



## Oponentský posudek disertační práce

Autor práce: **Ing. Jan Štefan**  
Název práce: **Módy porušování konstrukčních materiálů tlakové nádoby reaktoru**  
Studijní program: **Aplikace přírodních věd**  
Studijní obor: **Fyzikální inženýrství**  
Školící pracoviště: **České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra materiálů**  
Školitel: **doc. Ing. Jan Siegl, CSc.**  
Školitel specialista: **RNDr. Milan Brumovský, CSc.**  
Oponent: **Ing. Radim Kopřiva, Ph.D.**

Oponentský posudek disertační práce Ing. Jana Štefana byl zpracován na základě žádosti děkana ČVUT v Praze, Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ze dne 28. ledna 2020. Předkládaná disertační práce je vytvořena v českém jazyce a obsahuje celkově 238 stran textu, včetně příloh. Tělo disertační práce obsahuje 126 stran textu a dvě samostatné přílohy obsahují 82, resp. 30 stran textu. Disertační práce je členěna do šesti hlavních kapitol, další nečíslované kapitoly formálního charakteru jsou věnovány definici zkratk, veličin, publikací a použité literatury.

Disertační práce je zaměřena na posouzení způsobů porušování a degradace vybraných konstrukčních materiálů tlakových nádob reaktorů typu VVER 440 a VVER 1000 prostřednictvím porovnání výsledků zkoušek mechanických vlastností a výstupů fraktografických a strukturních analýz. Cíle disertační práce jsou založeny na hodnocení materiálů austenitického návaru a svarového kovu tlakové nádoby reaktoru.

První kapitola definuje cíle disertační práce, které jsou zaměřeny na hodnocení struktury a procesů porušování materiálů v návaznosti na výsledky zkoušek mechanických vlastností. Stanovené cíle jsou rozděleny na dvě hlavní oblasti, které odpovídají výčtu hodnocených konstrukčních materiálů.

Druhá kapitola se zaměřuje prostřednictvím rešeršní práce na popis základních problematik provozu tlakových nádob reaktorů typu VVER 440 a VVER 1000 - konstrukce, použitých materiálů a provozních degradačních mechanismů. Převážná část kapitoly je věnována detailnímu popisu požadavků na konstrukční materiály TNR a způsobu jejich výroby, s přihlédnutím zejména k materiálům austenitického návaru. Nedílnou součástí kapitoly je popis způsobu hodnocení provozní degradace konstrukčních materiálů prostřednictvím ozařovacích programů svědečných vzorků, včetně standardně používaných metod experimentálního hodnocení - zkoušek rázem v ohybu, tahových zkoušek a zkoušek statické lomové houževnatosti. Pozornost je také věnována inovativním metodám, kterým je v poslední době věnována stále větší pozornost, zejména vzhledem k miniaturizaci





používaných zkušebních těles a jejich semi-destruktivnímu přístupu – penetračním zkouškám (SPT) a zkouškám instrumentované tvrdosti (ABIT).

V rámci třetí kapitoly je v popsán experimentální program zkoušek a souvisejících analýz materiálů austenitického návaru VVER 440 a svarového kovu VVER 1000, včetně použitého zařízení. Kapitola prezentuje výsledky zkoušek mechanických vlastností, které poskytly základ pro výběr reprezentativních zkušebních těles pro následné analýzy.

Čtvrtá kapitola popisuje výsledky realizovaných strukturních a fraktografických analýz na vybraných zkušebních tělesech z hodnocených konstrukčních materiálů. Výsledky analýz jsou systematicky prezentovány v detailní a přehledné podobě. Na základě provedených analýz jsou následně zhodnoceny zjištěné mechanismy porušování zkušebních těles.

V závěrečných dvou kapitolách je pro jednotlivé hodnocené materiály diskutována návaznost aktuálně dosažených výsledků na předchozí experimentální a analytické činnosti autora, je provedeno porovnání výsledků s dostupnými literárními zdroji a také jsou definovány návrhy pro další pokračování experimentálních činností. Celkově je možné konstatovat, že v rámci řešení disertační práce byl vytvořen poměrně rozsáhlý soubor výsledků strukturních a fraktografických analýz, které ve spojení s výstupy zkoušek mechanických vlastnostech poskytují nové informace o mechanismech porušování reálných materiálů tlakových nádob reaktorů nejen ve výchozím, ale i ozářeném provozovaném stavu. Prezentované závěry disertační práce poskytují v ucelené podobě základ pro další rozvoj dané oblasti hodnocení konstrukčních materiálů jaderných elektráren.

#### Aktuálnost předkládané práce, použité metody a zpracování

Předkládaná disertační práce je bezesporu aktuální, zejména v návaznosti na aktuální trend prodloužování životnosti komponent jaderných elektráren. Pro zajištění dlouhodobého a bezpečného provozu tlakových nádob reaktorů, které jsou z provozního hlediska brány jako nevyměnitelné, je nutná znalost aktuálních mechanických vlastností a odezvy konstrukčních materiálů na účinky provozních degradačních mechanismů.

Pro realizaci posouzení způsobu porušování materiálů tlakových nádob reaktorů byly zvoleny konstrukční materiály austenitického návaru, který je kromě intenzivního neutronového toku také vystaven účinkům korozního působení chladiva primárního okruhu, a materiálů svarového kovu - tedy materiálů, které jsou z hlediska trendu degradace mechanických vlastností klíčové pro periodické hodnocení životnosti tlakových nádob reaktorů.

Soubor metod, použitých pro dosažení cílů disertační práce, sestával ze strukturních a fraktografických analýz, které byly realizovány ve vazbě na výsledky experimentů zkoušek rázem v ohybu a statické lomové houževnatosti, tedy základních metod, které jsou standardně pro hodnocení ozářených konstrukčních materiálů tlakových nádob reaktorů využívány. Výstupy disertační práce jsou kvalitním doplňkem experimentů realizovaných v rámci svědečných programů jaderných elektráren a poskytují základ pro další rozvoj v této





oblasti. Zpracování výsledků je provedeno kvalitně a k vyhodnocení jsou použity vhodné metody. Disertační práce obsahuje ojedinělé překlady, které nicméně výrazně nesnižují celkový dojem z prezentované práce. Jediná připomínka spočívá v tom, že napříč celou prací není zcela důsledně uváděno při prezentaci vlastních a převzatých výsledků ozářených materiálů, pro jaké energie je neutronová fluence uvažována. Vzhledem k rozdílné ustálené hodnotě energie neutronů pro hodnocení výsledků reaktorů PWR a VVER (1,0 MeV a 0,5 MeV) může být takto realizovaná prezentace výsledků mírně problematická, zejména v případě možného budoucího využití výsledků uvedených v rámci disertační práce.

Seznam použité literatury obsahuje relevantní dokumenty, mezinárodní odborné zdroje publikované v poslední době a vlastní publikace autora v oblasti řešení dané problematiky. V seznamu použité literatury je uvedeno celkově 73 zdrojů, ze kterých je 7 publikací vlastních. Převážně se jedná o odborné publikace citované v citačních databázích WoS, příp. Scopus. Z toho pohledu se jeví publikační činnost doktoranda jako dostatečná.

#### Návrh otázek k obhajobě

1. Jaká je vazba dosažených výsledků na principy aktuálních metodik hodnocení životnosti tlakových nádob reaktorů VVER v České republice (např. IAEA VERLIFE, normativně-technická dokumentace Asociace strojních inženýrů – NTD A.S.I.). Vzhledem k tomu, že tyto dokumenty jsou periodicky aktualizovány, existuje oblast, kam by mohly být získané poznatky implementovány?
2. Představuje výše podílu interkrystalické dekoheze, zjištěné v rámci fraktografického hodnocení porušených zkušebních těles, nějaký omezující faktor pro platnost výsledků dle současné normativní dokumentace pro hodnocení výsledků zkoušek mechanických vlastností?

#### Závěrečné zhodnocení disertační práce

Předložená disertační práce Ing. Jana Štefana je i přes výše uvedené drobné připomínky zpracována kvalitně, splnila stanovené cíle a její výsledky mohou najít další přínos v rámci rozvoje dané problematiky. Autor v rámci disertační práce dostatečně prokázal schopnost samostatné tvůrčí vědecké práce a své teoretické znalosti a proto disertační práci **doporučuji** k obhajobě a po úspěšném absolvování obhajoby a zodpovězení položených dotazů udělení titulu „Ph.D.“.

V Řeži dne 6. března 2020

Ing. Radim Kopřiva, Ph.D.  
Vedoucí oddělení Mechanické vlastnosti  
ÚJV Řež. a. s.

