





Problematika metalurgické svařitelnosti niklového drátu o jakosti Ni 99,6 jako těsnící element dělicí roviny tlakové nádoby reaktoru



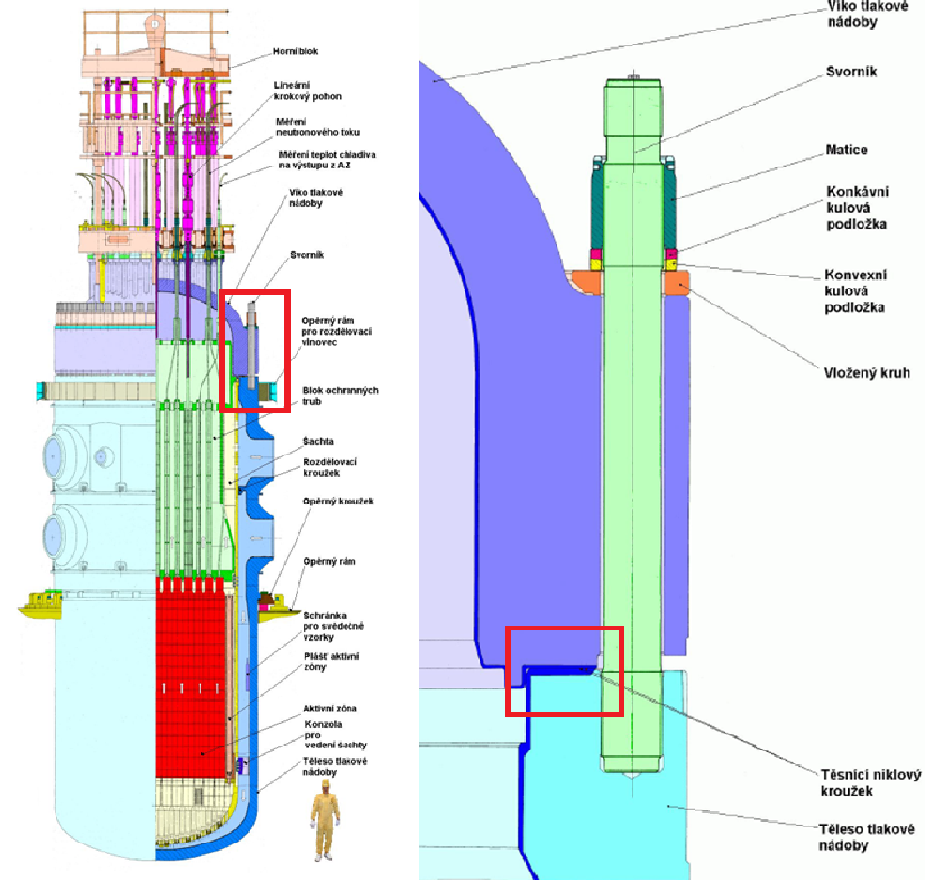
Cíl bakalářské práce

- zhodnocení problematiky svažitelnosti niklového tvářeného drátu o jakosti Ni 99.6 (ČSN 42 3405) jako těsnící element dělicí roviny tlakové nádoby s vlivem na jeho strukturní stabilitu a mechanické vlastnosti.

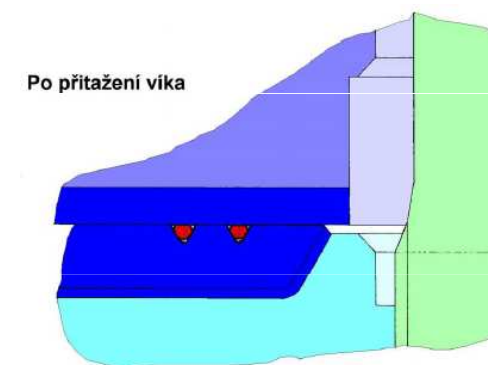
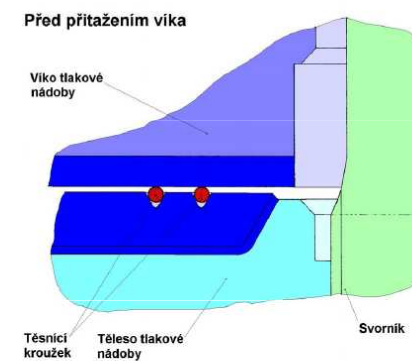
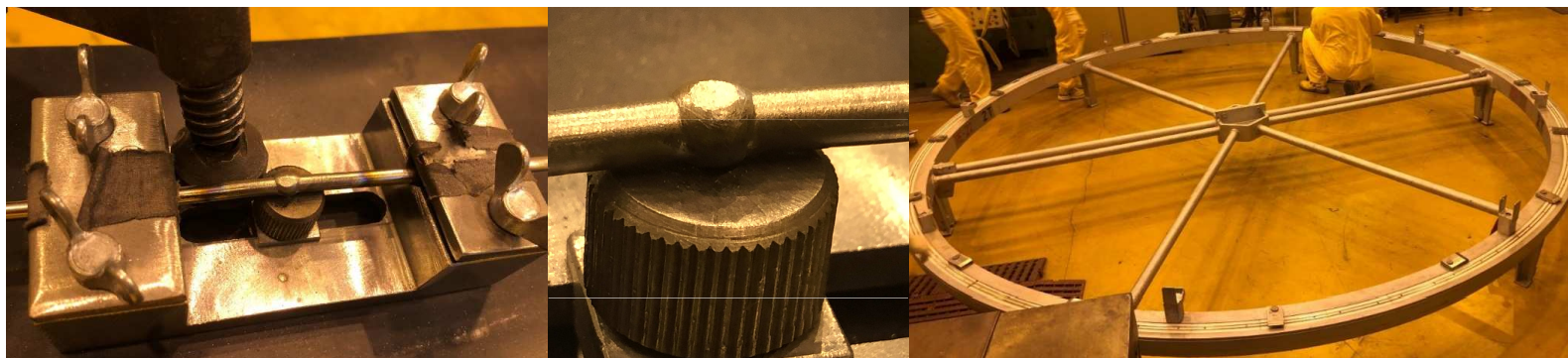
Metodika práce

-  Teoretická část – sběr dat
-  Aplikační část – experimentální výzkum

Reaktor VVER 1000 v podélném řezu a svorník v HDR



Niklové těsnění před umístěním a po vyndání z dělicí roviny tlakové nádoby reaktoru



Parametry svařování

PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ

Housenka (PA)	Metoda svařování	Index SM	Průměr (mm)	Proud (A)	Napětí (V)	Proud polarita	Rychlost svařování (cm/min)	Rychlost podávání drátu (m/min)	Tepelný příkon (kJ·mm ⁻¹)
1Ni č.1	141	A, B	1,2	46,3 – 58,3	8,8 – 10,8	DC (-)	1,3 – 4,3	-	0,68
1Ni č.2	141	A, B	1,2	44,9 – 56,9	8,3 – 10,3	DC (-)	2,2 – 5,2	-	0,47
2Ni č.1	141	A, B	1,2	42,3 – 54,3	8,5 – 10,5	DC (-)	1,0 – 4,0	-	0,68
2Ni č.2	141	A, B	1,2	43,9 – 55,9	8,6 – 10,6	DC (-)	1,3 – 4,3	-	0,64
5Ni č.1	141	A, B	1,2	47,3 – 59,3	8,9 – 10,9	DC (-)	2,0 – 5,0	-	0,56
5Ni č.2	141	A, B	1,2	49,6 – 61,6	8,6 – 10,6	DC (-)	1,6 – 4,6	-	0,64
6Ni č.1	141	A, B	1,2	46,0 – 58,0	8,8 – 10,8	DC (-)	1,9 – 4,9	-	0,56
6Ni č.2	141	A, B	1,2	44,5 – 56,5	9,3 – 11,3	DC (-)	2,6 – 5,6	-	0,44
9Ni č.1	141	A, B	1,2	48,0 – 60,0	8,5 – 10,5	DC (-)	0,6 – 3,6	-	0,87
9Ni č.2	141	A, B	1,2	48,1 – 60,1	8,7 – 10,7	DC (-)	0,4 – 3,4	-	0,97
10Ni č.1	141	A, B	1,2	48,4 – 60,4	8,5 – 10,5	DC (-)	1,6 – 4,6	-	0,62
10Ni č.2	141	A, B	1,2	45,0 – 57,0	8,8 – 10,8	DC (-)	1,5 – 4,5	-	0,62

Svařování metodou TIG



Příprava niklových drátů o jakosti Ni 99,6 o \varnothing 5,0 mm tavby B5927

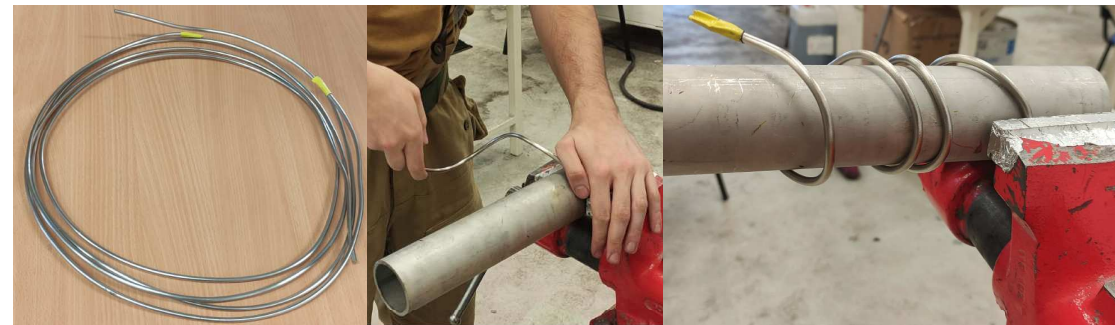
Niklový drát Ni 99,6

- Základní materiál Ni 99,6 o \varnothing 5,0 mm tavby B5927
- Deformovaný Ni 99,6 byl zvolen jako základní materiál pro kontrolní svarové spoje 5Ni, 6Ni, 7Ni a 8Ni

svarové spoje

3Ni a 4Ni nedeformované

5Ni a 6Ni Deformované ohybem



Zkoumané niklové dráty o jakosti Ni 99,6

Kontrolní svarové spoje

- 1Ni až 12Ni základní materiál Ni 99,6 o \varnothing 5,0 mm tavby B5927 (svařené ve spolupráci s doktorem Beněm)
- 536-1 a 536-2 Základní materiál Ni 99,6 o \varnothing 5,13 mm tavby A8743 (vytvořené zaměstnanci dodavatele zajišťující servis JE)
- Přídavný materiál NITIG 99 o \varnothing 1,2 mm tavby Z1-000601



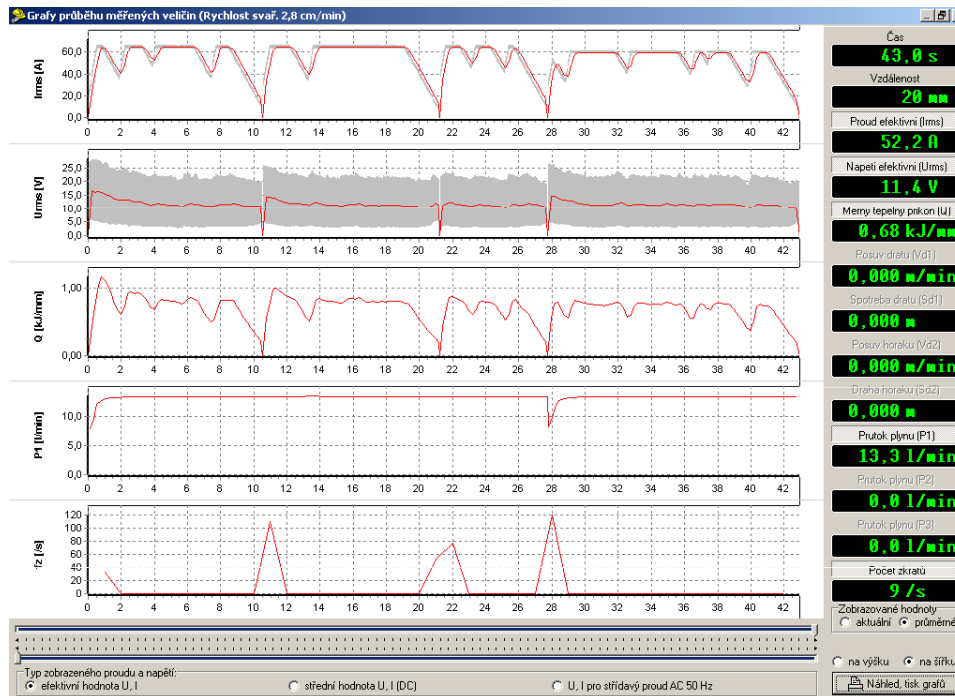
Použití základního materiálů na tahové zkoušky

Použití ZM pro tahové zkoušky	13Ni-1	13Ni-2	14Ni-1	14Ni-2	536-3	536-4
ZM: Ni 99,6 Tavba B5927	ANO	ANO	NE	NE	NE	NE
ZM: Ni 99,6 Tavba A8743	NE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO

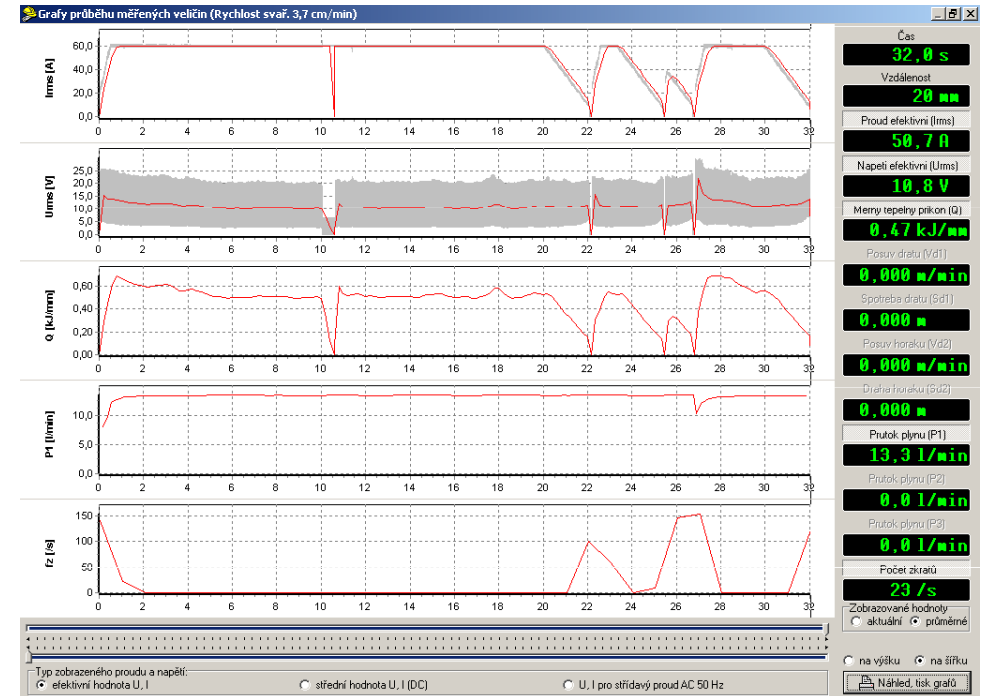
Použití základního a přídavného materiálů na svarové spoje

Použití ZM a PM	1Ni	2Ni	3Ni	4Ni	5Ni	6Ni	7Ni	8Ni	9Ni	10Ni	Použití ZM a PM	11Ni	12Ni	536-1	536-2
ZM: Ni 99,6 Tavba B5927	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ZM: Ni 99,6 Tavba B5927	ANO	ANO	NE	NE
PM: Ni 99,6 Tavba B5927	NE	NE	ANO	ANO	NE	NE	ANO	ANO	NE	NE	PM: Ni 99,6 Tavba B5927	ANO	ANO	NE	NE
ZM: Ni 99,6 Tavba A8743	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	ZM: Ni 99,6 Tavba A8743	NE	NE	ANO	ANO
PM: NITIG 99	ANO	ANO	NE	NE	ANO	ANO	NE	NE	ANO	ANO	PM: NITIG 99	NE	NE	ANO	ANO

WeldMonitor-Grafy průběhu měřených veličin



Svar 1Ni housenka 1



Svar 1Ni housenka 2

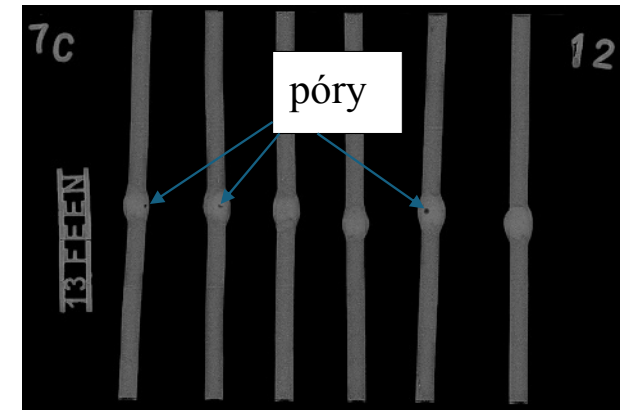
Prováděné zkoušky

- Nedestruktivní zkoušky pro svarové spoje
 - Vizuální kontrola
 - Kapilární zkouška
 - Radiografická zkouška
- Destruktivní zkoušky pro liché svarové spoje (1Ni, 3Ni, 5Ni, 7Ni, 9Ni, 11Ni a 536-1)
 - Strukturní a prvková analýza pro spoje 536-1 a 11Ni
 - Metalografická analýza makrostruktury
 - Metalografická analýza mikrostruktury
 - Zkouška tvrdosti (Vickers HV1)
 - Zkouška mikrotvrdosti pro spoje 1Ni, 7Ni (Vickers HV0,01)
- Destruktivní zkoušky pro sudé svarové spoje (2Ni, 4Ni, 6Ni, 8Ni, 10Ni, 12Ni a 536-2) a základní materiály 13Ni-1, 13Ni-2, 14Ni-1, 14Ni-2, 536-3 a 536-4
 - Tahová zkouška

Vady kapilární zkouška



Vady radiografická zkouška







Liché svarové spoje



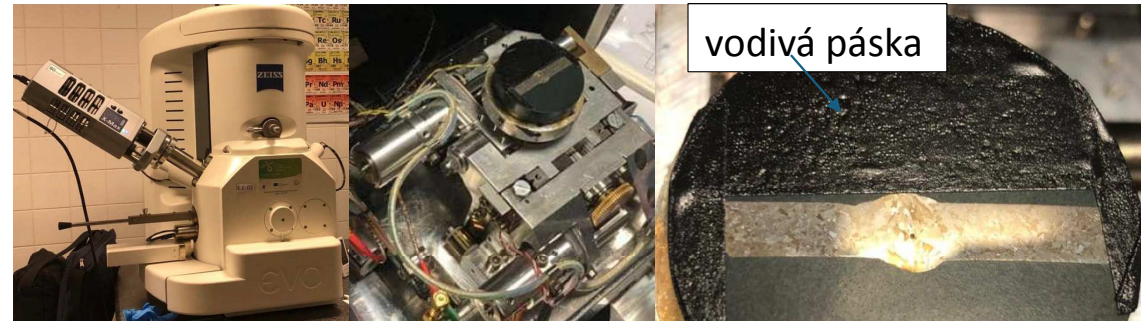
Sudé svarové spoje



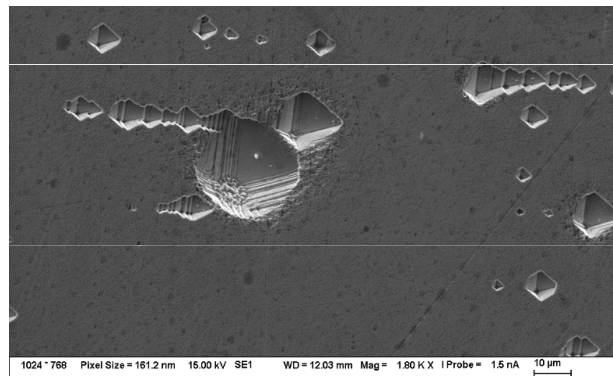
Strukturní a prvková analýza

-  Pro spoje 536-1 a 11Ni
-  100 % niklu v odhaleném krystalu niklu viz. spektrum 23, 24, 25.
-  100 % niklu v v základní matici kovového materiálu viz. spektrum 21, 22.
-  Další chemické prvky se vyskytovaly v důsledku kontaminace leptadlem nebo během analýzy ve svarovém kovu.

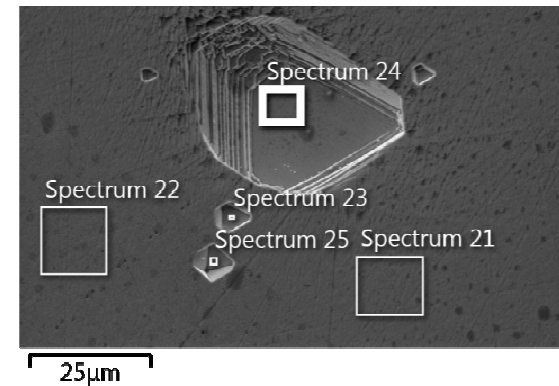
elektronový SEM mikroskop ZEISS EVO LS10



Struktura SK 536-1 zvětšeno 1800x



Struktura ZM 536-1



Element	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
Ni	100.00	0.00	100.00
Total:	100.00		100.00

Metalografická analýza makrostruktury

- ❑ TOO není výrazná kromě vzorku 536-1
- ❑ Výraznější lept vzorku 536-1 je způsobeno nejspíše tepelným zpracováním, které proběhlo dvakrát.

Metalografická analýza mikrostruktury

- ❑ Austenitická struktura
- ❑ Výrazný lept u vzorku 536-1
- ❑ Zvýrazněné oxidy niklu

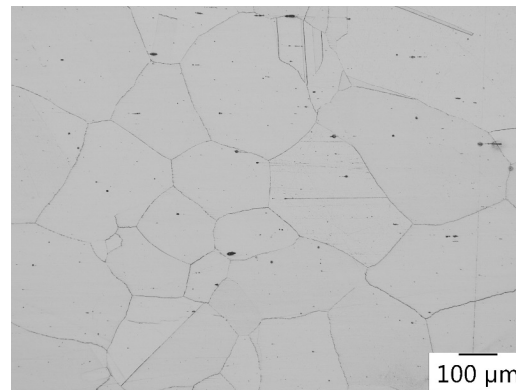
7 Ni zvětšeno 20x



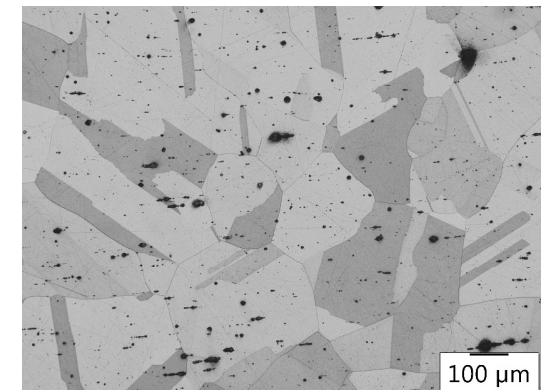
536-1 zvětšeno 20x



7 Ni zvětšeno 100x



536-1 zvětšeno 100x

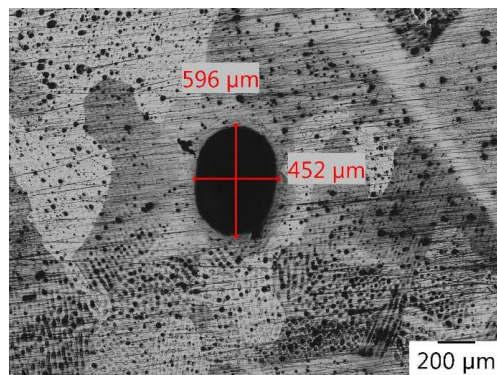


Metalografická analýza mikrostruktury

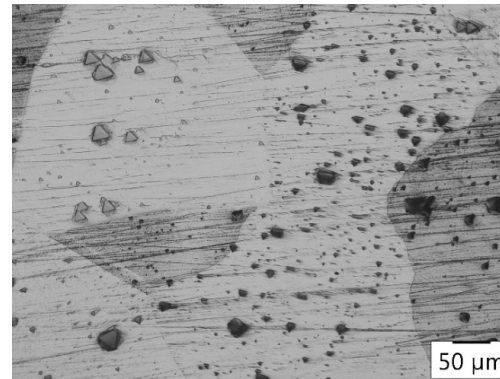
! Vzorek 536-1

- Použity tři leptadla Kalling 2, Klemm's a Lučavka královská.
- Zvoleno leptadlo Kalling 2 ponořovací metoda.

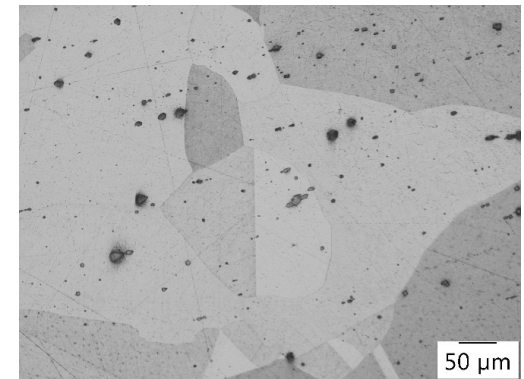
Pór (zvětšeno 50x)



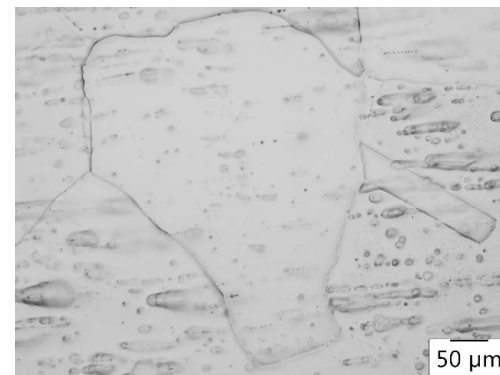
Kalling 2 nanášeno vatou
(zvětšeno 200x)



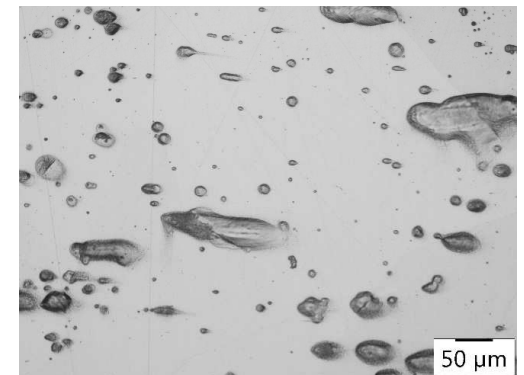
Kalling 2 ponořovací
metoda (zvětšeno 200x)



Lučavka královská nanášeno vatou
(zvětšeno 200x)



Klemm's nanášeno vatou
(zvětšeno 200x)



Zkouška tvrdosti

Tvrdość

- Zkouška tvrdosti pro vzorky 1Ni, 3Ni, 5Ni, 7Ni, 9Ni, 11Ni a 536-1 (Vickers HV1)

Mikrotvrdość

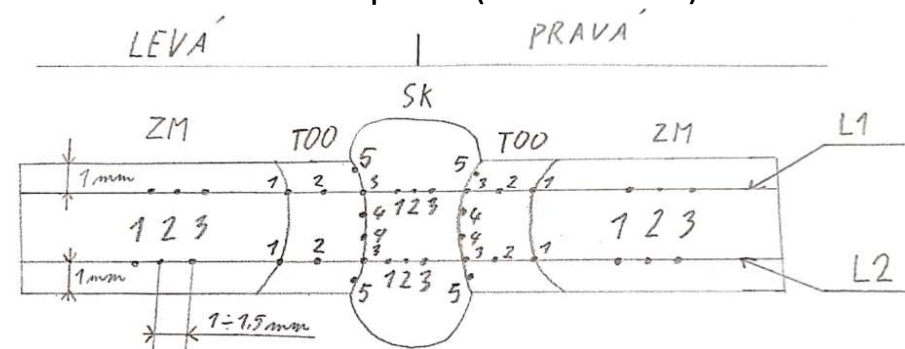
- Zkouška mikrotvrdości pro vzorky 1Ni, 7Ni (Vickers HV0,01)

Výsledky vpichů vzorek 1Ni (Vickers HV1)

Vzorek – 1Ni	1 (HV1)	2 (HV1)	3 (HV1)	4 (HV1)	5 (HV1)
ZM LEVÁ L1	106,6	109,5	105,2	-	-
TOO LEVÁ L1	102,1	104,9	102,1	99,7	98,6
SK L1	101,3	103,9	99,7	-	-
TOO PRAVÁ L1	145,2	144,7	137,5	104	179,6
ZM PRAVÁ L1	140,2	140,4	137,2	-	-
ZM LEVÁ L2	97,3	96,4	98	-	-
TOO LEVÁ L2	95	94,1	93,4	92,2	91,4
SK L2	105,4	105,6	105,1	-	-
TOO PRAVÁ L2	143,5	145,4	116	89,6	139,6
ZM PRAVÁ L2	141,2	136,2	137,7	-	-



Vkládání vpichů (Vickers HV1)



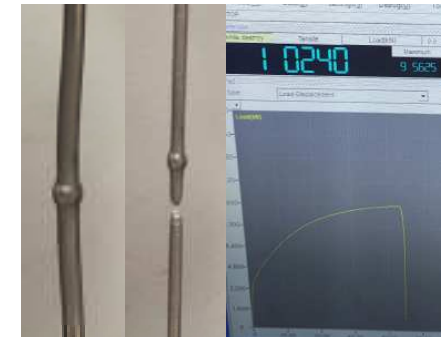
Tahová zkouška

■ Příkladný a Základní materiál

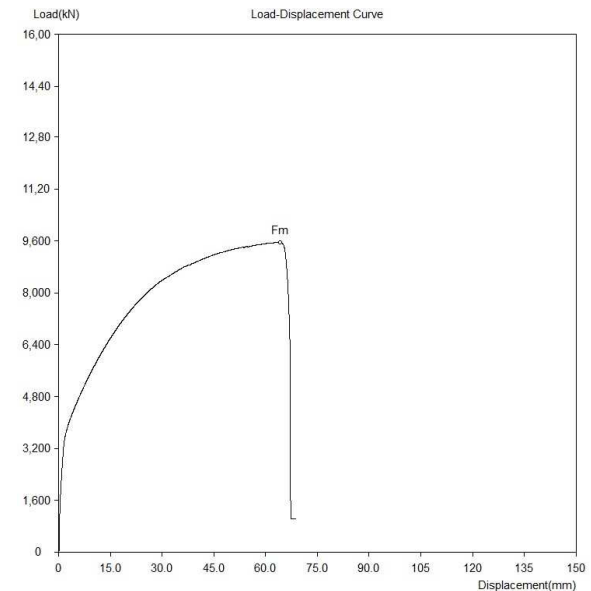
- 2Ni, 6Ni a 10Ni – Základní materiál Ni 99,6 a Příkladný materiál NITIG 99.
- 4Ni, 8Ni a 12Ni – Základní materiál Ni 99,6 a Příkladný materiál Ni 99,6.
- 13Ni-1, 13Ni-2 – Základní materiál tavby B5927.
- 14Ni-1, 14Ni-2, 536-3, 536-4 – Základní materiál tavby A8743.

Hodnoty příčných tahových zkoušek

Označení vzorku	Fp 0,1 (kN)	Rp 0,1 (MPa)	Fp 0,2 (kN)	Rp 0,2 (MPa)	Fm (kN)	Rm (MPa)	Poloha lomu
2Ni (KSS)	5,26	263	5,31	265,5	9,562	478,1	Mimo svar Ni 99,6
4Ni (KSS)	3,65	182,5	3,66	183	7,314	365,7	Mimo svar Ni 99,6
6Ni (KSS-DEF)	3,65	182,5	3,66	183	10,04	502	Mimo svar Ni 99,6
8Ni (KSS-DEF)	3,65	182,5	3,66	183	7,519	375,9	Mimo svar Ni 99,6
10Ni (KSS) neodmaštěný	3,65	182,5	3,66	183	10,04	502	Mimo svar Ni 99,6
12Ni (KSS)	3,65	182,5	3,66	183	7,131	356,5	Mimo svar Ni 99,6
13Ni-1 (ETE-ZM)	3,65	182,5	3,66	183	10,41	520,5	-
13Ni-2 (ETE-ZM)	3,65	182,5	3,66	183	11,96	598	-
14Ni-1 (DEF)	5,41	270,5	-	-	10,87	543,5	-
14Ni-2 (DEF)	5,41	270,5	-	-	11,42	571	-
536-2 (KSS)	5,26	260	5,31	265,5	10,66	533	Mimo svar Ni 99,6
536-3 (EDU-ZM)	3,65	182,5	3,66	183	9,724	486,2	-
536-4 (EDU-ZM)	3,65	182,5	3,66	183	11,2	560	-



2Ni



Spektrometrie

Zkušební vzorky 1Ni, 5Ni, 536-1 a naklepané svarové spoje 536-2 a 2Ni

- Měřená koncentrace niklu na spektrometru je dominantní oproti ostatním prvkům s hmotnostním obsahem do 2 %.



Výsledky chemického složení pomocí spektrometru

Označení vzorku	Spektrum	Si	Ti	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
1Ni – ZM (klepaný)	1	0,150	0,022	0,104	0,086	0,022	99,602	-
	2	0,145	0,024	0,118	0,083	0,021	99,586	-
1Ni – ZM (nerozklepaný)	1	0,154	0,085	0,454	0,215	0,018	98,582	0,102
	2	0,238	0,081	0,469	0,230	0,019	98,188	-
2Ni – svarový kov (klepaný)	1	0,203	1,671	0,230	0,200	0,030	97,063	-
	2	0,224	1,738	0,233	0,208	0,027	96,925	-
5Ni – ZM DEF (klepaný)	1	0,168	0,030	0,114	0,092	0,019	99,406	-
	2	0,163	0,030	0,107	0,103	0,019	99,355	-
536-1 – ZM (klepaný)	1	0,162	0,081	0,114	0,100	0,025	99,313	-
	2	0,237	0,020	0,125	0,377	0,012	98,315	0,051
536-2 – svarový kov (klepaný)	1	0,189	1,391	0,209	0,190	0,017	97,471	-
	2	0,182	1,367	0,202	0,176	0,020	97,545	-

Snímky z kamery spektrometru VANTA Olympus



Feritoskopie

Zkušební vzorky 1Ni, 5Ni, 536-1 a naklepané svarové spoje 536-2 a 2Ni

- Vzorky byly rovněž ověřeny magnetem, který nám potvrdil, že jsou silně magnetické.
- Vysoké procento feritu potvrdilo feromagnetické vlastnosti niklu.



1Ni hodnoty % feritu

1Ni	Naklepaná část (% feritu)	Nenaklepaná část (% feritu)
1	31,3	54,9
2	32	53,7
3	34,6	54,2

536-2 hodnoty % feritu

536-2	Svarový spoj (% feritu)
1	29,8
2	30,4
3	30,7



Plán svařování kontrolních svarových spojů 1Ni až 12Ni

Kvalitativní vyhodnocení provedených experimentů

Označení vzorku	Použité zkoušky (KSS)	ZM	PM
1Ni	Vzorek pro NDT (RT, VT, PT), mikro, makro a tvrdosti	Drát Ni 99,6 o průměru 5 mm	NITIG 99
2Ni	Vzorek pro NDT (RT, VT, PT) a tahovou zkoušku	Drát Ni 99,6 o průměru 5 mm	NITIG 99
3Ni	Vzorek pro NDT (RT, VT, PT), mikro, makro a tvrdosti	Drát Ni 99,6 o průměru 5 mm	Naklepaný drát Ni 99,6
4Ni	Vzorek pro NDT (RT, VT, PT) a tahovou zkoušku	Drát Ni 99,6 o průměru 5 mm	Naklepaný drát Ni 99,6
5Ni	Vzorek pro NDT (RT, VT, PT), mikro, makro a tvrdosti	Deformovaný drát Ni 99,6 o průměru 5 mm	NITIG 99
6Ni	Vzorek pro NDT (RT, VT, PT) a tahovou zkoušku	Deformovaný drát Ni 99,6 o průměru 5 mm	NITIG 99
7Ni	Vzorek pro NDT (RT, VT, PT), mikro, makro a tvrdosti	Deformovaný drát Ni 99,6 o průměru 5 mm	Naklepaný drát Ni 99,6
8Ni	Vzorek pro NDT (RT, VT, PT) a tahovou zkoušku	Deformovaný drát Ni 99,6 o průměru 5 mm	Naklepaný drát Ni 99,6
9Ni	Vzorek pro NDT (RT, VT, PT), mikro, makro a tvrdosti	Neodmaštěný drát Ni 99,6 o průměru 5 mm	Neodmaštěný NITIG 99
10Ni	Vzorek pro NDT (RT, VT, PT) a tahovou zkoušku	Neodmaštěný drát Ni 99,6 o průměru 5 mm	Neodmaštěný NITIG 99
11Ni	Vzorek pro NDT (RT, VT, PT), mikro, makro a tvrdosti	Drát Ni 99,6 o průměru 5 mm	Drát Ni 99,6 o průměru 2 mm
12Ni	Vzorek pro NDT (RT, VT, PT) a tahovou zkoušku	Drát Ni 99,6 o průměru 5 mm	Drát Ni 99,6 o průměru 2 mm

Vzorek	VT	PT	RT	MA	MI	HV1	HV0,01	TAH	SEM	F	XRF
1Ni (SS)	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	-	-	OK	OK
2Ni (SS)	OK	OK	OK	-	-	-	-	OK	-	-	OK
3Ni (SS)	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	-	-	-	-
4Ni (SS)	OK	OK	OK	--	--	--	--	OK	-	-	-
5Ni (SS)	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	-	-	OK	OK
6Ni (SS)	OK	OK	OK	-	-	-	-	OK	-	-	-
7Ni (SS)	OK	OK	NOK	OK	OK	OK	OK	-	-	-	-
8Ni (SS)	OK	OK	NOK	-	-	-	-	OK	-	-	-
9Ni (SS)	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	-	-	-	-
10Ni (SS)	OK	OK	OK	-	-	-	-	OK	-	-	-
11Ni (SS)	OK	OK	NOK	OK	OK	OK	OK	-	OK	-	-
12Ni (SS)	OK	OK	OK	-	-	-	-	OK	-	-	-
536-1(SS)	OK	NOK	OK	OK	OK	OK	OK	-	OK	OK	OK
536-2 (SS)	OK	OK	OK	-	-	-	-	OK	-	-	OK
536-3 (ZM)	-	-	-	-	-	-	-	OK	-	-	-
536-4 (ZM)	-	-	-	-	-	-	-	OK	-	-	-
13Ni-1 (ZM)	-	-	-	-	-	-	-	OK	-	-	-
13Ni-2 (ZM)	-	-	-	-	-	-	-	OK	-	-	-
14Ni-1 (ZM)	-	-	-	-	-	-	-	OK	-	-	-
14Ni-2 (ZM)	-	-	-	-	-	-	-	OK	-	-	-



Závěr

- Vzorek 536-1 tavby A8743 – příliš výrazná struktura (výrazný lept).
 - Kontrolní svarové spoje s použitým přídavným materiálem NITIG 99 mají pozitivní vliv na vyšší úroveň mechanických vlastností.
 - Vhodnost materiálové kombinace svarového spoje se prokázala i při použití přídavného materiálu ve formě základního materiálu o jakosti Ni 99,6. všechny naměřené hodnoty R_m vyhovující požadavkům na pevnost v tahu podle normy ČSN 42 3405.11.
 - Při deformaci (ohýbání) se měkký niklový drát Ni 99,6 vytvrzuje.
- Nápravná opatření:
1. Pro vzorek 536-1 bylo zvoleno stejné leptadlo, ale změnil se způsob nanášení. Místo aplikace leptadla vatou se zvolila ponořovací metoda.
 2. V případě použití PM ve formě ZM (Ni 99,6) musí být jeho tvar vhodněji připraven, tl. 2 mm je příliš velká.
 3. Svarový kov zhotovený PM ve formě ZM (Ni 99,6) vykazoval větší strukturní homogenitu.
 4. Řízená deformace neměla zásadní vliv na metalurgickou svažitelnost a vyšší tvrdost svarových spojů.
 5. Současná technologie svařování niklového drátu (Ni 99,6) pomocí PM (NITIG 99) na bázi niklu metodou TIG je na základě výsledků experimentálního zkoušení vyhovující.



Otázky vedoucího práce

- Lze na základě získaných poznatků posoudit, zda ověřené postupy jsou jediným vhodným řešením anebo lze ještě výrobní postupy inovovat?
- Lze k ověření fyzikálních a mechanických vlastností využít i jiné postupy zkoušení?
- Jsou získané technické poznatky přenositelné i na ostatní jaderná zařízení?



Děkuji za pozornost