HODNOCENÍ KVALITY PROVOZOVANÝCH HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ PRIMÁRNÍHO OKRUHU JE TYPU VVER-1000

Ing. Jakub Horváth, Ph.D., IWE[1)], Ing. Petr Ducháček, IWE[2)], Doc. Ing. Jiří Janovec, CSc.[1)], Ing. Michal Junek, IWE[1)], Ing. Marek Palán, IWE[2)]

[1)] ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství
[2)] ČEZ, a. s., Technika jaderných elektráren, Řízení zvláštních procesů a technické kvality

1. Úvod

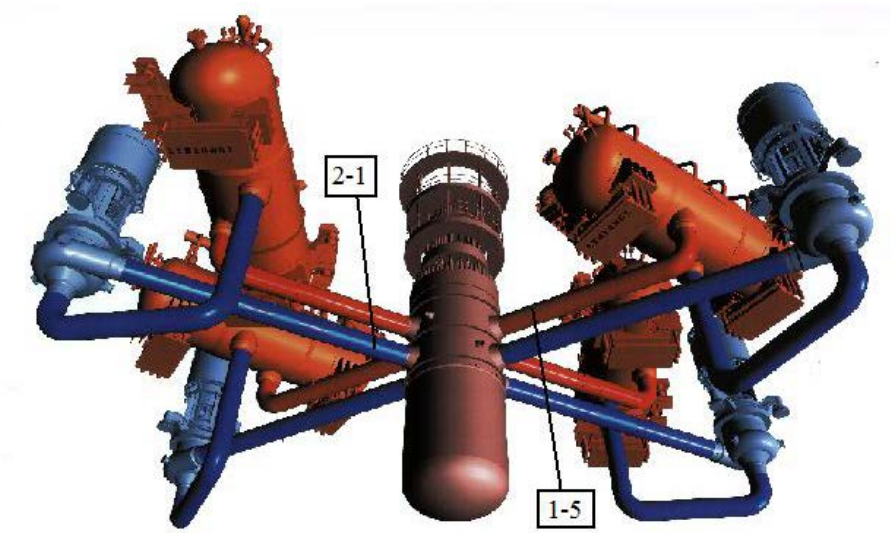
Z hlediska zajištění jaderné a technické bezpečnosti zařízení jaderných elektráren typu VVER-1000 patří mezi nejdůležitější činnosti pravidelné ověřování, posuzování a hodnocení kvality heterogenních svarových spojů hlavních komponent primárního okruhu. Primární okruh JE typu VVER-1000 je schematicky znázorněn na Obr. 1. Heterogenní svarové spoje vznikají kombinací feritických, bainitických a matenzitických (případně i austenitických) ocelí komponent primárního okruhu.

V procesu výroby svarových spojů byly uplatňovány více či méně technologicky náročné postupy včetně tepelného zpracování. Před aplikací technologických postupů byla provedena kvalifikace postupu svařování prostřednictvím zhotovení kontrolních svarových spojů. Výsledky z kvalifikačních kontrol a zkoušek potvrdily naplnění kvalitativních požadavků kladených na konkrétní svarové spoje.

Pro hodnocení kvality provozovaných svarových spojů primárního okruhu byly použity níže uvedené nedestruktivní (semidestruktivní) metody:

- Makrostrukturální hodnocení pravidelnosti kresby housenky a šíře tepelně ovlivněné zóny
- Mobilní spektrometrická kontrola chemického složení OES
- Repliková mikrostrukturální analýza (kolodium, transcopy)
- Ultrazvukové měření tvrdosti (HV05 - HV10)

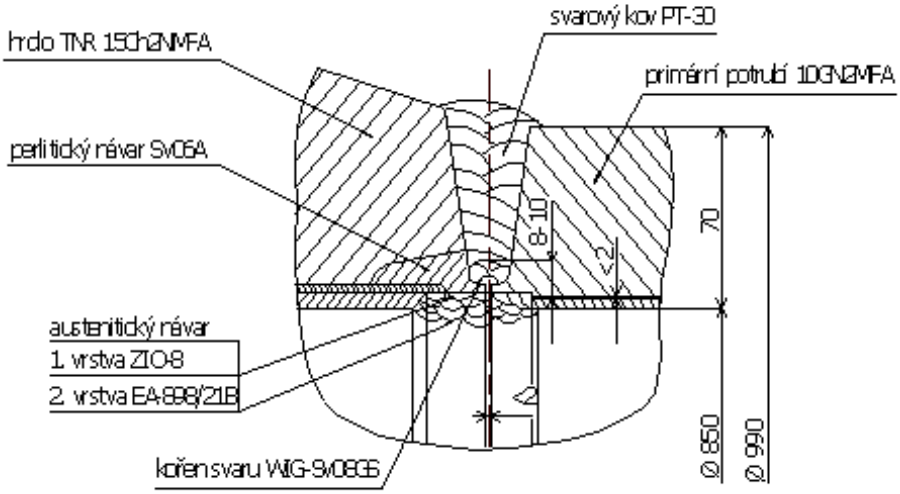
V příspěvku předkládáme výsledky výše uvedených experimentálních metod uplatněných při stanovení kvality svarových spojů TNR (tlakovou nádobou reaktoru) s HCP (hlavním cirkulačním potrubím) a HCČ (hlavním cirkulačním čerpadlem) s přechodkou HCP.



Obr. 1 Provedení primárního okruhu s tlakovou nádobou reaktoru, PG, HCČ a HCP

2. Hodnocení kvality heterogenního svarového spoje TNR s HCP

Tlaková nádoba reaktoru je zhotovena z nízkolegované Cr-Ni-Mo-V oceli 15Ch2NMFA a 15Ch2NMFAA s bainitickou strukturou, na hlavní cirkulační potrubí byla použita měkčí ocel 10GN2MFA se strukturou acikulárního feritu. Původní ruské elektrody PT30 byly při montáži nahrazeny elektrodami E-B 830 (dnes OK75.75) z produkce ESAB Vamberk. Na Obr. 2 je naznačeno provedení svarového spoje TNR s HCP.



Obr. 2 Konstrukčně-technologické schéma provedení svaru TNR s HCP

Následné Tab. 1 a Tab. 2 uvádí požadavky na chemické složení ocelí 15Ch2NMFA a 10GN2MFA. Výsledky mobilní OES svarového spoje TNR s HCP 1-1-5 jsou uvedeny v Tab. 3. Specifikace antikorozního dvouvrstvého návaru není v příspěvku uváděna.

Tab. 1 Chemické složení oceli 15Ch2NMFA (TNR)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
Max	0,30	0,20	max	max	2,00	1,10	0,40	0,05
0,18	0,60	0,35	0,02	0,20	2,50	1,50	0,70	0,15
0,13	**0,38**	**0,28**	**0,007**	**0,01**	**2,03**	**1,14**	**0,57**	**0,09**

Tab. 2 Chemické složení oceli 10GN2MFA (HCP)

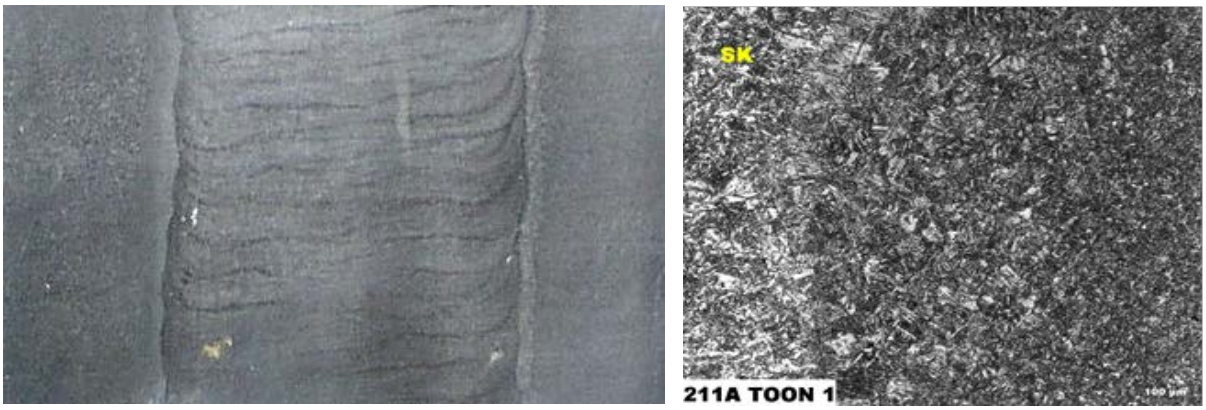
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al
0,08	0,60	0,15	max	Max	max	1,70	0,40	0,02	max	min
0,15	1,20	0,45	0,25	0,25	0,30	2,70	0,70	0,07	0,30	0,015
0,12	**0,90**	**0,29**	**0,012**	**0,009**	**0,21**	**2,07**	**0,42**	**0,03**	**0,11**	**-**

Tab. 3 Chemické složení svarového spoje 1-1-5 TNR s HCP.

Materiál		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Co
E-B 830	Min	0,05	0,50	0,15			1,20		0,35		
	max	0,12	1,00	0,35	0,02	0,02	1,80	0,30	0,75		0,025
svarový kov		**0,07**	**1,26**	**0,33**	**0,016**	**0,01**	**1,62**	**0,11**	**0,58**		**0,007**

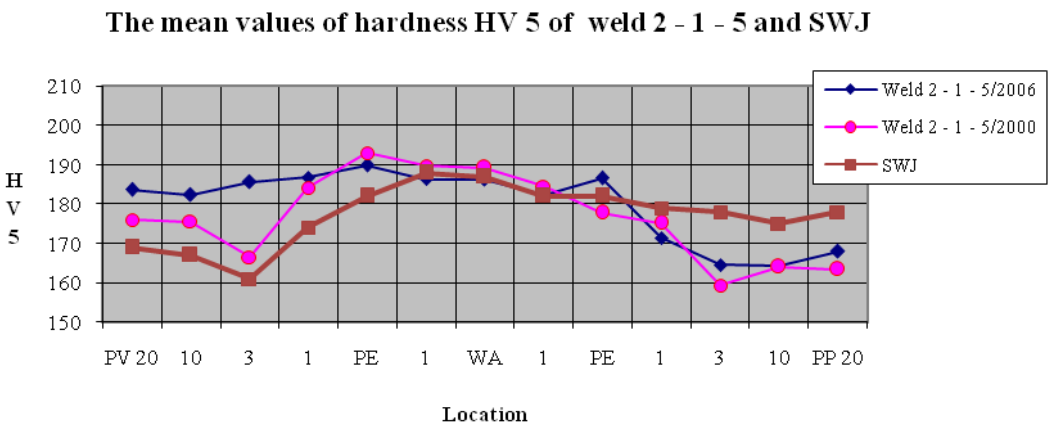
Všechny základní materiály a svarové spoje TNR s HCP splnily stanovené požadavky na chemické složení.

Makrostrukturální posouzení i sejmuté repliky mikrostrukturálně potvrdily kvalitu svarového spoje, pravidelnou kresbu housenky, rovnoměrnou šířku jak oblasti svarového spoje, tak i tepelně ovlivněné zóny, viz Obr. 3.



Obr. 3 Makrostruktura a mikrostruktura svarového spoje 1-1-5.

Průběh tvrdostí potvrdil vyloučení příkalných mikrostruktur s nadlimitními hodnotami 320 HV. Srovnávací měření svaru 2-1-5 z 2. bloku JE Temelín v roce 2000 a 2006 a experimentálního simulovaného svarového spoje (SWJ), provedeného v Modřanské potrubní, a.s. před realizací montážních svarů na JE Temelín, ukazuje Obr. 4. [1]



Obr. 4 Srovnávací měření svarového spoje 2-1-5 z 2. bloku JE Temelín v roce 2000 a 2006 a experimentální svarový spoj (SWJ)

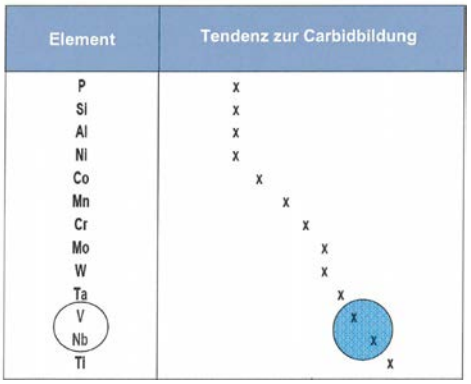
3. Hodnocení kvality svarového spoje HCČ s přechodkou HCP

V případě svarového spoje HCČ s přechodkou HCP je heterogenita vyšší, neboť je svařována ocel martenziticko–austenitická s ocelí acikulárního feritu, tj. ocelí s vyšším rozdílem koncentrace chromu, iniciujícím difúzní tok uhlíku [2]. V podstatě se pohybujeme vedle popuštěného martenzitu v oblasti transformací feriticko-karbidických, tzn. struktur bainitického charakteru. Teoretické poznatky difúzních přeměn takto svařovaných Cr ocelí s nízkolegovanými Cr-Mo ocelemi byly prezentovány [3].

Ve zkratce lze konstatovat, že při svařování heterogenních svarových spojů je potřebné z důvodu co nejnižšího nalegování svarového spoje minimální množství vneseného tepla, a proto je používána metoda ručního obloukové svařování obalenou elektrodou či netavící se elektrodou v inertním ochranném plynu s malými tepelnými příkony (malé průměry elektrod, nízké proudy a vyšší rychlosti svařování).

Naopak široké difúzní zóny vznikají po svařování a navařování pod tavidlem a při elektrostruskovém svařování. Tato svařování lze použít pouze tehdy, pracuje-li svarový spoj do teploty 350 °C. Za pracovní teploty vyšší než 350 °C dochází k difúzi uhlíku a k tvorbě oduhličených a nauhličených pásem se sníženými schopnostmi k plastické deformaci.

Precipitace karbidů v difúzních zónách závisí na afinitě legujících prvků k C, jak ukazuje Obr. 5. Vysokou tendenci vykazuje legovaní V, Nb a Ti.



Obr. 5 Karbidotvornost prvků

Při svařování ocelí rozdílných strukturních bází je nutno postupovat tak, aby za provozních podmínek byl vznik oduhličených a nauhličených pásem potlačen na minimum a aby strukturní stálost spoje byla co nejvyšší, jinými slovy aby gradient chemické koncentrace uhlíku v přechodu mezi základním materiálem a svarovým kovem byl co nejnižší. Šířka pásma, ve kterém proběhla difúze, vyplývá z řešení *II. Fickova zákona*, jehož formulace se obvykle omezujeme na sledování jednorozměrného difúzního toku pro předpokládané izotropní prostředí a nezávislosti difuzního součinitele D na koncentraci:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

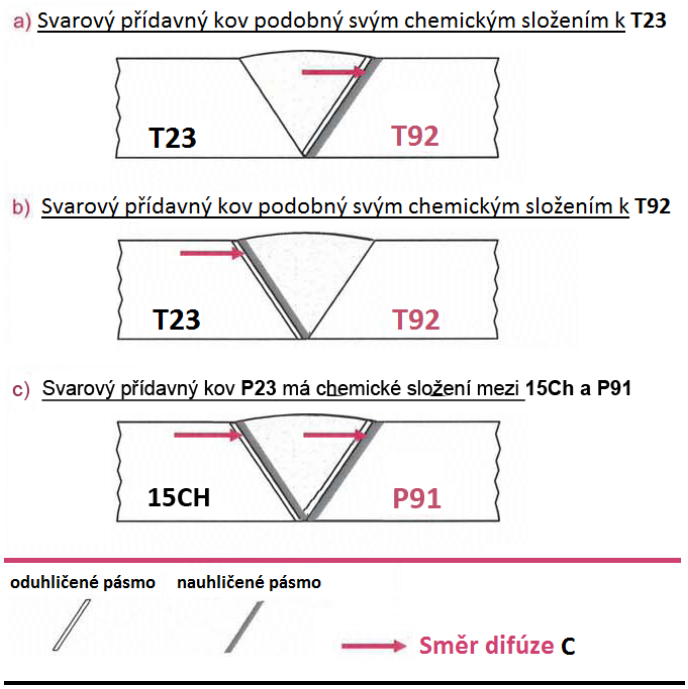
řešením uvedené rovnice vyjde šířka difúzního pásma $h = 2\sqrt{D \,.\, t}$,

když hodnoty difúzního součinitele dle Arheniova zákona závislé na teplotě T a aktivační energii Q dle vztahu $D = D_0 \,.\, \exp(-Q/R.T)$ uvádí následná Tab. 4.

Tab. 4 Hodnoty difúzního součinitele dle Arheniova zákona

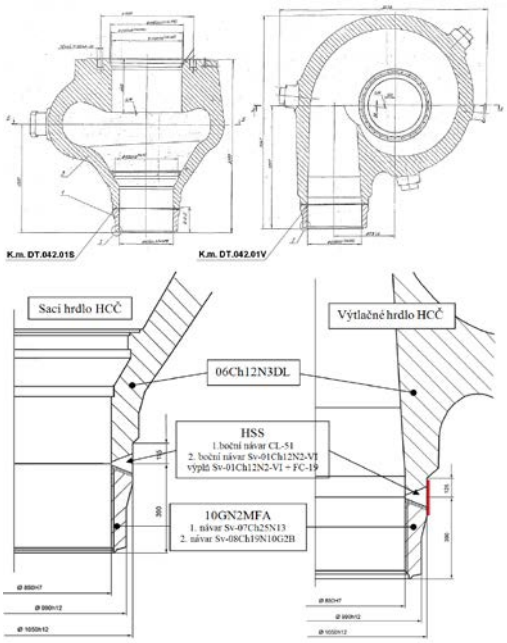
Difúzní prostředí	Difundující Prvek	D_o [$m^2 . s^{-1}$]	Q [$kJ . mol^{-1}$]
Fe α	H	$2,0 . 10^{-7}$	12 až 16
	C	$(0,5$ až $2,0) . 10^{-6}$	76 až 88
	N	$(0,5$ až $7,0 . 10^{-7}$	75 až 78
	Fe	$(0,1$ až $6,0) . 10^{-4}$	197 až 250
	Cr	3,0	343
	Ni	1,4	245,8
	W	$3,8 . 10^{-2}$	293
Fe γ	H	$1,1 . 10^{-6}$	42 až 48
	C	$(0,4$ až $5,0) . 10^{-5}$	130 až 150
	N	$(0,3$ až $2,0) . 10^{-6}$	118 až 145
	Fe	$(0,2$ až $1,0) . 10^{-4}$	264 až 285
	Cr	1,8	315 až 405
	Ni	0,77	280,5
	W	0,1	377

Možné alternativy provedení heterogenních svarových spojů mezi ocelemi T23 – T92, případně 15CH1M1F – P91, které jsou alternativní svarovému spoji HCČ s přechodkou HCP uvádí Obr. 6. V podstatě je možné volit 4 možnosti přídavných materiálů, vedle 3 níže uvedených možností lze rovněž provést svařením niklovou slitinou.



Obr. 6. Alternativy provedení heterogenních svarových spojů

Specifikaci a provedení svarového spoje HCČ s přechodkou HCP ukazuje Obr. 7.



	C	Si	Mn	Cr	Ni
odlitek: 06Ch12N3DL	max. – 0,06	max. – 0,30	max. – 0,60	12,00 – 13,50	2,80 – 3,20
potrubí: 10GN2MFA	0,08 – 0,12	0,17 – 0,37	0,80 – 1,10	max. – 0,30	1,70 – 2,70
elektroda: CL-51	max. – 0,04	max. – 0,35	0,15 – 0,60	12,00 – 14,00	1,80 – 2,50
TIG drát: Sv-01Ch12N2-VI	max. – 0,03	0,15 – 0,50	0,20 – 0,70	11,00 – 13,50	1,60 – 2,50

	Mo	Cu	V	S	P
odlitek: 06Ch12N3DL	–	0,80 – 1,10	–	max. – 0,025	max. – 0,025
potrubí: 10GN2MFA	0,40 – 0,70	max. – 0,30	0,03 – 0,07	max. – 0,020	max. – 0,020
elektroda: CL-51	–	–	–	max. – 0,025	max. – 0,030
TIG drát: Sv-01Ch12N2-VI	–	–	–	max. – 0,020	max. – 0,030

Obr. 7 Hlavní cirkulační čerpadlo a svarový spoj k přechodce HCP, chemické složení jednotlivých komponent svarového spoje.

Chemické složení korozivdorného Cr-Ni odlitku a podobně dvou návarů, stejně jako výplňového svarového kovu po tepelném zpracování, vede ke struktuře popuštěného martenzitu s nízkým podílem zbytkového austenitu s mezipaketovým uspořádáním. Tato feriticko-perlitická směs bainitického charakteru má ve svarovém spoji následné 3 morfologické alternativy dle intenzity odvodu tepla [4]:

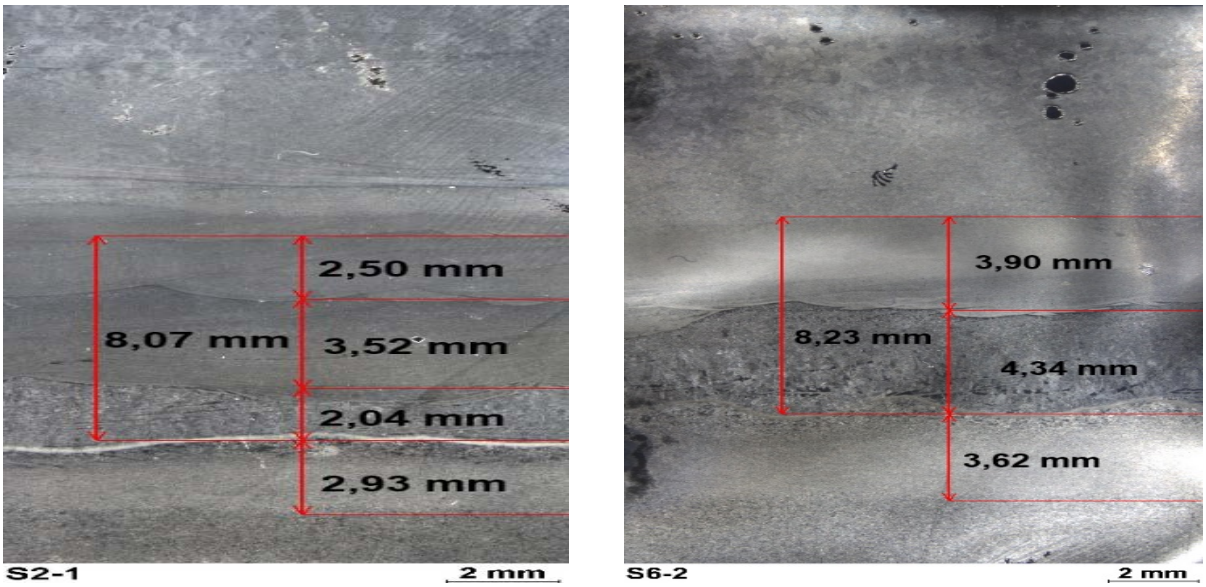
- Horní bainit (High-range) – granulární cementit
- Dolní bainit (Low-range) – intergranulární cementit – precipituje v řadách skloněných k podélné ose laťky pod úhlem 60°
- Acikulární ferit – bainitický ferit vytváří jednotlivé desky rostoucí do různých směrů (příznivá chaotická struktura)

Kontrolovaná místa na sacím a výtlačném hrdle 4. HCČ dokumentuje Obr. 8.

a) b)

Obr. 8 Příprava k makrostrukturálnímu leptu a sejmutí transcopy replik a) sacího, b) výtlačného hrdla HCČ

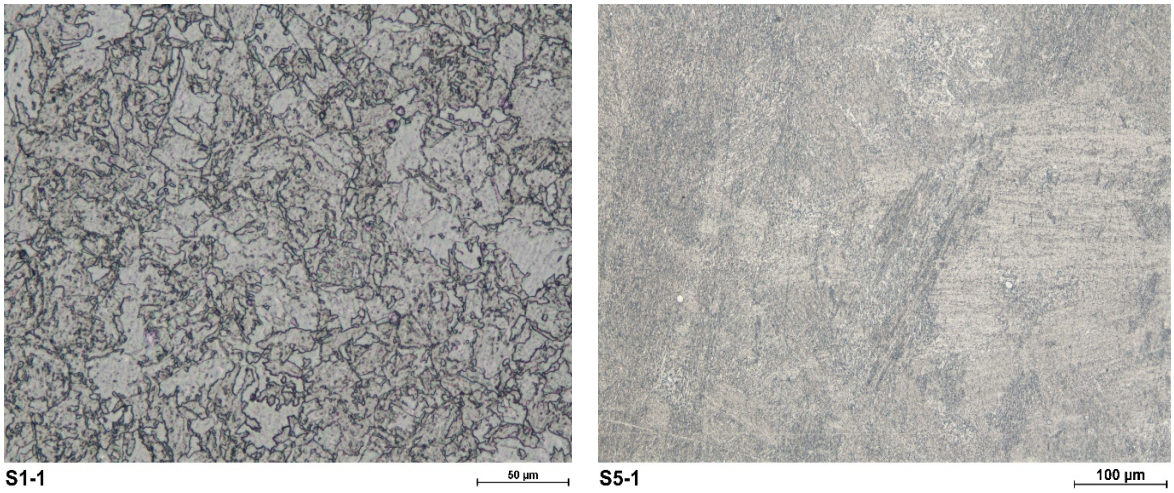
Tloušťky jednotlivých vrstev návarů a TOO na straně oceli 10GN2MFA jsou zřejmé z Obr. 9.



Obr. 9 Vrstvy návarů a TOO

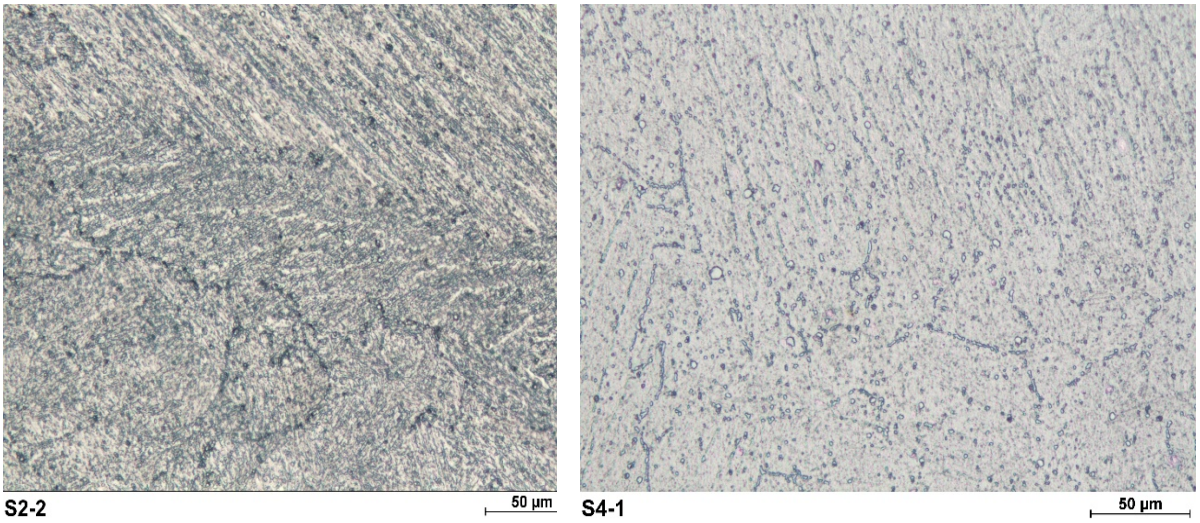
Celková tloušťka všech návarů se pohybuje kolem 8 mm, první návar dle dosažené tloušťky okolo 2 mm byl navařen druhou vrstvou o tloušťce přibližně 3,5 mm. Šířka TOO činila 3 – 4 mm.

Mikrostruktury acikulárního feritu základního materiálu přechodky HCP z oceli 10GN2MFA (206±6 HV10) a popuštěné martenzitické struktury základního materiálu HCČ z oceli 06Ch12N3DL (251±7 HV10) jsou na Obr. 10.



Obr. 10 Acikulární ferit – 10GN2MFA Popuštěný martenzit – 06Ch12N3DL

Následující Obr. 11 dokládá dvě alternativy dendritické struktury svarového kovu.



Obr. 11 Dendritické mikrostruktury svarového kovu s různou rychlostí odvodu tepla

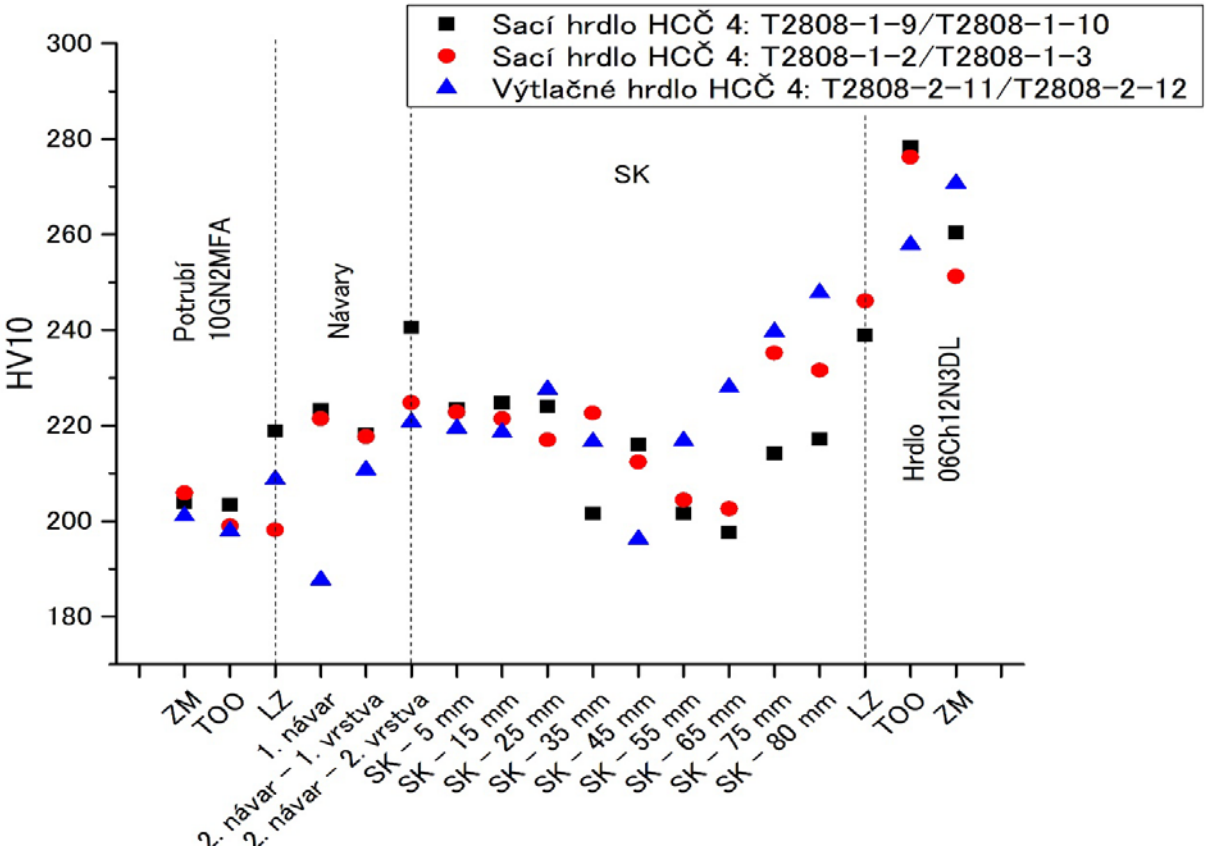
Šířka a mikrostrukturální periodicita koruny svarového spoje ukazuje na 3 drátovou aplikaci metody svařování pod tavidlem.

Velikost zrna byla stanovena v souladu s normou ČSN EN ISO 643 etalonovým porovnáním a výsledky pro svarový spoj sání ukazuje Tab. 5. Hrubost zrna obdobných oblastí u výtlakového hrdla je srovnatelná.

Tab. 5 Stanovení velikosti zrna v souladu s ČSN EN ISO 643

Sání	
Pozice	Velikost zrna G
Základní materiál přechodky HCP – 10GN2MFA	7,5
Tepelně ovlivněná oblast ze strany 10GN2MFA	6
1. návar	4
2. návar 1. vrstva	7,5
2. návar 2. vrstva	7-8
Svarový kov	2,5
Tepelně ovlivněná oblast ze strany 06Ch12N3DL	3
Základní materiál HCČ – 06Ch12N3DL	2

Naměřené hodnoty průběhu tvrdostí ve dvou místech sacího a v jednom místě výtlačného hrdla HCČ stanovené přenosným ultrazvukovým tvrdoměrem Krautkrämer MIC-10 se sondou 2010 ukazuje Obr. 12.



Obr. 12 Průběhy tvrdostí přes svarové spoje HCČ s přechodkou HCP

4. Závěry

Svarové spoje TNR s HCP byly zhotoveny v souladu se schválenými technologickými postupy metodou ručního obloukové svařování obalenou elektrodou včetně příslušného tepelného zpracování. Svarové spoje byly provedeny jako montážní společností Modřanská potrubní, a.s., technologické postupy byly podloženy provedením a vyhodnocením kontrol a zkoušek zhotovených na kontrolních svarových spojích.

Hodnocení kvality svarových spojů TNR s HCP vycházející z výsledků kontrol provedených nedestruktivními metodami v roce 2000 až 2006 prokázalo bezdefektnost svarových spojů a jejich vlastnosti, včetně životnosti, srovnatelné s příslušnými základními materiály.

Svarové spoje HCČ s přechodkou HCP byly zhotoveny u ukrajinského výrobce HCČ jako výrobní svarové spoje dle postupů vycházejících z ruských předpisů pro práci s dotčenými základními materiály. Šířka a mikrostrukturální periodicita koruny svarového spoje ukazuje na 3 drátovou aplikaci metody svařování pod tavidlem.

Geometrie oblastí svarového spoje včetně návarů, jejich mikrostrukturální rozbory a měření tvrdosti potvrdily stabilitu feriticko-karbidických mikrostruktur a tím i vlastností svarových spojů.

Vhodná volba přídavného materiálu svarových spojů a obou vrstev návarů stejně jako vnesené teplo při svařování eliminovaly nárůst šířky tvrdých karbidických či intermediálních zón v oblasti linie ztavení a tím vyloučily možnost iniciace křehkých mikrotrhlin.

Hodnocení kvality svarových spojů mezi HCČ s přechodkou HCP provedená v roce 2019 obdobnými aktualizovanými experimentálními postupy rovněž prokázala vysokou kvalitu kontrolovaných heterogenních svarových kovů.

Použitá semidestruktivní metodika hodnocení kvality svarových spojů spolehlivě prokazuje, že životnosti svarových spojů TNR s HCP a HCČ s přechodkou HCP u JE Temelín splňují požadavky na kvalitu svarových spojů v souladu s projektovanou životností.

Literatura

[1] Janovec, J., Pešková, O.: Lokální tvrdosti svarových spojů mezi TNR a primárním potrubím na JETE, Symposium Lokální mech. vlastnosti 2006, ZČU Plzeň, 2006, 88-93

[2] Pilous, V.: Svařování různorodých materiálů, Materiály a jejich svařitelnost, ZEROSS Ostrava, 1999

[3] Janovec, J., Poláchová, D.: Heterogenní svary korozivzdorných ocelí v energetice, Dny svařovací techniky, ESAB Vamberk, 2012

[4] Ducháček, P.: Heterogenní svarové spoje nových žáropevných ocelí pro vysokoparametrické elektrárny, [Diplomová práce] FS ČVUT v Praze, 2013

[5] Bendick,W., Hahn.B., Adam,W.,Gross,V.,Heuser,H., Jochum,C.: Schweissen von Mischverbindunngen neuartiger ferritischer Kraftwerksstahle, Salzgitter Mannesmann Forchung, Duisburg, 2009