

ANALÝZA VLIVU REGENERAČNÍHO ŽÍHÁNÍ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORU VVER 440

THE ANALYSIS OF THERMAL ANNEALING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF WVER 440 TYPE REACTOR INTERNALS

Ivana Schnablová ^{a)}, Radim Kopřiva ^{a)}, Kateřina Rusňáková ^{a)} a Aleš Materna ^{b)}

^{a)} ÚJV Řež, a. s.

^{b)} České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Abstrakt

Materiály komponent vnitřních částí reaktorů typu VVER 440 jsou za provozu vystaveny významně intenzivnějším degradačním mechanismům než tlaková nádoba reaktoru. Znalost odezvy konstrukčních materiálů vnitřních částí na probíhající degradační procesy je klíčová pro zajištění dlouhodobého provozu. Pro proces zajištění dlouhodobé životnosti komponent vnitřních částí se jako perspektivní jeví možné využití technologie regeneračního žíhání, která byla již dříve úspěšně aplikována k žíhání tlakových nádob reaktorů VVER 440. Regenerační žíhání slouží k významnému obnovení výchozích mechanických vlastností a tím i podstatnému prodloužení životnosti. Příspěvek prezentuje výsledky hodnocení mechanických vlastností v žíhaném i nežíhaném stavu (tvrdost, statická lomová houževnatost) na ozářeném materiálu vnitřních částí reaktoru VVER 440 – segmentu nosného válce z austenitické korozivzdorné oceli. Prezentované výsledky jsou výstupem rozsáhlého experimentálního programu na ozářeném a neozářeném materiálu vnitřních částí reaktoru v žíhaném i nežíhaném stavu, který je v letech 2017-2020 realizován ve spolupráci ÚJV Řež, a. s., a ČVUT v Praze, FJFI, v rámci projektu TH02020565 Technologické agentury České republiky.

Abstract

The materials of reactor pressure vessel internals are exposed to a significantly more intense neutron flux than reactor pressure vessel during their operation. The technology of thermal annealing can be one of the possible solutions to ensure long term service life of reactor pressure vessel internals. This method has been successfully applied for thermal annealing of reactor pressure vessel (RPV) WVER 440. Thermal annealing can be one of the possible solutions to provide and re-establish initial mechanical properties and thus can contribute to long term operation of reactor pressure vessel internals. The paper presents the evaluation of mechanical properties (hardness, static fracture toughness) of irradiated Ti – stabilized austenitic stainless-steel type 321 WVER 440 reactor pressure vessel internals – core barrel. The paper includes results of experimental program unirradiated and irradiated Ti - stabilized austenitic stainless steel type 321 before and after thermal annealing, within the projects supported by Technology Agency of the Czech republic: TH02020565 „Assurance of Safe and Long-Term Operation of Nuclear Reactor Pressure Vessel Internals, which is realized by ÚJV Řež, a. s. in cooperation with Czech Technical University in Prague, FNSPE, in period from 2017 to 2020 with the support of Technology Agency of the Czech Republic.

Úvod

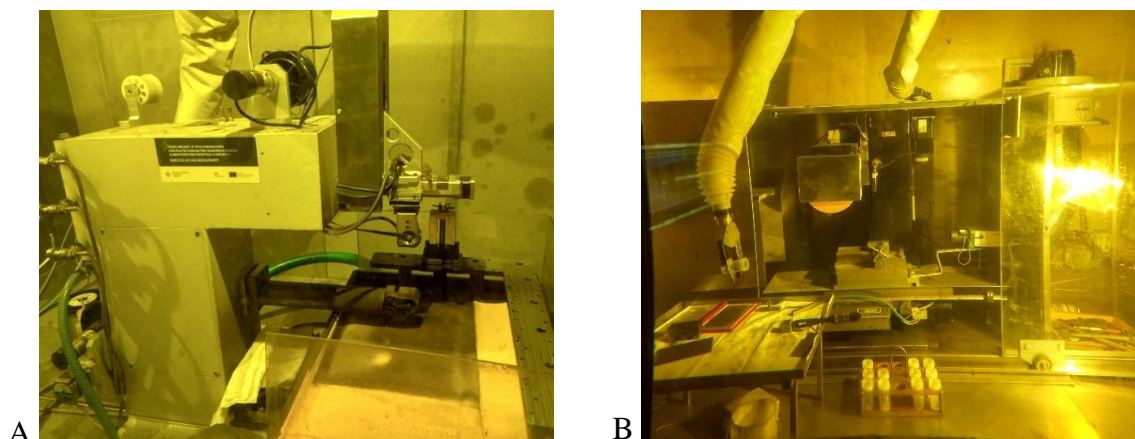
K zajištění bezpečného, spolehlivého a dlouhodobého provozu jaderných elektráren (JE) je nutné zajistit zejména integritu a pevnost komponent jaderných reaktorů a primárního okruhu. Znalost aktuální míry degradace použitých materiálů v průběhu provozu a posuzování jejich případného vývoje je jedním z hlavních požadavků na zpřesnění podkladů pro analýzu bezpečnosti a zbytkové životnosti komponent jaderných reaktorů. Pro zjišťování míry degradace tlakové nádoby reaktoru jsou využívány výstupy tzv. svědečných programů ozařovacích těles,

kteře poskytují informace nejen o aktuální míře degradace strukturních materiálů, ale i pro budoucí predikci [1].

Materiály vnitřních částí reaktorů nejsou monitorovány programy svědečných těles, jako je tomu v případě tlakových nádob reaktorů. Stupeň degradace materiálů vnitřních částí se tak odhaduje převážně na základě literárních údajů ze zkoušek podobných materiálů, případně z prediktivních vztahů, udávaných v literatuře, nebo výpočetních postupech a normách. Vnitřní části reaktoru (VČR) jsou během provozu vystaveny náročným podmínkám, včetně vysokého toku neutronů a nepříznivému prostředí chladiva. VČR zahrnují komponenty, které jsou umístěny uvnitř jaderného reaktoru a plní následující funkce: tepelné a radiační stínění tlakové nádoby reaktoru, usměrňování průtoku chladiva primárního okruhu, definovaná geometrie aktivní zóny [2]. Mezi hlavní komponenty vnitřních částí reaktorů VVER 440 patří šachta a dno šachty reaktoru, blok ochranných trub a koš aktivní zóny (KAZ). Z hlediska radiačního namáhání je nejvíce ohrožen koš aktivní zóny, ve kterém je umístěno jaderné palivo a je tak nejvíce vystaven působení neutronového záření. KAZ spolu se šachtou reaktoru tvoří stínění, které chrání samotnou TNR před účinky tepla a neutronového toku, a dále jsou v něm uloženy palivové soubory. Samotný KAZ se skládá z nosné desky, válcovitého pláště, hraněných plechů a šroubů M12, které tyto plechy upevňují [3] ,[4].

Experimentální materiál

Vnitřní části reaktoru typu VVER 440 jsou vyrobeny z austenitické korozivzdorné oceli s označením 08Ch18N10T (ekvivalent oceli AISI 321). Pro experimentální činnosti byly využity části ozářeného archivního materiálu, které byly odebrány z přímo provozovaných vnitřních částí reaktoru VVER 440 (typ V230) prvního bloku německé jaderné elektrárny Greifswald (JE byla odstavena po 16 letech v provozu). Chemické složení experimentálního materiálu i výsledná radiační dávka je uvedena v tab. 1, tab. 2. Jelikož bylo pro řešení projektu k dispozici jen omezené množství experimentálního ozářeného materiálu, byla pro zkoušky mechanických vlastností (zejména zkouška tvrdosti a statické lomové houževnatosti) vyrobena miniaturizovaná zkušební tělesa – mCT (10 x 10 x 4 mm). Všechny kroky výroby ozářených zkušebních těles proběhly v komplexu horkých komor (HK) na pracovišti odd. Vysokoaktivní laboratoř a ozařovací experimenty, ÚJV Řež, a. s. (obr. 1).



Obr. 1: A – Elektrojiskrová drátová řezačka, B – Broušení ozářených zkušebních těles (oddělení Vysokoaktivní laboratoř a ozařovací experimenty, ÚJV Řež, a. s.)

Experimenty a diskuze výsledků

Před samotným žiháním byla na ozářených zkušebních tělesech změřena tvrdost HV 5 dle Vickerse. Zkoušky tvrdosti byly prováděny dle normy ČSN EN ISO 6507–1 [5]. K měření tvrdosti byl použit tvrdoměr ZHV 30 od společnosti Zwick/Roell Indentec. Tvrdoměr je umístěn

v olovem stíněné polohorké komoře akreditované laboratoře odd. Mechanické vlastnosti, ÚJV Řež, a. s. Na základě vyhodnocení výsledků měření tvrdosti a žíhání neozářených zkušebních těles v roce 2018 a 2019 [6], [7], [8] byly pro ozářené zkušební tělesa zvoleny dvě žíhací teploty: 550 °C a 600 °C. Další parametry žíhání jsou následující: výdrž na žíhací teplotě – 1, 4 a 6 hodin, rychlost ohřevu – 10 °C/min, chladnutí: v uzavřené žíhací peci, prostředí – vzduch.

V příspěvku budou prezentovány výsledky hodnocení mechanických vlastností v žíhaném i nežíhaném stavu (tvrdost, statická lomová houževnatost) na ozářeném materiálu vnitřních části reaktoru VVER 440 – segmentu nosného válce z austenitické korozivzdorné oceli. Rozdíl mezi výsledky měření tvrdosti HV 5 na ozářených zkušebních tělesech před a po žíhání na teplotě 550 °C a 600 °C, jsou uvedeny v tab. 3 a graficky znázorněny na obr. 2.

Klíčovou metodou zvolenou pro ověřování vlivu regeneračního žíhání na experimentální materiál je zkouška statické lomové houževnatosti. Zkouška byla provedena na trhacím stroji INSTRON 5967 umístěna v polohorké komoře 12 (PHK12), v akreditované laboratoři odd. Mechanické vlastnosti, ÚJV Řež, a. s. Pro účely provedení zkoušky bylo toto zařízení vybaveno teplotní komorou INSTRON – SFL EC1657, která umožňuje provádět zkoušky při teplotách od –196 °C do +350 °C.

Při zkoušce lomové houževnatosti nebylo možné použít snímač rozevření trhliny a aplikovat metodu postupného odlehčování zkušebního tělesa během zatěžování – metodou poddajnosti. Během zkoušky se odečítala zatěžovací síla a posunutí bodu síly ze snímače v pístu trhacího stroje, kdy je výstupem graf síla – posunutí. Z uvedeného důvodu byla pro stanovení odolnosti materiálu vůči iniciaci a šíření trhliny stabilního lomu použita normalizační metoda (normalization data reduction technique – NDRT), která je definována v normě ASTM E1820 [9] jako alternativní způsob stanovení J-R křivky a kritické hodnoty J-integrálu.

Výsledky zkoušek statické lomové houževnatosti ve formě závislosti normalizované síly na normalizované plastické deformaci jsou graficky znázorněny na obr. 3 až obr. 5. Z naměřených hodnot je patrné, že k největší obnově vlastností dochází u těles žíhaných při teplotě 600 °C po dobu 4 a 6 hodin. Tento efekt je nejlépe patrný na výsledcích zkušebních těles žíhaných po dobu 6 hodin a zkoušených při provozní teplotě VČR (310 °C).

Průměrné hodnoty kritické hodnoty J-integrálu $J_{0,2}$ pro jednotlivé stavy ozářeného materiálu nosného válce jsou porovnány a graficky znázorněny na obr. 6.

Závěr

Cílem regeneračního žíhání je odstranění předchozího poškození a obnovení výchozích vlastností. V první fázi experimentů na ozářené austenitické korozivzdorné oceli 08Ch18NT10 (nosný válec – 2,4 dpa) byl ověřen vliv regeneračního žíhání při teplotě 550 °C a 600 °C s výdrží 1, 4 a 6 hodin. Experimentální měření vlivu regeneračního žíhání na mechanické vlastnosti ozářené austenitické korozivzdorné oceli 08Ch18N10T (nosný válec – 2,4 dpa) ukázalo, že optimální režim regeneračního žíhání je při teplotě 600 °C s výdrží 4 a 6 hodin na této teplotě.

Při této teplotě došlo k poklesu tvrdosti ozářeného materiálu z hodnoty 292 na 190 HV 5 (nosný válec – 2,4 dpa), což téměř odpovídá výchozímu stavu neozářených zkušebních těles. Z výsledků porovnání průměrných hodnot kritické hodnoty J-integrálu $J_{0,2}$ je patrný největší pozitivní vliv u žíhacího režimu 600 °C s výdrží 6 hodin na této teplotě. Zkouška statické lomové houževnatosti, provedená při provozní teplotě materiálu VČR, prokázala obnovu hodnoty $J_{0,2}$ ~89 %, což je ve shodě s trendem změn výsledků tvrdosti. Experimentální program bude pokračovat následujícími experimentálními aktivitami:

- stanovení režimu regeneračního žíhání z výsledků měření tvrdosti a statické lomové houževnatosti materiálu nosného válce pro materiál koše aktivní zóny (KAZ) a hraněného plechu,

- měření mechanických vlastností (tvrdost, statická lomová houževnatost) na zkušebních tělesech typ mCT před a po regeneračním žihání z materiálu koše aktivní zóny (KAZ) a hraněného plechu.

Tab. 1: Chemické složení Ti stabilizované austenitické korozivzdorné oceli 08Ch18N10T [hm. %]

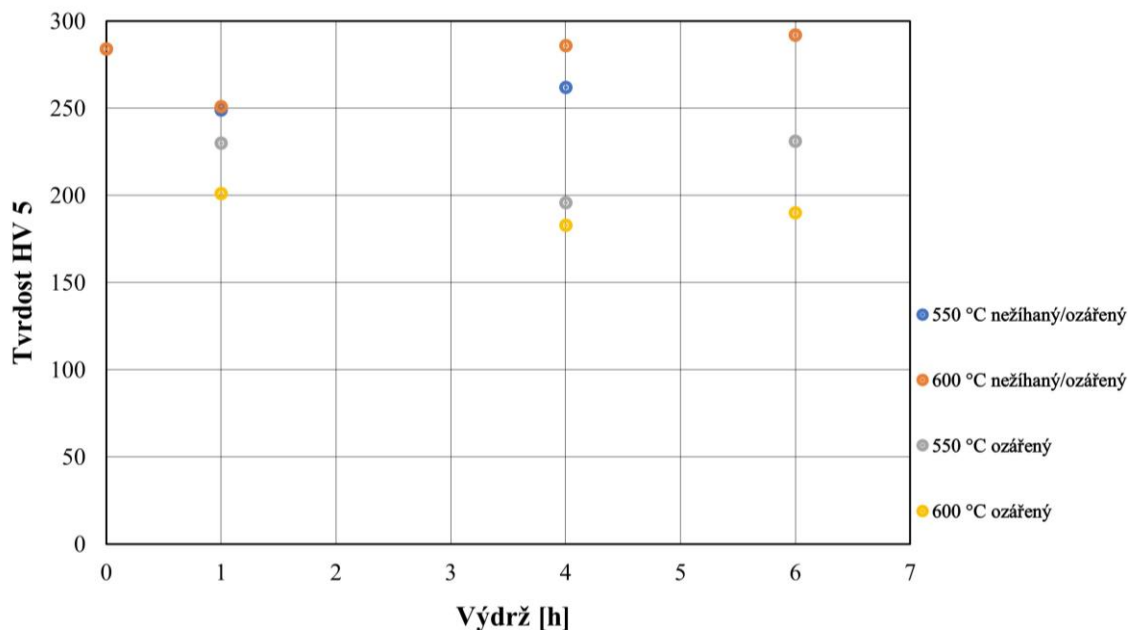
Materiál	C	Mn	S	P	Ni	Cr	Ti
08Ch18N10T	≤ 0,08	1,0 – 2,0	≤ 0,02	≤ 0,035	9,0 – 11,0	17,0 – 19,0	≥ 5C ≤ 0,6

Tab. 2: Výsledná radiační dávka pro zvolený ozářený materiál

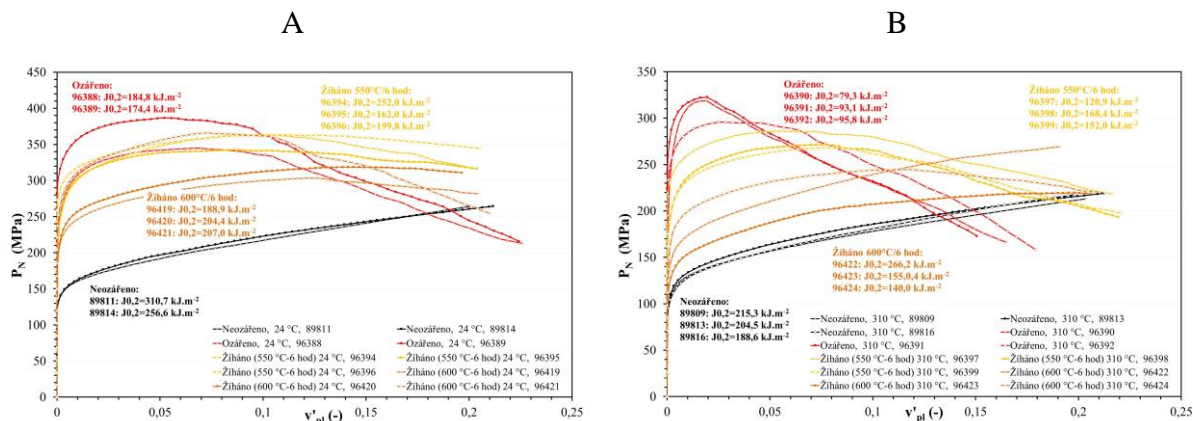
Ozářeno	2,4 dpa	5,2 dpa	11,4 dpa
Komponenta	Nosný válec 36 mm prstenec	Plášť koše aktivní zóny 32 mm prstenec	Hraněný plech 8 mm plát

Tab. 3: Výsledky měření tvrdosti HV 5 na ozářených zkušebních tělesech z austenitické korozivzdorné oceli 08Ch18N10T (nosný válec – 2,4 dpa, Greifswald I)

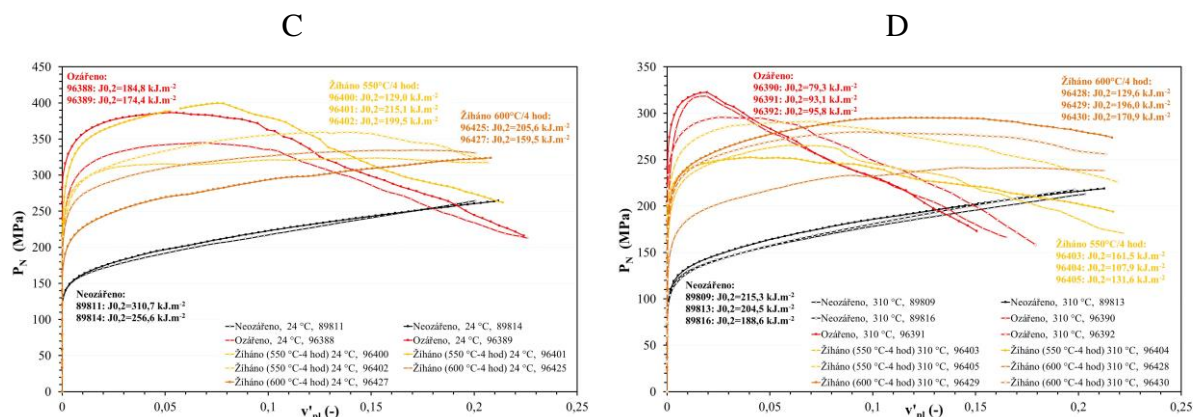
Žihací teplota [°C]	Výdrž na teplotě [h]	Tvrdost HV 5 (nežiháný/ozářený stav)	Tvrdost HV 5 (žiháný/ozářený stav)
550	1	249	230
	4	262	196
	6	292	231
600	1	251	201
	4	286	183
	6	292	190



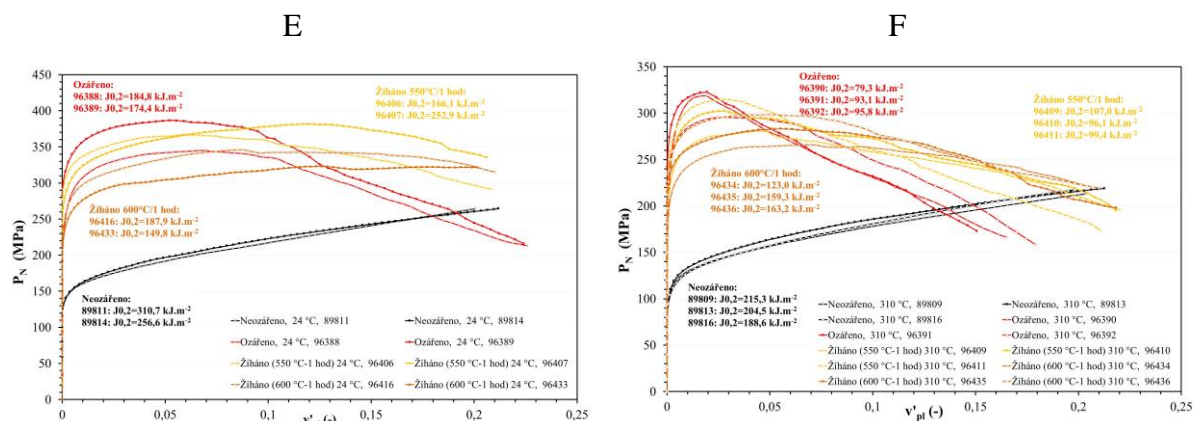
Obr. 2: Porovnání výsledků měření tvrdosti HV 5 ozářené Ti stabilizované austenitické korozivzdorné oceli 08Ch18N10T (nosný válec – 2,4 dpa, Greifswald I) – dvě žihací teploty 550 °C a 600 °C



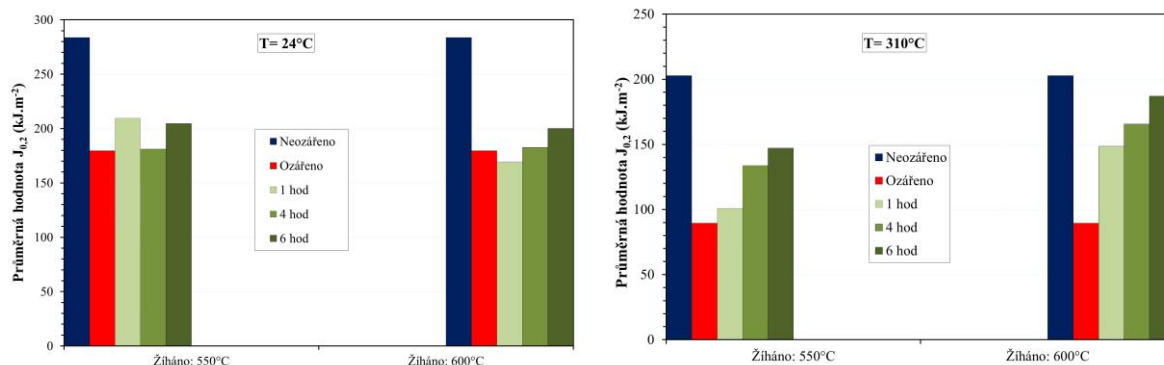
Obr. 3: Záznam zkoušky statické lomové houževnatosti při zkušební teplotě: A–24 °C, B–310 °C. Porovnání neozářeného a ozářeného materiálu se zkušebními tělesy žíhánými při teplotě 550 °C a 600 °C, výdrž 1 hodina (nosný válec – 2,4 dpa).



Obr. 4: Záznam zkoušky statické lomové houževnatosti při zkušební teplotě: C–24 °C, D–310 °C. Porovnání neozářeného a ozářeného materiálu se zkušebními tělesy žíhánými při teplotě 550 °C a 600 °C, výdrž 4 hodiny (nosný válec – 2,4 dpa).



Obr. 5: Záznam zkoušky statické lomové houževnatosti při zkušební teplotě: E–24 °C, F–310 °C. Porovnání neozářeného a ozářeného materiálu se zkušebními tělesy žíhánými při teplotě 550 °C a 600 °C, výdrž 6 hodin (nosný válec – 2,4 dpa).



Obr. 6: Porovnání průměrných hodnot kritické hodnoty J-integrálu $J_{0,2}$ při zkušební teplotě: G–24 °C, H–310 °C. (nosný válec – 2,4 dpa)

Literatura

- [1] 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*. Ageing Materials European Strategy, European Commission, Joint Research Institute, AMES Report N. 19, JRC 46534, EUR 23449EN. ISSN 1018-5593
- [2] IAEA (1999): *Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components to safety: PWR vessel internals*. Technical Document, IAEA-TECDOC-1119, International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria). ISSN 1011-4289
- [3] Was, G. S. (2007): *Fundamentals of Radiation Materials Science*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-49472-0
- [4] Konings, R. (Ed.) (2012): *Comprehensive Nuclear Materials*. Elsevier Science & Technology. ISBN 978-0-08-056027-4
- [5] ČNI (2018): *ČSN EN ISO 6507-1, Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Technická norma, Český normalizační institut, Praha.
- [6] Petelová, P., Eliášová, I., Kopřiva, R., Buršík, O., Tonarová, D., Materna, A. (2019): Analyses of thermal annealing influence on WWER 440 reactor pressure vessel internals materials. *28th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2019*, TANGER Ltd., Brno, pp. 787-792.
- [7] Petelová, P., Marešová, B., Buršík, O., Kopřiva, R., Materna, A. (2018): Vývoj procesu regeneračního žihání vnitřních částí reaktoru VVER-440 pro zajištění dlouhodobého provozu. *13. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní, str. 71-74. ISBN 978-80-261-0794-1
- [8] Eliášová, I., Klatovská, P., Kopřiva, R., Tonarová, D., Materna, A. (2019): Návrh optimálního režimu žihání vnitřních částí reaktoru VVER 440 pro zajištění dlouhodobého provozu. *14. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní, str. 227-232. ISBN 978-80-261-0885-6
- [9] ASTM (2013): *ASTM E 1820-13e1, Standard Test for Method Measurement of Fracture Toughness*. Standard, ASTM E 1820-13e1, ASTM International, West Conshohocken (PA).