

NÁVRH OPTIMÁLNÍHO REŽIMU ŽÍHÁNÍ VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORU VVER 440 PRO ZAJIŠTĚNÍ DLOUHODOBÉHO PROVOZU

DESIGN OF OPTIMAL THERMAL ANNEALING REGIME OF WWER-440 INTERNALS FOR PROVIDING A LONG-TERM OPERATION

Ivana Eliášová ^{a)}, Petra Klatovská ^{a)}, Radim Kopřiva ^{a)}, Dana Tonarová ^{a)} a Aleš Materna ^{b)}

^{a)} ÚJV Řež, a. s.

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

Abstrakt

Vnitřní částí reaktorů nejsou monitorovány programy svědečných vzorků, jako je tomu v případě tlakových nádob reaktorů. Stupeň degradace materiálů VČR se převážně odhaduje na základě literárních údajů ze zkoušek podobných materiálů, případně z prediktivních vztahů, udávaných v literatuře nebo výpočetních postupech a normách. Materiály komponent vnitřních částí reaktorů jsou navíc vystaveny významně intenzivnějším toku neutronů než tlaková nádoba reaktoru. Regenerační žíhání může být jedním z možných řešení pro obnovu výchozích mechanických vlastností komponent vnitřních částí reaktorů a může tak přispět k dlouhodobému provozu jaderných elektráren. Příspěvek obsahuje dosavadní výsledky projektu TH02020565 „Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren”.

Abstract

The reactor pressure vessel internals are not monitored by surveillance program. The degree of material degradation reactor pressure vessel internals is estimated on literature data from tests of similar materials, or from predictive relationships reported in literature, or calculation procedures and standards. The materials of reactor pressure vessel internals are exposed to significantly more intense neutron flux than the reactor pressure vessel. The thermal annealing can be one of the possible solutions to re-establish initial mechanical properties of reactor pressure vessel internals and thus can contribute to long term operation of nuclear power plants. This paper includes results obtained within the project TH02020565 “*Assurance of Safe and Long-Term Operation of Nuclear Pressure Vessel Internals*” which is realized by ÚJV Řež, a. s. in cooperation with Czech Technical University in Prague, FNSPE, in the period from 2017 to 2020 with the support of Technology Agency of the Czech Republic.

Úvod

Pro prodloužení životnosti materiálů tlakové nádoby reaktoru typu VVER-440 byla již v minulosti na několika jaderných elektrárnách úspěšně aplikována technologie regeneračního žíhání, která slouží k významnému obnovení výchozích vlastností a tím i k podstatnému prodloužení životnosti. Při ozařování kovových materiálů neutrony, elektrony, ionty nebo γ -zářením dochází ke změnám jejich struktury. Interakcí dopadajících částic o dostatečně vysoké energii s atomy krystalové mřížky dochází ke vzniku bodových poruch, tj. vakancí a intersticiálů. Tyto procesy jsou doprovázeny vznikem charakteristických mřížkových poruch, které degradují užitkové vlastnosti materiálu. Mřížkové poruchy vyvolávají změnu mikrostruktury, mechanických a mechanicko-korozních vlastností ozařovaného materiálu. Radiační poškození je souhrnem všech změn vlastností materiálu vlivem ozáření a je důležitým kritériem bezpečnosti provozu jaderného zařízení. Nejdůležitější změnou ozářené mikrostruktury u austenitu používaného pro vnitřní části jaderných reaktorů typu VVER-440 je tvorba Frankových dislo-

kačních smyček a vrstevních chyb. Protože jsou dislokační smyčky častěji tvořeny intersticiálními atomy než vakancemi, mají silný vliv na rozvoj radiačně poškozené mikrostruktury. U ozářených materiálů dále rostoucí koncentrace vakancí umožňuje šplhání dislokací za nižších teplot. Vnitřní části reaktoru jsou vyrobeny z korozivzdorné austenitické oceli stabilizované titanem 08Ch18N10T. Kromě výše zmíněných degradačních mechanismů dochází u austenitických ocelí ještě k radiačně indukovanému koroznímu praskání pod napětím (IASCC), které nastává při souběžném působení radiace a agresivního chemického prostředí primárního okruhu (demineralizovaná voda s H_3BO_3 , KOH a NH_4OH) [1, 2, 3].

Experimentální materiál

Pro potřeby řešení projektu má hlavní řešitel projektu ÚJV Řež, a. s. k dispozici neozářenou korozivzdornou austenitickou ocel 08Ch18N10T (chemické složení je uvedeno v tab. 1 a tab. 2) a ozářenou korozivzdornou austenitickou ocel 08Ch18N10T z uzavřené JE Greifswald (VVER-440/213), která byla 15 let v provozu (1974-1990), konkrétně se jedná o ozářený materiál z bloku I (výsledná radiační dávka je uvedena v tab. 3). Pro výrobu neozářených zkušebních těles byly použity dvě tavby experimentálního materiálu 08Ch18N10T. Dvě odlišné tavby byly zvoleny pro možnost vzájemného porovnání výsledků dosažených na vzorcích z mírně odlišného materiálu. Pro potřeby experimentu byly vyrobeny 2 sady neozářených zkušebních těles. Z neozářeného bloku 08Ch18N10T první tavby (tab. 1) byly vyrobeny zkušební tělesa s rozměrem 12x12x60 mm, z neozářeného bloku 08Ch18N10T druhé tavby byly vyrobeny zkušební tělesa s rozměrem 15x15x17 mm. Na všech zkušebních tělesech byla změřena tvrdost HV5.

Experimenty

Před samotným žíháním byla na zkušebních tělesech obou taveb austenitické korozivzdorné ocele 08Ch18N10T v neozářeném stavu změřena tvrdost HV5. K měření tvrdosti byl použit tvrdoměr ZHV30 od společnosti Zwick/Roell Indentec. Tento tvrdoměr je umístěn na pracovišti hlavního řešitele projektu ÚJV Řež, a. s. v olovem stíněné polohorké komoře laboratoře oddělení Mechanické vlastnosti. Pro žíhání zkušebních těles byly vybrány následující žíhací režimy: 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C, 900 °C. Parametry žíhání: ohřev na teplotu: 10 °C/hod, výdrž na teplotě – 6 hodin, ochlazování zkušebních těles probíhalo v uzavřené peci. Po žíhání byla na zkušebních tělesech změřena tvrdost HV5. Výsledky zkoušek tvrdosti pro obě zkušební tavby neozářeného materiálu 08Ch18N10T jsou uvedeny v tab. 4 a tab. 5 a graficky znázorněny na obr. 1. Pro potřeby stanovení optimálního žíhacího režimu pro ozářené materiály byly spoluřešitelem projektu ČVUT FJFI provedeny doplňkové žíhací režimy při teplotě 550 °C a 600 °C s výdrží na teplotě 1, 2, 4 a 6 hodin, chlazení zkušebních těles probíhalo v uzavřené žíhací peci. Následně byla změřena tvrdost po žíhání HV5. Výsledky jsou uvedeny v tab. 6 a graficky znázorněny na obr. 2.

Analýza materiálu 08Ch18N10T v neozářeném stavu

Z výsledku měření tvrdosti HV5 je patrné, že vlivem rostoucí žíhací teploty dochází k mírnému poklesu tvrdosti. Výjimkou je žíhací teplota 700 °C, při které se tvrdost téměř nesnížila. Z tohoto důvodu byl analyzován vliv doby žíhání při teplotě na 700 °C na tvrdost oceli 08Ch18N10T v neozářeném stavu. Tyto doplňková měření byla provedena na pracovišti spoluřešitele projektu ČVUT FJFI. Na pracovišti spoluřešitele byla pro stanovení vlivu doby žíhání na změnu mechanických vlastností materiálu (změnu tvrdosti) zkušební tělesa ponechána na požadované teplotě 700 °C po dobu: 1, 2, 4 a 6 hodin, a následně zakalena do vody. Kalení do

vody bylo zvoleno z důvodu uchování mikrostruktury v okamžiku po ukončení žíhaní. Vliv doby žíhaní při teplotě 700 °C na tvrdost neozářené oceli 08Ch18N10T je uvedena v tab. 7.

Dále byla provedena mikrostrukturní analýza oceli 08Ch18N10T před a po žíhaní na teplotě 700 °C a též byla provedena analýza k citlivosti na mezikrystalovou korozi (MKK), tato analýza probíhala v akreditované laboratoři oddělení Podpora provozu energetických zařízení ÚJV Řež, a. s. Mikrostruktura analyzovaných vzorků byla austenitická, tvořena různě velkými austenitickými zrny s průměrnou velikostí cca 200 μm (obr. 3). Po naleptání byl lokálně patrný delta ferit. Zrna jsou v analyzovaných vzorcích rovnoosá, nejsou protažená v žádném směru. V mikrostruktuře jsou patrná menší i větší zrna (max. 720 μm). V analyzovaných vzorcích se vyskytovaly globulární karbidy o velikosti 1 μm na hranicích zrn i uvnitř zrn. Tento typ karbidů se nachází i ve výchozím stavu materiálu 08Ch18N10T, tudíž vznik těchto karbidů nelze výhradně považovat za důsledek žíhaní. Dále bylo provedeno hodnocení vměstků pomocí světelné mikroskopie a následné měření chemického složení přítomných vměstků pomocí EDS (energieově disperzní spektrometrie) (obr. 4). V analyzovaném vzorku austenitické korozivzdorné oceli 08Ch18N10T se vyskytovaly 3 typy vměstků: ostrohranné OV, deskovité DV, globulární GV. Distribuce vměstků byla homogenní, nebylo patrné vyšší množství u okraje nebo uprostřed vzorku. Ostrohranné vměstky byly pravidelného tvaru a vyskytovaly se ojediněle nebo ve shlucích. Deskovité vměstky se vyskytovaly ve shlucích a byly protažené v jednom směru (desítky μm), široké byly 3 μm. Globulární vměstky byly jemné, velikosti 1 μm. Tyto vměstky se vyskytovaly i v tepelně zpracovaných vzorcích, zejména na hranicích a uvnitř zrn. Z výsledku chemických analýz lze usoudit, že ostrohranné vměstky byly tvořeny pravděpodobně nitridy Ti. Deskovité vměstky se vyznačovaly poměrně vysokým obsahem síry a uhlíku. Jedná se pravděpodobně o karbosulfidy titanu $Ti_4C_2S_2$. Globulární vměstky byly nejspíše karbidy titanu TiC.

Pro analýzu vzorků k citlivosti na MKK bylo vybráno 5 vzorků z Tavby 1 (tab. 1) – jeden ve výchozím stavu a čtyři žíhané na teplotě 550 °C, 600 °C, 700 °C a 800 °C. Před samotnou analýzou byla provedena úprava povrchu všech zkušebních vzorků broušením na metalografickém papíře zrnitosti 1000. Expoziční část zkoušky byla provedena dle ČSN EN ISO 3651-2 metodou zkoušení v 16% roztoku kyseliny sírové/síranu měďnatém. Doba expozice byla 20 hodin. Po expozici byla tělesa příčně rozříznuta – řez probíhal kolmo k ose tváření. Mikrostruktura všech vzorků byla austenitická, hranice zrn byly po leptání zvýrazněny přítomností karbidických vměstků. Vzorek ve výchozím stavu a vzorek žíhaný při teplotě 550 °C vykazovaly oba rovnoměrný povrch bez výrazného korozního napadení (obr. 5a). Na povrchu vzorků žíhaných při teplotě 600 °C, 700 °C (obr. 5b) byly místy patrné náznaky korozního napadení o maximální hloubce ~5 μm. Vzorek žíhaný při teplotě 800 °C (obr. 5c) vykazoval lokálně důlky až do hloubky ~17 μm, které byly viditelné i na dalších řezech. V okolí těchto důlků byly po naleptání patrné známky MKK.

Závěr

Cílem regeneračního žíhaní je odstranění předchozího poškození a obnovení výchozích vlastností materiálů. Výsledky žíhaní na neozářených zkušebních tělesech materiálu 08Ch18N10T (austenitická nerezivějící ocel) ukázaly, že jako ideální se pro samotné žíhaní jeví teploty v rozmezí 500 °C – 600 °C. Na základě analýz a zkoušek mechanických vlastností před a po žíhaní bylo zjištěno, že při žíhací teplotě 700 °C dochází k menšímu snížení hodnoty tvrdosti a k zvýšení citlivosti na MKK. Při porovnání tvrdosti HV5 a velikosti zrna (v příčném a podélném řezu) je patrný Hall – Petchův vztah (čím větší velikost zrna, tím menší tvrdost). U oceli 08Ch18N10T v neozářeném stavu žíhaném při teplotě 700 °C při výdrži 1, 2, 4 a 6 hodin s následným kalením do vody, bylo ujištěno, že z původní hodnoty HV5 176 se tvrdost po 6 hodinách zvýšila na hodnotu 200 HV5. Tento nárůst tvrdosti se nedá vysvětlit ani proce-

sem kalení, ani mechanickou úpravou měřeného povrchu (nárůst tvrdosti se projevil jak u kalených a pomalu ochlazovaných zkušebních těles, tak i u zkušebních těles s neupraveným i přebroušeným a přešetřeným povrchem po žíhání). Pravděpodobným důvodem nárůstu tvrdosti může být i precipitační vytvrzení, kdy po žíhání při 700 °C vznikají ve zkoumané oceli 08Ch18N10T karbonitridy. Na základě dosažených výsledků budou pro žíhání ozářených materiálů zvoleny dvě teploty žíhání: 550 °C, 600 °C. Vývoj 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.

Literatura

- [1] Petelová, P., Marešová, B., Buršík, O., Kopřiva, R., Materna, A. (2018): Vývoj procesu regeneračního žíhání vnitřních částí reaktoru VVER-440 pro zajištění dlouhodobého provozu. *Sborník 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
- [2] Padilha A.F., Rios P. R. (2002): *Decomposition of Austenite in Austenitic Stainless Steels*. ISIJ International, Vol. 42, No. 4, pp. 325-337. Online ISSN 1347-5460, Print ISSN 0915-1559
- [3] Sourmail, T. (2001): *Precipitation in creep resistant austenitic stainless steels*. Materials Science and Technology, Vol. 17, No. 1, pp. 1-14. ISSN 0267-0836

Tabulky a obrázky

Tab. 1: Tavební analýza materiálu 08Ch18N10T číslo 278075 s předepsanými hodnotami, tavba 1

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Ti	V	Nb	N	W	Co	H
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm	%	%	ppm
0,05	1,66	0,52	0,031	0,005	17,5	10,1	0,12	0,09	0,058	0,35	0,07	0,024	130	0,03	0,04	1m4

Tab. 2: Chemické složení druhé tavby materiálu 08Ch18N10T, kolektor PG z JE Greifswald – tavba 2

C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	Al	P	V
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0,102	0,520	1,446	18,08	9,79	0,048	0,023	0,61	0,109	0,023	0,013

Tab. 3: Ozářené materiály zvolené pro řešení projektu

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

Tab. 4: Výsledky měření tvrdosti HV5 na neozářených zkušebních tělesech z materiálu 08Ch18N10T před a po žihání, materiál první tavby

Žihací teplota								
Stav	nežiháno	450 °C	500 °C	550 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
Tvrdość HV5	181	164	164	171	161	178	163	160

Tab. 5: Výsledky měření tvrdosti HV5 na neozářených zkušebních tělesech z materiálu 08Ch18N10T před a po žihání, materiál z druhé tavby

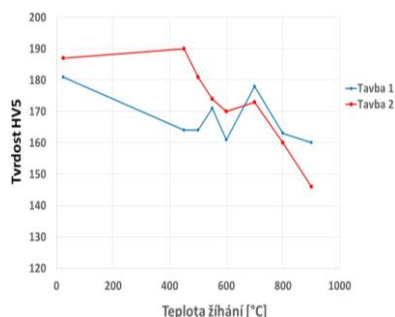
Žihací teplota								
Stav	nežiháno	450 °C	500 °C	550 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
Tvrdość HV5	187	190	181	174	170	173	160	146

Tab. 6: Výsledky měření tvrdosti HV5 na neozářených zkušebních tělesech z materiálu 08Ch18N10T po žihání, materiál z první tavby

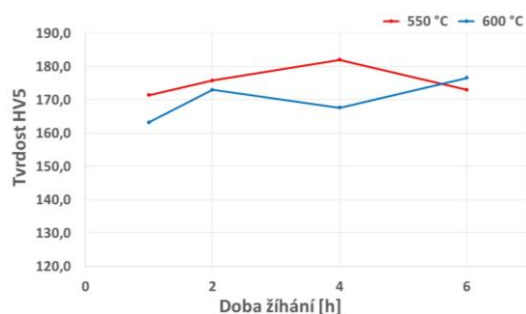
Teplota žihání	Výdrž	Tvrdość HV5	Teplota žihání	Výdrž	Tvrdość HV5
550 °C	1	171,4	600 °C	1	163,2
	2	175,8		2	173
	4	182		4	167,6
	6	173		6	176,6

Tab. 7: Vliv doby žihání při teplotě 700 °C na tvrdost neozářené austenitické nerezavějící oceli 08Ch18N10T

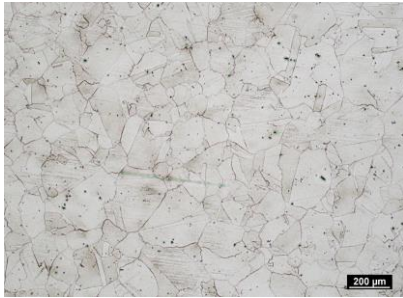
Teplota žihání	Výdrž	Tvrdość HV5
nežiháno	0	176
700 °C	1	184
	2	191
	4	190
	6	200



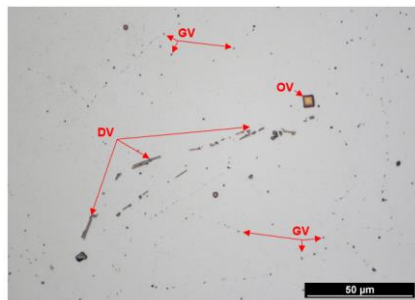
Obr. 1: Porovnání výsledků měření tvrdosti (HV5) dvou experimentálních taveb oceli 08Ch18N10T



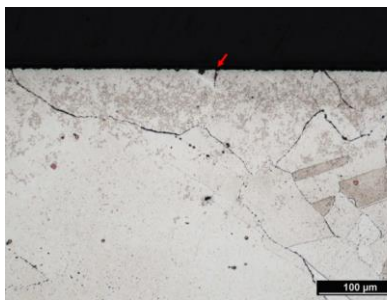
Obr. 2: Porovnání výsledků měření tvrdosti (HV5) pro teploty 550 °C a 600 °C při výdržích 1, 2, 4, 6 hod oceli 08Ch18N10T



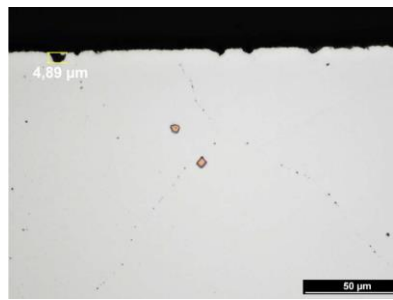
Obr. 3: Mikrostruktura austenitické nerezavějící oceli 08Ch18N10T v nezářeném stavu při různých zvětšeních (nežiháno, neleptáno)



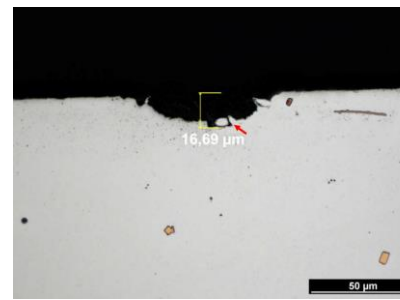
Obr. 4: Stanovení chemického složení jednotlivých typu vměstků na zkušební tělese oceli 08Ch18N10T pomocí metody EDS (energiově disperzní spektrometrie). OV – ostrohranné vměstky, DV – deskovité vměstky, GV – globulární vměstky



a



b



c

Obr. 5: Detail stavu povrchu mikrostruktury v příčném řezu žiháno při: a) 600 °C, b) 700 °C, c) 800 °C