

ÚNAVOVÉ HODNOCENÍ KRITICKÉHO MÍSTA TNR – PŘIVAŘENÍ KOŠILKY NÁTRUBKU HRK – POMOCÍ ELASTO-PLASTICKÉHO PŘÍSTUPU

FATIGUE ASSESSMENT OF CRITICAL POINT ON THE RPV, WELDING OF THE HRK SLEEVE USING THE ELASTO-PLASTIC APPROACH

Petr Gál a Vladislav Pištora

ÚJV Řež, a. s., Hlavní 130, Řež, 250 68, Husinec

Abstrakt

Na technických zařízeních se vyskytuje určité množství svarových spojů s neúplným průvarem. Kořen svaru je potom výrazný koncentrátor napětí, který je při únavovém hodnocení založeném na lineárně elastické analýze silně nevyhovující. Jedná se totiž o singulární místo. Jednou z možností odstranění singularity je provedení elasto-plastického výpočtu a následně také únavového hodnocení založeného na tomto přístupu. Na víku TNR je takové reprezentativní místo např. přivaření stínění (košilky) k přírubě nátrubku havarijní regulační kazety (HRK). Pomocí metody konečných prvků je provedena analýza s elasto-plastickým chováním materiálu. Únavové hodnocení je provedeno z výsledků rozložení deformací v oblasti svaru.

Abstract

There is a certain amount of weld joints with incomplete penetration on technical equipment. The weld's root is a significant stress concentrator, which is strongly unsatisfactory in fatigue evaluation based on linear elastic analysis. This is a singular place. One of the possibilities to remove the singularity is to perform an elasto-plastic calculation and, subsequently, a fatigue assessment based on this approach. On the cover of the TNR, there is such a representative place, for example, the welding of the shield (shirt) to the flange of the nozzle of the emergency regulation cassette (HRK). An analysis with the elasto-plastic behavior of the material is performed using the finite element method. Fatigue evaluation is performed from the results of the distribution of deformations in the weld area.

1. Úvod

Technická zařízení obsahují určité množství konstrukčních uzlů/míst, která díky své geometrii působí jako koncentrátoři napětí. V případě tlakové nádoby reaktoru (TNR) se může např. jednat o svarové spoje s neúplným průvarem jejichž kořeny působí jako silné koncentrátoři napětí. V případě lineárně elastického výpočtu se jedná o singulární body, kde hodnota napětí teoreticky dosahuje nekonečné hodnoty (nekonverguje ke konečnému číslu a je závislá na síti). Hodnocení únavové životnosti v takovém místě potom postrádá smysl, protože bude ve většině případů silně nevyhovující, a navíc závislé na hustotě sítě konečných prvků. Hodnocení takových míst je možné potom provádět pomocí jednoho z následujících postupů (např. dle [1]):

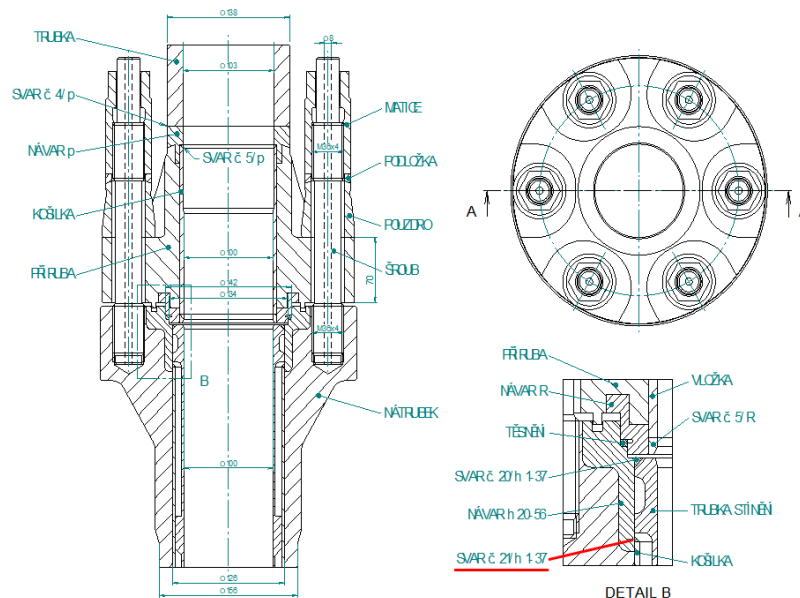
- Pomocí elasto-plastického výpočtu deformací v hodnocené oblasti.
- Metoda nominálních napětí, které se bere ve vzdáleném místě mimo hodnocenou oblast.
- Effective notch stress method – skutečná geometrie v místě kořene svaru je nahrazena efektivním rádiusem o poloměru r .
- Pomocí lomově-mechanického hodnocení – stanovení součinitelů intenzity napětí v hodnocené oblasti (která je pro dané místo interpretována jako čelo trhliny) pro všechny zatěžovací stavy v průběhu životnosti komponenty. Na základě těchto součinitelů intenzity napětí se predikuje únavový růst trhliny pomocí Parisova zákona.

Pro hodnocení přivaření košilky k přírubě nátrubku HRK byl zvolen přístup pomocí elasto-plastického určení deformací v kořeni svaru. Pro takové hodnocení není možné využít lineární kombinace jednotlivých zatěžovacích stavů, protože elasto-plastické řešení je nelineární a deformace závisí na historii. Je tedy potřeba provést výběr dominantních zatěžovacích režimů (redukci jejich počtu), aby bylo možno simulovat celou provozní historii. Po provedení této simulace je stanovena výsledná kumulace únavového poškození.

2. Popis konstrukce nátrubků HRK a přivaření košilek v nátrubcích HRK

Nátrubky HRK jsou vyrobeny z oceli 22 K a na vnitřním povrchu jsou umístěny košilky z austenitické oceli 08Ch18N10T. Košilky jsou přivařeny k návaru, které jsou z materiálů Sv-04Ch19N11M3, na spodním čele nátrubků HRK a k návaru na přírubách nátrubků HRK elektrodou ZIO-8. Smyslem těchto košilek je zamezení styku primárního chladiva se základním materiálem nátrubku HRK (22K). K návaru na přírubách nátrubků HRK jsou dále přivařeny trubky stínění z austenitické oceli, které volně procházejí celým nátrubkem HRK až do prostoru pod víkem. Svary zajišťující polohu košilek a trubek stínění lze považovat za svarové spoje s neúplným průvarem, kořeny těchto svarů tvoří potenciální napěťové singularity.

Nátrubek HRK je opatřen dosedací plochou pro vložení těsnicího kroužku z niklu. Dále je zde umístěna drážka pro vložení azbestového těsnění. Příruba nátrubku HRK je opatřena šesti závitovými otvory pro svorníky M36x4 (svorníky jsou opatřeny dvěma závity, na spodní a horní straně). Pomocí těchto svorníků a příslušných matic se přes podložky a pouzdra přitlačí na uvedený niklový těsnicí kroužek dolní příruba pouzdra HRK z oceli 22K. Dosedací plochy mezi podložkami a pouzdry mají kulový tvar. Konstrukční provedení se základními rozměry přírubových spojů je uvedeno na obr. 1.



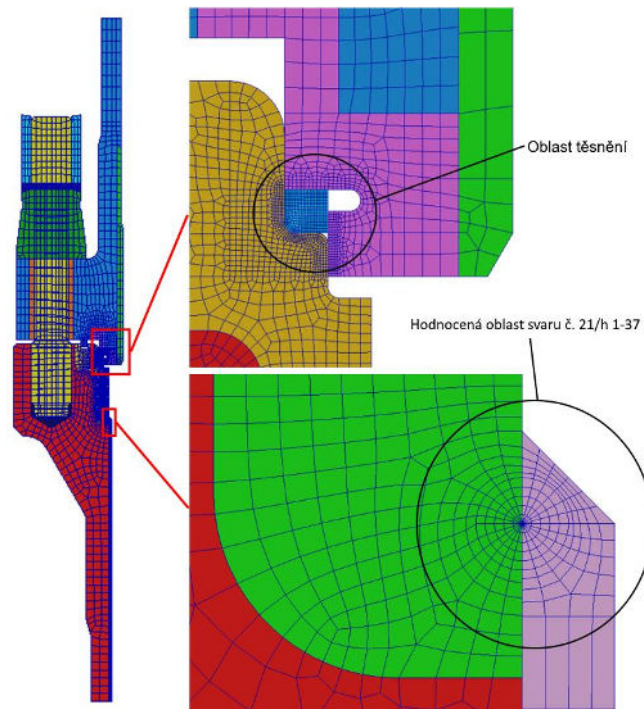
Obr. 1: Konstrukce přírubového spoje nátrubku HRK a označení umístění hodnoceného svarového spoje

3. Výpočtový model přírubového spoje nátrubku HRK

Výpočtový model obsahuje všechny komponenty dle výše uvedeného popisu konstrukce nátrubku HRK, tedy: horní část nátrubku HRK včetně příruby, spodní přírubu pouzdra HRK, košilku nátrubku HRK, košilku příruby pouzdra HRK, spodní část pouzdra HRK, šroub M36x4, matici, podložku a pouzdro, niklové těsnění.

Výpočtový model byl vytvořen jako dvourozměrný rotačně symetrický model (axisymetrický). Tato definice výpočtového modelu byla zvolena, protože hodnocené místo je symetrické a rotačně symetrický model umožní detailní popis napěťově deformačního stavu v místě „singularity“, tedy v místě přivaření košilky k přírubě nátrubku HRK.

Model je tvořen čtyřúhelníkovými kvadratickými prvky (osmiuzlovými). Tyto prvky umožňují řešení jak mechanické, tak i teplotní úlohy v jednom kroku (tzv. svázaná úloha). Celkový počet prvků v modelu je 4 244 a tomu přináleží 13 717 uzlů. Těsnění muselo být vysítováno dostatečně kvalitně (adekvátně jemná síť), protože při utažení šroubu je silně stlačeno a dochází k velmi silné deformaci. MKP síť a její detaily jsou uvedeny na obr. 2.



Obr. 2: Výpočtový model přírubového spoje nátrubku HRK a detailní pohledy na místa těsnění a přivaření košilky

Svorník M36x4, pouzdro, podložka a matice jsou modelovány jako rotačně symetrické prstence s použitím anizotropního materiálu s velmi nízkou tuhostí v obvodovém směru. Závitové hnízdo v přírubě nátrubku a oblast otvoru pro šroub v přírubě pouzdra HRK jsou modelovány jako rotačně symetrické prstence s použitím anizotropního materiálu s tuhostí patřičně modifikovanou. Tento postup je např. uveden v ASME [2] a dále je použit např. v publikaci [3].

Při uvedeném způsobu modelování je model sestaven tak, že osová tuhost, např. prstence modelujícího svorník odpovídá celkové tuhosti všech šesti svorníků po obvodu přírubového spoje a toho je dosaženo pomocí modifikace modulu pružnosti E . Protože se používá obvodová tuhost blížká nule a Poissonova konstanta se také zadává blížká nule, vypočtená napjatost v rotačně symetrickém modelu svorníku odpovídá napjatosti jednoho svorníku (totéž platí pro deformace). Takto byly modelovány i ostatní zmíněné části.

3.1. Materiálové vlastnosti modelu

Pro tento výpočtový model je možné materiálové vstupní parametry rozdělit na tři kategorie:

1. vlastnosti pro řešení teplotní úlohy – termo-fyzikální vlastnosti,
2. mechanické vlastnosti pro řešení úlohy napjatosti v lineární oblasti,
3. mechanické vlastnosti v oblasti elasto-plasticity – po překročení meze kluzu materiálu.

Pro výpočty napěťových polí jsou použity hodnoty modulu pružnosti v tahu E a koeficientu délkové roztažnosti α_t uvedené v NTD ASI, Sekce II [4] a také Poissonova konstanta ν . Pro návar jsou mechanické vlastnosti použity z NTD ASI, Sekce IV [5].

Jak je již naznačeno výše, pro výpočetní model byl zvolen kombinovaný přístup v oblasti materiálových vlastností. Část modelu byla řešena jako elastická a část modelu byla řešena jako elasto-plastická. Jedná se o části přivaření košilky k nátrubku, košilku, část náváru a niklové těsnění. Pro niklové těsnění byla křivka skutečné napětí vs. skutečná plastická deformace sestavena na základě materiálových testů, provedených v ÚJV Řež, a. s., a to na materiálu získaném z EDU.

Vzhledem k absenci experimentálních dat byly pro austenitické návary, základní materiály a svarový kov stanoveny tři teplotně závislé křivky skutečného napětí vs. skutečná plastická deformace, a to v souladu s postupem dle NTD ASI, Sekce III [6].

3.2. Konstitutivní materiálový model

Pro popis napěťově deformační odezvy materiálu v oblasti elasto-plasticity byl použit kombinovaný materiálový model. Bylo tedy zohledněno izotropní i kinematické zpevnění materiálu v průběhu zatěžování, a to jejich superpozicí. Tím je zahrnuta změna velikosti i pozice plochy plasticity.

3.3. Významné režimy zatěžující přivaření košilky k náváru na přírubě nátrubku HRK

Při provádění elasto-plastických výpočtů není možné využít princip superpozice (lineární kombinace jednotlivých zatěžovacích stavů) a je tedy nutné provést simulaci celé provozní historie. Na základě předběžných lineárně elastických výpočtů byly vyhodnoceny příspěvky jednotlivých provozních režimů na únavové poškození a pomocí tohoto postupu byly určeny dominantní zatěžovací režimy vzhledem k únavovému poškození, které byly následně zahrnuty do (zjednodušené) provozní historie. Málo významné režimy jsou potom v simulaci vynechány. Na základě těchto analýz bylo zjištěno, že největší příspěvek k únavovému poškození ve svaru košilky k nátrubku HRK mají změny ze studeného stavu do výkonového stavu reaktoru a naopak, a to s uvažováním tlakového zatížení.

3.4. Okrajové podmínky a zatížení výpočtového modelu

Důležitou roli ve výpočtu hraje přivaření košilky k náváru na nátrubku. Ta se přivařuje při předehřevu na 150 °C. Dále jsou ve všech uzlech v rovině řezu nátrubku HRK v nejspodnější části modelu zadána nulová posunutí ve vertikálním směru.

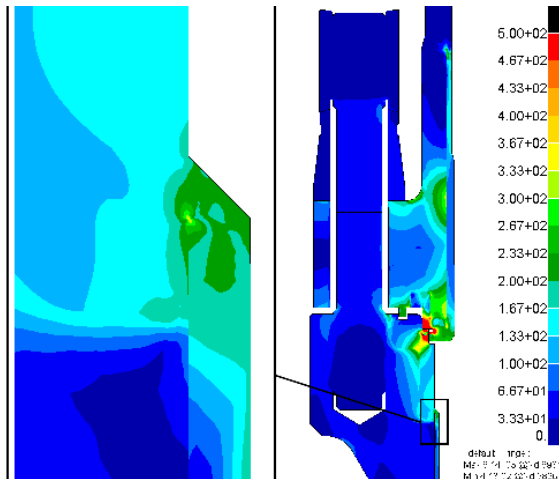
V modelu jsou zahrnuty kontaktní páry simulující interakce jednotlivých komponent. Celkový počet kontaktních párů v modelu je 9.

Na základě výběru dominantních režimů je ve výpočtu nutné uvažovat i tlakové zatížení. Celý vnitřní povrch nátrubku a přírubového spoje byl tedy ve výpočtu zatížen vnitřním provozním přetlakem.

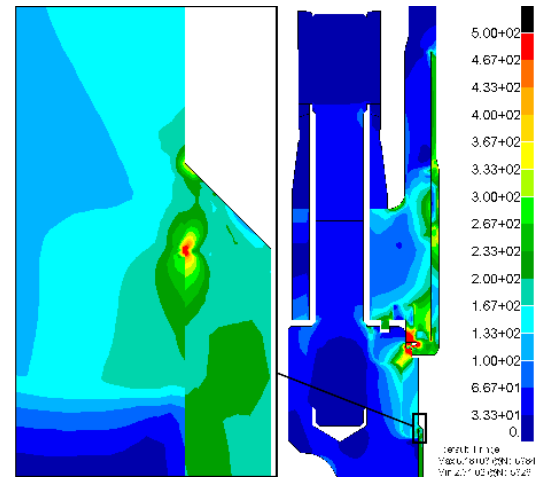
Nedílnou součástí provozní historie nátrubku HRK je i utažení svorníků M36x4. Pro toto namodelování byl použit zvláštní postup. Svorník, respektive jeho MKP síť, je uprostřed zatížené části rozdělen řezem kolmým k jeho ose. Vzájemné posunutí uzlů ve středech obou koncových řezů rozdělených částí „rozříznutého“ šroubu je zadáno tak, že se šroub prodlužuje (tzn. krajní řezy se posunuly v opačných směrech, toto prodloužení je řízeno tzv. řídicím uzlem). Uzly ležící na rovině řezu jsou s řídicím uzlem svázány pomocí tuhé vazby RBE2, která zajišťuje i zachování rovinnosti obou řezů na svorníku. Hodnoty vzájemného posunutí jsou zadány tak, aby vypočítané prodloužení šroubu (stanovené jako součet prodloužení obou částí šroubu určených jako rozdíl posunutí krajních uzlů těchto částí ve vertikálním směru) dosáhlo zadané a při montáži měřené hodnoty prodloužení šroubů M36x4. Během provozu reaktoru proběhlo utažení svorníků pouze jednou, a to před uvedením reaktoru do provozu.

4. Výsledky výpočtů

Na obr. 3 a obr. 4 je vyobrazeno pole napjatosti Tresca. Na obr. 3 je stav po přivaření košilek a utažení svorníků. Protože se košilky přivařují při 150 °C, je potom svar při pokojové teplotě výrazně zatížen a stejně tak i košilky. Po utažení svorníků je značně zatížena oblast těsnění, kudy je přenášén veškerý silový tok. Rozložení napjatosti na konci předpokládaného provozu, tedy po 60 kampaních, je uveden na obr. 4. Je vidět, že kořen svaru je silně zatížen, napětí dosahuje hodnoty kolem 500 MPa a oblast výrazného napětí se zvětšila. Dále je patrné, že je více zatížena košilka, a to v nátrubku i pouzdru.

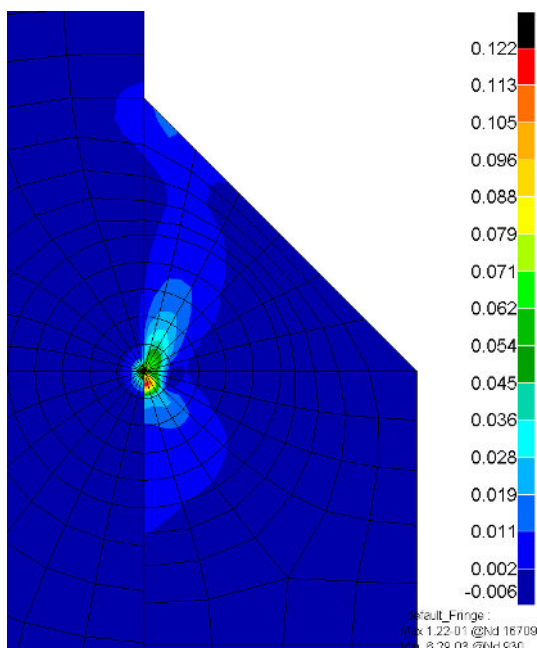


Obr. 3: Rozložení pole napjatosti Tresca – studený stav po utažení svorníku

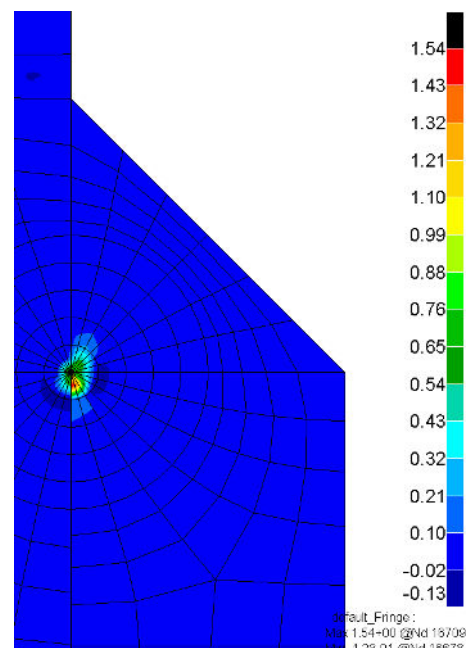


Obr. 4: Rozložení pole napjatosti Tresca – na konci 60. kampaně

Na obr. 5 je uvedeno rozložení akumulované plastické deformace po 1 kampani. Je patrné, že plastická zóna je soustředěna do kořene svaru a jeho blízkého okolí. Plastická deformace po 60 kampani je uvedena na obr. 6, kde je zřejmé, že plastická deformace je nejvíce lokalizována v kořeni svaru a v košilce.



Obr. 5: Rozložení akumulované plastické deformace po 1. kampani



Obr. 6: Rozložení akumulované plastické deformace na konci 60. kampaně

5. Únavové hodnocení

Výpočet únavového poškození byl proveden na základě vypočtených elasto-plastických deformací z MKP výpočtu, a to pro celou stanovenou provozní historii. Provedení hodnocení na základě elasto-plastického výpočtu je dle NTD ASI, Sekce III (viz článek 8.5.8), [6] připuštěno. Bohužel zde není ale uveden přesný postup, jakým hodnocení provést. Pro sestavení ekvivalentní deformace do výpočtu kumulace únavového poškození bylo využito Trescova vztahu na základě celkového tenzoru deformace:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{1+\nu} \text{Max}_{i \neq j} (|\varepsilon_i - \varepsilon_j|), \quad (1)$$

kde ν uvedeném vztahu jsou ε_i a ε_j složky hlavních deformací a ν je Poissonova konstanta. Blíže je problematika spojená s tímto typem hodnocení popsána v příspěvku [7].

Na základě MKP výsledků byla vybrána hodnocená místa v oblasti kořene svaru košilkou a bylo ukázáno, že podmínka únavové životnosti je splněna.

6. Závěr

V předloženém článku je prezentováno únavové hodnocení svarového spoje mezi košilkou a návarem na pouzdře nátrubku HRK. Je popsána konstrukce celého nátrubku HRK a také popsán vytvořený MKP model. Je uveden postup výpočtu se zahrnutím elasto-plasticity, protože svarový spoj v kořeni představuje singulární místo v klasickém lineárně pružném výpočtu. Na základě výsledků pevnostních výpočtů byla vybrána místa do únavového hodnocení, které bylo provedeno nestandardně, ale dle normy NTD ASI, Sekce III [6] je tento postup připuštěn.

Literatura

- [1] BARSOUM, Zuheir. Introduction to Fatigue design of welded structures. *Workshop on Compuattion Fatigue Analysis 2017*. Praha, 2017
- [2] ASME (2004), Stresses in Perforated Flat Plates, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec.III Appendix A-8000
- [3] ESTRADA, Hector. Analysis of Leakage in Bolted-Flanged Joints Using Contact Finite Element Analysis. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*. 2015, doi: <https://doi.org/10.17265/2159-5275/2015.03.001>
- [4] Normativně technická dokumentace ASI, Sekce II, *Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*, NTD ASI, 2020.
- [5] Normativně technická dokumentace ASI, Sekce IV, *Hodnocení zbytkové životnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*. NTD ASI, 2020, ev. č. 19
- [6] Normativně Technická Dokumentace ASI, Sekce III, *Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*, 2020, ev. č. 19
- [7] GÁL, Petr, PIŠTORA, Vladislav, POŠTA, Miroslav. Fatigue assessment of Grooves for gaskets in reactor main flange. In: *SMIRT-26: 26th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*. Berlin/Potsdam, 2022