

Atestace přídavného materiálu zn. Inconel 52(M) pro opravné svařování TIG tlakové nádoby reaktoru VVER 1000

Opravné svařování tlakových nádob reaktorů je v současné době relativně široce diskutované téma, kdy s narůstajícími provozními roky jaderných bloků se může stát důležitou součástí zajištění jejich dlouhodobého provozu. Technologie opravy tlakových nádob reaktorů existuje již od doby projektu jaderných reaktorů, nicméně současné požadavky na technické zabezpečení a na vlastní průběh takové opravy může splnit pouze taková technologie opravy, která nevyžaduje obvyklé doprovodné tepelné režimy, jako je přehřev a následné tepelné zpracování. Důležitým aspektem je také vyloučení potřeby výměny přídavných materiálů aplikovaných na opravy různých materiálových variant tlakových nádob, jako je především základní materiál, návary a obvodové svary. Byl vyvinut speciální svařovací automat pro svařování TIG na ozářeném základním materiálu tlakové nádoby daným přídavným materiálem programově řízený s následným vyhodnocením vybraných vlastností některých materiálových kombinací. Porovnání výsledků zkoušek ozářených materiálů a materiálů neozářených pak budou podávat přesnější informace o degradaci těchto materiálů a zvláště i opravného svarového kovu vlivem ozáření.

Úvod

První návrhy na použití vysokocelikové slitiny Inconel 52 pro opravy tlakových nádob reaktorů (TNR) typu VVER se objevuje již na začátku tohoto století. V roce 2004 byly dokonce ověřeny vlastnosti opravného svaru a tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu TNR VVER 440 v rámci navrženého kvalifikačního programu. Ukázalo se, že materiál Inconel 52 vykazuje velmi dobré mechanické i korozní vlastnosti. Na konci roku 2004 bylo vydáno stanovisko Institutu technické inspekce (v té době jedinou, v dnešní terminologii, autorizovanou osobou) k použitelnosti přídavného materiálu Inconel 52 pro opravy základního materiálu TNR typu VVER 440. Po šesti letech se na jaderné elektrárně Temelín (bloky typu VVER 1000) ukázalo, že nutnost opravy nemusí být vyvolána jen dlouhodobým provozem bloku a jeho vlivem na stávající necelistvosti materiálu, ale že i krátkodobé provozní problémy mohou být příčinou nutnosti opravy. V roce 2012 byl proto zahájen projekt na atestaci a kvalifikaci přídavného materiálu Inconel 52 pro použití při opravách na TNR VVER 1000. Tento projekt je realizován díky finanční podpoře Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci programu TIP 2012 a podpoře společnosti ČEZ, a.s.

Základní koncept projektu

Současný projekt byl připraven pracovníky čtyř organizací, které mají bohaté zkušenosti se zkouškami, které bylo nutné realizovat, ale především se zkouškami na konkrétních materiálech, tedy přídavného materiálu Inconel 52 a základního materiálu TNR. Nedílnou součástí projektu je také provedení zkoušek na ozářených materiálech. Těmito organizacemi tedy jsou ŠKODA JS a.s., ÚJV Řež a.s., VZÚ Plzeň s.r.o. a CV Řež s.r.o.

Na základě zkušeností s atestací přídavného materiálu Inconel 52 pro opravu TNR typu VVER 440 bylo v první řadě důležité zjistit, zda bude nutné stanovit přesné parametry svařování pro prvních x vrstev pro dosažení požadované kvality tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu TNR typu VVER 1000 – oceli

15Ch2NMFA. Jinými slovy ověřit nutnost použití metody tzv. žihací housenky. Poté byl připraven atestačně-kvalifikační program zkoušek, který byl konzultován s autorizovanou osobou a s Českým svářečským ústavem v Ostravě. Součástí tohoto programu je provedení zkoušek na klasických i méně běžných typech zkušebních těles.

Výstupem projektu budou kromě výsledků zkoušek také stanovení zbytkových prnutí, která lze očekávat ve stěně TNR po opravě a návrh speciálního robotizovaného systému, který bude schopný svařovat v prostředí vysoké radiace. Na tomto místě je vhodné doplnit, že oprava stěny TNR znamená odstranění vady (max. do hloubky cca 35 mm), a to do určitého tvaru uzavřeného žlábků nebo kavity a následné zavaření.

Technologické zkoušky s Inconelem 52

Provedení technologických zkoušek bylo první etapou projektu. Předmětem technologických zkoušek bylo ověření nutnosti použití žihací housenky a stanovení optimálních parametrů svařování. Ověření nutnosti žihací housenky znamená stanovení příkonů pro navařování prvních x průchodů, resp. stanovení jejich vzájemného poměru za účelem dosažení požadovaných vlastností tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu. Výsledkem tohoto studia bylo, že nelze použít stejný příkon pro všechny vrstvy navařování za předpokladu, že se nebude upravovat/snižovat výška svarových housenek v jedné vrstvě, ale že pro prvních x vrstev musí být stanoveny přesné hodnoty příkonů.

Speciálními zkouškami na zařízení GLEEBLE 3800 bylo ověření celistvosti Inconelu 52 odolnosti jednak proti vzniku horkých trhlin tak i porušení typu Ductility-Dip Cracking (DDC). Poslední technologickou zkouškou pak bylo ověření formování housenky v různých polohách a optimalizace bočního překrytí sousedících housenek včetně velikosti vrcholového úhlu W-elektrody.

Návrh atestačně-kvalifikačního programu [1]

Označení „Atestačně – kvalifikační program“ znamená, že zahrnuje zkoušky pro ověření vlastností čistého svarového kovu (atestace) a ověření vlastností Inconelu 52 v kombinaci s materiálem TNR a to nejen se základním materiálem TNR, ale také v kombinaci s návarem a obvodovým svarem TNR (kvalifikace). Program byl postaven tak, aby bylo možné provést ověření vlastností na výchozích tedy neozářených stavech materiálů, dále na ozářeném materiálu po provedeném svařování a nakonec pro stav materiálu, který byl nejdříve ozářen a pak navařen přídavným materiálem Inconel 52. Tato poslední varianta se nejlépe přibližuje skutečnosti, tzn. opravě aktivní TNR po určité době provozu. Je však také nejnáročnější z hlediska technické vybavenosti a vlastního provedení, protože navařovat na ozářený materiál vyžaduje speciální zařízení, které je umístěno v horkých komorách určených pro práce na radioaktivních materiálech. Problémem je také možnost ozařování dostatečně velkého bločku materiálu pro navařování.

Teploata [°C]	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A [%]	Z [%]
20	621	471	31	60
100	590	435	33	62
290	504	364	27	54
350	513	393	25	58
400	476	352	32	65

Tab. 1 – Mechanické vlastnosti opravného svarového kovu – střední hodnoty

Mezi navržené zkoušky byly zahrnuty zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu, zkouška lomové houževnatosti, zkoušky nízkocyklové únavy, korozně-mechanické zkoušky v prostředí primárního okruhu VVER 1000, zkoušky lámavosti a v neposlední řadě též strukturální analýzy.

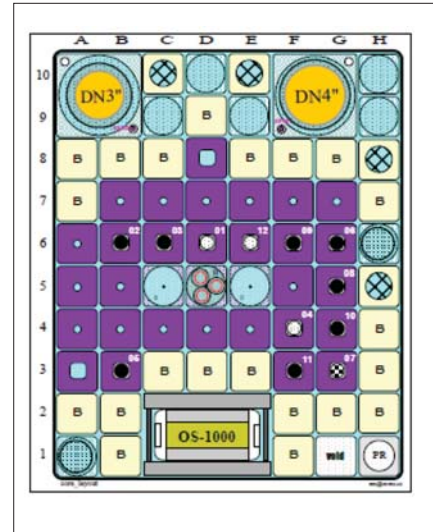
Ozařování v CV Řež

Všechna navržená zkušební tělesa určená pro zkoušení v ozařovaném stavu a 2 bloky základního materiálu pro navařování po ozáření byly umístěny společně do jedné ozařovací sondy [2] a ozařovány v aktivní zóně výzkumného reaktoru LVR-15 ve společnosti Centrum výzkumu Řež. Návrh ozařovací sondy byl navržen na základě neutronově-fyzikálních analýz, a to z hlediska požadavků na celkovou fluenci neutronů s energií $E > 0.5$ MeV, kterou mají zkušební tělesa obdržet, a s ohledem na ostatní

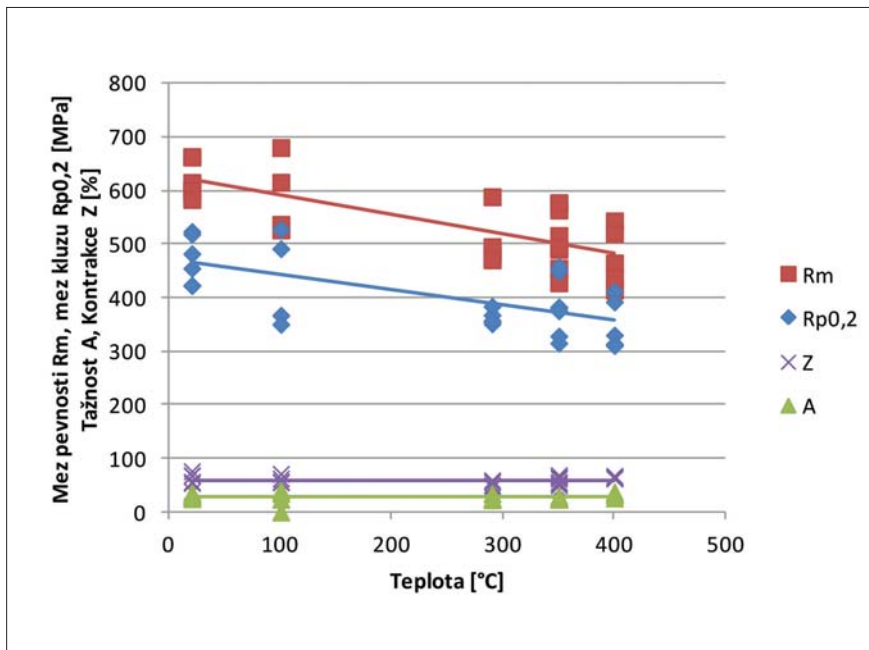
Navarování na ozářený materiál

Navarování přídavného materiálu Inconel 52 na bloky ozářeného základního materiálu TNR typu VVER 1000 bylo prováděno v boxu horké komory metodou TIG s přídavným materiálem. Jedná se o operaci, která vyžadovala velmi náročnou přípravu dálkově řízeného pracoviště z důvodu velmi vysoké aktivity navařovacích bloků. Veškeré manipulace uvnitř boxu jsou prováděny na dálku pomocí manipulátorů Master/Slave.

Vlastní zařízení pro navařování je automat se čtyřmi stupni volnosti (X, Y, Z, naklápění hořáku) vybavený zařízením pro posuv drátu předepsanou rychlostí se zásobní cívkou. Vlastní blok základního materiálu byl pneumaticky upnut na desku, ve které jsou umístěny kanály pro průtok chladicího média (voda). Pomocí tohoto média byla teplota navařovaného bloku udržována v požadovaném rozmezí teplot 40°C



Obr. 1 – Konfigurace standardní aktivní zóny s ozařovací sondy OS-1000

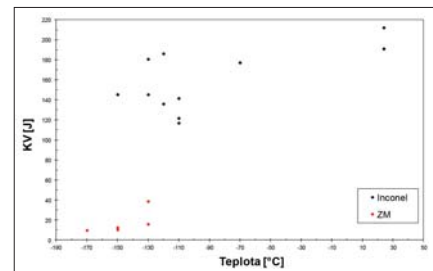


Obr. 2 – Mechanické vlastnosti opravného svarového kovu

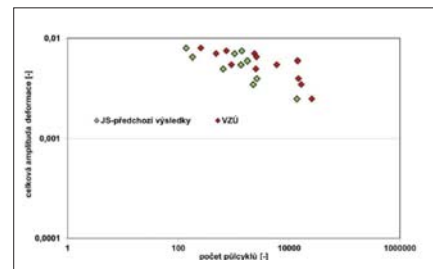
experimentální zařízení provozovaná v průběhu ozařování. Sonda byla umístěna na okraji aktivní zóny reaktoru za beryliovým reflektorem. Střední hodnota hustoty toku rychlých neutronů $E > 0,5$ MeV byla spočítána na $8,99 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ a pro dosažení cílové fluence neutronů $5,60 \times 10^{23} \text{ m}^{-2}$ bylo potřeba provozovat sondu v reaktoru po dobu cca tří měsíců 72 dní [3]. V polovině celkové doby provozu byla sonda vyjmuta z reaktoru, otočena o 180° a opětovně vložena do původní pozice v reaktoru. Toto otočení zajišťuje, že v průběhu druhé poloviny provozu je vyrovnán průběh fluence neutronů napříč zkušebními tělesy. Pro stanovení fluence neutronů ve všech zkušebních tělesech bylo použito 18 sad aktivních monitorů fluence neutronů. Schéma umístění sondy v reaktoru je naznačeno na obrázku 1 na horizontálním řezu aktivní zóny reaktoru.

(předehřev) a max. 70°C (teplota Interpass). Jelikož nebylo technicky možné umístit čidla pro odečítání teploty přímo do bloku, jsou do upínací desky upevněny pružně čtyři odporové teploměry Pt1000. Tato čidla odečítají teplotu na spodní straně bloku materiálu. Po provedení teplo-technických výpočtů a sérii experimentů v neozářeném stavu byl určen exaktní vztah mezi teplotou na spodní straně a teplotou v místě navařování a jejich časová soustavnost. Teplota z čidel je vyhodnocována řídicím programem a automaticky je hlídána požadované rozmezí teplot.

Z řídicího programu je možné ovládat jednak pohyby ve všech čtyřech stupních volnosti, rychlost podávání drátu, průtok ochranného plynu a rozmezí teplot. Výrobce svařovacího automatu, včetně řídicího systému je ve spolupráci s ÚJV Řež a.s., firma MIKRONEX, dodavatelem systému pro udržování a měření teploty



Obr. 3 – Absorbovaná energie stanovená na vzorcích odebraných z tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu a směr šíření trhliny



Obr. 4 – Nízkocyklová únava opravného svarového kovu při teplotě +350°C

je firma JOBI s.r.o. a dodavatelem svařovacího zdroje je firma ESAB.

Vlastní navařování proběhlo na dvou ozářených blocích základního materiálu TNR. Na blok bylo navařeno 16 vrstev (housesek) přídavného materiálu. Tloušťka navařené vrstvy se pohybuje mezi 18 až 19 mm.

Vyhodnocování mechanických, korozních a strukturálních vlastností

Zkoušky mechanických vlastností, dlouhodobých korozně-mechanických vlastností a strukturálních analýz na materiálech ve výchozím stavu, ozářeném stavu a ve stavu po navařování a následném ozáření probíhají postupně na pracovištích ÚJV Řež, VZÚ Plzeň a ŠKODA JS.

Zkoušky mechanických vlastností na ozářených materiálech proběhly v polohorkých komorách v akreditované zkušební laboratoři

v ÚJV Řež. Jedná se o zkoušky rázem v ohybu na tělesech typu Charpy-V, zkoušky statickým tahem s průměrem zkušebních těles 4 mm. Zkoušena byla také statická lomová houževnatost a to na dvou typech zkušebních těles: na tělesech typu TPB pro namáhání v tříbodovém ohybu a na tělesech typu 0,5CT pro namáhání v mimoosovém tahu. Výsledky testů na ozařených zkušebních tělesech budou porovnány s výsledky provedenými na neozařených zkušebních tělesech.

Pro opravný svarový kov ve výchozím stavu je typická vysoká vrubová houževnatost při zkušebních teplotách +20, +5 a -25°C (absorbovaná energie 199 až +300 J). Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 1 a na obr. 2. Přechodová teplota v tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu je velmi nízká (obr. 3). Při zkoušce nízkocyklové únavy byly potvrzeny výsledky získané při atestaci Inconelu 52 pro opravu TNR VVER 440 (obr. 4).

Korozně-mechanické zkoušky prováděné ve vodním prostředí primárního okruhu jaderných elektráren s reaktory typu VVER 1000 za provozních parametrů (320°C, 12,5 MPa) umožnily na tahových zkušebních tělesech stanovení mechanických vlastností a na tělesech typu RCT měření kinetiky růstu únavových trhlin, vše s vlivem prostředí a následně i radiace. Zkoušky prokázaly, že Inconel 52 není citlivý ke koroznímu praskání pod napětím v prostředí I.O. VVER 1000 při teplotě 320°C.

Strukturální analýzy (makrotvrdost a mikrotvrdost na optickém mikroskopu a řádkovacím elektronovém mikroskopu, mikrotvrdost, mikrostruktura na transmisním elektronovém mikroskopu) na výchozích a ozařených stavech určí případnou degradaci materiálu po ozaření.

Vyhodnocení stavu po navažení na předem ozařený materiál bude v omezeném rozsahu vzhledem k malému množství připraveného materiálu. Zkoušení bude zaměřeno především na strukturální analýzy a měření mikrotvrdosti tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu, čistého svarového kovu a oblasti tzv. trojných bodů. Bude provedena zkouška rázem v ohybu dle Charpyho a zkouška statické lomové houževnatosti na tělesech typu TPB umístěných v tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu. Trojné body představují místo styku 3 typů materiálů. U prvního ze dvou navařovaných bloků to bude styk základního materiálu TNR, přídatného materiálu Inconelu 52 a obvodového svaru TNR. U druhého bloku to pak místo obvodového svaru TNR bude antikoroziční návar TNR.

Závěr

Projekt popsany v tomto příspěvku je ve svém čtvrtém, posledním roce plnění. V průběhu projektu se objevila komplikace v tom, že přídatný materiál Inconel 52 se přestal komerčně vyrábět. Existují však další sofistikovanější modifikace tohoto přídatného materiálu jako Inconel 52M, popř. Inconel 52MSS. Jedná se o materiály, které jsou založeny na stejném chemickém složení jako Inconel 52, ale vyznačují se vyšší čistotou resp. další úpravou mikrolegováním. Z tohoto důvodu se řešitelé projektu rozhodli přejít na Inconel 52M a provést několik základních zkoušek na výchozím stavu materiálu pro potvrzení, že tento nový materiál je stejně kvalitní a vhodný pro opravu TNR jako původní, ne-li vhodnější.

Po absolvování celého atestačně-kvalifikačního programu se předpokládá zařazení přídatného materiálu Inconel 52(M) do seznamu

přípustných přídatných materiálů pro svařování jaderných zařízení, který je uveden v Normativně-technické dokumentaci Asociace strojních inženýrů (NTD A.S.I.) v Sekci I – Svařování.

Kromě původně zamýšleného použití Inconelu 52(M) pro opravu TNR se objevují úvahy o použití tohoto materiálu i na jiné aplikace. Nejvíce zmiňovanou je provádění oprav svarů potrubí tzv. metodou „structural overlay“. Principem této metody není odstranění zjištěné necelistvosti a následně zavaření místa po odstranění vadě, ale „přelátování“ původního místa podle přesně definovaných podmínek a to i s ponechaným defektem.

Literatura

- [1] Konop R., Jandík V. (2013): Atestačně-kvalifikační program zkoušek přídatného materiálu Inconel 52. Ae 15182/Dok, ŠKODA JS a.s., Plzeň.
- [2] Soukupová W. (2013): Výroba a neaktivní zkoušky ozařovací sondy pro materiály opravných svarů TNR VVER 1000. DITI 2306/21, ÚJV Řež, Řež u Prahy.
- [3] Ernest J., Kolečka M., Lahodová Z., Soukupová W., Vinš M., Zmítková J. (2014): Zpráva o ozařování materiálů opravných svarů TNR VVER 1000 v ozařovací sondě OS 1000. CVR 313, CV Řež, Řež u Prahy.
- [4] Volák J. (2014): Výsledky zkoušek nízkocyklové únavy při teplotě 350 °C v rámci projektu opravných svařování. VYZ-TZ-53/14/089, VZÚ Plzeň, Plzeň.

Ing. Radek Konop, ŠKODA JS a.s., Plzeň
Ing. Miloš Kytka, ÚJV Řež, a.s.
Ing. Jiří Ellinger, CSC, EWE

Inconel 52(M) filler material attestation for gtaw repairs on nuclear reactor vver 1000 pressure vessels

Repair welding of reactor pressure vessels is relatively broad discussed theme in present. Repair technology of reactor RPVs was proposed during their design in general, nevertheless as time goes on and the operating period of such nuclear units is getting longer, the repair welding may become a crucial part to reach their long-term operation. Present reactor pressure vessels welding repairs technology must meet such requirements for the course of such repairs when accompanying thermal regimes such as pre-heating and subsequent heat treatment are not inevitable. GTA repair technology by filler material Inconel 52 (M) is based on one filler metal application only and it means this technique does not require the changes of filler materials for repairs of RPVs different material variations as base material, claddings and circumferential welds are first of all. Special GTAW programmable controlled device was developed for welding on irradiated reactor pressure vessel materials with subsequent evaluation of selected mechanical properties of some important material combinations. Comparison of results on non -irradiated and irradiated materials will give out the precisely information of materials degradation with respect to repair weld metal especially.

Аттестация присадочного материала марки Inconel 52(M) для ремонтной сварки TIG напорного сосуда реактора VVER 1000

Тема ремонтной сварки напорных сосудов реакторов в настоящее время достаточно часто обсуждается и с увеличивающимся сроком службы ядерных блоков может стать важной составляющей обеспечения их долговременной эксплуатации. Технология ремонта напорных сосудов реакторов существует с начала проектирования ядерных реакторов, однако современные требования к техническому обеспечению и собственному проведению такого ремонта может выполнить только такая технология ремонта, которая не использует стандартные сопроводительные температурные режимы, такие как предварительный подогрев и последующая термообработка. Также важным аспектом является исключение необходимости замены присадочных материалов, применяемых для ремонта вариантов напорных сосудов из различных материалов, прежде всего его основного материала, наплавки и кольцевых швов. Был разработан специальный сварочный автомат для осуществления сварки TIG на облученном основном материале напорного сосуда данным присадочным материалом, оснащенный программным контролем с последующей оценкой избранных свойств некоторых комбинаций материалов. Сравнение результатов испытаний облученных материалов и необлученных материалов потом предоставит более точные данные о деградации материалов под воздействием облучения, прежде всего металла ремонтной сварки.



Doosan Škoda Power

Součást nadnárodní skupiny Doosan

Slavíme 111 let výroby parních turbín ŠKODA

Aplikace

- Fosilní elektrárny, paroplynové cykly, biomasa, komunální odpad, koncentrované solární elektrárny, jaderné elektrárny
- Parní turbíny 10–1200 MW

Komplexní realizace projektů

- Turbosoustrojí
- Turbínových ostrovů
- Strojoven parní turbíny
- Zákaznického servisu včetně retrofitů a modernizací
- LSTA

Síla naší minulosti – energie pro vaši budoucnost



Vybrané projekty v realizaci

- Temelín 2 x 1078 MW, jaderná elektrárna, modernizace, Česká republika
- Paco 2 x 153 MW, uhelná elektrárna, Panama
- Kellar 177 MW, paroplynový cyklus, Chile
- Punta del Tigre 200 MW, paroplynový cyklus, Uruguay
- Termotajachero 200 MW, uhelná elektrárna, Kolumbie
- Atacama I a II, 2 x 110 MW, koncentrované solární elektrárny, Chile
- Karabatan 2 x 56 MW, paroplynový cyklus, Kazachstán
- Tula 2 x 110 MW, non OEM modernizace, paroplynový cyklus, Mexiko
- Stalowa Wola 160 MW, paroplynový cyklus, Polsko
- Dublin 70 MW, spalovna komunálního odpadu, Irsko
- Värö 64 MW, průmyslová turbína, biomasa, Švédsko
- Lisbjerg 38 MW, teplárna, biomasa, Dánsko

Doosan Škoda Power, Tylova 1/57
30128 Plzeň, Česká republika
Tel.: +420 378 185 000, Fax: +420 378 185 910
E-mail: doosanskodapower@doosan.com
www.doosanskoda.com