

Heterogenní spoje v energetice, zejména se zaměřením na svařování martenzitických ocelí s rozdílným obsahem Cr

Petr Hrachovina,

Böhler Uddeholm CZ s.r.o., phrachovina@bohler-uddeholm.cz

O svařování heterogenních spojů „černo-bílých“ toho v různých publikacích bylo popsáno mnoho, v této přednášce se budu věnovat svařování heterogenních spojů materiálů s rozdílným obsahem Cr.

1. Svařování heterogenních spojů

Tabulka 1.1 obsahuje bainitické a martenzitické oceli, které nacházejí uplatnění v elektrárnách nové generace. Při stavbě různých součástí elektrárny vznikají smíšené spoje mezi materiály uvedenými v tabulce 1. Zvláštnosti, které přitom vznikají, jsou v podstatě známé z nauhličených dosud používaných ocelí. V první řadě se jedná o výskyt oduhličených a nauhličených oblastí. K tomuto byly již podány četné zprávy. Neexistují však žádné výsledky průzkumu ke dvojicím materiálů nových elektrárenských ocelí.

Tabulka 1.1. Chemické složení a mechanické hodnoty jakosti nových bainitických a martenzitických materiálů a také ověřených žárovevných materiálů 10CrMo9-10, X20 a P91

Označení	Prvky v hmotnostních %										Teplota použití °C ¹⁾
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	W	Nb	Ostatní	
Bainitické oceli											
10CrMo9-10 (T/P22) 1.7380	0,08-0,14	≤ 0,50	0,40-0,80	2,0-2,5	-	0,90-1,10	-	-	-	-	≤ 550
7CrWVNb9-6 (T/P23)	0,04-0,10	≤ 0,50	0,10-0,60	1,9-2,6	-	0,05-0,30	0,20-0,30	1,45-1,75	0,02-0,08	N ≤ 0,03 B 0,0005-0,0060	≤ 550
7CrMoVTiB10-10 (T/P24) 1.7378	0,05-0,10	0,15-0,45	0,30-0,70	2,20-2,60	-	0,90-1,10	0,20-0,30	-	-	N ≤ 0,010 B 0,0015-0,0070 Ti 0,05-0,10	≤ 550
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	W	Nb	Ostatní	Teplota použití °C ¹⁾
Martenzitické oceli (9 - 12 % Cr-oceli)											
X20CrMoV11-1 1.4922	0,17-0,23	< 0,50	< 1,0	10,0-12,5	0,30-0,80	0,80-1,20	0,25-0,35	-	-	-	≤ 560
X10CrMoVNB9-1 (T/P91) 1.4903	0,08-0,12	0,20-0,50	0,30-0,60	8,0-9,5	< 0,40	0,85-1,05	0,18-0,25	-	0,06-0,10	N 0,03-0,07	≤ 585
X11CrMoWVNb9-1-1 (E911) 1.4905	0,09-0,13	0,10-0,50	0,30-0,60	8,50-9,50	0,10-0,40	0,90-1,10	0,18-0,25	0,90-1,10	0,06-0,10	N 0,05-0,09	≤ 600
X10CrWMoVNB9-2 (T/P92)	0,07-0,13	< 0,5	0,30-0,60	8,5-9,5	< 0,40	0,30-0,60	0,15-0,25	1,5-2,0	0,04-0,09	N 0,03-0,07 B 0,001-0,006	≤ 620
VM12-SHC	0,10-0,14	0,40-0,60	0,15-0,45	11,0-12,0	0,10-0,40	0,20-0,40	0,20-0,30	1,30-1,70	0,03-0,08	Co 1,40-1,80 N 0,030-0,070 B 0,0030-0,006	≤ 620

¹⁾ konstrukční teplotní meze použití v elektrárenských odvětvích

Mechanické hodnoty při RT

	Rp0,2 MPa	Rm MPa	A %	Av (ISO-V) J
10CrMo9-10 (T/P22)	> 310	480-630	> 18	> 40
7CrWVNb9-6 (T/P23)	> 400	> 510	> 20	-

7CrMoVTiB10-10 (T/P24)	> 450	585-840	> 17	> 41
X20 (1.4922)	> 500	700-850	> 16	> 39
T/P91 (1.4903)	> 450	620-850	> 17	> 41
E911 (1.4905)	> 450	620-850	> 17	> 41
T/P92	> 440	620-850	> 17	> 27
VM12-SHC	> 450	620-850	> 17	> 27

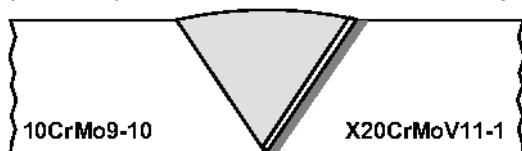
V principu u smíšených spojů spočívá problematika mezi materiály s výrazně rozdílným obsahem chrómu v uhlíkové difúzi. Během tepelného zpracování po svaření difunduje uhlík do materiálu s vyšším obsahem chrómu. Tímto způsobem se v materiálu s nižším obsahem chrómu tvoří oblasti chudé na uhlík a v materiálu bohatším na chróm, oblasti obohacené uhlíkem, tzv. karbidový lem. Vlastnost těchto zón přitom závisí na teplotě a době žhání. Vyvarovat se tomu není v podstatě možné, byť by svařování bylo provedeno přídavným svařovacím materiálem na bázi niklu.

Obrázek 1 ukazuje schématické znázornění uhlíkové difúze na příkladu spojení 10CrMo9-10 s X20CrMoV11-1 při použití různých přídavných svařovacích materiálů.

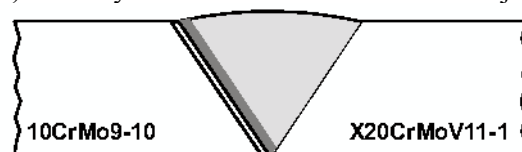
Schematické zobrazení „uhlíkové difúze“ na příkladu smíšeného spoje 10CrMo9-10/2,25Cr/ – X20CrMoV11-1/12Cr/



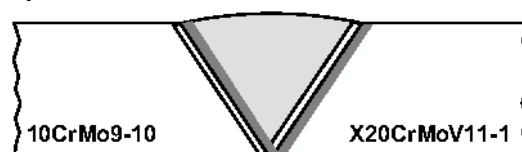
a) Přídavný svařovací materiál: druhově stejný GW 10CrMo9-10



b) Přídavný svařovací materiál: druhově stejný základní materiál X20CrMoV11-1



c) Přídavný svařovací materiál: druhově rozdílný k oběma GW dílčí řešení např. s 5% Cr / 1% Mo



d) Přídavný svařovací materiál na bázi Ni. Uhlíková difúze je vzhledem k materiálu obsahujícímu více chrómu méně výrazná.

Nevýhody:

- rozdílný součinitel teplotní roztažnosti
- omezená možnost NDT zkoušení!



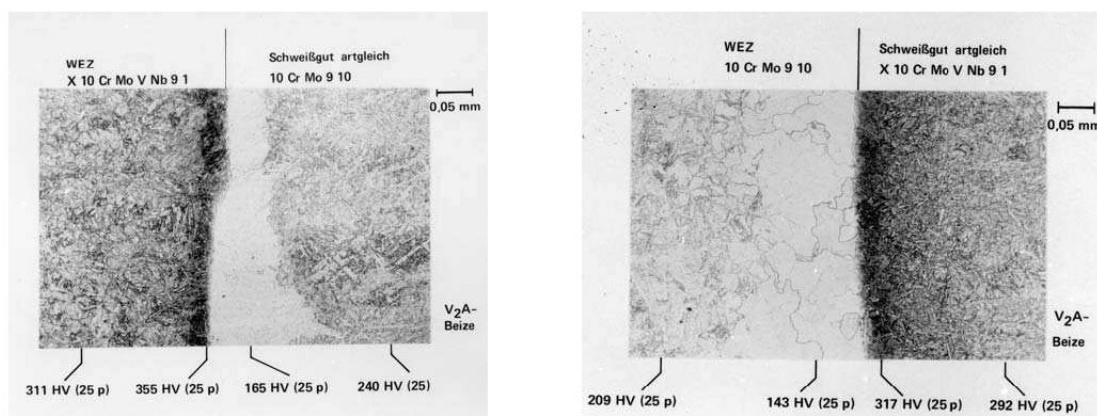
Změny struktury ovlivňují chování materiálu (houževnatost a pevnost) svařovaného spoje v oblasti oduhličených a nauhličených zón. U smíšených spojů mezi X20CrMoV11-1 a 10CrMo9-10, svařeno druhově stejně k jednomu z obou materiálů, nebudou často dosaženy bezpečné hodnoty houževnatosti neovlivněného základního materiálu v oblasti sváru zóny chudé na uhlík a karbidového okraje (silné rozptýlení dílčích hodnot).

Další kontroly ukázaly, že iniciace a šíření trhliny při rázové zkoušce ohybem, jsou ohraničeny na měkkou oduhličenou zónu. Důsledky během tlakové zkoušky nebyly však díky chování, zjištěnému při rázové vrubové zkoušce, nikdy zjištěny. Vzhledem k provoznímu chování při použité teplotě neexistuje rovněž žádný důvod k obavám, neboť při těchto teplotách existují dostatečně vysoké houževnatosti. Také porušení meze pevnosti v tečení v těchto smíšených spojích, které se objeví během více než 100.000 provozních hodin, nejsou dosud známy.

Dokonce i při zkouškách meze pevnosti v tečení s vrubem v oduhličené zóně nebyl pozorován žádný předčasný lom.

U spojení mezi martenzitickými materiály jako např. mezi X20CrMoV11-1 a X10CrMoVNb9-1 (P91) se vychází z toho, že na základě malých rozdílů v obsahu chrómu mezi oběma materiály nevzniká difúze uhlíku nebo k ní dochází pouze v zanedbatelně malém měřítku, nezávisle na zvoleném přídavném svařovacím materiálu. Oproti tomu u smíšených spojů například mezi 10CrMo9-10 a X10CrMoVNb9-1, vystupuje charakter nauhličení a oduhličení výrazně silně najevo, nezávisle na použitém přídavném svařovacím materiálu. Slabé místo spoje se nachází buď v oduhličené TOO-oblasti 10CrMo9-10 (přídavný materiál k P91) nebo v oduhličené oblasti svarového kovu (přídavný materiál k 10CrMo9-10; viz obr. 2). Na základě rozsáhlých prohlídek výbrusů bylo dokázáno, že tvoření trhliny při zkoušce rázem v ohybu, dochází u těchto smíšených spojů principiálně v zónách chudších na uhlík a tím také v měkčích.

Obrázek 2. Oduhličená oblast svarového kovu ve smíšených spojích 10CrMo9-10 / P91 svařeno přídavným materiálem druhově stejným k 10CrMo9-10 popř. k P91



U předcházejících příkladů nemůže být difúze uhlíku v materiálu 10CrMo9-10 brzděna, z důvodu nedostatku prvků tvořících slitinový karbid jako např. Nb, V nebo Ti. U nových bainitických materiálů T/P23 a T/P24 jsou oproti tomu takové prvky důležitými legujícími složkami, které výrazně zlepšují mez pevnosti v tečení. Dá se očekávat, že tyto prvky tvořící karbid působí také příznivě u smíšených spojů s martenzitickými materiály s vysokým obsahem chrómu T/P91, E911, T/P92 a VM12 s ohledem na zóny s nízkým obsahem uhlíku. Toto

očekávání by mělo být doloženo odpovídajícími zkouškami. Pro tento účel byly svařovány různé smíšené spoje.

Provedení zkoušek

Byly zkoumány následující dvojice materiálů:

- a) Kotlové trubky T23 / T91
- b) Kotlové trubky T24 / T91
- c) Potrubí /parovod/ P23 / P92

Pro dvojice materiálů T24 / T91 byly k dispozici pouze trubky s přibližně stejným průměrem. Tabulky 1.2 až 1.4 obsahují analýzy a mechanické hodnoty jakosti základních materiálů. Pro oba potrubní materiály byly vždy použity svařovací přísady stejného druhu. Tabulka 7.8 obsahuje analýzy a mechanické hodnoty jakosti použitých svařovacích přísad. Tenkostěnné spoje kotelních trubek byly svařeny metodou WIG. U silnostěnných spojů P23 / P92 byly kořeny svařeny metodou WIG, další výplňové vrstvy svařeny elektrodami. Přípravy svárů jsou na obrázcích 8 a 9. Při spojování kotlových trubek činily předehřívací a interpass teploty 150 °C. Silnostěnné komponenty P23 / P92 byly předehřívány na 200 °C. Interpass teplota činila maximálně 270 °C. Všechny spoje byly po svaření tepelně zpracovány.

Tabulka 1.2. Základní materiály pro spojování kotlových trubek T23 / T91

Základní materiál T23												
chem. analýza [hmotnostní %]												
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	N	V	W	Al	B
0,056	0,24	0,45	0,016	0,003	2,15	0,07	0,052	0,011	0,21	1,52	0,016	0,0029
Základní materiál T23												
Mechanické vlastnosti; základní materiál (44,5 x 7,14 mm)												
Zkušební teplota + [°C]	ReH [N/mm2]	Rm [N/mm2]	A4 [%]	tvrdost [HB]								
20	490	593	24	198								
Základní materiál T91												
chem. analýza [hmotnostní %]												
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	N	V	Al	
0,104	0,31	0,44	0,017	0,002	8,34	0,93	0,21	0,067	0,044	0,21	0,012	
Základní materiál T91												
Mechanické vlastnosti; základní materiál (44,5 x 6,5 mm)												
Zkušební teplota + [°C]	ReH [N/mm2]	Rm [N/mm2]	A4 [%]	tvrdost [HB]								
20	548	710	24,8	221								

Tabulka 1.3. Základní materiály pro spojování kotlových trubek T24 / T91

Základní materiál T24											
chem. analýza [hmotnostní %]											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	V	Ti	Al	B
0,065	0,20	0,49	0,006	0,002	2,30	1,03	0,0095	0,25	0,088	0,01	0,0037
Základní materiál T23											
Mechanické vlastnosti; základní materiál (36 x 6,3 mm)											
Zkušební teplota + [°C]	ReH [N/mm2]	Rm [N/mm2]	A4 [%]	tvrdost [HB]							
20	500	603	20,5	200							
Základní materiál T91											
chem. analýza [hmotnostní %]											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	N	V	Al
0,104	0,31	0,44	0,017	0,002	8,34	0,93	0,21	0,067	0,044	0,21	0,012

Základní materiál T91				
Mechanické vlastnosti; základní materiál (44,5 x 6,5 mm)				
Zkušební teplota + [°C]	ReH [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	A4 [%]	tvrdost [HB]
20	548	710	24,8	221

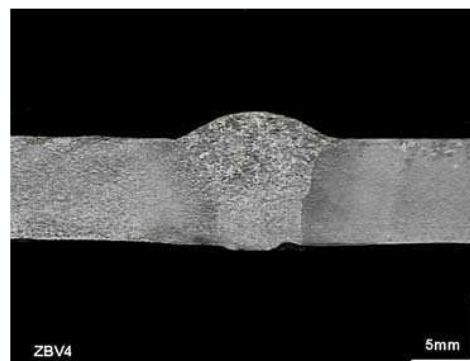
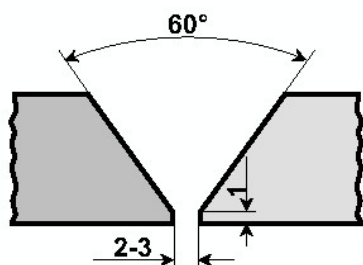
Tabulka 1.4. Základní materiály pro potrubní spoje P23 / P92

Základní materiál P23													
chem. analýza [hmotnostní %]													
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	N	V	W	Al	B	
0,07	0,28	0,54	0,008	0,004	2,08	0,08	0,03	0,011	0,22	1,65	0,018	0,002	
Základní materiál P23													
Mechanické vlastnosti; základní materiál (219,10 x 20 mm)													
Zkušební teplota + [°C]	ReH [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	A4 [%]										
20	467	575	27,5										
Základní materiál P92													
chem. analýza [hmotnostní %]													
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	N	V	W	Al	B
0,11	0,21	0,43	0,013	0,006	8,93	0,49	0,12	0,05	0,055	0,19	1,65	0,008	0,005
Základní materiál P92													
Mechanické vlastnosti; základní materiál (219,10 x 20 mm)													
Zkušební teplota + [°C]	ReH [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	A4 [%]										
20	518	736	26										

Tabulka 1.5. Analýzy a mechanické hodnoty použitých přídavných svařovacích materiálů

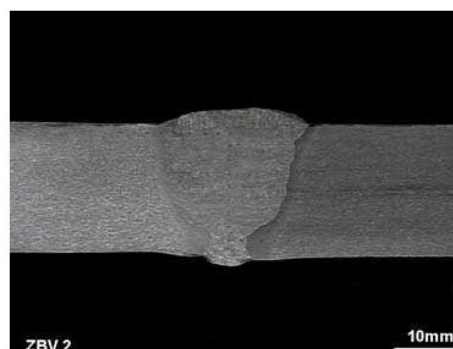
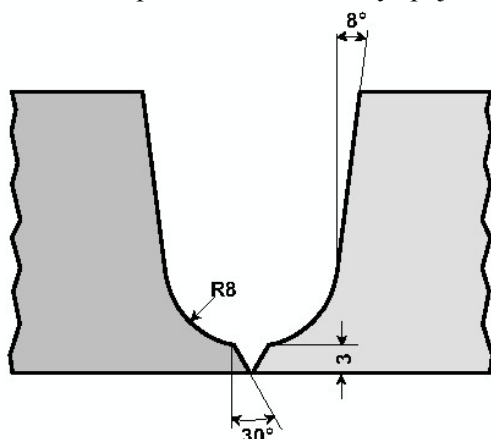
Chemická analýza drátu popř. čistého svařového kovu (hmotnostní %)														
SZW	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb	N	V	W	Cu	B	Ti	
WIG; druhově stejný P23 Ø 2,4 mm	0,061	0,45	0,53	2,02	0,03	0,13	0,04	0,01	0,22	1,78	0,10	0,002	0,005	
WIG; druhově stejný P24 Ø 2,4 mm	0,073	0,26	0,45	2,32	0,92	0,09	0,01	0,006	0,25	<,002	0,17	0,002	0,086	
El: druhově stejný P23 Ø 3,2 mm	0,057	0,23	0,62	2,20	0,03	0,05	0,04	0,022	0,20	1,59	0,06	0,002	<,001	
El: druhově stejný P92 Ø 3,2 mm	0,113	0,35	0,74	8,97	0,56	0,61	0,06	0,038	0,22	1,57	0,03	0,005	0,007	
Mechanické vlastnosti čistého svařového kovu; zkušební teplota: + 20°C														
SZW	WBH [°C/h]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	Av, ISO-V [J]									
WIG; druhově stejný P23 Ø 2,4 mm	740/2	621	708	21,0	256 / 207 / 242									
WIG; druhově stejný P24 Ø 2,4 mm	740/2	595	699	20,5	264 / 286 / 292									
El: druhově stejný P23 Ø 3,2 mm	750/2	523	633	20,8	100 / 137 / 144									
El: druhově stejný P92 Ø 3,2 mm	750/2	691	810	19,0	54 / 60 / 65									

Obrázek 3. Příprava sváru a svařený spoj T23 / T91



Přídavný svařovací materiál: WIG, druhově stejný k T23, \varnothing 2,4 mm
rozměr trubky: 44,5 x 7,14 (mm); $T_p = 150^\circ\text{C}$, $T_i = 200^\circ\text{C}$, $I_s = 140$ A

Obrázek 4. Příprava sváru a svařený spoj P23 / P92



Přídavný svařovací materiál, kořen: WIG; druhově stejný k P23 popř. druhově stejný k P92, \varnothing 2,4 mm

Přídavný svařovací materiál výplňové vrstvy: elektroda; druhově stejný k P23 popř. druhově stejný k P92, \varnothing 3,2 / 4,0 mm

rozměr trubky: 219 x 20 (mm); $T_p = 200^\circ\text{C}$, $T_i = 270^\circ\text{C}$, $I_s = 160$ A

Výsledky zkoušek

Mechanické hodnoty

Mechanické hodnoty jakosti svařovaných spojů byly zjištěny ve svařeném stavu a následném TZ, pro zjištění, zda se vyskytuje změna ve zlomu vrstev v závislosti na stavu zpracování, při zkoušce příčným tahem. Pevnostní hodnoty spojů byly určeny pomocí plochých zkoušek tahem napříč ke sváru při pokojové teplotě a při teplotě 500°C . Při všech zkouškách vždy došlo k přetržení v méně pevném základním materiálu. Přitom byly bezpečně dosaženy specifické minimální hodnoty pevnosti základních materiálů T23, T24 a P23. Při použití svařovacích materiálů stejného druhu k nízko legovanému materiálu byly dosaženy nejvyšší hodnoty houževnatosti. Tabulky 1.6 až 1.8 obsahují zjištěné mechanické hodnoty. Obrázky 3 a 4 zřetelně ukazují, že druhově stejný svařovací materiál k P92 a k P23 vykazuje vyšší pevnost než základní materiál P23. Z toho je rovněž možné vyvozovat, že neexistuje žádné významné

oduhlčení mající vliv na pevnostní chování v oblasti spojů v blízkosti tavicích linií. To bylo doloženo metalografickými zkouškami.

Tabulka 1.6. Spoje T23 / T91; svařeno metodou WIG

Přídavný svařovací materiál: druhově stejný P23, Ø 2,4 mm; základní materiály: T23 (44,5 x 7,6 mm) na T91 (44,5 x 7,14 mm)					
WBH [°C/min]	Zkušební teplota + [°C]	R _m [N/mm ²]	Umístění zlomu	Av střed SG [J/cm ²] při teplotě + 20°C	Ohybová zkouška
Svařovaný stav	20	595	GW T23	53/85/93	DiZ/WiZ 180° o. B.
	500	476	GW T23		
740/30	20	563	GW T23	73/95/158	DiZ/WiZ 180° o. B.
	500	436	GW T23		

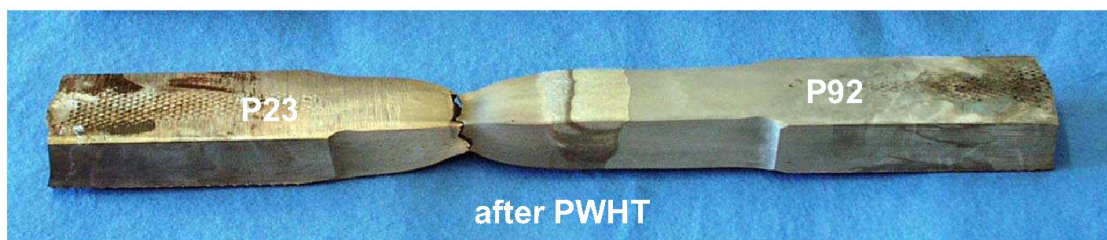
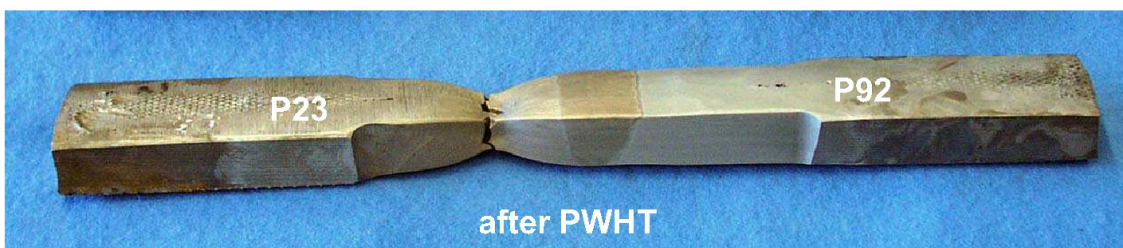
Tabulka 1.7 Spoje T24 / T91; svařeno metodou WIG

Přídavný svařovací materiál: druhově stejný P24 (legování Ti/B), Ø 2,4 mm; základní potrubní materiály: T24 (38,3 x 6,3 mm) na T91 (44,5 x 7,14 mm)					
WBH [°C/min]	Zkušební teplota + [°C]	R _m [N/mm ²]	Umístění zlomu	Av střed SG [J/cm ²] při teplotě + 20°C	Ohybová zkouška
Svařovaný stav	20	598	GW T24	57/65/104	DiZ/WiZ 180° o. B.
	500	445	GW T24		
740/30	20	574	GW T24	135/152/148	DiZ/WiZ 180° o. B.
	500	464	GW T24		

Tabulka 2.8. Spoje P23/P92 svařeno elektrodou; kořen WIG

Přídavný svařovací materiál : druhově stejný P23, Ø 3,2 / 4,0 mm; základní potrubní materiály: P23 na P92 (oba 219,10 x 20 mm)					
WBH [°C/min]	Zkušební teplota + [°C]	R _m [N/mm ²]	Umístění zlomu	Av [J] při teplotě + 20°C	Ohybová zkouška
Svařovaný stav	20	653	GW P23	29/26/33	DiZ/WiZ 180° o. B.
		636			
	500/550	448/434			
740/30	20	613		138/136/132 132/135	DiZ/WiZ 180° o. B.
		598			
	500/550	432/386			

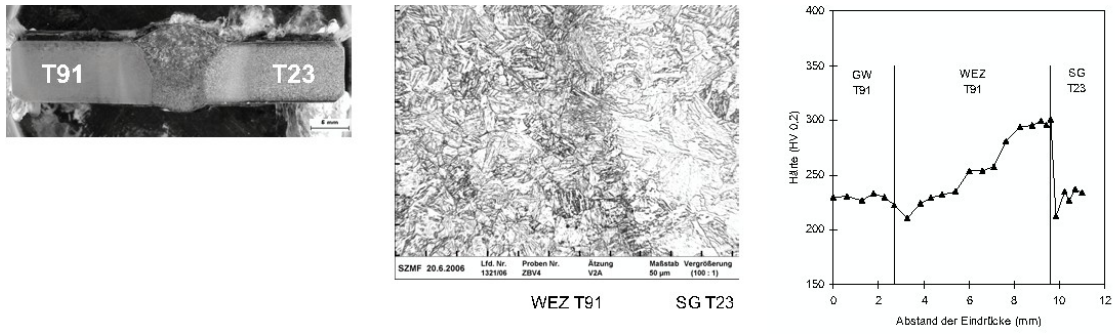
Přídavný svařovací materiál : druhově stejný P92, Ø 3,2 / 4,0 mm; základní potrubní materiály: P23 na P92 (oba 219,10 x 20 mm)					
WBH [°C/min]	Zkušební teplota + [°C]	R _m [N/mm ²]	Umístění zlomu	Av [J] při teplotě + 20°C	Ohybová zkouška
Svařovaný stav	20	605	GW P23	7/7/6	DiZ/WiZ 180° o. B.
		605			
	500/550	462/434			
740/30	20	589		40/46/44	DiZ/WiZ 180° o. B.
		590			
	500/550	419/385			

Obrázek 3. zkouška tahem spoje P23 / P92, p.m.druhově stejný k P23**Obrázek 4.** zkouška tahem spoje P23 / P92, p.m.druhově stejný k P92

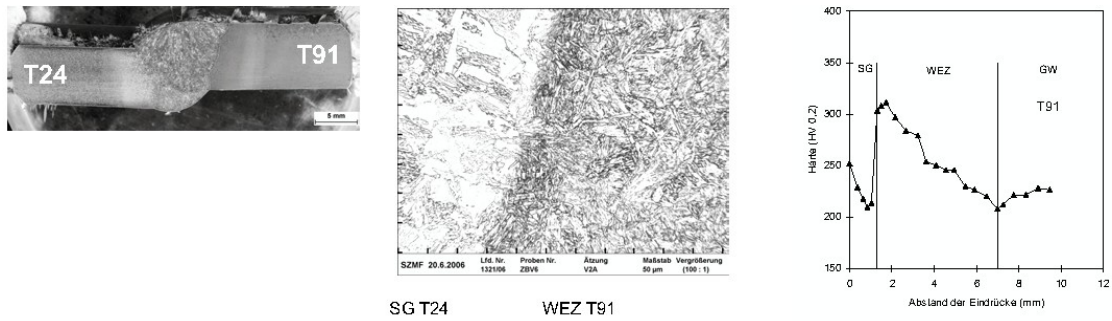
2. Metalografické zkoušky, tvrdost a rozdělení prvků

Pomocí metalografických zkoušek byly prozkoumány zejména oblasti blízko tavných linií s ohledem na oduhličení a nauhličení. Obrázky 58- ukazují výsledky metalografických zkoušek. V žádném případě neklesá tvrdost významně pod tvrdost základního materiálu v oblasti blízkosti tavných linií svarového materiálu a TOO. Prvky vytvářející karbid v druhově stejných svařovacích materiálech k T/P23, T24 a P92 zamezují silnou difúzi uhlíku, tak jak to například existuje v případě svarového materiálu vůči 10CrMo9-10 (obrázek 2). Kromě toho byly provedeny zkoušky na rozdělení prvků pomocí mikrosondy s elektronovým paprskem, které tuto domněnku potvrdily. Tímto by měly být srovnatelné i meze pevnosti v tečení takových smíšených spojů k druhově stejným spojům nížepevnostních potrubních materiálů. Započaté zkoušky by to měly doložit.

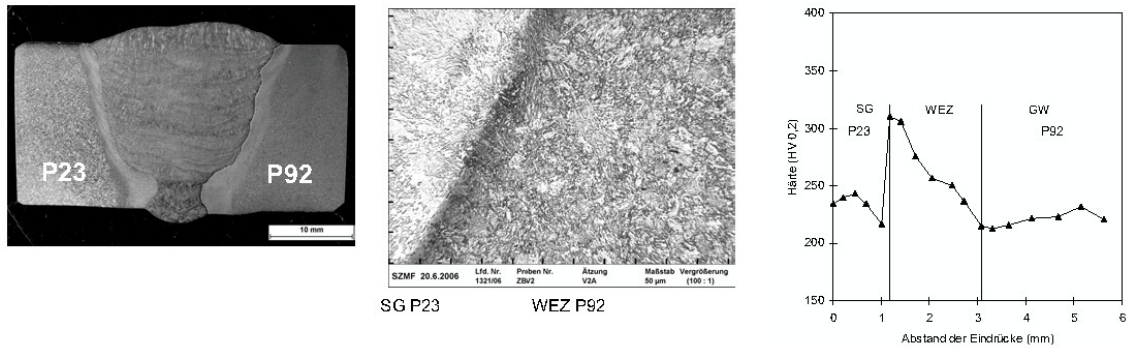
Obrázek 5. spoj T23 / T91, svařený druhově stejným p.m. k T23 (TZ 740°C/30 min.)



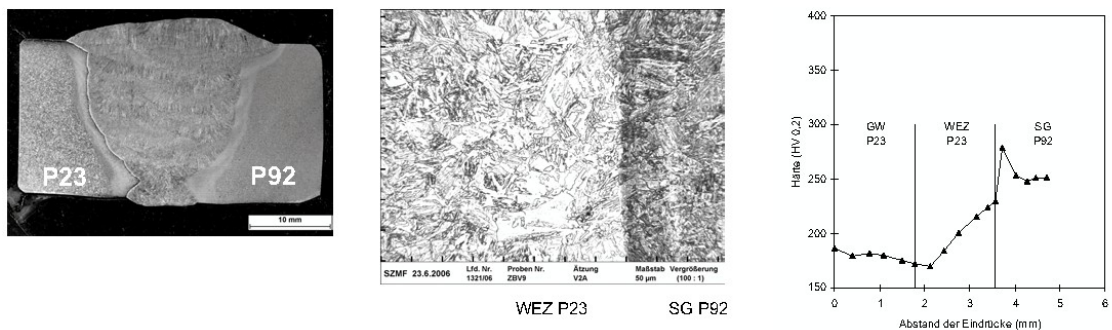
Obrázek 6. spoj T24 / T91, svařený druhově stejným p.m. k T24 (TZ: 740°C/30 min.)



Obrázek 7 spoj P23 / P92, svařený druhově stejným p.m. k P23 (TZ: 740°C/2 h)



Obrázek 8. spoj P23 / P92, svařený druhově stejným p.m. k P92 (TZ: 740°C/4 h)



Byly prozkoumány vlastnosti spojů nových ocelí T23 / T91; T24 / T91 a P23 / P92. Oproti stávajícím smíšeným spojům 10CrMo9-10 / P91 omezují popř. redukuje uhlíkovou difúzi prvky vytvářející slitinové karbidy V, Nb a Ti, nezávisle na tom zda druhově stejné přídatné materiály budou vybrány k nízkolegovaným ocelím nebo k vysoce legovaným materiálům. To by mohlo také pozitivně působit na vlastnosti meze pevnosti v tečení druhově stejných smíšených spojů. Odpovídající zkoušky jsou zavedeny. S druhově stejnými svařovými materiály k T/P23 a T/P24 jsou k dispozici přídatné svařovací materiály, které by také mohly vést u smíšených spojů s ocelmi, u kterých žádný partnerský materiál neobsahuje žádné prvky vytvářející slitinové karbidy, ke zmírnění uhlíkové difúze. Např. pro dvojice materiálů 10CrMo9-10 /

P91 jsou výhodnější. Další zkoušky zde představených nových, nízkolegovaných přídatných svařovacích materiálů by měly podpořit aplikační přednost oproti dosavadním běžným svařečským řešením pro smíšené spoje a popřípadě současně existující doporučení doplnit. Pokyny k označení výrobků použitých přídatných materiálů pro svařování budou získány z tabulky 2.

Tabulka 2.1. Použité druhově stejné přídatné svařovací materiály

	Druhově stejné k			
	T/P23	T/P24	T/P91	P92
WIG	Union I P23	Union I P24	Thermanit MTS 3	Thermanit MTS 616
Elektroda	Thermanit P23	Thermanit P24	Thermanit MTS 3	Thermanit MTS 616

Použité materiály firem:

Böhler Schweißtechnik Deutschland GmbH
 Vallourec&Mannesmann Tubes Deutschland GmbH