Na návare veka reaktora je viditeľné otláčenie v oblasti tesnenia. Ďalej je viditeľná plastická deformácia v tvarovom prechode v oblasti zvarového spoja medzi vekom a toroidným kompenzátorom, ktorý je na Obr. 5.7 v pravom hornom rohu. Ten vzniká z dôvodu utiahnutia skrutky a následného dosadnutia jednotlivých komponentov.

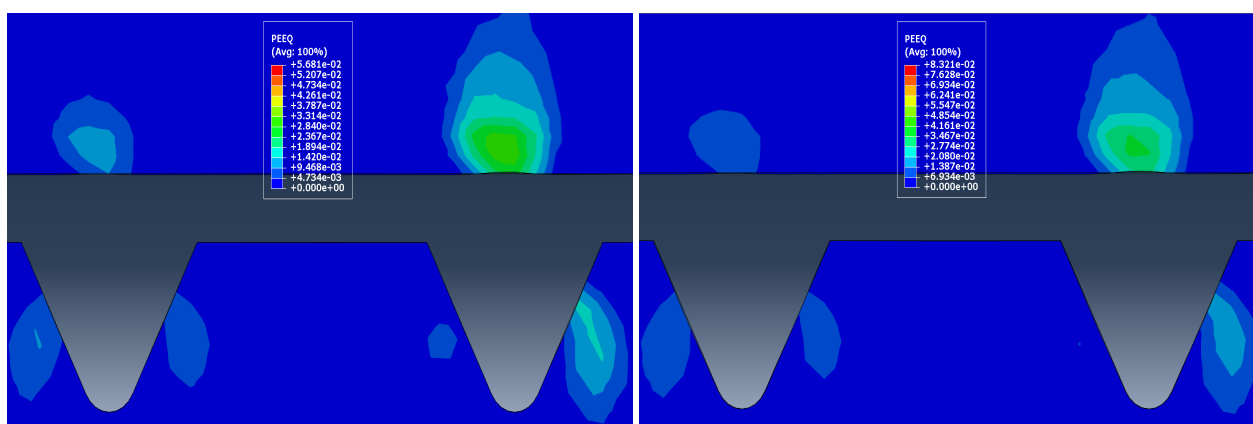
Plastická deformácia vonkajšej sady tesnení je zobrazená na Obr. 5.8. Z uvedených výsledkov je badateľné ich nižšie zaťaženie pri porovnaní s vnútornou sadou tesnenia. Ich hodnota plastickej deformácie je po štyroch kampaniach 2,4%. Plastické deformácie sú zobrazené v ich ekvivalentných skalárnych hodnotách.



(a) Po prvom uvoľnení

(b) Po štvrtom uvoľnení

Obr. 5.7: PEEQ vo vnútornej sade tesnení



(a) Po prvom uvoľnení

(b) Po štvrtom uvoľnení

Obr. 5.8: PEEQ pre vonkajšiu sadu tesnenia

### 5.1.2 Submodel

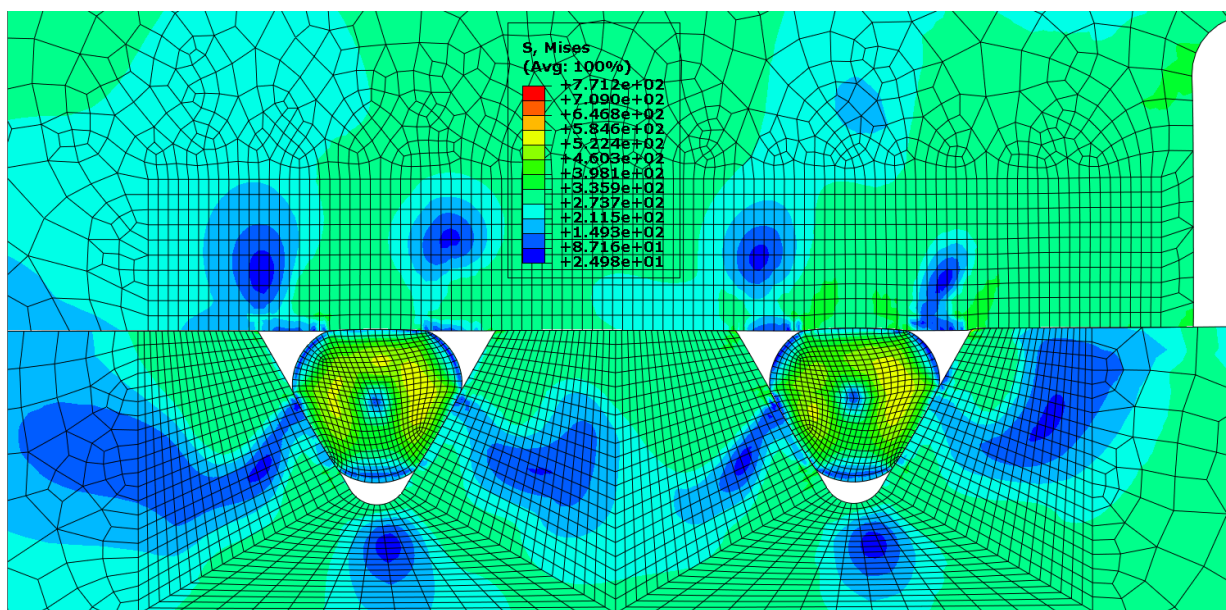
Postup vytvorenia submodela je opísaný v sekcii 4.3. Na hraniciach submodela bola definovaná deformačná okrajová podmienka interpolovaná z globálneho modelu. Na Obr. 5.9 a Obr. 5.10 sú znázornené redukované napätňové polia podľa Trescu po prvom utiahnutí, respektíve uvoľnení. Zjemnenie siete v submodely a následná zmena rádu elementov z lineárnych na kvadratické dopomohla ku kvalitatívne lepším výsledkom.

Pri porovnaní veľkosti napätí v oblasti V-drážok tesnení medzi Obr. 5.4a, Obr. 5.5a a Obr. 5.9 sú pozorovateľné zvýšené napätia. V globálnom modeli pri danom definovaní siete

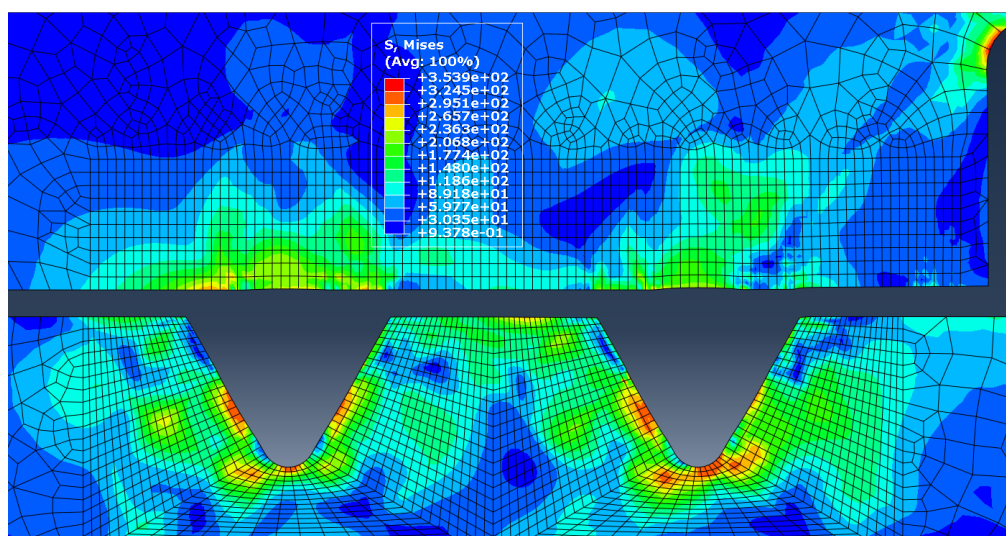


dosahujú napätia v rozmedzí 250 - 300 *MPa*. Pre submodel sa to pohybuje v hodnotách 300 - 350 *MPa*. Nárast redukovaného napätia sa teda pohybuje o 50 *MPa*.

Pri uvoľnení utiahnutia a vrátenia veka do pôvodnej polohy je taktiež badateľný nárast zvyškových napätí v zaťažených oblastiach V-drážok. V globálnom modeli, vid'. Obr. 5.5a sa hodnoty redukovaných napätí pohybujú v hodnotách 150 - 200 *MPa*. Najväčšie zvyškové redukované napätia v oblasti drážok sú o hodnote približne 340 *MPa*. Pri pohľade na zvyškové napätia v submodely, vid'. Obr. 5.10 došlo taktiež ku kvalitatívne lepším výsledkom. Hodnoty zvyškových redukovaných napätí sa taktiež pohybujú o hodnotách 150 - 200 *MPa*, avšak je pozorovateľné zväčšenie, prípadne vznik nových oblasti, kde sa dosahujú najväčšie hodnoty redukovaných napätí v rozmedzí 300 - 340 *MPa*. Najväčšia zmena vo zvyškovom napätí došla v oblasti prechodu patky ku zvaru medzi vekom a vnútornou patkou toroidného kompenzátora, kde sa dosahuje hodnota až 330 *MPa* oproti pôvodným 100 *MPa* v globálnom modeli.



Obr. 5.9: Redukované napätia podľa Trescu po prvom utiahnutí

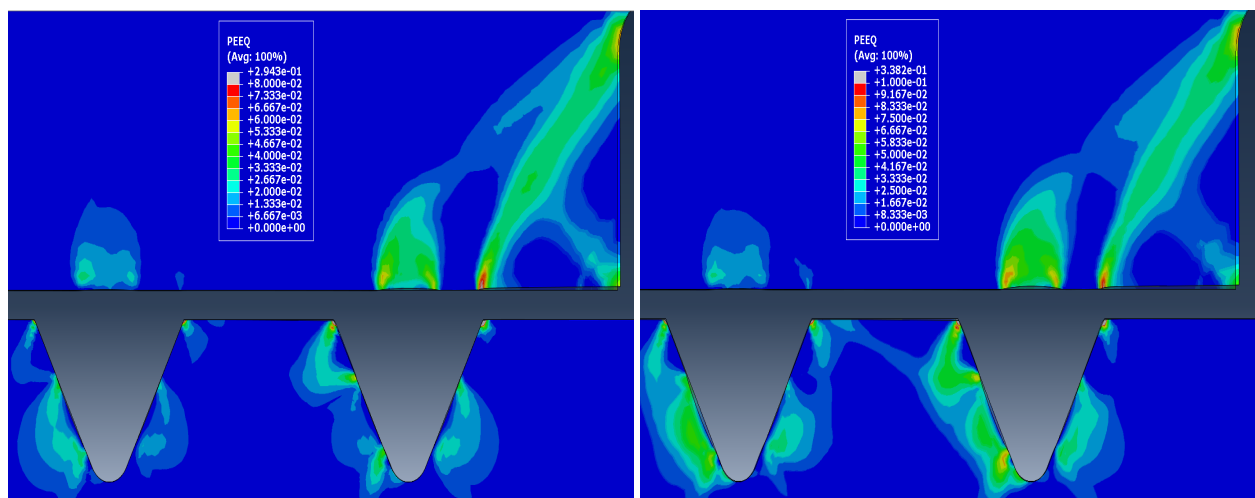


Obr. 5.10: Zvyškové redukované napätia podľa Trescu po prvom uvoľnení

Na Obr. 5.11 je zobrazený rozvoj plastickej deformácie vo vnútornej sade V-drážok po prvom uvoľnení a až po tridsiatom uvoľnení. Po prvom a štvrtom uvoľnení je vidno nárast plastickej deformácie približne o 1% po prvom a štvrtom uvoľnení v porovnaní s výsledkami z globálneho modelu. Taktiež sa objavili špičky plastickej deformácie vo veku a vonkajšej vnútornej V-drážky. V oblasti ostrého prechodu V-drážok vznikajú lokálne špičky deformácií. Tie sú spôsobené ostrou tvarovou zmenou, ktorá je v prípade kontaktu vždy problémová. V skutočnosti sa tam nenachádza ostrý tvarový prechod, ale mierne zaoblenie. Avšak nie sú známe presné rozmery z dôvodu nevykonaného merania zaoblenia v danom mieste. Po tridsiatom uvoľnení je dosiahnutá plastická deformácia o hodnote 8% - 9%. V miestach najväčšej akumulácie plastickej deformácie sa dosahujú hodnoty približne 12%. Ich hodnoty sú ako v globálnom modeli zobrazené v ekvivalentných skalárnych hodnotách.

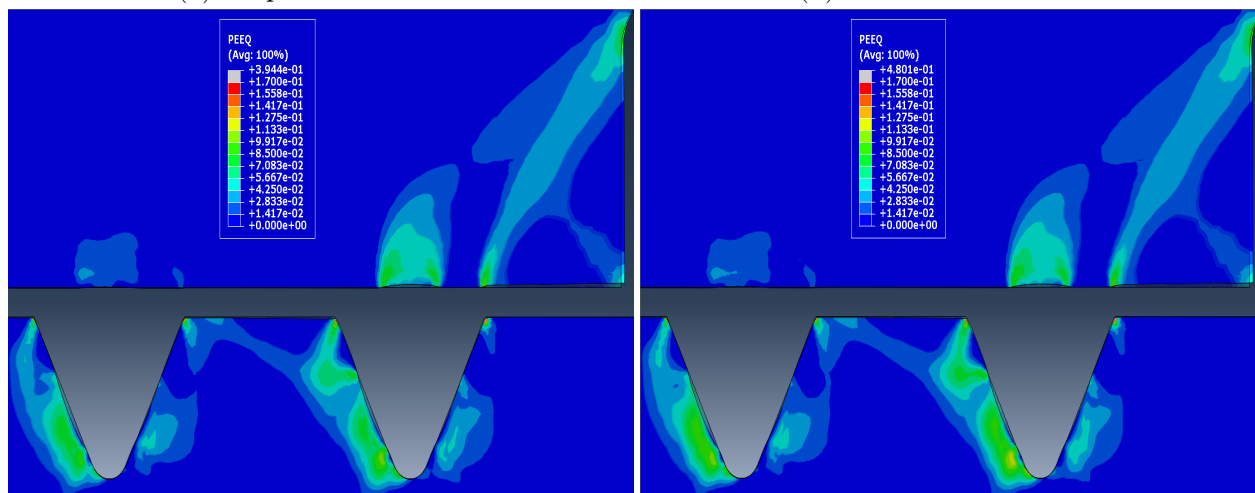
Pre priblíženie rozvoja vzniku plastickej deformácie boli vybrané kritické body, vid' Obr. 5.12. Na Obr. 5.13 je ich vykreslenie priebehu plastickej deformácie v závislosti na výpočtovom čase. Z nich plynie že najväčší prírastok plastickej deformácie je po prvej kampani a zvyšné kampane majú klesajúci trend v prírastku plastickej deformácie. Jedna výpočtová kampaň reprezentuje časový úsek 3 s. V prvej sekunde nastáva nastavenie kontaktov, v druhej sekunde je utiahnutie skrutky, v tretej sekunde je uvoľnenie skrutkového spoja a takýchto kampaní bolo tridsať. V *Bode III* a v *Bode IV* je vidno, že po pár kampaniach nastáva saturácia. *Bod I* a *Bod II* ma počas všetkých kampaní určité prírastky plastickej deformácie.

Dá sa očakávať zo súčasného trendu, že pri ďalších 10-15 kampaniach by nastala saturácia.



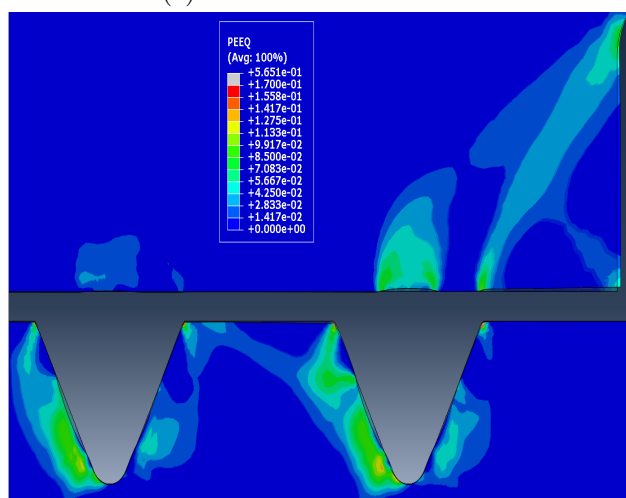
(a) Po prvom uvoľnení

(b) Po štvrtom uvoľnení



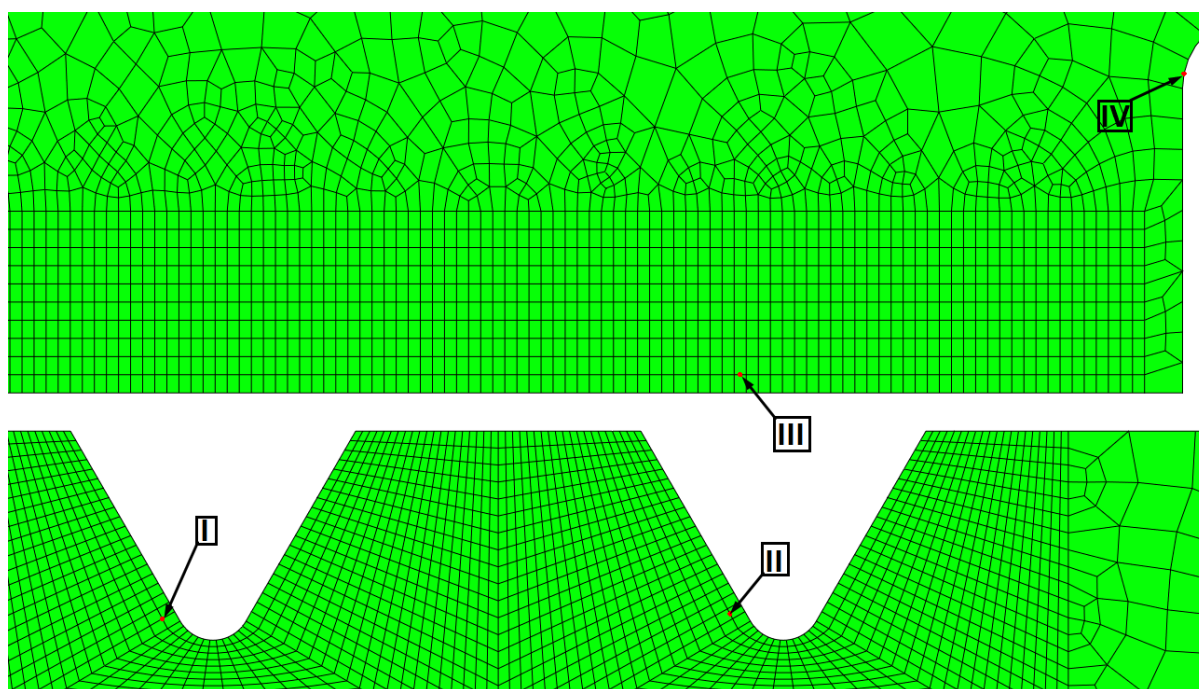
(c) Po desiatom uvoľnení

(d) Po dvadsiatom uvoľnení

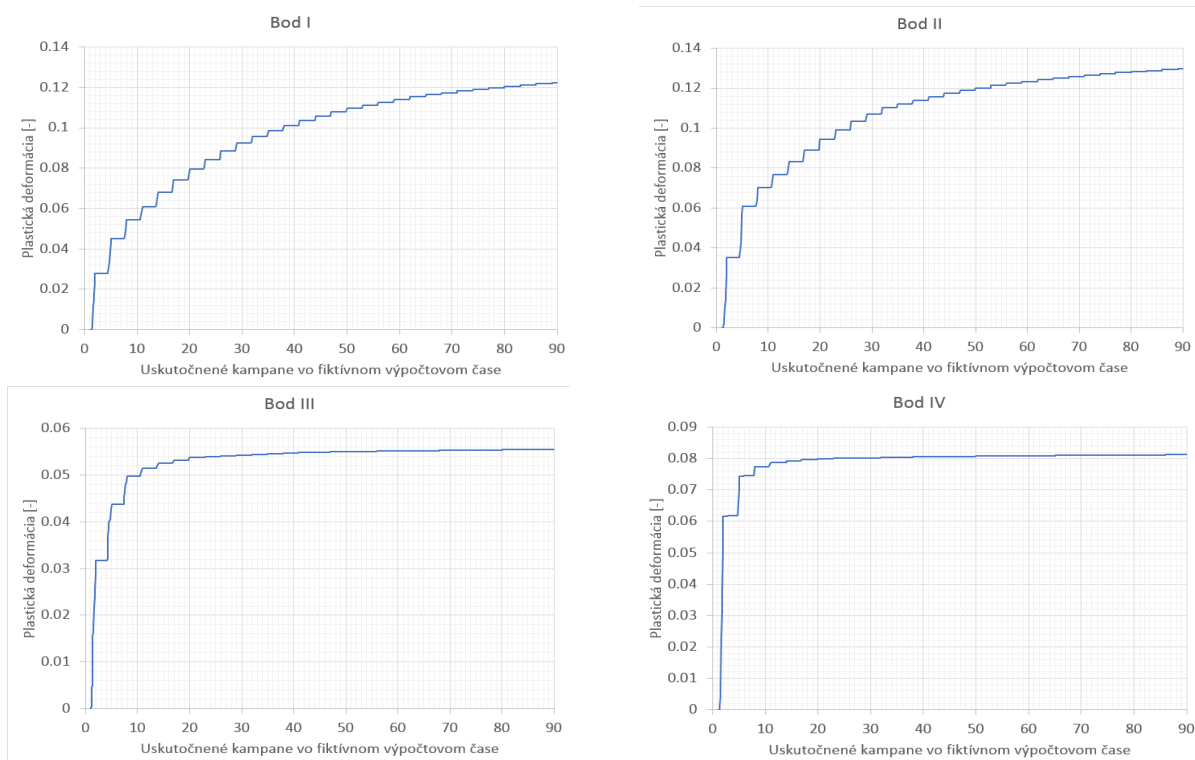


(e) Po tridsiatom uvoľnení

Obr. 5.11: PEEQ v submodely



Obr. 5.12: Miesta vykreslenia rozvoja plastickej deformácie po jednotlivých kampaniach



Obr. 5.13: Rozvoj plastickej deformácie vo vybraných bodoch

## 5.2 Únava drážky tesnenia

Výpočet únavového poškodenia V-drážky tesnenia je vykonaný podľa normy NTD A.S.I., sekcia III [5]. Najprv bolo nutné vypočítať jednotlivé zložky napätia, resp. deformácie v každom časovom okamžiku v programe využívajúcom metódu konečných prvkov, teda v tomto prípade *Abaqus 2019*. Ten nám generuje skutočné napätia, keďže materiálové vlastnosti sú definované ako elasto-plastické. Taktiež program generuje pomerné deformácie zahŕňajúce v sebe elastickú a plastickú zložku.

Následne je nutné určiť jednotlivé hlavné zložky napätia, resp. deformácie. Tie musia spĺňať nasledovnú podmienku:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3,$$

$$\epsilon_1 \geq \epsilon_2 \geq \epsilon_3.$$

Použitý postup je trochu neštandardný. Obvykle sa konečno-prvkový model počíta ako lineárne elastický. To umožňuje uplatnenie superpozície a na čase nezávislé výpočty jednotlivých zaťažovacích stavov. Vplyv plastického chovania v lokálnych koncentrátoroch napätia sa zohľadňuje pomocou fiktívnych napätí podľa postupu uvedeného v NTD A.S.I. [5]. Vzhľadom k značným plastickým deformáciám v oblasti V-drážok, potreby modelovať výmenu tesnenia a taktiež dosadnutie prírub v priebehu ťahovania bolo nutné spraviť elasto-plastický výpočet. Jeho výsledkom sú celkové deformácie, ktoré sa prevedú na fiktívne napätia a tie vstupujú do výpočtu únavového poškodenia podľa uvedenej normy.

Postupnosť fiktívnych napätí sa určí pomocou algoritmu *rainflow*, kde ich rozloží na množinu polocyklov fiktívnych napätí, pre ktoré sa určí ich amplitúda a stredná hodnota.

Následne ju nutné určiť dovolenú amplitúdu fiktívneho napätia alebo počet cyklov:

$$\frac{\sigma_{aF}}{\phi_s} = \frac{Ee_c}{n_\sigma(4[N_o])^m} + \frac{\sigma_{FR}}{n_\sigma[(4[N_o]^{m_e})] + \frac{1+r_\sigma}{1-r_\sigma}}, \quad (5.1)$$

$$\frac{\sigma_{aF}}{\phi_s} = \frac{Ee_c}{(4n_N[N_o])^m} + \frac{\sigma_{FR}}{(4n_N[N_o]^{m_e}) + \frac{1+r_\sigma}{1-r_\sigma}}, \quad (5.2)$$

$$\frac{\sigma_{aF}}{\phi_s} = \frac{Ee_c}{n_\sigma(4[N_o])^m} + \frac{\sigma_c}{n_\sigma[1 + \frac{\sigma_c}{R_m} \frac{1+r_\sigma}{1-r_\sigma}]}, \quad (5.3)$$

$$\frac{\sigma_{aF}}{\phi_s} = \frac{Ee_c}{(4n_N[N_o])^m} + \frac{\sigma_c}{1 + \frac{\sigma_c}{R_m} \frac{1+r_\sigma}{1-r_\sigma}}. \quad (5.4)$$

kde

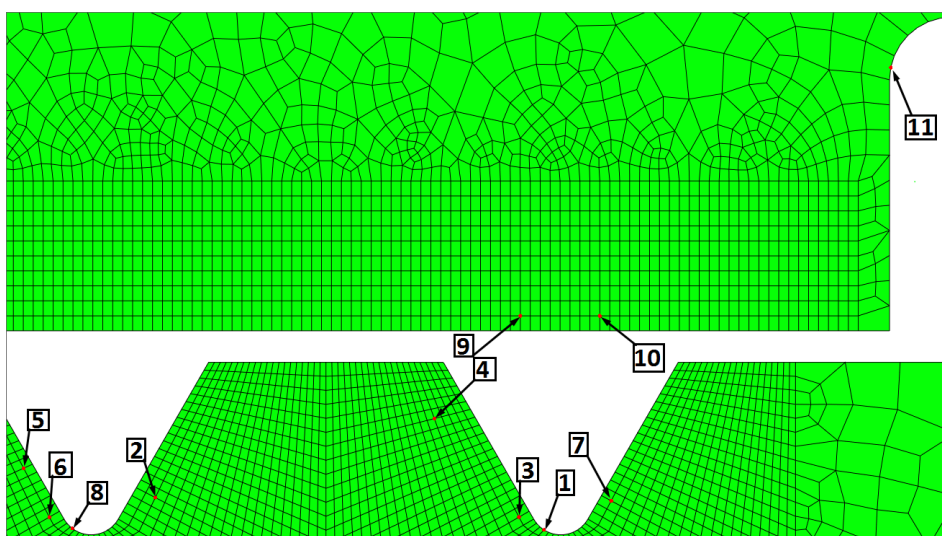
- $\sigma_{FR}$  je lomová pevnosť,
- $e_c$  je charakteristika plasticity závislá na hodnote kontrakcie materiálu  $Z_c$ ,
- $N_o$  vyjadruje počet cyklov, kedy vznikne trhlina o veľkosti 0,5 - 1 mm,
- $m$  a  $m_e$  sú exponenty v rovnici životnosti,
- $n_\sigma$  je súčiniteľ bezpečnosti voči napätiu, resp. deformácii,
- $n_N$  je súčiniteľ bezpečnosti voči počte cyklov,
- $r_\sigma$  súčiniteľ asymetrie cyklu,
- $\phi_s$  je súčiniteľ zníženia únavovej pevnosti.

Vo finálne sa vyberie najmenšia hodnota amplitúdového fiktívneho napätia. Následne je potrebné určiť životnosť zariadenia pri cyklickom namáhaní, ktorá je definovaná pomocou kumulácie poškodenia. Tá ma podmienku:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{[N_0]} \leq [D], \quad (5.5)$$

kde  $k$  je celkový počet cyklov,  $N_i$  počet cyklov  $i$ -tého typu počas prevádzky a  $D$  je kumuláciu únavového poškodenia, kde maximálna hodnota je  $[D] = 1$  [5].

V kritických oblastiach je vybraných 11 bodov, kde je zhodnotená únavové poškodenie, vid' Obr. 5.14 .



Obr. 5.14: Miesta hodnotenia únavového poškodenia

Pri hodnotení boli použité mechanické vlastnosti z podkapitoly 4.2 a Tabuľky 4.4. Jednotlivé súčinitele sú zvolené podľa normy. Súčiniteľ  $n_\sigma$  má hodnotu 2, súčiniteľ  $n_N$  má hodnotu 10 a súčiniteľ  $\phi_s$  je zvolený 0,8.

Číslo bodu	Únavové poškodenie po 30-tich kampaniach
1	2.80
2	1.17
3	2.44
4	1.29
5	1.13
6	1.74
7	1.09
8	2.01
9	1.35
10	1.23
11	1.13

Tabuľka 5.1: Únavové poškodenie vo vybraných bodoch

$\sigma_{aF}$ [MPa]	počet polcyklov	Únavové poškodenie pre danú amplitúdu
431.5	1	0.00278949
559.6	2	0.0130629
562.6	2	0.013275
570.9	2	0.0138719
683.8	2	0.0233118
726.7	2	0.02753
772.8	2	0.0324589
795	2	0.0349804
810.9	2	0.0368453
833.9	2	0.0396237
859.7	2	0.0428582
873.6	2	0.044655
920.8	2	0.0510339
980.7	2	0.0597411
1031.8	2	0.0677079
1050.6	2	0.0707637
1078.2	2	0.0753747
1096.1	2	0.0784421
1100.1	2	0.0791326
1121	2	0.0828175
1131	2	0.0846021
1148.8	2	0.0878253
1155.6	2	0.0890822
1156	2	0.0891503
1159.4	2	0.0897782
1163.3	2	0.0905175
1180.3	2	0.0937059
1186.9	2	0.0949538



$\sigma_{aF}$ [MPa]	počet polcyklov	Únavové poškodenie pre danú amplitúdu
1193.9	2	0.0962992
1196.9	2	0.0968754
31946	1	1

Tabuľka 5.2: Rozvoj  $\sigma_{aF}$  a jej vplyv na únavové poškodenia v bode 1

$\sigma_{aF}$ [MPa]	Počet polcyklov	Únavové poškodenie pre danú amplitúdu
568.3	2	1.29E-02
618.4	2	1.65E-02
621	2	1.67E-02
654.6	2	1.94E-02
673.1	2	2.10E-02
688.1	2	0.0222773
696.5	2	0.023039
704.4	2	0.0237619
711.4	2	0.0244145
717.4	2	0.0249806
721.7	1	0.0126945
722.5	2	0.0254633
727.4	2	0.0259349
731.9	2	0.0263685
736.1	2	0.0267784
738.9	2	0.0270481
741	2	0.0272609
743.3	2	0.027493
745.2	2	0.0276776
749.1	2	0.0280655
751	2	0.0282609

$\sigma_{aF}$ [MPa]	Počet polcyklov	Únavové poškodenie pre danú amplitúdu
751.2	2	0.0282753
752.3	2	0.0283926
752.9	2	0.0284481
754.9	2	0.0286491
757	2	0.028863
757.5	2	0.0289215
757.7	2	0.0289386
758.6	2	0.0290272
759.5	2	0.02912
30988.4	1	1

Tabuľka 5.3: Rozvoj  $\sigma_{aF}$  a jej vplyv na únavové poškodenia v bode 6

V Tabuľke 5.1 je vypísaná kumulácia únavového poškodenia vo vybraných bodoch. Vo všetkých bodoch je prekročená maximálna hodnota kumulácie poškodenia, teda dané body nespĺňajú definovanú hodnotu. Najvyššia hodnota únavového poškodenia je v bode 3 o hodnote 2,8.

V Tabuľke 5.2 sú vypísané hodnoty  $\sigma_{aF}$ , ich počet polcyklov a príspevok do kumulácie únavového poškodenia. Je badateľný jeden dominantný polcyklus o hodnote 31946 MPa, ktorý prekračuje dovolenú maximálnu hodnotu kumulácie únavového poškodenia. Zvyšné polcykly majú menšiu kumuláciu pre dané amplitúdy, ale stále ich súčet prekračuje dovolenú maximálnu hodnotu.

V Tabuľke 5.3 je obdobná ako spomínaná tabuľka vyššie, avšak pre bod 6. Opäť je viditeľný jeden dominantný polcyklus, ktorý má značný vplyv na únavové poškodenie. Zvyšné amplitúdy majú menší príspevok do únavového poškodenia a v súčte neprekračujú maximálnu hodnotu únavového poškodenia. Rozprava týchto výsledkov je v nasledujúcej podkapitole *Diskusia výsledkov*. Na Obr. 5.13 v kapitole 4.3 sú uvedené priebehy kumulácie plastickej deformácie v bodoch, v ktorých bola vysoká miera plastickej deformácie. Pretože z výsledkov únavového poškodenia má najvyššiu hodnotu bod 3, pre ktorý nie je vykreslený graf plastickej deformácie závislosti na kampaniach je tento graf uvedený v Prílohe.

## 5.3 Diskusia výsledkov

Pri riešení únavového poškodenia V-drážok hlavnej deliacej roviny tlakovej nádoby reaktora je vytvorený 2D axisymetrický model. Pomocou tohto modelu sú analyzované tuhostné pomery v modeli, z ktorého sú následne využité výsledky v submodeli (vnútorná sada drážok). Do submodelu bola importovaná deformačná okrajová podmienka na definovaných oblastiach. Keďže z dôvodu robustnosti výpočtu (vstupuje mnoho nelinearit) sú v globálnom modeli zvolené lineárne axisymetrické štvoruhlové elementy. Pre využitie deformačnej okrajovej podmienky je to postačujúce, keďže je len potrebné zistenie posuvov na definovanej oblasti. V submodeli bol zvýšený rád elementov na kvadratické axisymetrické štvoruhlové elementy. To spolu so zjemnením siete umožňuje odhalenie špičiek plastickej deformácie, ktoré značne pomáhajú zistiť stav únavového poškodenia.

V podkapitole 4.3 sú zobrazené jednotlivé výsledky pre redukované napätia podľa Trescu a plastické ekvivalentné deformácie. Na jednotlivých obrázkoch je zreteľne vidno ako sa jednotlivými kampaňami rozvíja oblasť plastickej deformácie. V štyroch bodoch je na grafoch zobrazená závislosť plastickej deformácie voči uskutočneným kampaňam vo fiktívnom výpočtovom čase. V nich je vidno značný vplyv prvej kampane na veľkosť plastickej deformácie. V *Bode III* a *IV* je viditeľné ako po pár kampaňach nastáva saturácia. Vo zvyšných dvoch bodoch nenastala saturácia ani po tridsiatich kampaňach. Avšak trend kriviek nasvedčuje saturáciu v najbližších 10-15 kampaňach.

Na únavové poškodenie bolo vybraných 11 bodov, viď. podkapitola 5.2. V každom jednom bode vzniká veľká kumulácia únavového poškodeniam, ktorá presahuje dovolenú maximálnu hodnotu. V príslušných tabuľkách je vypísaný rozvoj  $\sigma_{aF}$ , počet polcyklov a zodpovedajúca veľkosť poškodenia. Je jasne vidieť značný vplyv jedného polcyklu na finálnu hodnotu únavového poškodenia. Z toho plynie nutnosť podrobnejšieho preskúmania danej oblasti na vplyv tohto polcyklu. Teda je potrebné, či daná zložka má reálny vplyv na finálne únavové poškodenie, aby v prípade ďalšieho hodnotenia s ňou uvažovalo alebo prípadne bola zanedbaná. V každom prípade je potrebné danej oblasti venovať zvýšenú pozornosť kvôli vysokému riziku vzniku trhliny v danej oblasti, napr. vykonávanie nedeštruktívnych kontrol.

Hodnotenie únavového poškodenia bolo vykonané podľa normy NTD A.S.I., ktorá má využiteľnosť v prípade lineárnych výpočtov. Pre hodnotenie bol použitý neštandardný prístup a taktiež norma definuje vysoké koeficienty bezpečnosti, čo vedie ku konzervatívnejším

výsledkom. Bolo by vhodné vykonať detailný rozbor normy pre prípad elasto-plastických výpočtov a jej využiteľnosť pre tento druh hodnotenia. Táto problematika je nad rámec diplomovej práce preto nie je viac rozvedená.

Výsledky únavového poškodenia nám potvrdzujú nedostatočne posúdený úsudok, ktorý bol nesprávne posúdený prípadovou štúdiou. V nej sa skúmala najviac splastizovaná oblasť v ktorej by bolo kumulované únavové poškodenie. Z toho plynie, že nebol vykonaný postačujúci počet cyklov, ktorý by odhalil vznik špičky plastickej deformácie v rádiuse, tá začne pomaly vznikať približne po 20 kampani.

Výsledky daného výpočtového modelu je možné porovnať, ale aj vylepšiť. Napríklad pre overenie výpočtu plastickej deformácie V-drážky by bolo vhodné porovnať výsledky s experimentálnymi dátami, prípadne s dátami z elektrárne, ktorá je v prevádzke približne 30 rokov. Pre materiálové vlastnosti návaru by bolo vhodné zabezpečiť ťahovú krivku z cyklickej deformácie, ktorá by reálnejšie odzrkadľovala chovanie materiálu pri nízkocyklovom namáhaní. Vo výpočtovom modeli by sa mohol použiť sofistikovanejší model plasticity ako *Chaboche*, čo by pozitívne ovplyvnilo reálnosť dosiahnutých výsledkov. Pre overenie úsudku, ktorý bol využitý pri exportovaní deformačnej podmienky z globálneho modelu na submodel by bolo vhodnejšie vykonať väčší počet kampaní v globálnom modeli, aspoň 10. Taktiež je viditeľné vo vybraných bodoch, že nedošlo k saturácii, teda je potrebné vykonať vyšší počet kampaní, aspoň 60. V tejto diplomovej práci bolo zanedbané únavové poškodenie vo vonkajšej sade V-drážok z dôvodu väčšieho zaťaženia vnútornej sady V-drážok. Tie by bolo vhodné podrobiť detailnému preskúmaniu z dôvodu zaistenia bezpečnej prevádzky. Taktiež by bolo zaujímavé preskúmať aký má vplyv na celkovú hodnotu únavového poškodenia vo V-drážkach opätovné nahrievanie tlakovej nádoby na prevádzkovú teplotu a jej ochladenie na 20°C.

## Záver

V tejto diplomovej práci je riešený problém únavového poškodenia V-drážok hlavnej deliacej roviny tlakovej nádoby reaktora. V prvej kapitole je stručne opísaná problematika a jej doterajšie riešenia. Taktiež je stručne opísaný reaktor VVER-440. V ďalších dvoch kapitolách sa definujú základne poznatky z teórie plasticity, únavy a definujú sa ciele diplomovej práce. V štvrtej kapitole je opísaný výpočtový model, ktorý je generovaný v konečno-prvkovom softvéri *Abaqus 2019*.

Výpočtová analýza sa skladá z dvoch častí. Najprv boli vypočítané silové a tuhostné pomery v globálnom modeli a následne pomocou deformačnej okrajovej podmienky boli interpolované výsledky na definované krivky submodelu - vnútorná sada V-drážok. Ten je využitý z dôvodu detailného skúmania plastických deformácií, ktoré nastanú po vtlačení niklových tesnení.

V kapitole Výsledky sú zhodnotené dáta pre globálny model a submodel. K submodelu sa pristúpilo z dôvodu detailného skúmania vnútorných V-drážok, ktoré sú vystavené oveľa väčším plastickým deformáciám než vonkajšie V-drážky. Zjemnenie siete a zvýšenie rádu presnosti elementov zvýšilo kvalitu výsledkov. V rámci napätí po prvom utiahnutí nastal nárast o cca 50 MPa, vid'. Obr.5.4a a Obr. 5.9. Po uvoľnení veľkosť zvyškových redukovaných napätí ostala takmer rovnaká, avšak došlo k zväčšeniu plochy, kde sa dosahujú maximá, ale taktiež vznikli aj nové miesta s vysokými hodnotami, vid'. Obr. 5.5a a Obr. 5.10. Pri porovnaní plastických ekvivalentných deformácií na Obr. 5.7 a Obr. 5.11 došlo ku kvalitatívne lepším výsledkom v submodeli. Po štvrtom uvoľnení je ekvivalentná plastická deformácia v submodeli približne o 1% vyššia ako v globálnom modeli. Po tridsiatom uvoľnení v kritických miestach je dosiahnutá plastická ekvivalentná deformácia približne 12%.

Na hodnotenie únavového poškodenia bola použitá norma NTD A.S.I. [5]. Bolo vybraných 11 bodov na hodnotenie únavového poškodenia, vid. Obr. 5.14. V Tabuľke 5.1 sú uvedené

výsledky kumulovaného poškodenia po tridsiatich cykloch. Vo všetkých bodoch je presiahnutá maximálna dovolená hodnota kumulovaného poškodenia 1, a teda v danej oblasti je vysoká pravdepodobnosť vzniku trhliny. V *Diskusii výsledkov* sú bližšie zhodnotené výsledky a ďalšie možné práce pre skvalitnenie výsledkov.

# Literatúra

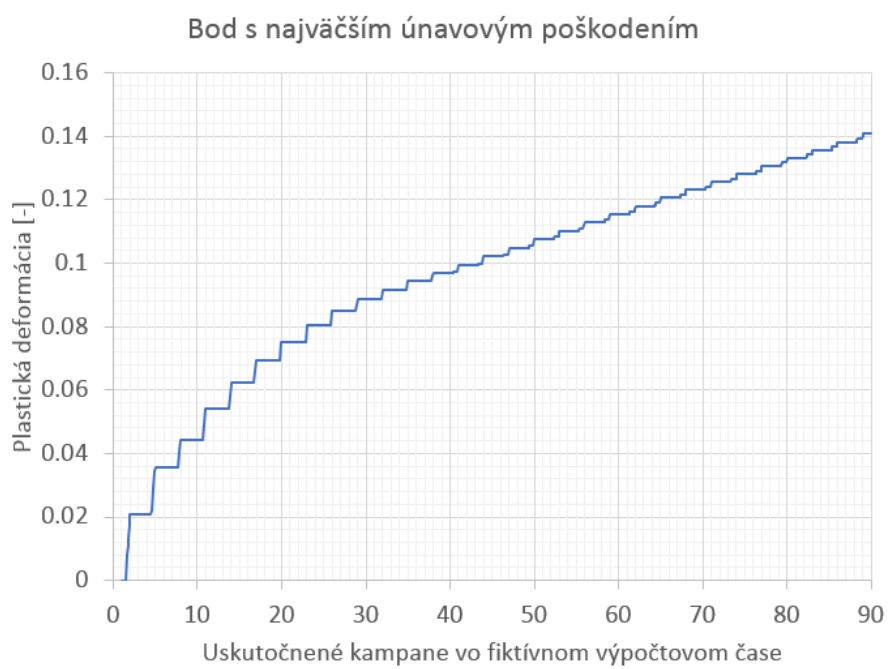
- [1] *Strength of materials II-Fatigue failure [online]*. Dostupné na:  
[www.old.umt.fme.vutbr.cz/jbursa/Backgrounds/2-3A-lecture-fatigue.pdf](http://www.old.umt.fme.vutbr.cz/jbursa/Backgrounds/2-3A-lecture-fatigue.pdf),  
stav z 5. 7. 2019.
- [2] *Vlastnosti a zkoušení materiálu, Přednáška č.8 – Únava materiálu [online]*. Dostupné  
na: [www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/VZM8\\_UnavaMaterialu.pdf](http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/VZM8_UnavaMaterialu.pdf),  
stav z 2. 8. 2019.
- [3] *VVER - Specific features regarding core degradation [online]*. OECD, Paříž, 1998, Do-  
stupné na: [www.oecd-nea.org/nsd/docs/1998/csni-r98-20.pdf](http://www.oecd-nea.org/nsd/docs/1998/csni-r98-20.pdf), stav z 5. 7. 2019.
- [4] *Water Chemistry of WWER Nuclear Power Plants [online]*. IAEA, Vienna, 2008,  
Dostupné na:  
[http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/VHJAE\\_podklady\\_iaea-  
ner\\_10march08\\_water\\_chemistry\\_of\\_wwer.pdf](http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/VHJAE_podklady_iaea-ner_10march08_water_chemistry_of_wwer.pdf), stav z 2. 8. 2019.
- [5] *NORMATIVNĚ TECHNICKÁ DOKUMENTACE A.S.I.*, Asociace strojních inženýrů,  
Praha, 2017.
- [6] Chakrabarty, J.: *Applied Plasticity Second Edition*. Springer, 2010.
- [7] Chen, W.F., Han, D.H.: *Plasticity for Structural Engineers*. Springer-Verlag, New York,  
1988.
- [8] Dassault Systemes Simulia Corporation: *Abaqus Documentation v.2019*.
- [9] de Souza Neto, E.A., Perić, D., Owen, D.R.J: *Computational Methods for Plasticity: The-  
ory and Applications*. John Wiley & Sons, Torquay, 2008, ISBN 978-0-470-69452-7.

- 
- [10] Gledatchev, J., Angelov, D., Belabanov, E.: *SAFETY OF NPP WITH WWER-440 AND WWER-1000 REACTORS [online]*. Dostupné na: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/28/034/28034585.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/034/28034585.pdf), stav z 5. 7. 2019.
- [11] Glinka, G.: *The Local Stress-Strain Fatigue Method [online]*. 2010, Dostupné na: [www.efatigue.com/training/Strain\\_Life\\_Method.pdf](http://www.efatigue.com/training/Strain_Life_Method.pdf), stav z 5. 7. 2019.
- [12] Halama, R.: *Řešení elastoplastické napjatosti v bodovém styku dvou zakřivených těles pomocí MKP*. VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Dizertační práce, 2005.
- [13] Halama, R.: *Experimentální poznatky a fenomenologické modelování cyklické plasticity kovů*. VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Habilitační práce, 2010.
- [14] Kiš Bandi, P.: *Grafické zpracování výsledků simulací reaktoru VVER 1000 [online]*. VUT v Brně, Fakulta Strojního inženýrství, Bakalárska práce, 2016, Dostupné na: [www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=126247](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=126247).
- [15] Loewenthal, S.H.: *Factors That Affect the Fatigue Strength of Power Transmission Shafting Their Impact on Design [online]*. Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, 1984, Dostupné na: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19840017961.pdf>, stav z 5. 7. 2019.
- [16] Pištek, A., Grégr, O., Kahánek, V., Böhm, R.: *Pevnost a životnost letadel*. Ediční středisko VUT Brno, 1987.
- [17] Rust, W.: *Non-linear Finite Element Analysis in Structural Mechanics*. Springer, 2015.
- [18] Růžička, M., Hanke, M., Rost, M.: *Dynamická pevnost a životnost*. Ediční středisko ČVUT, 1987.
- [19] Sedlák, J., Halama, R.: *Zaklady inkrementální teorie plasticity, Teoretický základ [online]*. 2012, Dostupné na: [www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Teorie-plasticity\\_Zaklady-inkrementalni-teorie-plasticity.pdf](http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Teorie-plasticity_Zaklady-inkrementalni-teorie-plasticity.pdf), stav z 2. 8. 2019.
- [20] Slugeň, V., Florek, M., Uhrík, P., Markuš, J., Tomek, J.: *Jadrové zariadenia, jadrová bezpečnosť [online]*. Dostupné na: <http://edu.snus.sk/ucebnice/Slugen-JZ.pdf>, stav z 5. 7. 2019.
-



- [21] Trebuňa, F., Šimčák, F.: *Pružnosť, pevnosť a plasticosť v strojárstve*. EMILENA, Košice, 2005, ISBN 80-8073-276-0.
- [22] Vlach, J.: *Zpracování měření mechanických charakteristik kovových materiálů při cyklickém zatěžování [online]*. VUT v Brně, Fakulta Strojního inženýrství, Bakalárska práca, 2014, Dostupné na: <https://core.ac.uk/download/pdf/30293780.pdf>, stav z 5. 7. 2019.
- [23] Vlk, M.: *Dynamická pevnosť a životnosť*. Nakladatelství VUT Brno, 1992.

# Príloha



Obr. 5.15: Rozvoj plasticity s najväčšou hodnotou únavového poškodenia