

VÝPOČTOVÉ HODNOCENÍ OPĚRNÝCH PRVKŮ JADERNÝCH REAKTORŮ

COMPUTATIONAL EVALUATION OF NUCLEAR REACTORS SUPPORT ELEMENTS

Jan Lazar, Kamil Šimeček, Petr Polcar a Petr Kindelmann

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň, s.r.o., Tylova 1581/46, 301 001 Plzeň, Česká republika

Abstrakt

Pro zajištění dlouhodobé spolehlivosti energetických zařízení a případné prodloužení jejich provozu je potřeba hodnotit stav jednotlivých komponent z hlediska zbytkové životnosti. Některé komponenty, zejména takové, ke kterým je ztížený přístup, je potřeba hodnotit výpočtově. Předkládaný příspěvek popisuje výpočtové aktivity při hodnocení statické pevnosti, nízkocyklové únavy a vysokocyklové únavy při vibracích opěrných prvků jaderného reaktoru dle Normativně technické dokumentace A.S.I. Je představen princip výpočtu, MKP modely jednotlivých komponent opěrných prvků, následně popsány výpočty napěťových a teplotních polí a jejich vyhodnocení.

Abstract

To ensure long-term reliability of power equipment and eventual prolongation of their lifetime it is necessary to evaluate the condition of individual components in terms of their residual life. Some of the components, especially those where access to is difficult, need to be simulated. Presented paper describes computational activities in evaluation of static strength, low and high cycle fatigue according to A.S.I. normative technical documentation. Simulation approach, FEM models of individual components of supporting elements are introduced followed by description of calculations of stress and temperature fields and their evaluation.

Úvod a motivace

Jaderné zdroje lze zařadit mezi bezemisní technologie, a nejen z toho důvodu je žádoucí prodlužování životnosti stávajících a výstavba nových zařízení. Pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti je nutné prokázat způsobilost jednotlivých komponent v souladu s Normativně technickou dokumentací A.S.I. Výpočtáři společnosti Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. se podílejí na výpočtovém hodnocení opěrných prvků tlakových nádob reaktorů (TNR) VVER-1000 a VVER-440. Pro hodnocení byly simulovány provozní režimy s využitím metody konečných prvků a komerčního programu ANSYS [1]. Vzhledem k omezenému rozsahu příspěvku se v dalším textu omezíme na příklady z hodnocení opěrných prvků TNR VVER-1000.

Při znalosti jednotlivých kampaní a jejich počtů je možné výpočtetně stanovit namáhání při provozních režimech a následně únavové poškození a zbytkovou životnost jednotlivých komponent. Tato znalost je stěžejní a napomůže případnému rozhodnutí o prodloužení doby provozu jaderně energetických zařízení, případně dodá informaci o kritických komponentech, na které je potřeba se zaměřit.

Hodnocené režimy

Jednotlivé provozní režimy, které byly výpočtově hodnoceny, shrnuje tab. 1. Z posloupnosti těchto zátěžných stavů byly následně sestaveny provozní režimy. Původy uvažovaných zatížení jsou vlastní hmotnost, tlak chladiva na stěnu TNR, tepelné namáhání při provozu, silové působení na nátrubky TNR a tlakové pulsace způsobené chodem hlavního cirkulačního čerpadla.

Tab. 1: Hodnocené režimy při výpočtovém hodnocení opěrných prvků TNR VVER-1000

Zn.	Pojmenování zátěžného stavu	Zátěž
0	Reaktor otevřen, horní blok sejmut, AZ a VČR vyjmuty	Tíha reaktoru (TNR, chladio), síly na nátrubky
1	Reaktor otevřen, zaplněn	Tíha reaktoru (TNR, AZ, VČR, chladio), síly na nátrubky
1a	Reaktor uzavřen	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladio), síly na nátrubky
2	Tlaková zkouška na těsnost 17.6 MPa, 130 °C	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladio), síly na nátrubky, tlak chladiwa
3	Tlaková zkouška na pevnost 24.4 MPa, 130 °C	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladio), síly na nátrubky, tlak chladiwa
4	Tlaková zkouška na pevnost, snížený tlak 19.6 MPa, 130 °C	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladio), síly na nátrubky, tlak chladiwa
5	Reaktor na plném výkonu, 16 MPa, 320 °C	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladio), síly na nátrubky, tlak chladiwa, tepelné zatížení, (+ tlakové pulsace od HCC při hodnocení vibrací)
6	Reaktor na nulovém výkonu 16 MPa, 320 °C	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladio), síly na nátrubky, tlak chladiwa, tepelné zatížení
7h (LOCA)	Loss-of-coolant accident, roztržení horké smyčky hlavního chladicího potrubí	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČ, chladio), síly na nátrubky včetně sil od přesušeného potrubí, tlak chladiwa
7s (LOCA)	Loss-of-coolant accident, roztržení chladné smyčky hlavního chladicího potrubí	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladio), síly na nátrubky včetně sil od přesušeného potrubí, tlak chladiwa

Metodika výpočtů

Výčet uvažovaných zatížení opěrných prvků (OP) je uveden tab. 1, lze je rozdělit takto:

- (i) statická zatížení mechanického původu (vlastní tíha, tlak chladiwa na TNR, síly na nátrubky TNR),
- (ii) zatížení statickým teplotním polem a
- (iii) zatížení dynamickými silami vyvolanými funkcí HCC.

K výpočtu rozložení napětí je ve všech případech použit statický výpočet.

Zatížení (ii) a (iii) lze díky konstrukci OP vyhodnotit nezávisle pro nosný a opěrný systém, pro hodnocení zatížení (i), tj. zatížení od vlastní hmotnosti a od sil působících na nátrubky TNR, musíme uvažovat interakci mezi všemi 3 hlavními komponentami: nosným systémem, opěrným systémem a TNR, zkráceně TNR–OP.

Vzhledem k výpočetní náročnosti bylo nutné rozdělit výpočet na dílčí části, které již budou řešitelné programem ANSYS nainstalovaným na standardním hardware. Kde to geometrie OP a charakter zatížení dovoluje, bylo využito symetrie úlohy:

- Teplotní výpočet a výpočet mechanických napětí od teplotních polí jsou provedeny na sektorech opěrného a nosného systému.
- Výpočet mechanického napětí v opěrném a nosném rámu je proveden na modelu jednoho celého nosníku a jeho bezprostředního okolí.

Na obr. 1 až obr. 4 jsou vyobrazeny geometrie všech modelů, použitých při výpočtech.

Výpočet byl proveden v následujících krocích:

- (i) příprava modelů pro výpočet napětí teplotního původu: model symetrické části opěrného systému model symetrické části nosného systému,
- (ii) výpočet rozložení teplot,
- (iii) výpočet napětí teplotního původu,
- (iv) příprava modelů pro výpočet tuhostí nosníků a pro výpočet napětí mechanického původu v nosnících: opěrný rám a nosný rám,
- (v) výpočet tuhostí opěrného a nosného rámu,
- (vi) příprava dalších modelů pro výpočet napětí mechanického původu: model TNR-OP, dílčí modely: opěrný kruh a nosný kruh; v těchto modelech jsou nosníky nahrazeny elementy, které mají stejnou tuhost jako nosníky,
- (vii) zatížení modelu TNR-OP vlastní hmotností reaktoru a silami na nátrubky, určení zatížení dílčích modelů (tj. modelů opěrného rámu, opěrného kruhu, nosného rámu a nosného kruhu),
- (viii) zatížení dílčích modelů zatížením vypočteným na modelu TNR-OP, výpočet napětí,
- (ix) zatížení dílčích modelů silami vyvolanými činnostmi HCC.

Součet napětí od teplotních a od mechanických zatížení lze realizovat (a) přenosem pole napětí mezi modely – náročnost a vhodnost této metody záleží na orientaci a rozsahu (tj. použití eventuálních symetrií) geometrií jednotlivých modelů, (b) součtem tenzoru napětí nebo hodnoty redukovaného napětí pouze ve vybraných bodech nebo (c) součtem tenzorů napětí linealizovaných podél odpovídajících SCL. Metoda (a) je použita při hodnocení nosníků opěrného a nosného rámu, metoda (b) je použita při hodnocení únavy, metoda (c) je použita při hodnocení statické pevnosti opěrného a nosného kruhu.

Z důvodů snížení výpočetní náročnosti jsou opěrný a nosný rám v modelech TNR-OP, opěrného kruhu a nosného kruhu nahrazeny zjednodušenými modely s ekvivalentními tuhostmi. Při formulaci zjednodušených modelů OP jsou uvažovány tyto stupně volnosti:

Nosník nosného rámu:

- vertikální posuv v místě kontaktu nosník nosného rámu – ustavovací klín,
- horizontální posuv v místě kontaktu nosný kruh – pojišťovací kolík,
- vertikální posuv v místě kontaktu pojišťovací kolík – klín pojišťovacího kolíku.

Nosník opěrného rámu:

- Horizontální posuv v místě kontaktu kronštejn – hřeb.

Všechny tuhosti mají rozměr [N/mm] a postup jejich výpočtu je následující:

- (i) zatížení kontaktní plochy nosníku silou F_{DOF} ve směru odpovídajícího stupně volnosti,
- (ii) odečet posuvu Δ_{DOF} ,
- (iii) výpočet tuhosti OP (F_{DOF}/Δ_{DOF}).

Postup určení tuhostí je ilustrován obr. 5 a obr. 6.

Výpočty únavového poškození od nízkocyklové únavy byly provedeny v souladu s kap. 8 a kap. 10 normy [4]. Pro výpočty fiktivních napětí při hodnocení únavového poškození byla použita méně konzervativní metoda ekvivalentní energie. Výpočty únavového poškození byly provedeny ve vybraných bodech volených v oblastech, kde bylo dosaženo maximálního napětí v jednotlivých zátěžných stavech. Na základě proběhlých režimů provozu byla pro výpočet

únavového poškození opěrných elementů TNR ETE zpracována posloupnost režimů. Pro hodnocení únavového poškození byly provedeny prognózy počtu zátěžových cyklů pro 60 let budoucího provozu.

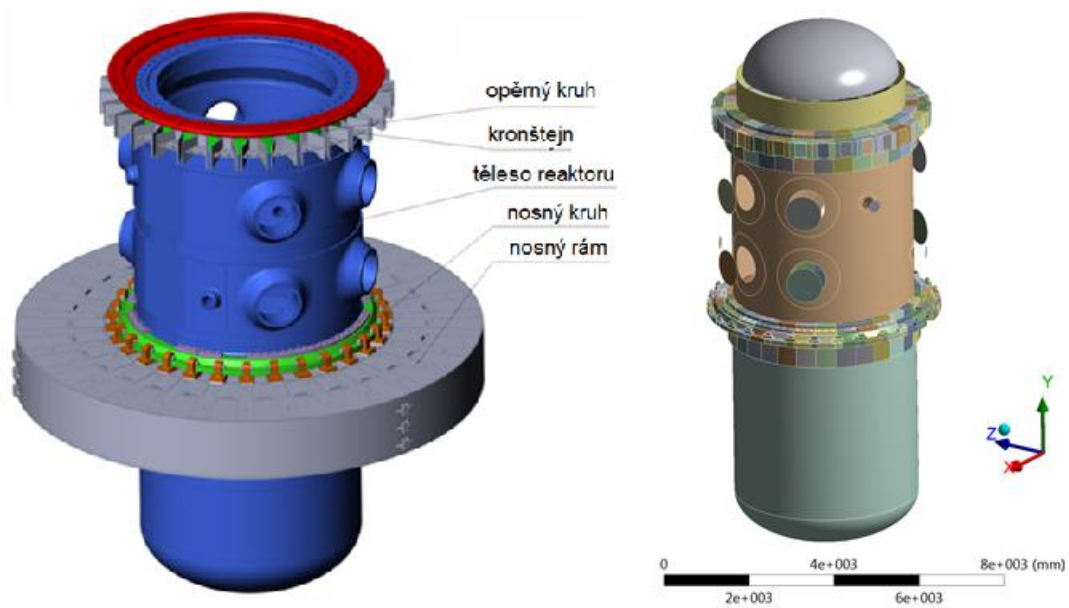
Vyhodnocení konstrukcí na odolnost proti poškození vysokocyklovou únavou bylo provedeno v souladu s kapitolou 10 normy [4]. Činností HCČ vznikají tlakové pulsace chladiva, které působí na reaktor, který pak kmitá vůči svému uložení. Síly, které jsou přitom přenášeny pomocí OP na betonovou šachtu, mají periodický průběh. K výpočtu napětí je ve všech případech použit statický výpočet. Tento přístup je možný proto, že vstupy pro výpočet dynamického namáhání OP jsou formulovány jako síly působící na opěrný a nosný rám a zohledňují rezonanční jevy na úrovni sestavy tuhých těles a eventuální rezonanční kmitání jednotlivých OP není kvůli vysoké tuhosti OP uvažováno. K hodnocení byl použit přístup založený na Goodmanově-Haighově diagramu (GHD). Hodnotu meze vysokocyklové únavy při souměrném střídavém cyklu napětí, σ_C , předepisuje norma [4] v tab. 10.1. GHD dovoluje hodnotit únavu až do hodnoty předpětí na mezi pevnosti materiálu R_m . Amplituda redukovaného fiktivního napětí (σ_{aF}) je výsledkem již provedeného elastického výpočtu, při vibracích nesmí překročit hodnotu σ_A .

Závěr

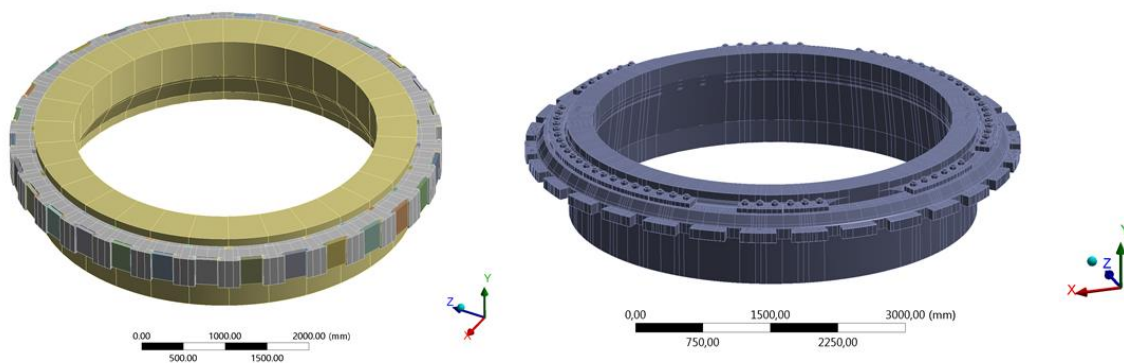
Provedené ověřovací výpočty potvrdily špičkovou profesionalitu odborníků, kteří se podíleli na konstrukčním návrhu a následné realizaci opěrných prvků tlakových nádob jaderně energetických zařízení. Všechny hodnocené prvky jsou vyhovující požadavkům Normativně technické dokumentace A.S.I. z hlediska statické pevnosti, nízkocyklové únavy i vysokocyklové únavy při vibracích. Výsledky provedených výpočtů lze využít při rozhodnutí o prodloužení životnosti jaderně energetických zařízení. Zároveň dokazují připravenost výpočtářských týmů řešit obdobné úkoly.

Literatura

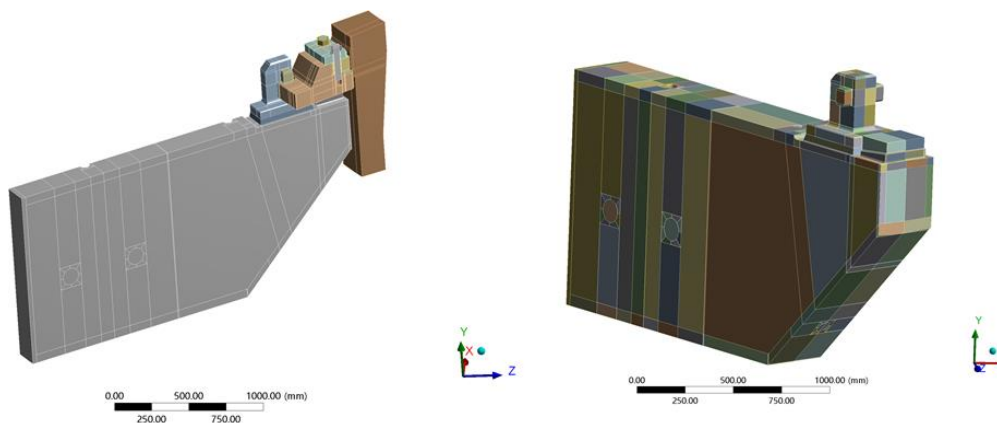
- [1] ANSYS® (2018): *Mechanical, Release 19.0*. Ansys Inc., Canonsburg (Pennsylvania, USA).
- [2] Kindelmann, P., Lazar, J., Hajžman, M., Červená, O., Polcar, P. (2018): *Model pro výpočtové hodnocení opěrných prvků JE Temelín*. Výzkumná zpráva, VYZ–VZ-36/18/009, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [3] Lazar, J., Šimeček, K., Hajžman, M., Polcar, P. (2018): *Hodnocení opěrných prvků ETE – průběžná zpráva za 1. etapu*. Výzkumná zpráva, VYZ–VZ-36/18/020, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [4] NDT A.S.I. (2016): *Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, sekce III*. Normativně technická dokumentace A.S.I., NTD ASI-III-2016, Praha.
- [5] NDT A.S.I. (2016): *Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, sekce II*. Normativně technická dokumentace A.S.I., NTD ASI-II-2016, Praha.



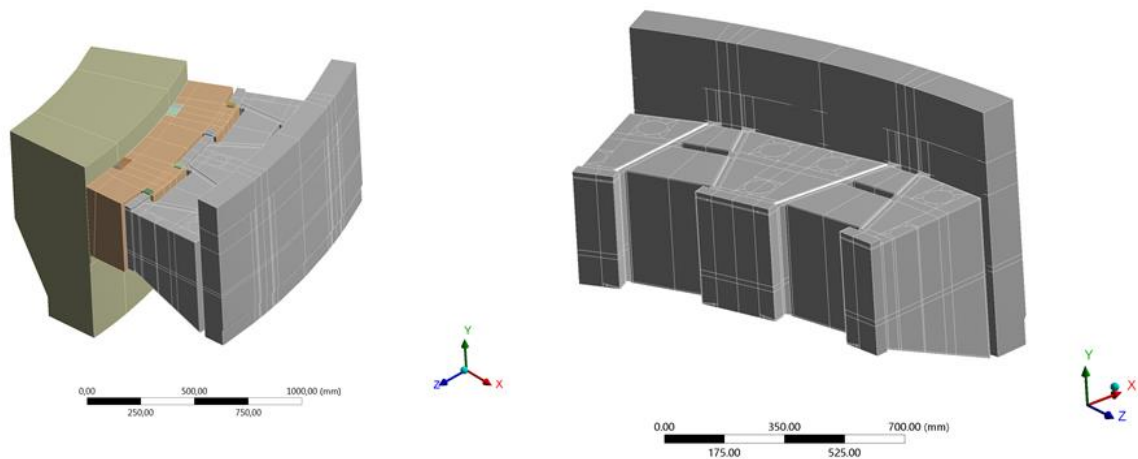
Obr. 1: Označení hlavních částí opěrných prvků tlakové nádoby reaktoru VVER-1000 a model pro výpočet přenosu sil



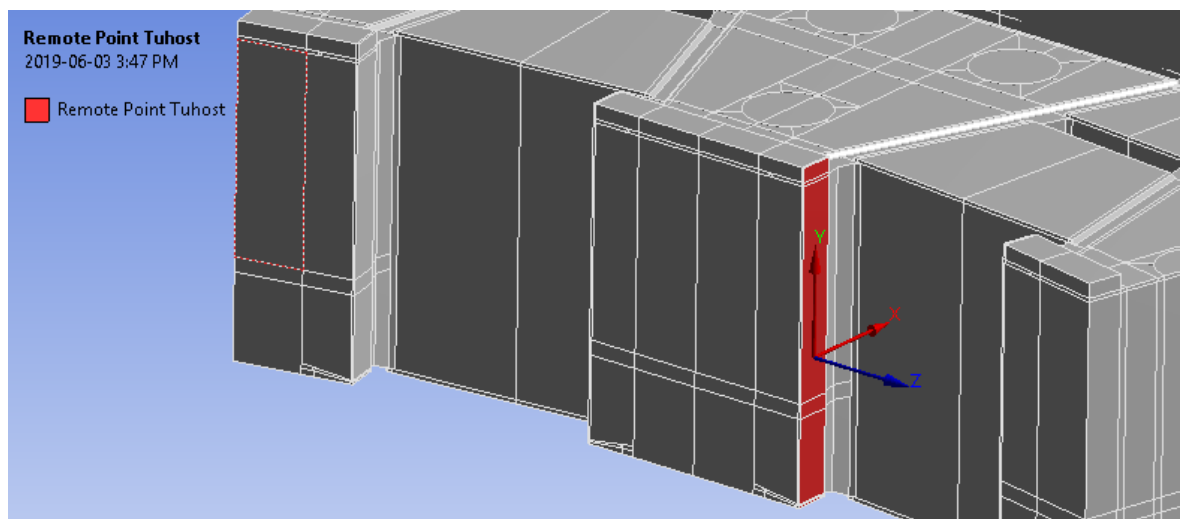
Obr. 2: Modely opěrného rámu a nosného kruhu



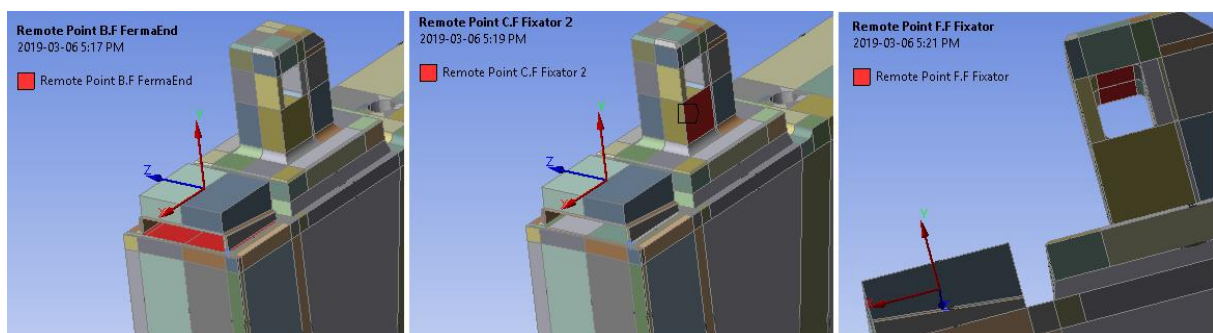
Obr. 3: Modely: sektor opěrného systému pro výpočet zatížení od teplot (vlevo) a sektor opěrného systému pro výpočet účinku od silového zatížení (vpravo)



Obr. 4: Modely: sektor opěrného rámu pro výpočet zatížení od teplot (vlevo) a sektor opěrného rámu pro výpočet mechanických účinků od silového zatížení (vpravo)



Obr. 5: Určení tuhosti opěrného rámu s vyznačením směru působení síly použité při výpočtu



Obr. 6: Určení tuhostí nosného rámu s vyznačením směru působení sil použitých při výpočtu