

Oponentský posudek disertační práce

Název disertační práce:	Módy porušování konstrukčních materiálů tlakové nádoby reaktoru
Disertant:	Ing. Jan Štefan
Doktorský studijní program/obor:	Aplikace přírodních věd/Fyzikální inženýrství
Školící pracoviště:	Katedra materiálů, FJFI, ČVUT v Praze
Oponent:	Prof. Ing. Bohumír Strnadel, DrSc. FMMI, VŠB – TUO, KMI

Předmětná disertační práce o rozsahu 126 stran doplněná 69 obrázky a 22 tabulkami je přehledně členěna do 6 kapitol. Součástí práce je seznam zkratk, termínů a veličin a dvě přílohy, první: Austenitický návar TNR VVER 440: Výsledky o rozsahu 82 stran, druhá: Svarový kov TNR VVER 1000: Výsledky o rozsahu 30 stran, obě v samostatné vazbě. V úvodu celé práce jsou uvedeny Bibliografický záznam a výstižný Abstrakt v české a anglické verzi.

Prvním cílem práce je objasnění příčin rozptýlu lomové houževnatosti návarových materiálů Sv 07Ch25N13 a Sv 08Ch19N10G2B TNR VVER 440 v závislosti na teplotě. Rozptyl lomové houževnatosti byl vyšetřován z pohledu nehomogenity mikrostruktury, která ovlivňuje lokální mikromechanismus poškození a fraktografické rysy lomových ploch. Druhým cílem je zjistit, jak se mění souvislost mezi podílem charakteristických mechanismů porušení na lomové ploše vrubovaných těles zkoušky tříbodovým ohybem, vrubovou houževnatostí a neutronovou fluencí materiálu svarových spojů TNR VVER 1000, Sv 12Ch2N2MAA v závislosti na teplotě. Práce má jednoznačně experimentální charakter.

Členění práce je nestandardní, práce neobsahuje úvod a v první kapitole o rozsahu 2 stran jsou ihned specifikovány cíle práce i s racionálním zdůvodněním nutnosti znát, jak studované materiály mohou ovlivnit integritu TRN. Ve druhé kapitole označené jako Rešerše jsou uvedeny aktuální informace k provozní degradaci TRN, k hodnocení mechanických vlastností ocelí s důrazem na vliv neutronového záření a k chování materiálů TNR VVER 440 a VVER 1000 během technického provozu. Zvláštní pozornost je v této kapitole věnována technologii návarů TRN, mikrostrukturu, mechanickým vlastnostem a radiačnímu poškození návarových a svařovacích materiálů a považují ji vzhledem k tématice práce za nejdůležitější. Ve třetí kapitole Experimenty je uveden popis a výsledky provedených experimentálních prací u austenitických dvojvrstevných návarů s lokalizací kořene trhliny v návaru Sv 07Ch25N13 (12 zkušebních těles testovaných při teplotách 24, 50, 150 a 270°C) a v návaru Sv 08Ch19N10G2B (26 zkušebních těles testovaných rovněž při teplotách 24, 50, 150 a 270°C). Z těchto souborů bylo dále pro účely práce analyzováno celkem 7 těles, 5 s lokalizací kořene trhliny v návaru Sv 07Ch25N13, při teplotách 24, 50, 150 a 270°C a 2 tělesa s lokalizací kořene trhliny v návaru Sv 08Ch19N10G2B, při

teplotě 270°C. Kromě strukturální analýzy byly na těchto vybraných tělesech provedeny i fraktografické analýzy. Detailní výsledky těchto analýz jsou uvedeny v příloze 1 k vlastní disertační práci: Austenitický návar TNR VVER 440: Výsledky. Kapitola Experimenty pak pokračuje druhou částí, kde bylo analyzováno celkem 6 souborů zkušebních těles pro zkoušku rázem v tříbodovém ohybu svarového kovu Sv 12Ch2N2MAA, první, u kterého tělesa nebyla ozařována a dalších 5, kde byla tělesa ozařována neutronovými fluencemi 2.6, 4.0, 5.8, 8.1 a 11.2 · 10²³m⁻². Testování nárazové práce proběhlo u všech skupin v teplotním intervalu -90°C až 170°C, nastavení spodní testovací teploty přirozeně s posunem tranzitní křivky vlivem ozáření bylo vyšší a u nejvyšší fluence byla nárazová práce testována i při teplotě 210°C tak, aby byla spolehlivě zachycena horní mez KCV. Z teplotní závislosti vrubové houževnatosti tranzitních křivek KCV(T) byly pro všech 6 souborů podle kritéria KCV = 50 Jcm⁻² stanoveny tranzitní teploty. Tyto podle mého soudu náročné a velmi cenné experimenty jsou zdařile ilustrovány průběhy tranzitních křivek modelovaných pravděpodobně podle (r.2), parametry tohoto vztahu nejsou však s měnící se fluencí uvedeny. Fraktografická analýza lomových ploch byla provedena u tří těles testovaných v blízkosti tranzitní teploty, u nejvyšší fluence to byla 4 tělesa, tedy celkem u 19 těles. S využitím software NIS Elements byly vyhodnoceny podíly charakteristických mechanismů poškození v celém průřezu, osobně bych však v souvislosti se změnou napětově deformačního stavu přes průřez doporučoval hodnocení ve vybrané střední části, kde jsou do jisté míry zachovány podmínky rovinné deformace. Detailní výsledky těchto analýz jsou uvedeny v příloze 2 k vlastní disertační práci: Svarový kov TNR VVER 1000: Výsledky. Ve čtvrté kapitole Výsledky je uvedena pro austenitický návar TNR VVER 440 strukturální analýza návarů a kvalitativně jsou popsány mikromechanismy iniciace a šíření poškození. Autor uvádí na 4 stranách i komentář, jak strukturální složky a jejich podíl ovlivňují lomovou houževnatost návaru. U lomového poškození svarového kovu TNR VVER 1000 testovaném v závislosti na stupni ozáření na tělesech pro zkoušku rázem v ohybu byl v závislosti na hodnotě vrubové houževnatosti stanoven plošný podíl sledovaných mechanismů porušení. Navržené lineární regrese mají však velmi nízký koeficient korelace a nelze je považovat za spolehlivé. Charakteristiky podílu intergranulárního porušení a neutronové fluence jsou jednoznačně podle obr. 4-16 nezkorelované. V Diskusi se autor ve dvou kapitolách vrací komentářem k získaným experimentálním výsledkům a provedené fraktografické analýze. V kap. 5.1 kvalitativně komentuje vztah mezi mikromechanismy porušení a lomovou houževnatostí u austenitického návaru TNR VVER 440 a v kap. 5.2 potom vztah mezi mikromechanismy porušení a vrubovou houževnatostí svarového kovu TNR VVER 1000 se zvláštním důrazem na podíl intergranulárního porušení ovlivněného mírou neutronové fluence. U obou kapitol existuje však poměrně málo citací a srovnání s dosud ve světě získanými výsledky v podobných studiích. Na třech stranách autor uvádí výstižně získané závěry orientované především na vztah mikrostruktury, mechanismu porušení a charakteristickými rysy na lomové ploše.

Připomínky

U této disertační práce bylo možná lépe nahradit název módy slovy mechanismy nebo procesy porušení, slovo mód je užíváno spíše ve spojitosti s integrálním porušením tělesa v souvislosti s celkovým napětově deformačním stavem. Nakonec se tento termín, myslím, v celé práci potom ani neobjevuje.

Očekával bych, že právě na FJFI bude v práci věnována větší pozornost zpevňujícím mechanismům způsobeným neutronovým tokem, popsány a analyzovány jsou však jen dopady neutronové fluence na

mechanické vlastnosti a velmi omezeně na vlastní změny v mikrostruktuře. Mechanismy neutronového zpevnění jsou ale rozhodující pro vysvětlení posunu tranzitní křivky a snížení horní meze nárazové práce, resp. vrubové houževnatosti materiálů RTN.

Práce na obou klíčových tématech disertace je vedena na vynikající vysoce erudované úrovni v oblasti fraktografické analýzy. Velmi cenných výsledků bylo dosaženo zejména při posuzování podílu mikromechanismů porušení na lomových plochách těles pro zkoušku rázem v tříbodovém ohybu u svarového kovu a u kvalitativních popisů mikromechanismů iniciace a šíření poškození u austenitických návarů při stanovení lomové houževnatosti. Přesto bych očekával, že z tak obsáhlých experimentálních výsledků budou vyvozeny alespoň nějaké kvantitativní vztahy, napětově-deformační podmínky iniciace trhlin nebo dutinového poškození a intergranulárního lomu, které by dávaly podklady pro technologické parametry návarů nebo svarů s požadovanou kombinací pevnosti a houževnatosti.

Ani z diskuse, ale ani ze závěrů není patrné, jak by mohly získané výsledky napomoci třeba změně technologických parametrů svařování nebo navařování, a jak by se tyto parametry měly optimalizovat, aby bylo dosaženo maximální odolnosti RTN proti porušení. Plně chápu, že nelze provést přímo konkrétní návrh změny takových parametrů, ale určitě by bylo vhodné uvést a zdůraznit pro technology ty informace, které integritu RTN ovlivňují.

Dotazy

K práci nemám žádné dotazy, snad jen poznámku a doporučení, že výsledky hodnocení změny tranzitní křivky vrubové houževnatosti v závislosti na hodnotě neutronové fluence u studovaného svarového kovu by bylo vhodné publikovat v některém technologickém časopise. Myslím, že o takovou publikaci by byl ze strany technické veřejnosti zájem.

Závěrem konstatuji, že disertant je schopen samostatné vědecko-výzkumné práce, předloženou práci doporučuji k obhajobě a po úspěšném obhájení a splnění všech administrativních podmínek doporučuji, aby byl panu Ing. Janu Štefanovi udělen titul PhD.

Prof. Ing. Bohumír Strnadel, DrSc.

v Ostravě, 6. dubna 2020