POSOUZENÍ APLIKACE REGENERAČNÍHO ŽÍHÁNÍ V PROCESU ZAJIŠTĚNÍ DLOUHODOBÉHO PROVOZU VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORU VVER 440

RECOVERY ANNEALING APPLICATION ASSESSMENT IN THE PROCESS OF WWER 440 TYPE REACTOR INTERNALS LONG-TERM OPERATION

Petra Petelová[a)], Ondřej Buršík[a)], Václav Novák[a)], Barbora Marešová[a)], Radim Kopřiva[a)] a Aleš Materna[b)]

[a)] ÚJV Řež, a. s.
[b)] České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Abstrakt

Současný trend prodlužování životnosti komponent jaderných elektráren (JE) na 60 a více let vyžaduje zajištění jejich bezpečnosti a spolehlivosti. Jednou z možností prodloužení životnosti tlakové nádoby reaktoru je její regenerační vyžíhání, které je již ověřenou technologií a jehož aplikace do průmyslové praxe byla motivována hlavně nemožností výměny tlakové nádoby. Podobný proces, který by se věnoval i vnitřním částem reaktoru dosud však realizován nebyl. ÚJV Řež, a. s. realizuje v období let 2017 až 2020 výzkumný program, jehož cílem je návrh, vytvoření a certifikace standardního postupu pro obnovení výchozích vlastností materiálů vnitřních částí reaktorů typu VVER-440 metodou regeneračního žíhání. Úspěšné řešení tohoto problému přispěje nejen ke zvýšení životnosti JE, ale také současně k podstatnému snížení objemu radioaktivních odpadů, které by vznikly při potřebě výměny poškozených částí novými.

Current trend of long term operation of NPPs for more than 60 years requires assurance of its safety and reliability. One of the possible solutions how to extend service life of RPV is its thermal annealing, which became a verified technology and its application in nuclear industry was prompted mainly due to an inability of RPV exchange. A similar process, which would be focused on reactor internals, has not been realized yet. ÚJV Řež, a. s. is realizing a research program between years 2017 and 2020. The aim of this research is design, development and certification of a standard procedure for restoring the initial properties of VVER 440-type reactor internals by the thermal annealing method. Successful solution of this problem will contribute to long-term operational life of NPPs and lower radioactive waste production.

Úvod

V návaznosti na aktuální ekonomické a politické podmínky je současným celosvětovým trendem v jaderné energetice primárně prodlužování životnosti stávajících elektráren a jejich komponent.

Tlaková nádoba reaktoru (TNR) je klíčovou a nevyměnitelnou komponentou pro funkci jaderné elektrárny a její stav je průběžně monitorován programy svědečných vzorků, na základě kterých se posuzuje míra radiačního poškození strukturních materiálů. Konstrukce TNR a chemické složení materiálů prvních reaktorů typu VVER-440/230 měly výrazný vliv na zvýšenou míru degradace materiálů TNR a proto se již v 70. letech 20. století začala věnovat významná pozornost výzkumu regeneračního žíhání TNR. [1] [2]

Vnitřní části reaktoru (VČR) zahrnují komponenty umístěné uvnitř reaktoru, které plní tyto funkce: usměrňují proudění chladiva I. O., tvoří radiační a tepelné stínění a pomáhají definovat geometrii uspořádání aktivní zóny (AZ). Mezi VČR se řadí: šachta a dno šachty reaktoru, blok ochranných trub a koš AZ. Koš AZ je z hlediska radiačního namáhání

nejvýznamnější, jelikož se ze všech VČR nachází nejblíže jadernému palivu, a je tak nejvíce vystaven ionizujícímu záření. Koš AZ slouží k uložení palivových kazet a spolu se šachtou reaktoru tvoří radiační a tepelné stínění tělesa TNR. Koš se dále skládá z nosné desky, válcového pláště, hraněných plechů a 312 šroubů M12, které je upevňují.[3]

Vnitřní části reaktorů nejsou na rozdíl od TNR monitorovány programy svědečných vzorků a stupeň degradace jejich materiálů se tak odhaduje na základě literárních údajů ze zkoušek podobných materiálů, případně z prediktivních vztahů, udávaných v literatuře nebo výpočetních postupech a normách.

Materiály VČR jsou podrobeny silnějšímu ionizujícímu záření než TNR. V případě TNR byla technologie regeneračního žíhání úspěšně aplikována na reaktory typu VVER-440 již v 80. letech a jejich životnost byla tak významně prodloužena.[1][2] Řešení, které by věnovalo pozornost materiálům VČR, nebylo do současnosti realizováno.

Radiační poškození

Radiační poškození je úměrné velikosti fluence rychlých neutronů dopadajících na kovový materiál a projevuje se především vznikem Frankových dislokačních smyček, shluků vakancí a mikrodutin, dále shluky intersticiálů a segregací na hranicích zrn. Tyto nepravidelnosti v mikrostruktuře brání pohybu dislokací a tím přispívají ke zvýšení meze kluzu, snížení plasticity a způsobují radiační křehkost (snazší rozvoj trhlin).[4]

U tlakové nádoby reaktoru typu VVER-440/213, vyrobené z feritické oceli 15Ch2MFA, popř. 15Ch2MFAA, je citlivost k radiačnímu poškození způsobena především obsahem fosforu a mědi. K radiačnímu křehnutí mimo jiné přispívá segregace fosforu na hranicích zrn.[4] Jako ochrana TNR před korozí slouží vnitřní austenitický návar.

VČR jsou vyrobeny z korozivzdorné austenitické oceli stabilizované titanem 08Ch18N10T (složení viz Tab. 1). Kromě výše zmíněných degradačních mechanismů dochází u austenitických ocelí ještě k radiačně indukovanému koroznímu praskání pod napětím (IASCC) [5], které nastává při souběžném působení radiace a agresivního chemického prostředí primárního okruhu (demineralizovaná voda s H3BO3, KOH a NH4OH [6]).

Plánované prodlužování životnosti jaderných reaktorů představuje vyšší radiační zátěž materiálů VČR v závislosti na způsobu provozování JE. Zvýšená radiační zátěž vede ke snížení plasticity a zvýšení citlivosti ke koroznímu praskání. K odstranění těchto degradačních jevů se regenerační žíhání jeví jako velmi perspektivní, provozně a finančně méně náročná technologie spojená s příznivými environmentálními dopady.

Regenerační žíhání

Žíhání je procesem, při kterém dochází obecně ke zlepšení mechanických vlastností materiálu. Cílem regeneračního žíhání je odstranění předchozího poškození a obnovení výchozích vlastností materiálů.

První regenerační žíhání TNR proběhlo při teplotě 430 °C, což se ukázala být příliš nízká teplota pro dostatečné zotavení materiálu. Následně se osvědčila pro regenerační žíhání TNR teplota 475°C po dobu min. 100 hodin, kdy dochází k zotavení přibližně z 80 %.[7]

Z literatury je známo, že pro regeneraci struktury žáruvzdorné austenitické oceli nelze použít mechanismu změny krystalové mřížky jako u materiálu TNR, lze ale využít mechanismu difuze chromu a uhlíku. V běžné praxi žíháním austenitické oceli na teplotě 650 až 700 °C po dobu 1000 hod. nastane regenerace struktury. Při žíhání kolem 650 °C ale může dojít ke zcitlivění struktury k mezikrystalové korozi (MKK), které lze eliminovat následným rozpouštěcím žíháním na teplotách 1050 až 1150 °C. Ocel 08Ch18N10T je nicméně stabilizovaná titanem, který snižuje náchylnost k MKK.[8][9]

Na základě těchto informací je nedílnou součástí projektu návrh vhodného způsobu žíhání, který by byl aplikovatelný pro materiály VČR a přispěl tak k prodloužení životnosti komponent. Základní omezení spočívají v době žíhání a ve velikosti a členitosti komponenty.

Představení projektu

ÚJV Řež, a. s., Divize integrita a technický inženýring zahájila ve spolupráci s Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze řešení projektu TA ČR TH02020565 – „Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren“, jehož hlavním cílem je vytvoření certifikovaného postupu pro obnovení výchozích vlastností vysoce ozářeného materiálu VČR typu VVER 440 metodou regeneračního žíhání. ÚJV Řež, a. s. zajišťuje dlouhodobě komplexní monitoring stavu TNR i VČR pro projektovou i prodlouženou životnost (až na 80 let) a projekt zabývající se možností regenerace vlastností VČR je tak inovativním rozšířením současných činností přispívající k dalšímu potenciálnímu zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti provozu JE.

Na počátku řešení projektu bude realizován výběr možných vhodných režimů regeneračního žíhání pro radiačně poškozený materiál VČR typu VVER 440/213. Specifikace vhodného režimu obnáší mimo jiné vymezení klíčových parametrů jako je teplota a časový průběh. Pro řešení problematiky bude využita fyzikální vlastnost radiací vyvolaných poruch - poruchy při teplotách vyšších, než je teplota ozařování, mohou rychleji difundovat a tím i anihilovat, čímž se radiační poškození snižuje, až prakticky úplně odstraňuje.

Dále budou navrženy typy zkušebních těles a způsob jejich výroby z vybraných komponent VČR. Průběžným výsledkem pak bude zhotovení funkčního vzorku.

Samotná optimalizace režimu regeneračního žíhání zkušebních těles z ozářených materiálů VČR bude posuzována měřením tvrdosti, protože měření tvrdosti je efektivní a rychlý způsob charakterizace vlastností materiálů a míry jejich degradace.

V návaznosti na měření tvrdosti budou realizovány další mechanické a mechanicko-korozní zkoušky, pomocí nichž bude hodnoceno zotavení materiálu. Konkrétně budou použity zkoušky tahem, lomové houževnatosti a citlivosti ke vzniku korozního praskání pod napětím. Hodnocení bude doplněno metalografickou a fraktografickou analýzou otestovaných zkušebních těles.

Pro daný projekt disponuje ÚJV Řež a. s. zkušebním zařízením a „polohorkými a horkými“ komorami, určenými ke zkouškám neozářených i ozářených zkušebních těles. Dále má ÚJV Řež, a. s. k dispozici ozářené reprezentativní materiály vnitřních částí reaktoru VVER-440, které jsou vhodné pro realizaci experimentálních činností.

Volba materiálu

Pro řešení projektu byl zvolen materiál VČR z uzavřené jaderné elektrárny VVER-440 Greifswald, která byla 15 let v provozu. Konkrétně se jedná o ozářený materiál z bloku I, čemuž odpovídá i výsledná radiační dávka (viz Tab. 2).

Tab. 1. Chemické složení materiálu 08Ch18N10T (v hm. %) [5]

Materiál	**C**	**Mn**	**S**	**P**	**Ni**	**Cr**	**Ti**	**Norma**
08Ch18N10T	≤ 0,08	1,0 – 2,0	≤ 0,02	≤ 0,035	9,0 – 11,0	17,0 – 19,0	≥5C ≤0,6	GOST 5632

Tab. 2. Ozářené materiály zvolené pro řešení projektu

Materiál	08Ch18N10T		
Původ	Greifswald I		
Ozářeno	2.4 dpa	5.2 dpa	11.4 dpa
Komponenta	Nosný válec 36 mm prstenec	Plášť koše aktivní zóny 32 mm prstenec	Hraněný plech 7 mm plát
Výrobce	Izhorskiye Závody		
Výrobní postup	Válcování + tepelná úprava + (svařeno + vertikální svary tepelná úprava/ horizontální svary bez tepelné úpravy)		

Závěr

Vývoj a následná certifikace metodiky regeneračního žíhání komponent VČR umožní zajistit výchozí podmínky pro obnovení mechanických vlastností vysoce ozářených materiálů, a tím případně prodloužit životnost důležitých součástí VČR a přispět tak k zajištění dlouhodobého a bezpečného provozu JE.

Samotný vývoj metodiky zahrnuje návrh a ověření optimálního režimu regeneračního žíhání materiálů VČR. Certifikace metodiky pak umožní její zavedení do průmyslové praxe.

Projekt TH02020565 – „Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren“ je řešen s finanční podporou TA ČR.

Literatura

[1] *Occupational exposure and reactor pressure vessel annealing*, ISOE European Technical Centre - CEPN Information Sheet No. 12 (1997), (dostupné online na: http://www.isoe-network.net/publications/pub-resources/pub-info-sheet/etc-information-sheets/198-etc-12/file.html) (28. 8. 2017),

[2] Brumovský, M., Ahlstrand, R., Brynda, J., Debarberis, L., Kohopaa, J., Kryukov, A., Server, W. (2008): *Annealing and re-embrittlement of RPV materials,* State of the art report, ATHENA WP-4, AMES Report N. 19. JRC 46534, EUR 23449 EN,

[3] Heřmanský, B. (1981): Jaderné reaktory, Praha: SNTL,

[4] Chatterjee, S., Kotak Shah, P. (2002): *WWER pressure vessel steel embrittlement: an overview*, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India,

[5] Petrequin, P., Pelli, R., Soulat, P.; Tavassoli, A. A. (1997): *General Review of Reactor Vessel Internals: Pressurised Water Reactors, including WWER,* Effect of Irradiation on Water Reactors Internals Volume 1, Luxembourg, European Commission,

[6] Štamberg K., Silber R. (2007): *Chemie provozu jaderných elektráren* (Učební texty - přepracované vydání), Praha (dostupné online na: http://www.jaderna-chemie.cz/data/documents/vyuka/stamberg/CHPJE_2015_text.pdf) (28.8.2017)

[7] Pelli, R., Törrönen, K., (1995): *State-of-the-art review on thermal annealing*, European Network on Ageing Materials Evaluation and Studies, Espoo,

[8] *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů.* 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3,

[9] Barták, J. (2008): *Svařování kovů v praxi: materiály, výpočty, technologie, požadavky na jakost, bezpečnost práce*, Praha: Dashöfer, ISSN 1803-2834.