

JADERNÉ OPRAVÁRENSTVÍ HLAVNÍCH KOMPONENT JADERNÝCH ELEKTRÁREN TYPU VVER V ČESKÝCH PODMÍNKÁCH S DŮRAZEM NA OPRAVY SVAŘOVÁNÍM

REPAIR OF WWER TYPE NUCLEAR POWER PLANT MAIN NUCLEAR COMPONENTS IN CZECH CONDITIONS WITH EMPHASIS ON WELD REPAIRS

Tomáš Soukup a Radek Konop

ŠKODA JS a.s.

Abstrakt

Opravné svařování Systémů, konstrukcí a komponent (SKK) jaderných elektráren (JE) typu VVER má ve společnosti ŠKODA JS dlouholetou tradici. V posledních letech vyvíjela a realizovala technologicky náročné opravy hlavních komponent primárního okruhu. Při řešení oprav byly aplikovány poznatky mnoha oborů na světové úrovni. Získané zkušenosti a poznatky byly použity jako základ pro další vývoj oboru jaderného opravárenství a to včetně oprav tlakových nádob reaktorů (TNR), které jsou sice nepravděpodobné, ale připravenost na ně je jednou ze základních podmínek dlouhodobého provozu.

Repair welding of main SSC (Systems, Structures, and Components) in the company ŠKODA JS a.s. has a long time history. It has been developing and put in to practice technologically demanding repairs of main components of primary circuit in the last years. There was applied knowledge from many fields at the worldwide level. Obtained experience and knowledge were used as a basis for further development of the nuclear repair field included repairs of Reactor Pressure Vessels (RPVs), which are unlikely but be prepared for it is one of basic conditions of long term operation.

Úvod do jaderného opravárenství a legislativy

Jaderné opravárenství je nedílnou součástí životního cyklu JE, přímo navazuje na úvodní a prováděcí projekt každé JE, velmi úzce souvisí s platnou legislativou, technickými předpisy a aplikovanými technickými normami daného projektu. Přístup k opravám odpovídá zatřídění příslušných SKK dle platné legislativy a projektem aplikovaných technických norem a tzv. „jaderných kódů“. Pro dlouhodobý provoz JE jsou klíčovými komponenty primárního okruhu, kterými jsou tlaková nádoba reaktoru, parogenerátory, hlavní cirkulační potrubí, hlavní cirkulační čerpadla, kompenzátor objemu, hlavní uzavírací armatury aj. Tyto komponenty jsou zpravidla nevyměnitelné, příp. vyměnitelné za náročných technických a finančních podmínek. To dokazují časté výměny vík TNR v USA, Francii, Japonsku aj. spojené se značnou degradací svarových spojů nátrubků víka. Degradace materiálů hlavních komponent JE, jejich řízení a provádění oprav je klíčovým aspektem při zajištění bezpečného provozu. Obrovský ekonomický význam pak má předcházení degradaci materiálů.

Rozvoj československé jaderné energetiky byl založen na ruském projektu vodovodních energetických reaktorů typu VVER, pomíneme-li první čs. JE pod označením A1 chlazenou plynem. Rozvoj jaderné energetiky vycházel ze státního plánu a tomu odpovídalo obrovské úsilí věnované výzkumu, přípravě, projektování, výrobě, spuštění ale i provozu a opravám. V průběhu 70. a 80. let tak byla vybudována široká vědecko-výzkumná, technická a výrobní základna schopná dodávat celé bloky dle úvodního ruského projektu. Značná pozornost byla věnována tvorbě legislativy v oblasti výstavby a provozu JE. Tato propracovaná legislativa zaměřená zejména na výstavbu komplexních technologických celků a vycházející z tehdejších sovětských předpisů, platila ještě na počátku 90. let minulého století. Měla poměrně přesně nastavena rozhraní, kde mohla být aplikována tehdejší čs. technická normalizace.

Výše popsaná situace tedy představuje stručně charakteristiku prostředí, ve kterém vznikaly úvodní a prováděcí projekty, výroba a montáž současných JE v České i Slovenské Republice. Je vhodné vyzdvihnout, že hlavní komponenty se vyznačují vysokou technologicko-výrobní náročností, vyžadující velmi vysoké požadavky na zajištění jejich kvality a to jak v procesu jejich výroby, tak v procesu jejich provozu a zajištění oprav. Tyto procesy vyžadují velmi vysoké požadavky na kvalifikaci pracovníků účastných daných procesů, přístup k potřebným informacím, budování a udržování potřebné znalostní báze. Touto potřebnou znalostní bází není jen znalost aktuálního stavu projektu ve vazbě na legislativu a technickou normalizaci, ale zejména znalosti z oblasti degradace materiálů za provozu a jeho řízení, schopnost navrhování a řešení případných oprav degradovaných SKK v souladu s danými požadavky. Podobně klíčovým bodem je spolupráce provozovatele JE s výrobcí komponent, protože provozovatel nemá přístup k detailní konstrukční dokumentaci. Skutečnost, že na trhu působí stále ještě výrobci většiny hlavních komponent JE, značně ulehčuje schopnost zajištění potřebného know-how k provádění oprav těchto komponent.

JE Dukovany byla uvedena do provozu v původním legislativním prostředí, v případě JE Temelín probíhala výstavba později a spuštěna byla za změněných legislativních podmínek, které však neměly dopad na projektování, konstrukci a výrobu v rámci tzv. sovětské zóny. Takto popsané informace jsou klíčové pro pochopení současného dění ohledně stavu projektu JE Dukovany a JE Temelín a schopnosti provádět odborně údržbu a opravy těchto JE v souladu s platnou (současnou) legislativou. Soulad s platnou legislativou nutně neznamená soulad s projektem stanovenou a požadovanou technickou normalizací.

Historie opravného svařování

Po uvedení prvních čs. JE do provozu zadal stát společnosti ŠKODA JS (tehdy záводу výstavby jaderných elektráren ŠKODA ZVJE) jako výrobcí TNR úkol na vývoj jejich oprav. V té době již byly v rámci programu osvojení technologie výroby reaktorových kompletů VVER 440 a 1000 vypracovány technologie oprav vad vzniklé v průběhu výroby TNR, zejména ve svarech a návarech. Existují dva základní způsoby provádění oprav a to v závislosti na tom, zda byly vady zjištěny před provedením konečného tepelného zpracování celé TNR (opravy se prováděly za podmínek odpovídajících výrobní technologii – zpravidla ručně obalenou elektrodou s předehřevem) nebo již byly příslušné díly nebo komponenty tepelně zpracovány a situace tak byla složitější. Již v období vývoje oprav TNR v průběhu výroby bylo tedy zřejmé, že opravy vad zjištěné na TNR před uvedením do provozu nebo v jeho průběhu budou velmi pravděpodobně nerealizovatelné s následným tepelným zpracováním (TZ) po svaření a mnohdy bude problematický i předehřev před svařováním. To vedlo již v průběhu 80. let ke značnému výzkumu svařitelnosti a možnosti použití metod oprav TNR bez předehřevu a následného TZ. Byla vyvinuta a následně i aplikována metoda žíhací housenky s použitím projektem předepsaných svařovacích materiálů a to např. při opravě hrdlové sekce JE Jaslovské Bohunice.

Koncepce opravného svařování hlavních komponent I.O. JE typu VVER vycházela a stále vychází z ruského projektu, je tedy založena na ruských přídavných svařovacích materiálech. Znalost jejich materiálově metalurgických vlastností je pro opravy klíčová.

Přestože je role ruského projektu z hlediska oprav stále dominantní okrajovou podmínkou při jejich realizaci, díky vývoji nových technologií a materiálů, a v nedávné minulosti i nedostupnosti nebo kvalitě původních značek svařovacích materiálů, zavádí provozovatel bloků VVER a dodavatel oprav nové přístupy v opravárenství. Jedním z nich je např. atestace amerického přídavného materiálu Inconel 52(M) pro opravy vnitřního povrchu provozované TNR. Atestaci a kvalifikaci tohoto nového přídavného materiálu ve vazbě na materiály TNR VVER 440 a VVER 1000 byla věnována velká pozornost v průběhu posledních téměř 20 let.

Technologie oprav vyvinuté v poslední době

V posledním desetiletí bylo nutné vyvinout řadu oprav hlavních komponent JE Dukovany ale i JE Temelín. Ukázalo se, že s určitým časovým zpožděním oproti západním typům reaktorů se i české bloky začínají velmi často potýkat s vadami v heterogenních svarových spojích. Některé opravy byly aplikovány v praxi, některé byly vyvinuty pro případ jejich budoucí potřeby. Při vývoji těchto technologií bylo nezbytné aplikovat komplexní systémový přístup s využitím projektových, konstrukčních, materiálových a technologických znalostí multi-profesního zaměření. Jednalo se zejména o tyto opravy:

- Oprava per šachty reaktoru JE Temelín
- Oprava heterogenního svarového spoje č.76/77 DN 1100 studené smyčky HCP parogenerátorů JE Dukovany
- Oprava heterogenního svarového spoje odbočky primárního potrubí JE Temelín
- Oprava vad v hrdle DN 1200 svarového spoje č. 111 parogenerátorů JE Temelín
- Atestace přídavných materiálů řady Inconel 52 pro opravy TNR VVER 440 a 1000
- Oprava výměnou horní části primárního kolektoru HCP JE Dukovany s orbitálním svařovacím automatem Polysoude

Ve fázi rozpracování a např. zpracování potřebných studií jsou:

- Oprava korozního napadení nátrubků víka TNR typu VVER 440
- Opravy potrubí orbitálním automatizovaným způsobem
- Opravy potrubí a hrdel komponent metodou SWOL (Structural Weld Overlay) s použitím materiálu Inconel 52(M) a drátem typu AWS 309L, resp. Sv07Ch25N13
- Rešerše stavu jaderného opravárenství
- Pokračování vývoje technologie oprav TNR materiálem Inconel FM 52/52M
- Automatizace svařování oprav svaru DN 1100 PGV 440

Heterogenní svarový spoj DN 1100 PGV 440

Paralelně s řešením projektu opravného svařování TNR bylo nutné začít řešit opravy korozního praskání heterogenních svarových spojů JE Dukovany i JE Temelín. V roce 2012 byla vyvinuta unikátní technologie opravy svarového spoje hrdla DN 1100 parogenerátoru typu VVER 440 poškozeného korozí pod napětím v rozhraní heterogenního návaru. Do současnosti ŠKODA JS provedla 4 úspěšné opravy svarového spoje hrdla DN 1100 parogenerátoru JE Dukovany. Po mnoha letech monitorování bylo v roce 2012 rozhodnuto provozovatelem urychleně vyvinout a následně realizovat opravu svaru, jehož vady již dosahovaly kritické hodnoty šíření trhliny. Realizace opravy trvá cca 21 dní v režimu nepřetržitých směn. Obvod svarového spoje je téměř 3,5 metru a svařovaná tloušťka je 72mm.

Na přípravu opravy byla velmi krátká doba necelého roku. Bylo nutné provést řadu přípravných činností, které byly ve spolupráci s provozovatelem završeny úspěšnou opravou na konci roku 2012. Příprava opravy představovala mnoho dílčích kroků: vývoj vhodné technologie obrábění a obráběcího zařízení, výcvik personálu obrábění, výběr a výcvik svářečů, svaření kontrolního svarového spoje, nákup a dodání projektem předepsaných původních svařovacích materiálů, zpracování technické dokumentace opravy, a mnohé další činnosti. Jako nedílnou součástí vývoje opravy bylo provedení potřebných výpočtů včetně výpočtů deformací od svařování a výpočtů zbytkových napětí. Konstrukční řešení parogenerátoru neumožnilo provést předepnutí před svařením nového svarového spoje v takovém rozsahu, aby po celkovém smrštění svaru zůstal primární kolektor HCP v původní poloze před opravou. Protože nebylo předem známo, jaké hodnoty dosáhne smrštění, byla provedena analýza MKP následně ověřena na kontrolním svarovém spoji provedeném

v reálném měřítku. Současně s ohledem na omezenou možnost předepnutí byl navržen ve světě dosud nepoužitý systém on-line měřené a řízené tuhosti a deformace svarového spoje s pomocí tenzometrického měření a průběžného uvolňování předpětí ve svaru.

Při opravě nebylo aplikovatelné, na rozdíl od předehřevu, tepelné zpracování po svaření, které poškozuje strukturní stabilitu heterogenních svarových spojů. S ohledem na krátký čas na přípravu nebylo možné řešit projektovou změnu a použití neoriginálních svařovacích materiálů, neboť zejména prokazování srovnatelnosti náhrad vůči původnímu projektovému řešení by vyžadovalo řadu nestandardních zkoušek materiálových charakteristik – fyzikálních a zejména únavových.

Nesmírně náročná byla příprava a výcvik svářečů zejména pro provedení přechodových návarů v poloze nad hlavou (obr. 1). V průběhu první opravy byl odebrán vzorek vady pro analýzy příčin poškození (obr. 2).

Nový svar odpovídá původnímu projektu a předpokládá se srovnatelná životnost s původním řešením. S ohledem na vysoké nároky na svářeče je v plánu automatizace procesu orbitálního svařování s využitím metody TIG s horkým drátem.

Inconel 52(M) pro opravy tlakové nádoby reaktoru

Jednou ze závažnějších oprav bylo poškození per šachty TNR JE Temelín v roce 2008. Poškození bylo jen v oblasti svarového spoje k austenitickému návaru vnitřní stěny TNR v její horní části a proto byla oprava provedena ručně původními svařovacími materiály (metodou TIG). Tato situace mimo jiné zintenzivnila úsilí ve ŠKODA JS na dokončení atestace vhodného přídatného materiálu pro případné opravy vad zasahující do základního materiálu pod úroveň antikorozičního návaru.

Na projektu se pracovalo v podstatě od roku 1998, kdy byl dokončen vývoj technologie oprav vnitřní části TNR typu VVER 440 MIG/MAG. Metoda opravy v té době předbýhala možnosti svařovacích automatů a pro své nedostatky zejména v oblasti neprůvarů a vnitřních vad nebyla dále rozvíjena. Přesto bylo provedeno značné množství zkoušek a byl položen moderní základ ve vývoji oprav hlavních komponent JE ve společnosti ŠKODA JS. Již v tomto období se zvažovalo použití materiálu na niklové bázi namísto dvou nebo tří různých materiálů použitých v původním projektu. S dnešním rozvojem počítačově řízeného el. oblouku v synergických procesech je opět tato metoda předmětem zájmu a potenciálního použití při opravném svařování některých komponent.

V dalším vývojovém kroku tak byla vybrána metoda svařování TIG a použit svařovací materiál obchodní značky Inconel FM 52 pro opravné svařování TNR VVER 440 z oceli 15Ch2MFA. Protože tyto nádoby jsou déle v provozu, předpokládá se pravděpodobnější výskyt vad u těchto nádob. Projekt byl zakončen v roce 2004 kladným stanoviskem ITI Praha.

Mezi lety 2012 až 2016 byl realizován navazující projekt atestace svařovacího materiálu Inconel FM 52/52M pro opravy TNR typu VVER 1000 z materiálu 15Ch2NMFA v rámci podpory Ministerstva průmyslu a obchodu (MPO) a s přispěním provozovatele JE.

V rámci projektu bylo kromě provedení řady atestačních zkoušek vybudováno experimentální robotizované pracoviště (obr. 3) s unikátními vlastnostmi on-line/off-line řízení procesu svařování při kladení jednotlivých svarových housenek do opravné kavity. Po nanesení každé svarové housenky je nutné laserovým skenerem nasnímat aktuální povrch a korigovat dráhu hořáku pro další průchod. Speciální experimentální program pro řízení vícevrstvého navařování s korekcí dráhy byl vyvinut na katedře kybernetiky ZČU. Výsledkem experimentu bylo přiblížení se reálné technologii opravy TNR a vyhovující výsledky kvality návaru (obr. 4) a potvrzení životaschopnosti této technologie oprav. Projekt byl završen atestací přídatného materiálu a jeho schválením jako přípustného pro případné opravy TNR VVER 1000 v rámci Sekce I Svařování Normativně technické dokumentace Asociace

strojních inženýrů. Ačkoliv se společně s atestací přídavného materiálu vyvíjel i potřebný proces svařování TIG, primárním úkolem byla materiálová atestace přídavného materiálu ve vazbě na základní materiál TNR VVER 1000. Z tohoto pohledu byl projekt završen úspěšně.

Činnosti byly vyvíjeny na základě události s poškozením per šachty JE Temelín a s vědomím, že doba provozu nemusí být rozhodující příčinou poškození. K případné realizaci oprav TNR je však ještě nutné učinit mnoho dalších kroků: dopracovat technologii oprav pomocí dálkového robotického manipulátoru odolného radiační zátěži, vyvinout technologii obrábění, potřebné NDT kontroly v průběhu opravy, metodiku pro atestaci technologie svařování aj. Značnou problematikou je legislativa a technické předpisy pro takto náročné opravy a v podstatě neexistence technického garanta české jaderné energetiky, kterým dříve byla ČSKAE koordinující výzkum a vývoj v dané oblasti.

Závěr

Byly nastíněny velmi stručně dva případy vývoje oprav. V prvním případě se jednalo o opravu heterogenního svarového spoje parogenerátoru VVER 440 a ve druhém případě o vývoj technologie a atestaci přídavného materiálu pro opravy vnitřní stěny TNR VVER 440 a VVER 1000. Oba případy představují náročné a rozsáhlé práce se zapojením mnoha technických profesí. Jaderné opravárenství představuje vysoce náročnou multi disciplinární oblast vyžadující značnou podporu v oblasti materiálového a technologického výzkumu. Zajištění schopnosti vyvíjet a provádět náročné opravy hlavních komponent JE vyžaduje úzkou spolupráci provozovatele a dodavatelů technologií, kvalitní koordinaci a značnou podporu z veřejných zdrojů. Tomu všemu je věnována patřičná pozornost v zemích aktivně rozvíjejících jadernou energetiku.

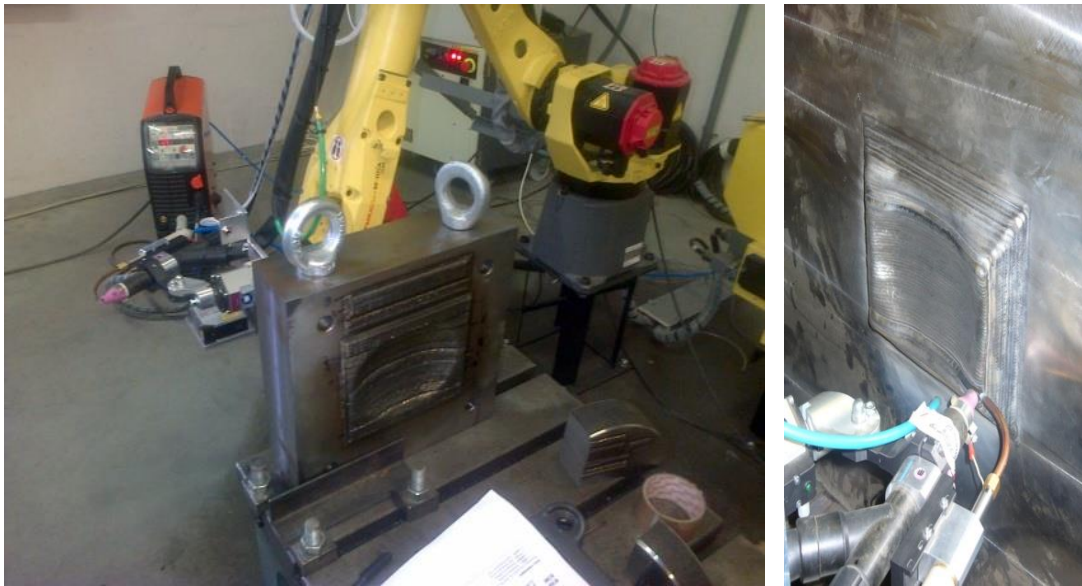
Pro řešení náročných oprav však neexistuje potřebná legislativa a jednoznačně definované technické kódy a tak jediným garantem jaderné energetiky u nás je dle současného přístupu legislativy provozovatel. Pro projekt VVER současně není možné přebírat postupy z jiných, nekompatibilních s projektem VVER technických kódů nebo bezhlavě do projektu přebírat „komerční“ normy Evropské Unie bez znalostí projektových souvislostí. Vývoj a realizace oprav tak v sobě skrývá mnohá rizika, která je nutné eliminovat budováním potřebného know-how a úzké spolupráce zúčastněných.



Obr. 1 Výcvik personálu na zkušebních stendech je nutností



Obr. 2 Pohled na vadu v průběhu jejího řezání a odběru vzorku



Obr. 3 Pohled na robotizované pracoviště při vývoji metody svařování materiálem Inconel FM52/52M pro opravy vnitřní plochy TNR a detailní pohled na vyplňování kavity



Obr. 4: Makrostruktura opravného návaru kavity materiálem Inconel FM 52/52M

Literatura

- [1] Kolektiv autorů ŠKODA JS (2004): *Opravné svařování TNR VVER 440*. Plzeň, technická zpráva ŠKODA JS a.s.
- [2] Ellinger J., Jandík V., (2004): *Výsledky kvalifikačních zkoušek svarového kovu Inconel 52*. Plzeň, technická zpráva ŠKODA JS a.s.
- [3] Dvořáková M., Konop R., Ellinger J. (2016): *Vývoj nové technologie opravného svařování provozovaných tlakových nádob jaderných reaktorů VVER 1000*. Plzeň, technická zpráva.