

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ú12133 - Ústav strojírenské technologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
Opravy svařovaných tlakových nádob z
hliníkových slitin

Autor: Matěj Pertlík

Studijní obor: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.,

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pertlík** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **438620**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Opravy svařovaných tlakových nádob z hliníkových slitin

Název bakalářské práce anglicky:

Repairs of welded pressure vessels made of aluminum alloys

Pokyny pro vypracování:

- Rozbor výroby svařovaných tlakových nádob z hliníku a jeho slitin - speciální požadavky výrobních norem
- Popis vybrané technologie svařování a postup oprav
- Návrh experimentu a jeho realizace
- Vyhodnocení kvality oprav svarových spojů, vytvoření specifikace postupu svařování
- zhodnocení dosažených výsledků

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kolařík, L. a kolektiv. Konstrukce a navrhování svarových spojů, Praha, 2017
- [2] Kolektiv. Materiály a jejich chování při svařování, Ostrava, 2016
- [3] Musil, M., Moravec, J. a kolektiv. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, DOM-ZO 13, 2017
- [4] Davis J.R. Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Specialty Handbook, 2002
- [5] Firemní materiály společnosti Alfimex, OK-BE spol. s r.o., ČSN EN 13445

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

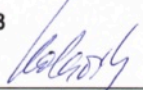
Miroslav Fišer, IWT, OK-BE spol. s.r.o.


Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2018**

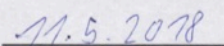

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

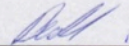

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

ANOTACE

Název práce: Opravy svařovaných tlakových nádob z hliníkových slitin

Autor práce: Matěj Pertlík

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.,

Ústav: 12133 - Ústav strojírenské technologie

Vedoucí ústavu: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.,

Univerzita: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní

Bakalářská práce se zabývá problematikou svařování tlakových nádob z hliníkových slitin. V teoretické části bakalářské práce je vytvořen přehled metod vhodných pro svařování hliníkových slitin se zaměřením na konvenční metody, svařitelnost hliníku, přídatné materiály, svařovací parametry a nejčastější vady vzniklé nedodržením správného svařovacího postupu. V experimentální části bakalářské práce je porovnání správně svařeného konkrétního dílu s identickým dílem obsahujícím nepřijatelné vady.

Rozsah práce: Počet stran: 85

Počet obrázků: 72

Počet tabulek: 13

Klíčová slova: TIG, Svařování, Hliníkové slitiny, Tlakové nádoby, Opravy

ANNOTATION

Title: Repairs of welded pressure vessels made of aluminium alloys

Author: Matěj Pertlík

Supervisor: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.,

Department: 12133 - Ústav strojírenské technologie

Head of department: **doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.,**

University: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní

The bachelor thesis deals with problems of welding of pressure vessels from aluminum alloys. In the theoretical part of the bachelor thesis there is an overview of methods suitable for welding of aluminum alloys with focus on conventional methods, weldability of aluminum, additional materials, welding parameters and most frequent defects caused by failure to observe the correct welding procedure. In the experimental part of the bachelor thesis, the comparison of a properly welded specific piece with an identical piece containing unacceptable defects.

Scope of the thesis: Number of pages: 85
Number of pictures: 72
Number of tables: 13

Key words: TIG, Welding, Aluminium alloys, Pressure vessels, Repairs

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma:

Opravy svařovaných tlakových nádob z hliníkových slitin

vypracoval samostatně pod vedením určeného vedoucího práce a odborných konzultantů s využitím zdrojů a literárních pramenů, které cituji a uvádím v přiložené bibliografii v závěru práce.

Z důvodu použití interních dokumentů firmy Haar CZ s.r.o. **odpírám** sdělit souhlas s užitím tohoto školního díla ve smyslu § Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V praze dne 10.6. 2018



.....
Matěj Pertlík

PODĚKOVÁNÍ

V této části bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D. IWE za odborné vedení, poskytnuté podklady k vypracování této práce, metalografické výbrusy a velmi vstřícný přístup.

Dále bych rád poděkoval panu Miroslavu Fišerovi za odborné konzultace, poskytnutí podkladů a spolupráci při praktické části bakalářské práce.

Poděkování patří také společnosti HAAR CZ s.r.o. a společnosti Alfimex s.r.o. za poskytnutí potřebných materiálů a dokumentace.

OBSAH

ANOTACE	3
ANNOTATION	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	9
SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK.....	11
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	13
2 METODY SVAŘOVÁNÍ HLINÍKU	14
2.1 Svařování metodou 111 (MMAW)	16
2.2 Svařování metodou 131 (MIG)	17
2.3 Svařování metodou 141 (TIG)	19
3 HLINÍK A JEHO SLITINY	23
3.1 Výroba Hliníku.....	23
3.2 Charakteristika hliníku	24
3.3 Druhy slitin Al	25
3.4 Značení slitin hliníku.....	27
3.5 Materiály pro výrobu tlakových nádob	30
4 SVAŘITELNOST Al A JEHO SLITIN	31
4.1 Ochranné plyny	31
4.2 Vysoká afinita Al ke kyslíku	34
4.3 Velký koeficient teplotní délkové roztažnosti	35
4.4 Velká rozpustnost plynů v Al.....	35
4.5 Pokles mechanických vlastností po svařování	35
4.6 Doporučení pro svařování Al a jeho slitin	37

5 VADY SVARŮ	42
5.1 Nejběžnější vady svarů spojené s Al	42
5.2 Nedestruktivní metody kontroly	44
5.3 Destruktivní metody kontroly	45
6 KVALIFIKACE	48
6.1 Kvalifikace postupu svařování.....	48
6.2 Kvalifikace personálu	51
7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	52
7.1 Výkresová dokumentace	54
7.2 Svařovací postup	56
8 VYHODNOCENÍ KVALITY VYTVOŘENÝCH ZKUŠEBNÍCH KUSŮ.....	62
8.1 Zkouška vizuální	62
8.2 Zkouška kapilární.....	62
8.3 Zkouška prozářením	63
8.4 Metalografický výbrus.....	66
8.5 Porovnání mikrostruktury	72
8.6 Zkouška tvrdosti	77
9 VYHODNOCENÍ	79
10 ZÁVĚR	82
SEZNAM LITERÁRNÍCH ZDROJŮ	83

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 Celková kvalita svařence	15
Obr. 2 schéma metody MMAW	16
Obr. 3 Schéma metody MIG	18
Obr. 4 Princip čtyřkladkového podavače	19
Obr. 5 Schéma metody TIG	20
Obr. 6 Schéma TIG hořáku a popis jeho jednotlivých částí	21
Obr. 7 Zobrazení čistícího účinku elektrického oblouku	22
Obr. 8 Možnosti zapojení el. oblouku a vliv čistícího účinku u metody 14	22
Obr. 9 Výroba Al elektrolýzou	23
Obr. 10 (a) kuličkový model, (b) jednotková buňka, (c) model krystalu	24
Obr. 11 Schéma tepelného zpracování (Vytvrzování) Al slitin	25
Obr. 12 Rozdělení slitin Hliníku	26
Obr. 13 Značení slitin hliníku	28
Obr. 14 Informační nálepka na tlakové láhvi	32
Obr. 15 Informační nálepka tl. láhve s argonem	32
Obr. 16 Informační nálepka tl. láhve se směsí Ar + He	33
Obr. 17 Neodstraněná oxidická vrstva	34
Obr. 18 Odstraněná oxidická vrstva	34
Obr. 19 Nevýrazná ztráta pevnosti slitiny AlMg4,5Mn	36
Obr. 20 Výrazný pokles tvrdosti slitiny AlMgSi1	36
Obr. 21 Rozdělení svarů používaných při výrobě tlakových nádob	40
Obr. 22 Trhlina svarového spoje	42
Obr. 23 Nepřípustné množství pórů způsobující výrazný pokles mechanických vlastností	43
Obr. 24 Wolframový vměstek	43
Obr. 25 Neprovařený kořen	44
Obr. 26 Postup metalografického výbrusu	45
Obr. 27 Tvrdoměr na měření tvrdosti podle Vickerse	47
Obr. 28 Obecný postup kvalifikace	50
Obr. 29 Kolektor	52
Obr. 30 Funkce kolektoru	53
Obr. 31 Umístění kolektoru	53
Obr. 32 Detail umístění kolektoru	54
Obr. 33 Čelo kolektoru	54
Obr. 34 Výrobní výkres kolektoru	55
Obr. 35 Základní materiál 1 - Rozdílná tloušťka stěny	56
Obr. 36 Základní materiál 2 - tloušťka materiálu 20mm	57
Obr. 37 Předehřev materiálu	60

Obr. 38 Měření teploty předeheřevu	60
Obr. 39 Svařený zkušební kus, připravený na NDT a DT zkoušení	61
Obr. 40 Detail svaru	61
Obr. 41 Nanesení penetrantu.....	63
Obr. 42 Nanesení vývojky.....	63
Obr. 43 RTG snímek - nepřípustné vady	64
Obr. 44 RTG snímek - čistota svaru	64
Obr. 45 Protokol Radiografické zkoušky	65
Obr. 46 Pozice řezů.....	66
Obr. 47 Řezání vzorku v pile Labotom 3.....	67
Obr. 48 Lis CitoPress - 1	67
Obr. 49 Broušení a leštění	68
Obr. 50 Ultrazvukové čištění.....	69
Obr. 51 Sušení naleptaných vzorků.....	69
Obr. 52 Schématické zobrazení řezů pro metalografické výbrusy z 1. série	70
Obr. 53 Výbrusy 1. série, zleva: A1, A2, A3	70
Obr. 54 Výbrusy 1. série, zleva: B1, B2, B3.....	71
Obr. 55 Schématické zobrazení řezů 3. série	71
Obr. 56 Výbrusy 3. série, zleva: A1, A2, B1.....	71
Obr. 57 Výbrusy 3. série, zleva: D2, D1, C2	72
Obr. 58 Schématické zobrazení místa snímků vzorku A2 z 1. série.....	72
Obr. 59 Mikroskopické snímky vzorku A2 z 1. série, umístění podle obr. 58 - zleva: 1, 2, 3	73
Obr. 60 Mikroskopické snímky vzorku A2 z 1. série, umístění podle obr. 58 - zleva: 4, 5, 6	73
Obr. 61 Schématické zobrazení místa snímků vzorku B1 z 1. série.....	73
Obr. 62 Mikroskopické snímky vzorku B1 z 1. série, umístění podle obr. 61 - zleva: 2, 3, 4	74
Obr. 63 Mikroskopické snímky vzorku B1 z 1. série, umístění podle obr. 61 - zleva: 5, 7, 8	74
Obr. 64 Schématické zobrazení místa snímků vzorku A2 z 3. série.....	74
Obr. 65 Mikroskopické snímky vzorku A2 z 3. série, umístění podle obr. 64 - zleva: 1, 2, 3	75
Obr. 66 Mikroskopické snímky vzorku A2 z 3. série, umístění podle obr. 64 - zleva: 4, 5, 6	75
Obr. 67 Schématické zobrazení místa snímku vzorku B1 z 3. série.....	75
Obr. 68 Mikroskopické snímky vzorku B1 z 3. série, umístění podle obr 67 - zleva: 1, 2, 3	76
Obr. 69 Mikroskopické snímky vzorku B1 z 3. série, umístění podle obr. 67 - zleva: 4, 5	76
Obr. 70 Rozmístění vtisků dle ČSN EN ISO 9015-2	78
Obr. 71 Nenatavené vnitřní hrany kolektoru	80
Obr. 72 Protokol pWPS.....	81

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 Porovnání hliníku se železem	24
Tabulka 2 Značení tvářených slitin Al dle ČSN EN 573-1 až 3.....	28
Tabulka 3 Značení slitin dle ČSN EN 1706	29
Tabulka 4 Rozdělení základních materiálů.....	29
Tabulka 5 Možné hliníkové materiály použitelné pro výrobu tlakových nádob.....	38
Tabulka 6 Kontrola a zkoušení zkušebních vzorků podle ČSN EN ISO 15614-2.....	49
Tabulka 7 Chemické složení AlMgSi0,5	56
Tabulka 8 Mechanické vlastnosti ZM 1 - kolektorový profil	57
Tabulka 9 Chemické složení AlMgSi0,5	58
Tabulka 10 Mechanické vlastnosti ZM 2 - čelo kolektoru	58
Tabulka 11 Chemické složení přídatného materiálu.....	58
Tabulka 12 Mechanické vlastnosti přídatného materiálu	58
Tabulka 13 Průměrné naměřené hodnoty tvrdosti podle Vickerse.....	77

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

MMAW	- Metoda ručního svařování obalenou elektrodou (Manual Metal Arc Welding)
TIG	- Metoda obloukového svařování neodtavující se elektrodou v inertním plynu (Tungsten Inert Gas)
WIG	- Metoda obloukového svařování neodtavující se elektrodou v inertním plynu (Wolfram Inert Gas)
MIG	- Metoda obloukového svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (Metal Inert Gas)
ČSN	- Česká soustava norem (Česká technická norma)
EN	- Evropská norma
ISO	- Mezinárodní organizace pro normalizaci (International organization for standardization)
WPS	- Specifikace postupu svařování (Welding Procedure Specification)
WPQR	- Záznam o kvalifikaci postupu svařování (Welding Procedure Qualification Record)
NDT	- Nedestruktivní zkoušky materiálů
DT	- Destruktivní zkoušky materiálů
RTG	- Rentgenové záření
HV	- Označení tvrdosti podle Vickerse (Hardness Vickers)
WP	- Označení elektrody z čistého wolframu (Wolfram Pure)
I	- Skupina ochranných plynů (inertní)
W	- Tvářené výrobky (Wrought)
AW	- Tvářené výrobky z hliníku (Aluminium Wrought)
AC	- Střídavý proud (Alternating Current)
DC	- Stejnoseměrný proud (Direct Current)
VT	- Zkouška vizuální
MT	- Zkouška magnetická/prášková
PT	- Zkouška penetrační/kapilární
UT	- Zkouška ultrazvukem
RT	- Zkouška prozářením
R _m	- Mez pevnosti materiálu [MPa]
R _{p0,2}	- Smluvní mez kluzu [MPa]

L _o	- Měřená délka
S _o	- Průřez
TOO	- Teplotně ovlivněná oblast
T _{av}	- Tavenina
T _T	- Teplota tání
α	- Strukturní fáze (tuhý roztok hliníku)
Nevyt.	- Nevytvrditelné
Vytv.	- Vytvrditelné
E	- Eutektikum
X	- % hl. legujícího prvku ve struktuře
T	- Teplota [°C]
TZ	- Tepelné zpracování
ZM	- Základní materiál
PM	- Přídavný materiál
SK	- Svarový kov
R	- Odpor [Ω]
λ	- Koefficient teplotní roztažnosti [W/mk]
ρ	- Měrná hmotnost [Kg . m ⁻³]
A	- Jednotka proudu Ampér
V	- Jednotka napětí Volt
AC	- Slévárenské slitiny (Aluminium Casting)
Al	- Hliník (Aluminium)
Ni	- Nikl
Cu	- Měď
Si	- Křemík
Zn	- Zinek
Mn	- Mangan
Mg	- Hořčík
Zr	- Zirkon
Ce	- Cer
La	- Lanthan
Ti	- Titan
Ag	- Stříbro
Ar	- Argon
He	- Helium
H ₂	- Vodík
Al ₂ O ₃	- Oxid hlinitý
CO	- Oxid uhelnatý
O ₂	- Kyslík
SiC	- Karbid křemíku
Pb	- Olovo
API	- Bezúkapová spojka spojující pevné a pružné armatury
GMH	- Výrobce digitálních teploměrů
OK	- Označení výrobku společnosti ESAB
BP	- Bakalářská práce

1 ÚVOD

V dnešní době se stále častěji setkáváme s požadavkem na nižší hmotnost materiálu a zároveň na jeho dobré vlastnosti, ať už se jedná o svařitelnost, tak i odolnost materiálu vůči vnějším vlivům prostředí a jeho mechanické vlastnosti. Proto se stále zvyšuje míra využití slitin hliníku. Průmyslová výroba hliníku s produkcí 5700 t/rok začala ke konci 19. století (kolem roku 1890). Dnes se produkce hliníku pohybuje okolo 130 mil.t/rok. [1] S nárůstem zpracování a použití Al slitin roste i jejich potřeba metalurgického spojování. Svařování hliníku je dnes proto nedílnou součástí výroby v automobilovém průmyslu, ve kterém se neustále zvyšuje jeho procentuální využití. Hliník je dále využíván i mimo dopravní průmysl např. ve stavebnictví, strojírenství, obalovém průmyslu, železárnách a ocelárnách nebo v elektrotechnice. Dále se také používá pro výrobu tlakových zařízení, což je předmětem této bakalářské práce.

Teoretická část práce je zaměřena na svařování hliníkových slitin a popis jednotlivých metod použitelných pro svařování, včetně výhod a nevýhod konvenčních metod. Obecné popsání svařitelnosti hliníku a jeho slitin a následné užší zaměření na hliníkové materiály určené k výrobě tlakových nádob. Rozbor výroby a speciální požadavky výrobních norem. V jednotlivých kapitolách jsou popsány vhodné přídavné svařovací materiály, vady vzniklé nedodržením předem stanoveného svařovacího postupu a možnosti, jak lze tyto vady identifikovat .

Experimentální část práce se zabývá konkrétními materiály a jejich vlastnostmi, porovnáním a metalografickým vyhodnocením svarových spojů materiálů používaných na tlakové nádoby, které obsahují nepřijatelné vady svaru a návrh na jejich eliminaci resp. opravu. Vyhodnocení kvality oprav svarových spojů a vytvoření specifikace postupu svařování.

Cílem práce je vytvořit vhodný svařovací postup pro konkrétní materiály ze slitin hliníku a vyhodnotit vady u neakceptovatelného dílu.

2 METODY SVAŘOVÁNÍ HLINÍKU

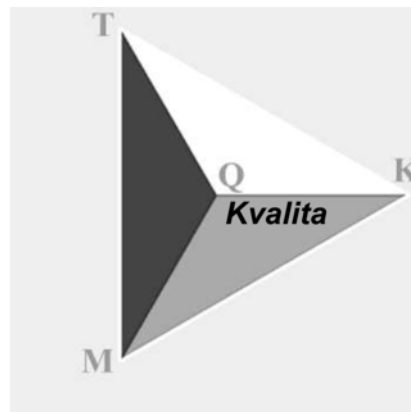
Svařování je vytváření nerozebíratelného spojení dvou a více dílů za pomoci tepla nebo tlaku. Tato metoda nerozebíratelného spojení se ve velmi širokém měřítku využívá v automobilovém průmyslu, kde neustále rostou požadavky na nízkou hmotnost materiálu. Cílem této metody je vytvořit spojení (dvou nebo více dílů), které je vyžadováno nebo vyhovuje provozním podmínkám. [2]

Dvě základní skupiny svařování se dělí na tlakové a tavné metody příp. kombinace těchto způsobů. Při tlakovém svařování dochází k přiblížení materiálů na vzdálenost odpovídající řádově parametru krystalové mřížky, vlivem difúze dojde ke svaření materiálů. Tento způsob dělíme na kovářské svařování, svařování tlakem za studena, svařování třením, difúzí, ultrazvukem apod. Při svařování tavném vzniká svarová lázeň působením vneseného tepla z externího tepelného zdroje a případného použití přídavného materiálu. Lze použít i kombinaci předešlých způsobů. U svařování tavného a tlakového dochází k natavení stykových ploch ohřátím na svařovací teplotu a následném působení tlaku. Tavné svařování rozdělujeme na svařování plamenem, elektrickým obloukem, laserem, plazmou a elektronovým svazkem. V této bakalářské práci se budeme dále věnovat konvenčním tavným metodám, které jsou vhodné pro zpracování Al (aluminium) slitin. [2]

Nevýhodou svařování je (především u tavných metod) působení tzv. napětově deformačního účinku, vlivem lokálního a nerovnoměrného ohřevu materiálu až nad teplotu tavení základního materiálu. Z tohoto důvodu příp. při nedodržení vhodného svařovacího postupu a podmínek mohou vznikat různé typy vad (např. trhliny, deformace apod.) v důsledku rychlého chladnutí materiálu, nerespektováním tuhosti spoje apod. Eliminovat tyto vady můžeme například předehnutím spojovaného materiálu (deformace) příp. vhodným ovlivněním teplotního cyklu svařovacího procesu (trhliny). [2]

Při svařování je nutné kontrolovat kvalitu konstrukce svařenců, svařitelnost nejvíce ovlivňují tři základní faktory, jejichž komplexní zhodnocení nám udává celkovou kvalitu (Q) svařence. (viz Obr. 1).

- **Technologie** (tavení materiálu, metoda svařování, svařovací parametry, resp. intenzita tepelného zdroje)
- **Materiál** (mechanické vlastnosti a chemické složení materiálu, způsob výroby materiálu a jeho metalurgická čistota, stav tepelného zpracování)
- **Konstrukce** (snaha o minimalizaci počtu dílů z hlediska hmotnosti, minimalizace tloušťky materiálu a volba vhodné velikosti, počtu a typu svařového spoje)



Obr. 1 Celková kvalita svařence [2]

Svařování rozdělujeme do skupin podle stupně mechanizace.

- Ruční a poloautomatické svařování konvenční (plamen. el.oblouk, el. odpor) a speciální (laser, plazma, difúze, výbuch, elektronový svazek)
- Strojní svařování (Mechanizované, automatizované, robotizované) [2]

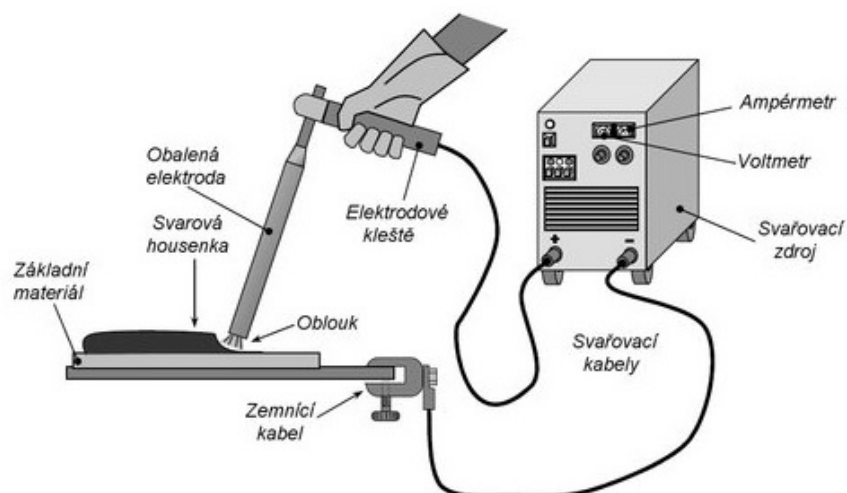
2.1 Svařování metodou 111 (MMAW)

Jedná se o metodu ručního svařování obalenou elektrodou. Označení číselným kódem 111 vychází z normy ČSN EN ISO 4063. (ČSN - Česká technická norma, EN - Evropská norma, ISO - mezinárodní norma). Často se pro označení této metody používá i mezinárodní zkratka MMAW (manual metal arc welding).

U slitin hliníku je velice důležité chránit svarovou lázeň a její okolí, čehož u metody MMAW dosáhneme pouze omezeně. Metodou 111 se Al a jeho slitiny dají svařovat, ale kvalita nebude taková, jako u metod s vyšším stupněm ochrany zmíněných v následujících kapitolách. Díky jednoduché manipulaci se dá tato metoda stále uplatnit v oblasti jednoduchých oprav a údržby. Není zde nárok na manipulaci s plynem, jen se zdrojem. Nevýhodou metody 111 jsou vyšší požadavky na zručnost svářeče. Princip je naznačen na Obr. 2. [3]

Základní charakteristika

- Svařovací proud 50 - 450 A
- Napětí na oblouku 15 - 40 V
- Druh svařovacího proudu: stejnosměrný, střídavý
- Použití: nelegované, nízkolegované, vysokolegované oceli, Al, Ni, Cu a jejich slitiny
- Tloušťka základního materiálu: 2 - 100 mm [4]



Obr. 2 Schéma metody MMAW [5]

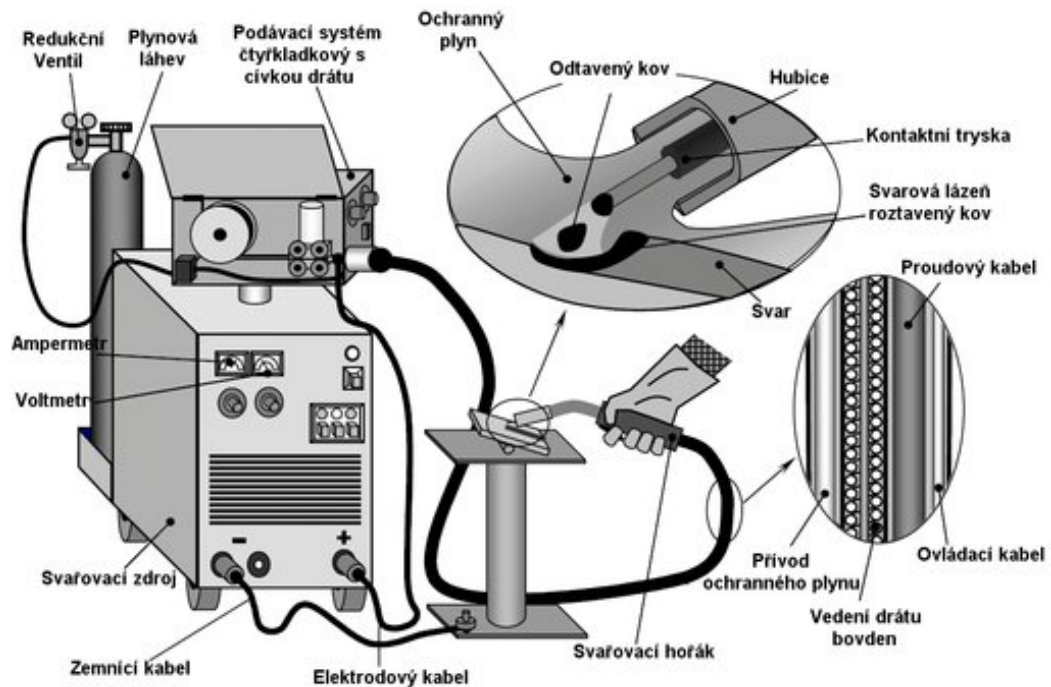
2.2 Svařování metodou 131 (MIG)

Metoda svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou v ochranném inetrním plynu. Metoda MIG (Metal inert gas) a její označení 131 vychází z normy ČSN EN ISO 4063. Elektrický oblouk vzniká a hoří mezi svařovaným materiálem (tzv. základním materiálem) a odtavující se elektrodou neboli svařovacím drátem odvíjejícího se ze zásobníku. Svarová lázeň a elektrický oblouk je konstantně chráněn inertním plynem, který nereaguje s okolním prostředím a dostatečně "izoluje" svarovou lázeň od působení okolního vzdušného prostředí. Jedná se o poloautomatické svařování, protože svářeč nepřidává manuálně přídavný materiál do svarové lázně, ale ten je tlačěn do svarové lázně automatickým podávacím zařízením, zatímco svářeč "pouze" pohybuje svařovacím hořákem ve směru tvorby svarové housenky. Výhodou metody 131 je vysoká produktivita práce neboli možnost dosažení vysoké svařovací rychlosti. Je možné nastavení širokého rozsahu výkonu oblouku bez změny průměru přídavného materiálu. Tato metoda disponuje také velmi dobrým čistícím účinkem el. oblouku proti povrchovým oxidům při svařování Al a jeho slitin. Díky vyšší rychlosti svařování vznikají menší deformace, než u metody TIG viz (kapitola 2.3). Nevýhodou metody 131 je především možnost vzniku studených spojů na začátku svařování a vznik koncových kráterů na konci svarů (v případě náhlého ukončení přívodu el. proudu). Tento koncový kráter je nutné vyplnit přídavným materiálem. [6] Princip metody je naznačen na Obr. 3. [7]

Základní charakteristika

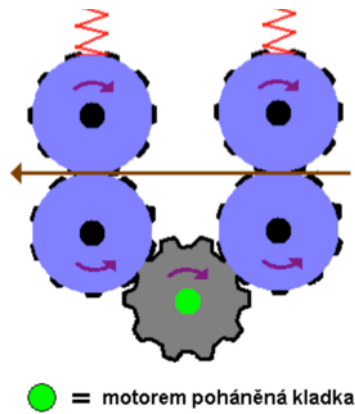
- Rozsah svařovacích proudů a napětí
 - Přenos kovu zkratový: $I_s = 40 - 190 \text{ A}$, $U_{EO} = 16 - 21 \text{ V}$
 - Přenos kovu sprchový: $I_s = 120 - 500 \text{ A}$, $U_{EO} = 20 - 36 \text{ V}$
- Druh svařovacího proudu: Stejnoseměrný DC (nepřímá polarita s elektrodou nacházející se na kladném (+) pólu). Možnost svařování pulzním proudem
- Ochranné plyny: Inertní (Ar, He) viz (kapitola 4.1)
- Možnost svařování pulzním proudem

- Použití: vysokolegované oceli, Al, Cu, Ni a jejich slitiny
- Tloušťka základního materiálu: 0,8 - 40 mm
- Průměry přídatných materiálů (svařovacích drátů): obvykle okolo 1mm (nejčastěji 0,8 - 1,2 mm) [7]



Obr. 3 Schéma metody MIG [8]

Metoda 131 vyžaduje velmi přesné a rovnoměrné podávání (tlačení) přídatného materiálu do svarové lázně. Narozdíl od kladek používaných při svařování ocelí musejí být podavače při svařování Al uzpůsobeny na měkkost přídatného materiálu. Pro vedení se používají teflonové bowdeny a podávací kladky nesmí deformovat přídatný materiál, proto jsou vhodné čtyř - kladkové podavače s větší adhezí při menším přitlaku viz Obr. 4. Používají se kladky s profilem drážky ve tvaru půlkruhu. Nevýhodou je, že každý průměr drátu musí mít vlastní velikost posuvné kladky. Svařovací hořák je zapotřebí vést tlačným způsobem při sklonu 10 až 20 stupňů od roviny kolmé k podélné ose svaru. [6]



Obr. 4 Princip čtyřkladkového podavače [9]

Vzhledem k nutnosti použití vyšších svařovacích proudů (resp. větších tepelných příkonů) při svařování Al a jeho slitin se doporučuje použít vodou chlazené hořáky.

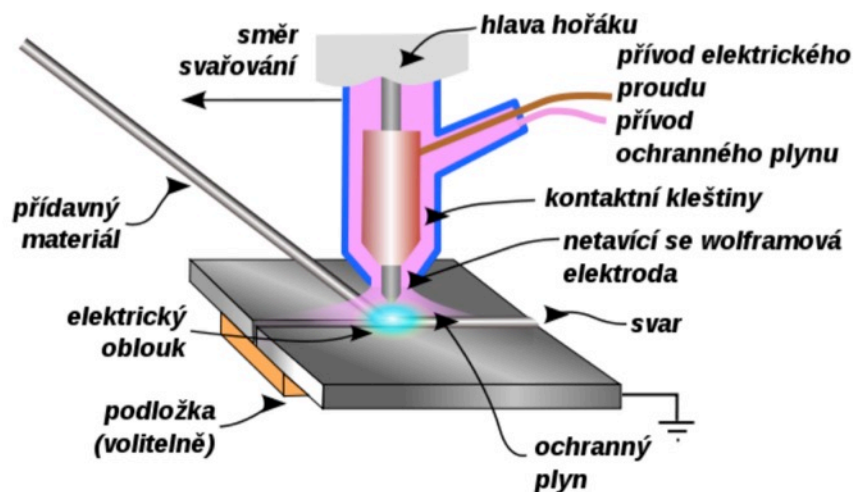
2.3 Svařování metodou 141 (TIG)

Metoda svařování elektrickým obloukem netavící se elektrodou v ochranném inertním plynu. Metoda WIG (Wolfram inert gas) resp. TIG (Tungsten inert gas) a její označení 141 vychází z normy ČSN EN ISO 4063.

Historie svařování elektrickým obloukem neodtavující se wolframovou elektrodou v inertním plynu mající počátky v roce 1920, kdy jsou zaznamenány první pokusy o svařování v ochranné atmosféře, je nejrozšířenější metodou pro svařování materiálů ze slitin hliníku. Jedná se o manuální (může být i automatizované) tavné svařování, při kterém je elektrický oblouk a svarová lázeň chráněna ochranným inertním plynem. Za pomoci Wolframové neodtavující se elektrody dosahujeme svarů o vysoké kvalitě a čistotě. Přídavný materiál se používá dle potřeby ve formě svařovacích drátů, tzn. na rozdíl od předchozích zmíněných metod můžeme svařovat bez přídavného materiálu. Wolframová elektroda může být z čistého wolframu WP (Wolfram pure) nebo s aktivující přísadou (La - Lanthan, Ce - Cer, Zr - Zirkon apod.) Touto metodou lze svařovat téměř všechny druhy základních materiálů určené pro svařování. (legované ocele, Al - Hliník, Mg - Hořčík, Cu - Měď, Ni - Nikl, Ti - Titan, Ag - Stříbro a jejich slitiny). Princip metody je znázorněn na Obr. 5. [10]

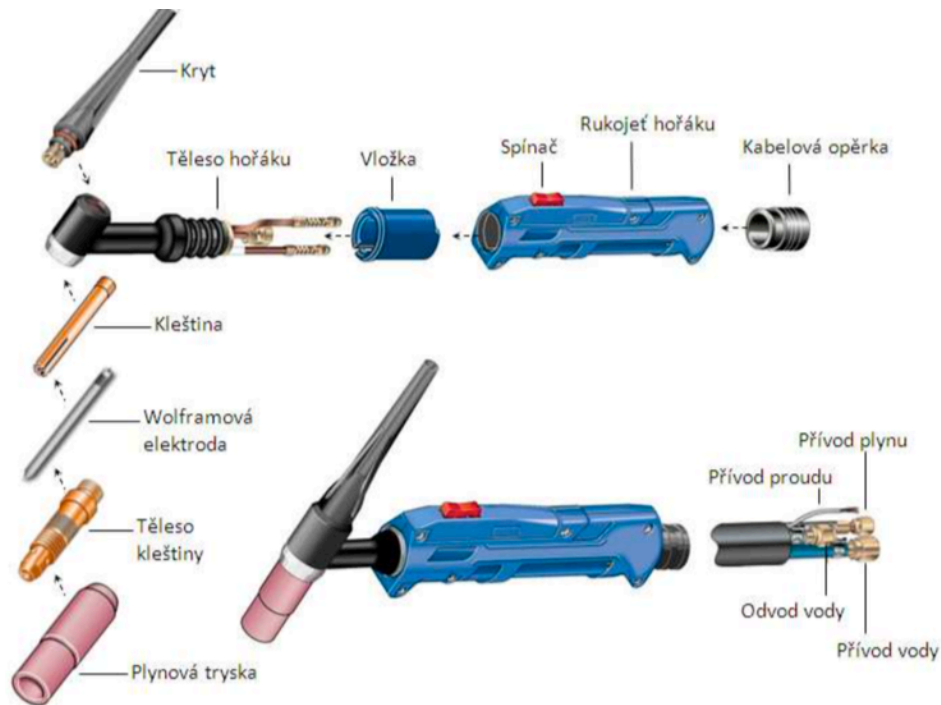
Základní charakteristika

- Rozsah svařovacího proudu: 10 - 500 A
- Druh svařovacího proudu: Stejnoseměrný DC (polarita přímá, omezeně i nepřímá), Střídavý AC
- Ochranné plyny: Inertní (Ar,He) viz (kapitola 4.1)
- Použití: Legované ocele, Al, Mg, Cu, Ti, Ni, Ag a jejich slitiny
- Tloušťka základního materiálu: 0,5 - 10 mm
- Průměry Wolframových elektrod: 1 - 8 mm (nejčastěji 1,6 až 4 mm) [10]



Obr. 5 Schéma metody TIG [11]

Při této metodě dosahujeme vysoké celistvosti a pravidelného formování celé svarové housenky při správném sklonu hořáku a správném směru pohybu. Hlavní výhodou metody 141 je dosažení houževnatějšího, pevnějšího, korozivzdornějšího svarového spoje, než docílíme u jiných konvenčních metod svařování. Nevýhodou metody 141 je malá produktivita, protože se jedná obvykle o ruční svařování. Tato metoda není vhodná do montážního prostředí, stejně jako všechny metody svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách. Výhodou této metody je možnost používání jak stejnosměrného (DC), tak i střídavého (AC) proudu, přičemž AC proud je vhodný pro Al a jeho slitiny z důvodu dosažení dostatečného čistícího účinku elektrického oblouku viz (kapitola 4) a zachování možnosti dostatečného chlazení elektrody a hořáku. [6]

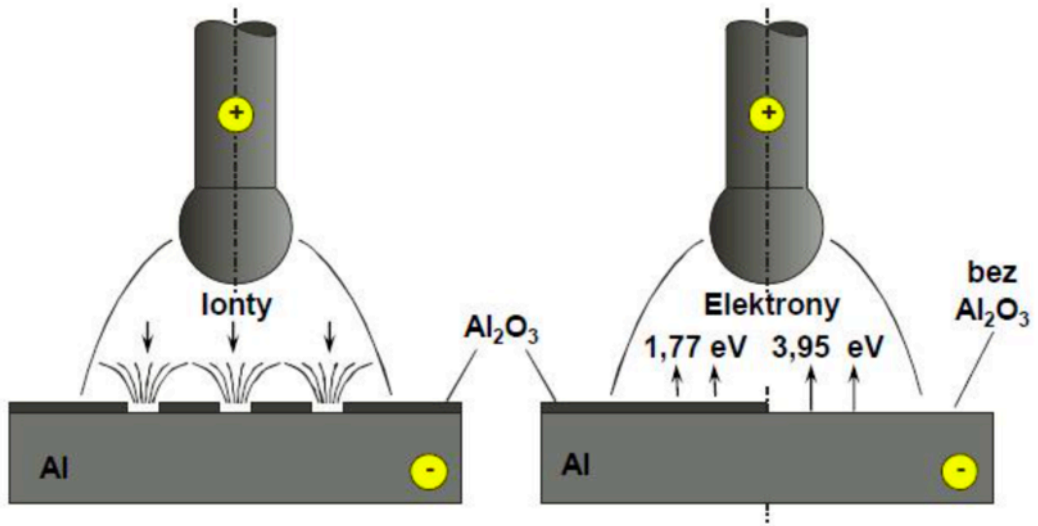


Obr. 6 Schéma TIG hořáku a popis jeho jednotlivých částí [10]

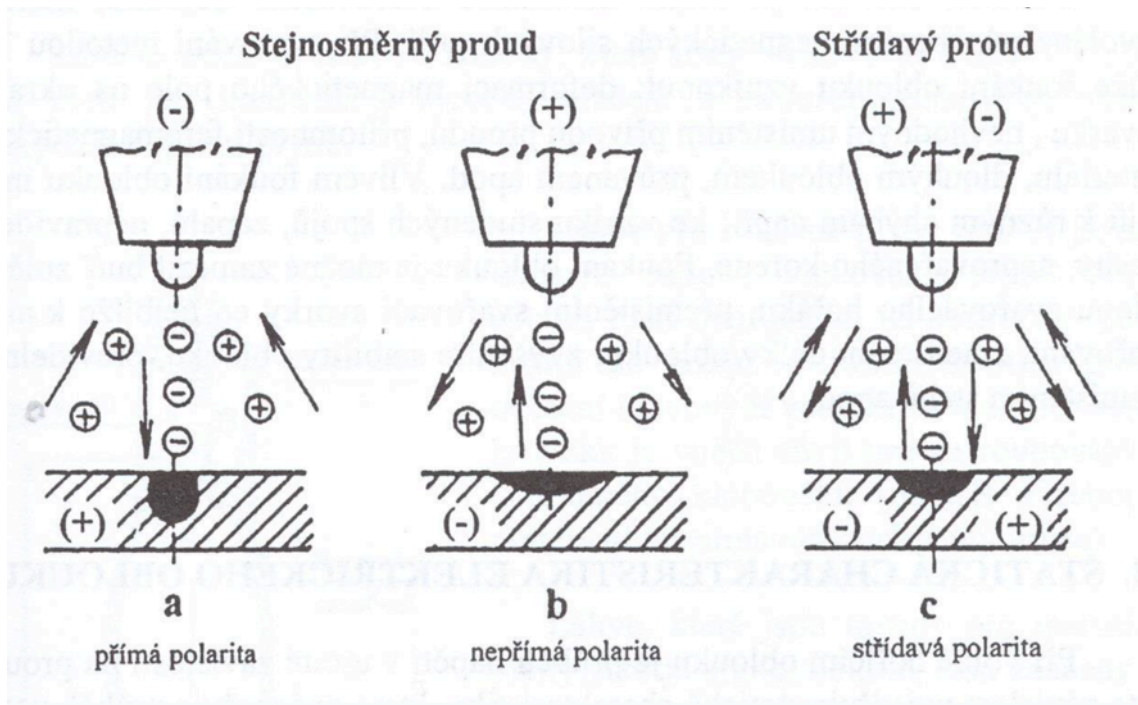
V rámci svařování Al a jeho slitin metodou 141, je důležité rozlišovat využití DC a AC proudu z důvodu již zmíněného čistícího účinku elektrického oblouku. Oba typy zapojení napomáhají k odstranění oxidických vrstev (důležité je to převážně u materiálů, které mají velmi rozdílné vlastnosti oxidických vrstev od ZM, typické Al, Mg a jejich slitiny). Zjednodušeně řečeno se jedná o určitou formu otryskávání povrchu. Největšího čistícího účinku dosáhneme při DC proudu se zapojením na typ nepřímé polarity (elektroda je zapojena na kladný pól svařovacího zdroje). Kladné ionty jsou urychlovány směrem ke svarové lázni a rozrušují oxidy na povrchu, díky jejich hmotnosti, která je 1840x větší, než hmotnost záporných elektronů putujících v opačném směru viz (Obr. 7 a Obr. 8). Zároveň však vzniká na ZM katodová skrvna, jejíž teplota je min. 2500°C, která účinně napomáhá k odpaření oxidické vrstvy. Tento druh zapojení však nevyužíváme u metody 141 z praktických důvodů, tzn. přehřívání wolframové elektrody a nedosažení dostatečného průvaru. Proto se u metody 141 používá při svařování Al a jeho slitin výhradně AC proud. Má sice poloviční čistící účinek, ale při dostatečném zvýšení svařovacího proudu jsme schopni dosáhnout požadovaného průvaru a zároveň jsme schopni dostatečně chladit wolframovou elektrodu viz (Obr. 8). [18]

Čištění působením kinetické energie

Výstupní práce elektronů



Obr. 7 Zobrazení čistícího účinku elektrického oblouku [18]



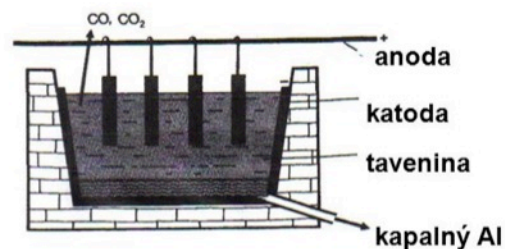
Obr. 8 Možnosti zapojení el. oblouku a vliv čistícího účinku u metody 141 [18]

3 HLINÍK A JEHO SLITINY

3.1 Výroba Hliníku

Hliník a jeho výroba spočívá v elektrolytické redukci Al_2O_3 z tekuté soli do tekutého kovu. Základní hliníková ruda se nazývá Aluminium. [12] Nejčastěji se používá pro výrobu polotovarů hliník o čistotě 99,5%. Hliník s čistotou 99,99% se vyrábí tzv. třívrstvou elektrolýzou a je využíván jen u specifických účelů. [16]

- surovina: **bauxit** zbaví se příměsí- získá se oxid hlinitý
- **elektrolýza** – taveniny ox.hlinitého s kryolitem
- katoda – kapalný hliník
- anoda – kyslík, který reaguje s uhlík.elektrodami
kryolit - přísada snižuje teplotu tání

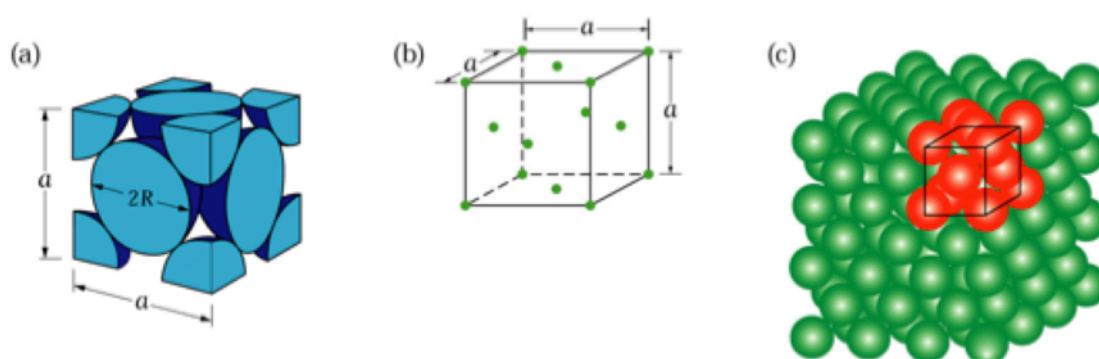


Obr. 9 Výroba Al elektrolýzou [13]

- Přípravou čistého Al_2O_3 se díky alkalickým tavením přemění Al_2O_3 na hlinitan sodný, který se rozpouští ve vodě na roztok od nežádoucích nečistot.
- Výroba surového hliníku elektrolýzou. Kyslík reagující s uhlíkem z anody tvoří směs plynů CO a O_2 . Kapalný hliník o koncentraci 99,5% se vakuovou páneví odsává ze dna elektrolýzéry
- Elektrolytická rafinace Al probíhá při anodickém rozpouštění Al z jeho slitiny s mědí a následném vyloučení čistého Al na katodě. Na spodní vrstvě se nachází slitina Al s 25% Cu o hustotě $3\,000\text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Prostřední vrstva je tvořena elektrolýtem, jehož hustota je $2\,700\text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a vrchní vrstva je tvořena čistým Al, který se vylučuje na katodě o hustotě $2\,300\text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [14]

3.2 Charakteristika hliníku

- Hustota ρ 2 698 kg.m⁻³
- Teplota tání T_T 660°C
- Korozivzdornost (Al₂O₃)
- Vysoká elektrická vodivost (2,65 $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)
- Kubická plošně středěná mřížka (poměrně dobrá tvářitelnost Al) [12]
- Vysoký koeficient teplotní vodivosti λ 221 W/mK [15] (u svařování je λ negativní jev z důvodu nutného velkého ohřevu k natavení základního materiálu a dále také možnosti vzniku velkých deformací)



Obr. 10 (a) kuličkový model, (b) jednotková buňka, (c) model krystalu [12]

Hliník řadíme mezi lehké kovy, díky malé měrné hmotnosti oproti železu viz (Tabulka 1). Měkkost (resp. nízké hodnoty pevnostních mechanických vlastností) Al nám umožňuje snadné obrobení a tváření. Pevnost se dá zvýšit legováním nebo mikrolegováním. Pevnost v tahu hliníku se pohybuje v rozmezí 50 - 70MPa. Naopak má velmi vysokou elektrickou a tepelnou vodivost, která se dá ještě zvýšit žíháním. [16]

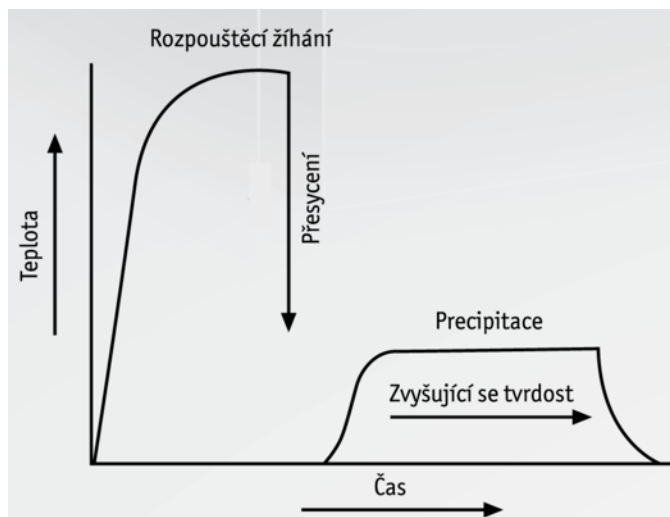
Tabulka 1 Porovnání hliníku se železem [16]

Vlastnost	Jednotky	Al	Fe	Porovnání
Atomová hmotnost	[g/Mol]	26,98	55,84	~ 1 : 2
Krystalová mřížka		Kubická plošně středěná	Kubická prostorově středěná	
Měrná hmotnost	[g/cm³]	2,70	7,87	~ 1 : 3

3.3 Druhy slitin Al

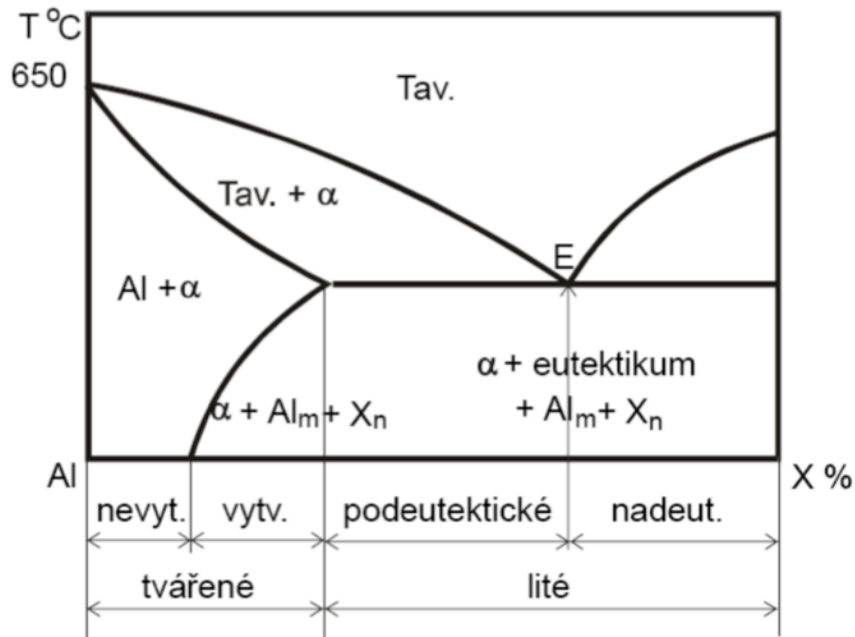
Slitiny hliníku rozdělujeme do dvou základních skupin dle jejich způsobu zpracování. Slitiny *slévárenské* a slitiny *tvářené*, které lze ještě rozdělit podle možnosti tepelného zpracování na slitiny *vytvrditelné* a *nevytvrditelné* viz (Obr. 12). Pro svařování se obvykle používají tvářené slitiny. Jedná se převážně o slitiny nízkolegované z důvodu nízké rozpustnosti legujících prvků v hliníku. Důvodem využívání Al slitin je jejich výhodná kombinace chemických, fyzikálních, mechanických a technologických vlastností. Tvářené slitiny jsou dobře tvařitelné za tepla i za studena. Mají nižší obsah legujících prvků a jedná se převážně o trubky, pásy, plechy, tyče, dráty. U nevytvrditelných slitin hliníku nedosahujeme tepelným zpracováním výrazného zvýšení mechanických vlastností. Tyto slitiny lze zpevnit tvářením za studena nebo tažením. [18]

Naopak u vytvrditelných slitin lze tepelným zpracováním výrazně zlepšit mechanické vlastnosti. Používá se tzv. Vytvrzování (precipitačním zpevněním), kterým dosahujeme podstatného zvýšení meze pevnosti R_m , smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a tvrdosti. Vytvrzování je komplexní proces tepelného zpracování, který se skládá z rozpouštěcího žhání, při kterém se získává homogenní tuhý roztok α (Al). Následuje rychlé ochlazení, jehož výsledkem je přesycený tuhý roztok α (Al) a poté dochází při stárnutí ke zpevnění struktury a tvorbě precipitátu viz (Obr. 11). [18]



Obr. 11 Schéma tepelného zpracování (vytvrzování) Al slitin [17]

Slévárenské slitiny se liší od tvářených vyšším obsahem legujících prvků, menší tvárností a menším sklonem ke vzniku trhlin za tepla. [18]



Obr. 12 Rozdělení slitin hliníku [19]

Slitiny slévárenské

- **Al - Si** (siluminy) Jedná se o slévárenskou slitinu hliníku s velmi dobrou zabíhavostí a odolností proti vzniku trhlin za tepla.
- **Al - Mg** disponuje vysokou odolností proti korozi
- **Al - Cu** hlavním faktorem této slitiny je vysoká odolnost proti opotřebení za vysokých teplot
- **Al - Zn** vhodná slitina pro následné tepelné zpracování, disponuje dobrými mechanickými vlastnostmi

Slitiny tvářené

Slitiny nevytvrditelné

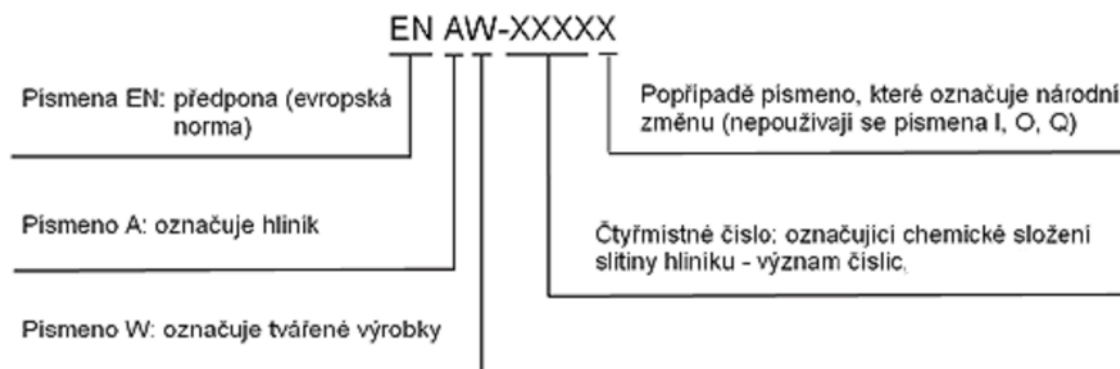
- **Al - Mg(-Mn)** (AlMg2, AlMg5, AlMg4,5Mn1) Slitiny používané především potravinářském, chemickém, automobilovém průmyslu.
- **Al - Mn** (AlMn1) Potravinářský a chemický průmysl

Slitiny vytvrditelné

- **AlCuMg** Dural, disponuje vysokou pevností oproti ostatním vytvrditelným slitinám hliníku, ale horší tvařitelností a svažitelností.
- **AlZnMgCu** Superdural, (AlZn6MgCu) vyšší pevnost než u duralu
- **AlMgSi** Avialy (AlMg0,5Si0,5) Výroba tvarově složitých výlisků, velkých profilů, dobrá svažitelnost a tvařitelnost za tepla.
- **AlZnMg** (AlZn6Mg1) obdobné použití jako u avialů, tyto slitiny jsou zajímavé tím, že jsou tzv. samovytvrditelné [18]

3.4 Značení slitin hliníku

Značení hliníkových slitin se provádí dle *ČSN EN 573 - 1 až 3 - Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků* (část 1 - Číselné označování, část 2 - Označování chemickými značkami, část 3 - Chemické složení) a *ČSN EN 1706 Hliník a slitiny hliníku - Odlitky - chemické složení a mechanické vlastnosti*. Zkratka AW označuje Aluminium wrought (A - hliník, W - tvářené výrobky) viz (Obr. 13). [18]



Obr. 13 Značení slitin hliníku [20]

Tabulka 2 Značení tvářených slitin Al dle ČSN EN 573-1 až 3 [18]

Hlavní legující prvek	Označení série	Typ slitiny	Stav
Hliník čistoty min 99%	1xxx	Al	Nevytvrditelný
Měď	2xxx	AlCuMg	Vytvrditelný
Mangan	3xxx	AlMn	Nevytvrditelný
Křemík	4xxx	AlSi	Nevytvrditelný
Hořčík	5xxx	AlMg	Nevytvrditelný
Hořčík a křemík	6xxx	AlMgSi	Vytvrditelný
Zinek	7xxx	AlZnMg	Vytvrditelný
Jiné prvky	8xxx	Al + různé prvky	Vytvrditelný i Nevytvrditelný
Neobsazená řada	9xxx		

Skupina 1xxx viz (Tabulka 2). Označení hliníku o čistotě minimálně 99% neboli tzv. technicky čistý hliník. Proto se odlišuje od skupiny 2xxx - 8xxx, kde se jedná o slitiny Al. Poslední dvojčíslí (u skupiny 1xxx) značí minimální obsah uhlíku v % s přesností na 1 setinu %. Druhá číslice označuje změny v mezním obsahu slitinových nebo doprovodných prvků. Číslice 0 označuje přirozenou mez nečistoty, číslice 1-9 pak určují zvláštní regulaci obsahu 1 nebo více slitinových nebo doprovodných prvků. [18]

Skupina 2xxx - 8xxx viz (Tabulka 2). Zde se označení odlišuje. První číslice znamená označení prvku s nejvyšším procentuálním obsahem v pořadí Měď, Mangan, Křemík, Hořčík, Hořčík a Křemík, Zinek, jiné prvky. [18]

Tabulka 3 Značení slitin dle ČSN EN 1706 [18]

Hlavní legující prvek	Označení série	Typ slitiny
Hliník čistoty min 99%	1xxxxx	Al
Měď	2xxxxx	AlCuMg
Mangan	3xxxxx	AlMn
Křemík	4xxxxx	AlSi
Hořčík	5xxxxx	AlMg
Hořčík a křemík	6xxxxx	AlMgSi
Zinek	7xxxxx	AlZnMg
Jiné prvky	8xxxxx	Al + různé prvky

Značení ČSN EN 1706 Slévárenské slitiny Značení hliníku a slitin hliníku na odlitky EN AC (Aluminium casting) pěti číslicemi z nichž první číslice označuje skupinu prvků stejně jako u značení slitin hliníku pro tvářený viz (Tabulka 3). Pro účely svařování se používá rozdělení základních materiálů do skupin podle svažitelnosti v souladu se směrnicí CEN ISO/TR 15608. Pro hliník je rozdělení uvedeno v Tabulce 4. [18]

Tabulka 4 Rozdělení základních materiálů [18]

Skupina	Podskupina	Druh hliníku a slitin hliníku
21		Čistý hliník s ≤ 1 % nečistot nebo legur
		Tepelně nevytvrditelné slitiny
	22.1	Slitiny hliníku a manganu
	22.2	Slitiny hliníku a hořčíku s $Mg \leq 1,5$ %
	22.3	Slitiny hliníku a hořčíku s $1,5$ % < $Mg \leq 3,5$ %
	22.4	Slitiny hliníku a hořčíku s $Mg > 3,5$ %
		Tepelně vytvrditelné slitiny
	23.1	Slitiny hliníku, hořčíku a křemíku
	23.2	Slitiny hliníku, zinku a hořčíku
		Slitiny hliníku a křemíku s $Cu \leq 1$ %
	24.1	Slitiny hliníku a křemíku s $Cu \leq 1$ % ; 5 % < $Si \leq 15$ %
	24.2	Slitiny hliníku, křemíku a hořčíku s $Cu \leq 1$ %; 5 % < $Si \leq 15$ % a $0,1$ % < $Mg \leq 0,8$ %
25		Slitiny hliníku, křemíku a mědi s 5 % < $Si \leq 14$ %; $1,0$ % < $Cu \leq 5,0$ % a $Mg \leq 0,8$ %
26		Slitiny hliníku a mědi s 2 % < $Cu \leq 6$ %
Skupiny 21 až 23 jsou všeobecně pro tvářené materiály a skupiny 24 až 26 pro materiály odlévané		

3.5 Materiály pro výrobu tlakových nádob

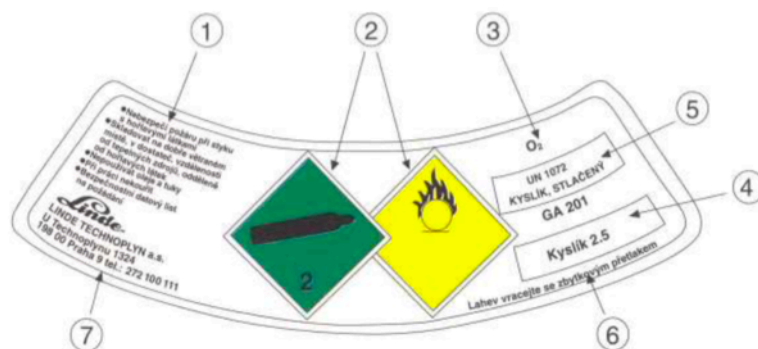
Materiály určené pro výrobu tlakových nádob z hliníku a jeho slitin jsou definovány normou *ČSN EN 13445 - 8 Netopené tlakové nádoby - Část 8: Doplňující požadavky na tlakové nádoby z hliníku a jeho slitin*. Nejběžnějšími slitinami Al pro tlaková zařízení jsou binární slitiny Al-Mg (5xxx). Jedná se o nevytvrditelné slitiny, protože při vytvrzení dosáhneme malého zvýšení pevnosti a současně značného snížení tažnosti viz (kapitola 4.5). Použitelnost Al-Mg slitin určuje podíl Hořčíku, který by neměl přesáhnout 7%. Při vyšším množství hořčíku roste podíl fáze α (Al_3Mg_2), který snižuje tvářecí možnosti materiálu a také odolnost proti korozi. Dalšími slitinami vhodnými pro výrobu tlakových nádob jsou slitiny Al-Mn (3xxx). Tyto slitiny se legují do 1,5% Mn, protože od 2% Mn ve slitině vznikají při krystalizaci nežádoucí primární krystaly fáze Al_6Mn , které snižují mechanické vlastnosti. [1]

4 SVAŘITELNOST Al A JEHO SLITIN

Hliník a jeho slitiny se liší svými vlastnostmi od ocelových materiálů viz (kapitola 3.2). Z hlediska svařování hliníku a jeho slitin je velmi důležité vyvarovat se několika hlavních faktorů, které nejčastěji způsobují vady ve svarech viz (kapitola 5). Slitiny hliníku jsou hojně využívány v oblasti svařování díky jeho výsledným vlastnostem, ať už se jedná o nízkou hmotnost nebo korozivzdornost. Při svařování hliníkových slitin je důležité dodržovat úzce stanovená pravidla, aby se eliminovalo množství vzniklých vad a dosáhlo se požadovaných vlastností svaru. [22]

4.1 Ochranné plyny

U hliníku a jeho slitin je zapotřebí chránit svarovou lázeň od okolních vlivů atmosférického prostředí. Ochranný plyn se dodává ze zásobníku (tlaková láhev, centrální rozvod) a chrání tím svarovou lázeň před působením okolní atmosféry. Ochranné plyny vycházejí z normy *ČSN EN ISO 14175 - Svařovací materiály - Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy* a obecně je dělíme dle chemické aktivity na plyny aktivní a inertní. V této práci se zaměříme na plyny inertní, které jsou používány na ochranu svarové lázně při svařování Al a jeho slitin, z důvodu velké reaktivity kyslíku s hliníkem. Inertní plyny (skupina I) se rozdělují na Argon (Ar), Helium (He) a směsi Ar + He. Ochranný plyn slouží k ochraně oblouku, okolí svarové lázně, elektrody a příp. pro sekundární ochranu (kořenu) svaru. Vytváří dostatečně ionizované prostředí pro zapálení a hoření elektrického oblouku. Udržuje stabilní hoření oblouku. Plyny jsou dodávány nejčastěji v tlakových láhvích (příp. ve svazcích tlakových láhví) v plynném stavu s plnicím tlakem 15 (starší typ tlakových láhví), 20 nebo 30MPa a přeprava těchto plynů a značení tlakových láhví je stanovena EN normami. Z hlediska bezpečnosti jsou tlakové láhve opatřeny na horní zaoblené části barevným pruhem, který jasně charakterizuje obsah tlakové láhve (Ar = tmavě zelený pruh, He = hnědý pruh). [21]



Vysvětlení:

- ① Bezpečnostní pokyny
- ② Bezpečnostní značky
- ③ Složení plynu nebo plyné směsi
- ④ Označení výrobku výrobcem
- ⑤ Úplný název a popis plynu podle ADR
- ⑥ Upozornění výrobce
- ⑦ Název, adresa a telefonní číslo výrobce

Obr. 14 Informační nálepka na tlakové láhvi [21]

Argon (Ar)

- inertní (netečný), nevytváří chemické sloučeniny s žádným prvkem
- bezbarvý, bez zápachu a chuti
- vyrábí se separací ze vzduchu pomocí molekulových sít
- Dobré ionizační vlastnosti umožňují používat vysoké proudové zatížení, dobré zapalování el. oblouku a vyšší intenzitu záření el. oblouku
- Dobrá ochrana svarové lázně a malá citlivost na proudění vzduchu díky měrné hmotnosti (1,784 Kg/m³), která je větší, než u vzduchu
- Relativně nízká tepelná vodivost a tím i vedení tepla. Široký závar na povrchu, který se ale směrem ke kořeni významně zužuje. [21]



Obr. 15 Informační nálepka tl. láhve s argonem [zdroj vlastní]

Helium (He)

- inertní (netečný), nevytváří chemické sloučeniny s žádným prvkem
- bezbarvý, bez zápachu a chuti
- vyrábí se separací z některých druhů zemního plynu, kde se He nachází v množství kolem 1%
- Vyšší ionizační potenciál, než u Ar. Hůře se zapaluje oblouk a je zapotřebí vyšší napětí na oblouku
- Vyšší tepelná vodivost než u Ar. Možnost vyšší rychlosti svařování, vyšší teplota lázně, lepší odplynění svarové lázně.
- Narozdíl od Ar je měrná hmotnost He výrazně menší ($0,178 \text{ kg/m}^3$), než vzduch. Nižší efektivita plynové ochrany a potřeba většího průtoku plynu [21]

Směsný plyn na bázi Ar s přídavkem He

- zvýšení tepelného výkonu (díky He)
- zvýšení produktivity a stability procesu svařování (díky Ar)
- lepší formování svarové housenky [21]



Obr. 16 Informační nálepka tl. láhve se směsí Ar + He [zdroj vlastní]

4.2 Vysoká afinita Al ke kyslíku

Kyslík je v hliníku nerozpustný a velmi reaktivní. Okamžitě vzniká oxidická vrstva na povrchu materiálu pohybující se mezi $0,1\mu\text{m}$ - 1μ . Vytváří přirozenou ochranu proti další oxidaci materiálu, z čehož plyne dobrá odolnost proti korozi. Vlastnosti této vrstvy ale také značně zhoršují svařitelnost materiálu. Teplota tavení oxidické vrstvy je značně vyšší, než teplota tavení daného materiálu při svařování. Proto musí být před procesem svařování z povrchu odstraněna mechanickým (kartáčování, broušení) nebo chemickým (moření) způsobem. Během svařování je vhodné využívat čistící účinek elektrického oblouku při svařování v ochranné atmosféře inertního plynu. Měrná hmotnost oxidické vrstvy je větší, než u hliníku, vznikají tak oxidické vměstky propadáním zbytků oxidů do svarové lázně. Oxidická vrstva je elektricky nevodivá, čímž znesnadňuje nastavení správných parametrů pro svařování. Je hygroskopická (má velkou schopnost pohlcovat difúzní vodík), kvůli zadržování vlhkosti dochází k nadměrné porezitě. [22]



Obr. 17 Neodstraněná oxidická vrstva [23]



Obr. 18 Odstraněná oxidická vrstva [23]

4.3 Velký koeficient teplotní délkové roztažnosti

Velký koeficient teplotní délkové roztažnosti způsobuje velké deformace po svaření. Aby se jim zabránilo, používají se při svařování často přípravky, které ale mohou způsobit vznik vnitřního pnutí a tím i vznik trhlin. Ke vzniku trhlin dochází v důsledku působení napětí TOO (teplotně ovlivněná oblast). Trhliny za tepla vznikají při objemových změnách v procesu krystalizace, kdy výsledkem je vznik tahových napětí. U většiny Al slitin vznikají problémy především s trhlínami za tepla. Trhliny za studena se u svařování Al a jeho slitin nachází pouze zřídka převážně u vysokolegovaných ocelí. Zamezit vzniku trhlin můžeme nastavením vhodných svařovacích parametrů, zvolením vhodného přídatného materiálu s větším obsahem Mg a Si, předehřevem nebo wolframovou elektrodou s obsahem Zr, který působí na zjemnění zrna. [22]

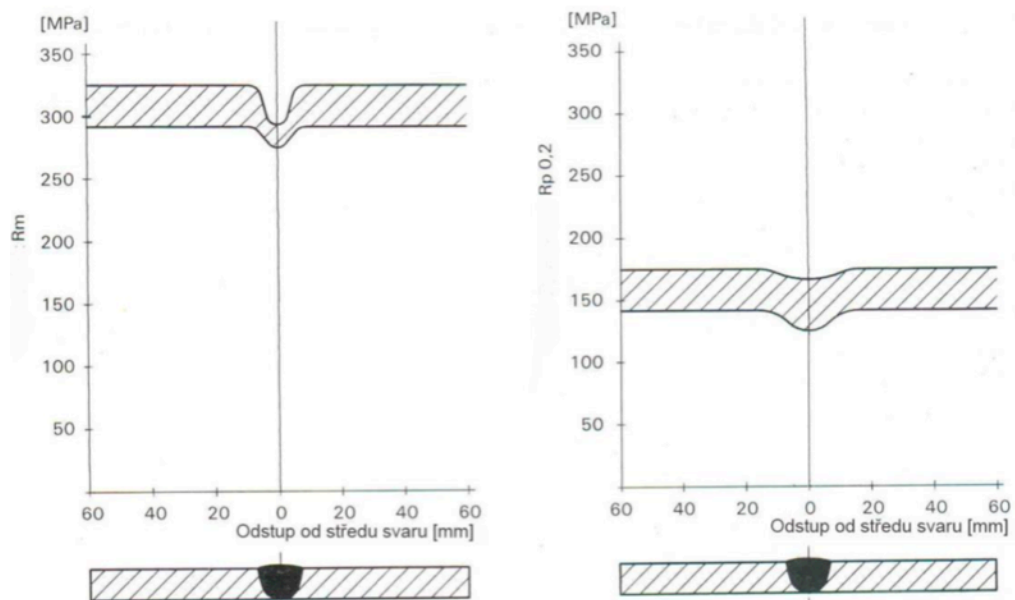
4.4 Velká rozpustnost plynů v Al

Největší vliv na výskyt pórů a bublin má vodík H_2 . Zdrojem vodíku je převážně vlhkost povrchu svařovaného materiálu nebo přídatného materiálu. Proto musí být oblast svarového spoje čistá a suchá. Vznik pórů účinkem H_2 se projevuje zejména ve svarovém kovu (SK). Při krystalizaci SK nedochází k úplnému vyloučení H_2 z důvodu prudkého poklesu rozpustnosti H_2 . SK hliníku krystalizuje velmi rychle a část H_2 zůstává ve svaru, k jehož vyloučení dochází až pod teplotou solidu. Vylučující se H_2 pak v pevném plastickém tvaru představuje vznik nežádoucích bublin a pórů. [1] Předehřevem, obloukem s vysokým výkonem nebo použitím ochranného plynu s vyšší tepelnou vodivostí (např. Helium) lze předejít vzniku pórů. [22]

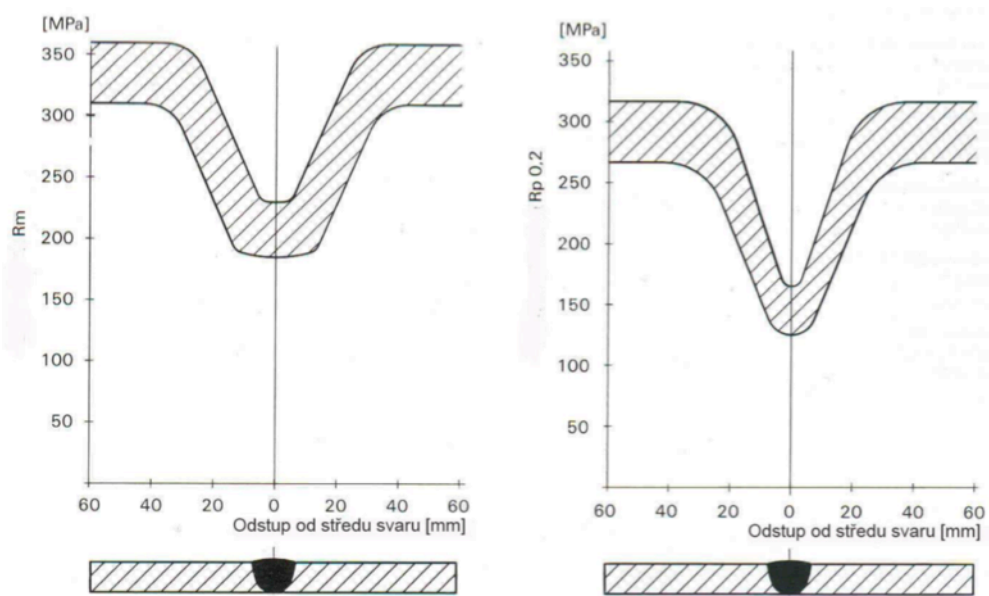
4.5 Pokles mechanických vlastností po svařování

Při svařování může u některých slitin dojít k vytvrzovacímu (precipitačnímu) procesu v tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Některé typy slitin jsou náchylné na ohřev.

Při zvýšených teplotách (vlivem svařování) se rozpouští vytvrzovací fáze (především u vytrditelných slitin) a tím ztrácí svou pevnost a tvrdost. Následující obrázky zobrazují přesný opak změny pevnosti, než je tomu u ocelí, kde ve svarovém kovu a TOO vzniká martenzit a materiál tvrdne, ale zároveň křehne. Při svařování slitin Al se snižují mechanické vlastnosti a také odolnost proti korozi. Na Obr. 19 je znázorněna nevýrazná ztráta pevnosti u slitiny nevytrditelné AlMg4,5Mn. Naopak Obr. 20 znázorňuje výraznou ztrátu pevnosti u slitiny vytrditelné AlMgSi1 v TOO. [22]



Obr. 19 Nevýrazná ztráta pevnosti slitiny AlMg4,5Mn [22]



Obr. 20 Výrazný pokles tvrdosti slitiny AlMgSi1 [22]

4.6 Doporučení pro svařování Al a jeho slitin

Doporučené požadavky z hlediska svařování a svařitelnosti jsou převážně obsaženy v normě *ČSN EN 1011 - 4 - Svařování - doporučení pro svařování kovových materiálů- Část 4: Obloukové svařování hliníku a slitin hliníku*. V této normě jsou k dispozici faktory ovlivňující svařování Al a jeho slitin, jako je např. základní materiál, přídatné svařovací materiály apod. Hliník a jeho slitiny musí být podle normy *ČSN EN 13445 - 8 - Netopené tlakové nádoby - Část 8: Doplňující požadavky na nádoby z hliníku a jeho slitin* opracovány na požadovaný rozměr primárně mechanickým způsobem nebo tepelným řezáním. Dále tato norma předepisuje určitá omezení, jako je např. možnost použití pouze určitých slitin viz (Tabulka 5), striktní požadavky na tažnost nebo chemické složení.

Al a jeho slitiny určené na svařované části tlakových nádob, které jsou tvářené za studena, musí mít minimální jmenovitou *tažnost*, na měřené délce $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$, která je $\geq 14\%$ v podélném nebo příčném směru, v závislosti na materiálové specifikaci. Pro materiály, které nejsou tvářeny za studena, musí mít jmenovitou tažnost, na měřené délce $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$, která je $\geq 10\%$ v podélném nebo příčném směru, v závislosti na materiálové specifikaci.

Dalším striktním požadavkem je výše zmíněné *chemické složení*. Chemické složení musí souhlasit s materiálovou specifikací. S výjimkou, že materiály dosahují maximální hodnoty obsahu olova $150\mu\text{g/g}$. Materiály určené pro svařované komponenty tlakových nádob jsou vyráběny z válcovaných nebo protlačovaných ingotů s obsahem vodíku nepřesahujícím $0,2\text{ml}/100\text{g Al}$, měřeného v tekutém kovu během odlévání.

Před ručním svařováním je nevhodné připravovat svarové plochy broušením kvůli možnému pozůstatku brusných částic na povrchu. U tlakových nádob musí být dle výše citované normy svařovaný povrch dokonale očištěn od mastnot, stop oxidů hliníku nebo dalších nežádoucích nečistot. Na očištění svarových ploch je možné použít např. aceton nebo průmyslový alkohol. Doporučená příprava svarových ploch pro tupé a koutové svarové spoje je uvedena v normě ČSN EN ISO 9692-3. [1]

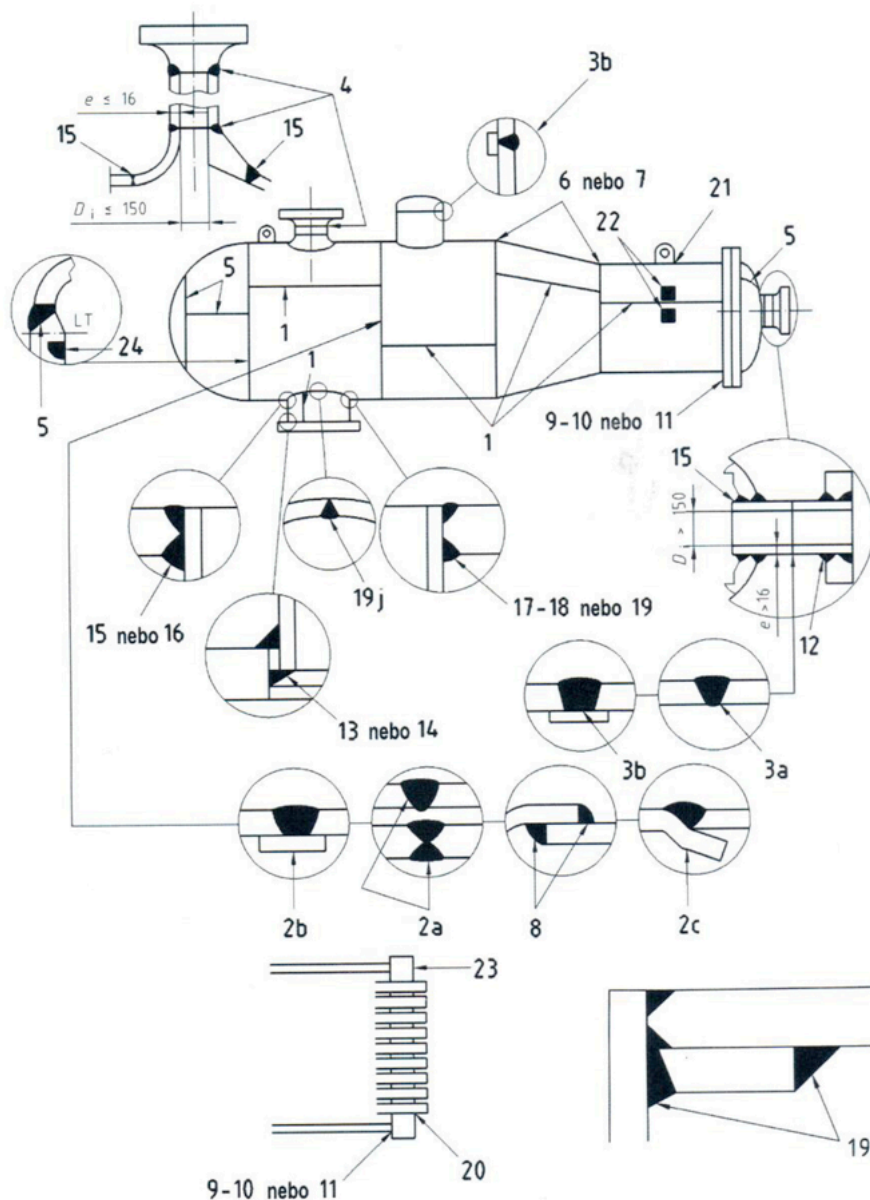
Tabulka 5 Možné hliníkové materiály použiteľné pro výrobu tlakových nádob [1]

Sk.		Pod- skupina	Druh hliníku a hliníkové slitiny	Označení		
				EN AW číslo	Chemická značka ^d	Stav materiálu ^e
21			Čistý hliník s ≤ 1% nečistot nebo obsahem legur	EN AW - 1050A EN AW - 1070A EN AW - 1080A	EN AW - Al 99,5 EN AW - Al 99,7 EN AW - 99,8(A)	O, H111, H112 O, H111, H112 O, H111, H112
22	Tepelně nezpracované slitiny					
	22.1		Slitiny hliník - mangan	EN AW - 3003 EN AW - 3103 EN AW - 3105	EN AW - Al Mn1Cu EN AW - Al Mn1 EN AW - Al Mn0,5Mg0,5	O, H111, H112 O, H111, H112 O, H111
	22.2		Slitiny hliník - hořčík s Mg ≤ 1,5%	EN AW - 5005 EN AW - 5005A EN AW - 5050	EN AW - Al Mg1(B) EN AW - Al Mg1(C) EN AW - Al Mg1,5(C)	O, H111, H112 O, H111, H112 O, H111
	22.3		Slitiny hliník - hořčík s 1,5% < Mg ≤ 3,5%	EN AW - 5049 EN AW - 5052 EN AW - 5154A EN AW - 5251 EN AW - 5454 EN AW - 5754	EN AW - Al Mg2Mn0,8 EN AW - Al Mg2,5 EN AW - Al Mg3,5(A) EN AW - Al Mg2 EN AW - Al Mg3Mn(A) EN AW - Al Mg3	O, H111, H112 O, H111, H112 O, H111, H112 O, H111, H112 O, H111, H112
	22.4		Slitiny hliník - hořčík s Mg > 3,5%	EN AW - 5083 EN AW -	EN AW - Al Mg4,5Mn0,7 EN AW - Al Mg4	O, H111, H112 O, H111

				5086		
23		Tepelně zpracované slitiny				
	23.1	Slitiny hliník - hořčík - křemík	EN AW - 6060 EN AW - 6061	EN AW - Al MgSi EN AW - Al Mg1SiCu	T4 ^a T4 ^b , T6 ^c	
<p>Pozn. a = pouze pro profily, b = pouze pro bezešvé trubky a příruby, c = pouze pro příruby</p> <p>d = značení materiálu podle ČSN EN 573-3 <i>Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků, Část 3: Chemické složení</i></p> <p>e = označení stavu podle ČSN EN 515 - <i>Hliník a slitiny hliníku - Výrobky tvářené - Označování stavů</i></p>						

Volba přídatného materiálu (PM) pro svařování Al a jeho slitin je jedním, z rozhodujících faktorů vedoucích k optimální svařitelnosti základního materiálu (ZM). Nejčastěji se PM volí tak, aby měl co nejbližší chemické složení, jako ZM. Jsou ale případy, u kterých se volí PM chemicky odlišný od ZM kvůli požadovaným mechanickým vlastnostem spoje. Volby PM a jejich rozdělení je uvedeno v normě ČSN EN 1011 - 4 - *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 4: Obloukové svařování hliníku a slitin hliníku.*

U hliníku a jeho slitin není předehřev z metalurgického hlediska požadován. Je používán např. pro odstranění stop vody při ohřevu na 50°C, aby se omezil vznik porezity, pro zabránění vzniku vad spojených se studenými starty, pro dosažení tepelné rovnováhy při svařování dílů, které mají odlišné tloušťky nebo pro snížení vlivu teplotního ochlazení svařovaných materiálů s velkou tloušťkou. Vhodné teploty předehřevu jsou pro slitiny hliníku doporučeny v normě ČSN EN 1011 - 4 a doporučení pro kontrolu předehřevu je uvedeno v normě ČSN EN ISO 13916 - *Svařování - Směrnice pro měření teploty předehřevu, interpas teploty a teploty dohřevu.* Stejně tak není požadováno tepelné zpracování (TZ) na snížení pnutí po svařování tlakových nádob. Jedním z případů požadavku TZ je možnost vzniku koroze kvůli napětí vyvolaném provozními médii. Druhy svarových spojů a jejich názvosloví vychází z normy ČSN EN 13445. Ve všech případech mají přednost tupé svary, spoje s trvalými podložnými pásky a přeplátované spoje jsou využitelné pouze v případech uvedených v normě ČSN EN 13445. [1] [24]



Obr. 21 Rozdělení svarů používaných při výrobě tlakových nádob [1]

Plně provařené tupé spoje: 1 – podélné spoje, 2a – obvodové spoje na plášti (včetně obvodových spojů mezi pláštěm a nepůlkulovým dnem), 2b – obvodové spoje na plášti (včetně obvodových spojů mezi pláštěm a nepůlkulovým dnem s podložným páskem), 2c – obvodový čepový spoj na plášti (včetně obvodových spojů mezi pláštěm a nepůlkulovým dnem), 3a – Obvodové spoje na hrdle $d_i > 150$ mm a $e > 16$ mm, 3b – Obvodové spoje na hrdle $d_i > 150$ mm a $e > 16$ mm s podložným páskem, 4 – Obvodové spoje na hrdle $d_i \leq 150$ mm a $e \leq 16$ mm, 5 – všechny svary na koulích, dnech a svary polokulových den s pláští, 6 – spojení kuželového pláště s válcovým bez anuloidového přechodu (malá podstava kužele),

Obvodové přeplátované spoje: 8a – běžné připojení pláště ke dnu, 8b – připojení vlnovce k plášti $e \leq 8$ mm,

Spojení plochého dna nebo trubkovnice s válcovým pláštěm (spojení příruby nebo límce s pláštěm): 9 – s plným průvarem, 10 – s částečným průvarem, pokud je $a > 16$ mm, 11 – s částečným průvarem, pokud je $a \leq 16$ mm,

Spojení příruby nebo límce s hrdlem: 12 – s plným průvarem, 13 – s částečným průvarem, 14 – s plným nebo částečným průvarem $d_i \leq 150$ mm a $e \leq 16$ mm,

Hrdlo nebo odbočka: 15 – s plným průvarem $d_i > 150$ mm, nebo $e > 16$ mm, 16 – s plným průvarem $d_i \leq 150$ mm, nebo $e \leq 16$ mm, 17 – s částečným průvarem pro jakékoliv d_i $a > 16$ mm, 18 – s částečným průvarem $d_i > 150$ mm $a \leq 16$ mm, 19 – s částečným průvarem $d_i \leq 150$ mm $a \leq 16$ mm, 19i – s výztužným plechem, 19j – svarový spoj na výztužném plechu

20 – konce trubek do trubkovnic, 21 – trvalá připojení (s plným nebo částečným průvarem), 22 – oblasti zatěžované tlakem po odstranění dočasných připojení, 23 – plátování navařováním, 24 – opravy [1]

5 VADY SVARŮ

S různými typy vad se můžeme setkat jak při ručním svařování, tak i u plně mechanizovaného svařování. Identifikování (resp. klasifikace) jednotlivých vad se u Al slitin provádí dle normy *ČSN EN ISO 6520 - 1 - Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování*. Pozoruje se především celistvost svarového spoje tzn. spoje bez trhlin, pórů, vměstků a dalších vad. Přípustnost těchto vad určuje pro různé stupně kvality svarových spojů norma *ČSN EN ISO 10042 - Svařování - Svarové spoje hliníku a jeho slitin zhotovené obloukovým svařováním - Určování stupňů kvality*. Vady rozdělujeme dle jejich místa výskytu na vady povrchové a vnitřní. [18]

5.1 Nejběžnější vady svarů spojené s Al

Trhliny (*ČSN EN ISO 6520 - 1 - Skupina č. 1 Trhliny*) [25]

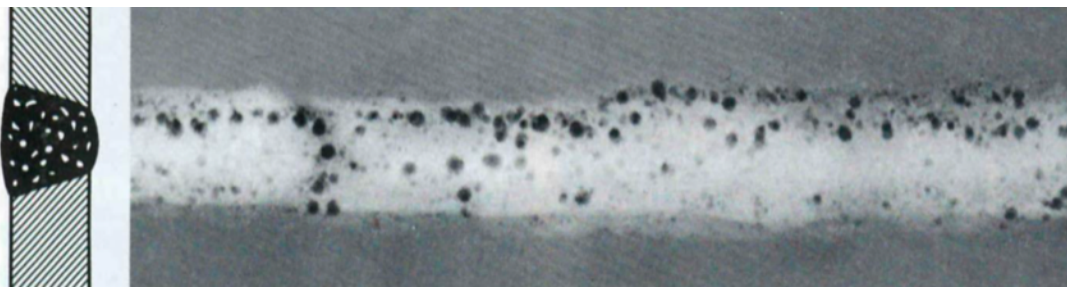
- Příklad vady dle *ČSN EN ISO 6520 - 1*, 1001, jedná se o mikrotrhlinu identifikovatelnou pouze pod mikroskopem [25]
- Stav napjatosti v oblasti svarového spoje rozhoduje o výskytu trhlin
- Pro zamezení vzniku trhlin za tepla je vhodný předehřev svařovaných materiálů, dále během svařování minimalizovat vnášené teplo nebo použitím vhodně zvoleného přídavného materiálu s vyšším obsahem legujících prvků [18]



Obr. 22 Trhlina svarového spoje [22]

Póry (ČSN EN ISO 6520 - 1 - Skupina č. 2 Dutiny) [25]

- Příklad vady dle ČSN EN ISO 6520 - 1, 2013, Shluk pórů, skupina bublin s nahodilým geometrickým rozmístěním [25]
- Hlavní příčinou vzniku pórů při svařování Al slitin je H_2 viz (kapitola 4.4)
- U svařování metodou 141 je výskyt pórů podstatně nižší, než u metody 131
- Ke snížení náchylnosti na vznik pórů je důležité udržovat čistotu svarových ploch, používat inertní plyn o vysoké čistotě a vyloučení všech zdrojů vodíku a vlhkosti [18]



Obr. 23 Nepřípustné množství pórů způsobující výrazný pokles mechanických vlastností [22]

Vměstky (ČSN EN ISO 6520 - 1 - Skupina č. 3 Vměstky) [25]

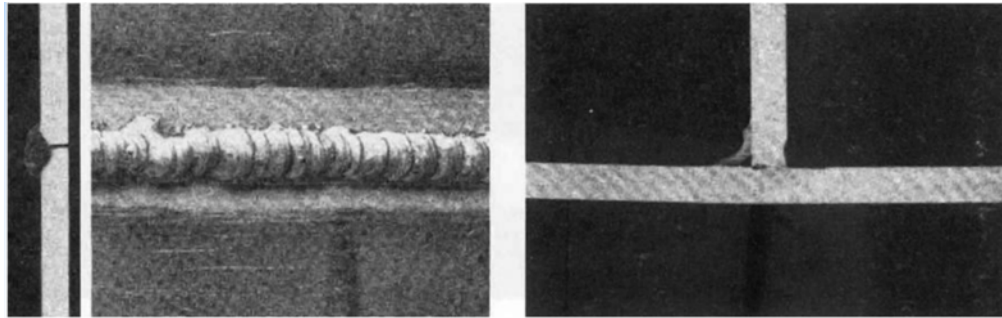
- Příklad vady dle ČSN EN ISO 6520 - 1, 3041, jedná se o částici cizího (při svařování metodou 141 se jedná o wolframovou elektrodu) kovu uzavřeného ve svarovém kovu. Dále se u Al a jeho slitin často vyskytují tzv. Oxidické vměstky. [25]
- Předějit vměstkům ve svarovém kovu se dá oddálením elektrody (zamezit kontaktu se svarovou lázní) nebo se vyvarovat tepelného přetížení elektrody Wolframových vměstků. Případně vhodným a dostatečným očištěním povrchu před a během svařování - u Oxidických vměstků. [18]



Obr. 24 Wolframový vměstek [22]

Studený spoj (ČSN EN ISO 6520 - 1 Skupina č. 4 Studený spoj a neprůvar) [25]

- Příklad vady dle ČSN EN ISO 6520 - 1, 4021, Neprovařený kořen, jedna nebo obě svarové plochy kořene svaru nejsou nataveny. [25]



Obr. 25 Neprovařený kořen [22]

5.2 Nedestruktivní metody kontroly

Povrchové vady

- základní zjištění povrchových vad probíhá při **vizuální (VT)** prohlídce svaru, vizuální prohlídka probíhá dle normy ČSN EN ISO 17637
- Nemagnetičnost Al slitin nedovoluje použít **magnetickou práškovou (MT)** zkoušku, ale musíme ji pro detailnější prohlídku povrchových vad použít
- **Penetrační (kapilární) zkouškou (PT)** - obvykle pro zjištění trhlin, povrchových pórů a studených spojů, probíhá dle normy ČSN EN ISO 3452 (s vyhodnocením podle ČSN EN ISO 23277) [22]

Vnitřní vady

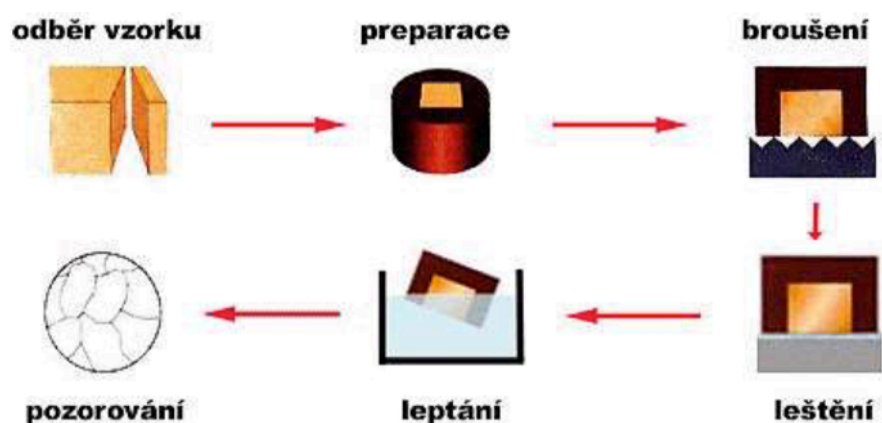
- Zkouškou vnitřních vad **ultrazvukem (UT)** zjistíme zejména výskyt trhlin a studených spojů, zkouška probíhá dle normy ČSN EN ISO 17640 (s vyhodnocením podle ČSN EN ISO 11666)
- Zkouškou **prozářením (RT)** obvykle zjistíme pomocí RTG záření výskyt vnitřních vad, mimo jiné i pórů a vměstků (provedení zkoušky podle ČSN EN ISO 17636 a vyhodnocení podle ČSN EN ISO 10675-2) [22]

5.3 Destruktivní metody kontroly

V rámci normy ČSN EN ISO 15614 - 2 - Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 2: Obloukové svařování hliníku a jeho slitin se používají následující destruktivní zkoušky Al a jeho slitin: Příčná zkouška tahem, Zkouška ohybem, Zkouška tvrdosti, Metalografická zkouška a další. V této bakalářské práci byla použita zkouška tvrdosti a metalografická zkouška, jejichž postup je detailněji popsán v kapitole 8.

Metalografická analýza

Tato metoda slouží ke zjišťování souvislostí mezi strukturou materiálu a jeho vlastnostmi nebo hledání příčiny vady vzniklé během svařování. Metalografické zkoušky rozlišujeme podle způsobu prohlížení na zkoušky makrostruktury a mikrostruktury. Jedná se o destruktivní zkoušku, kdy zkušební těleso odebíráme příčným řezem ze zkušebního kusu (zkoumané oblasti) a dále ho zpracujeme níže popsaným způsobem. Je to časově poměrně náročný proces, u kterého je důležité dbát na přesnost provedení každého kroku. Pokud některý z kroků této metody nevykáže požadovaný vizuální výsledek, následujícím krokem už nemůžeme (neopravíme) získat patřičné vyhodnocení. Nejprve je zapotřebí vzorky nařezat v přesné metalografické pile. Postup jednotlivých kroků tvorby metalografického výbrusu je znázorněn na Obr. 26 [26]



Obr. 26 Postup metalografického výbrusu [26]

Preparace

- Za studena - Zalití vzorku kapalinou (Dentakryl, Varidur, epoxidová pryskyřice), která po určité době ztuhne. Použití u vzorků náchylných na změnu tepla
- Za tepla - použití u vzorků, u kterých nehrozí teplotní ovlivnění struktury. Vzorek je umístěn do tlakové nádoby a zasype se práškem ze speciálního polymeru. Tato hmota působením tlaku, tepla a určitého času ztuhne a vzorek je připraven na další operaci. [26]

Broušení

- Intenzivní odebrání materiálu z porchu vzorku, snaha o dosažení rovinného povrchu
- Výsledek broušení závisí na zrnitosti a typu brusného kotouče, brousí se od hrubších kotoučů (např. SiC zrnitost 180) až po konečné brousící papíry (např. SiC zrnitost 2400)
- dalšími faktory jsou: velikost přitlačné síly, rychlost otáček, chladicí kapalina [26]

Leštění

- Stejný princip jako u broušení
- Cílem leštění je odstranit stopy po broušení a zanechat co "nejhladší" povrch vzorku
- Použití leštícího plátna
- bez chlazení za použití smáčedla (např. diamantová suspenze) [26]

Leptání

- Proces, při kterém je vrstva po broušení a leštění chemicky odstraněna.
- nezbytný krok ke zviditelnění mikrostruktury materiálu k pozorování optickým mikroskopem, příp. makrostruktury pro zviditelnění jednotlivých oblastí svarového spoje [26]

Zkouška tvrdosti

Tvrlost materiálu je definována jako odolnost proti vniknutí cizích těles. Tato odolnost je dána velikostí sil, kterými jsou atomy kovu vzájemně vázány. Tvrlost může být měřena podle Brinella (indentor - ocelová kalená kulička o průměru D), podle Rockwella (indentor - diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° nebo pro měkčí materiály ocelová kulička), a nebo podle Vickerse (indentor - čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem stěn 136°). V této bakalářské práci je tvrdost měřena pomocí čtyřbokého diamantového jehlanu s vrcholovým úhlem stěn 136° (pomocí Vickerse). Zkouška tvrdosti podle Vickerse spočívá ve změření obou úhlopříček po provedení vtisku. Tato zkouška není vyžadována dle normy *ČSN EN ISO 15614 - 2* a je provedena jen pro ověření změny mechanických vlastností vlivem teplotního ovlivnění. [27]



Obr. 27 Tvrdoměr na měření tvrdosti podle Vickerse [zdroj vlastní]

6 KVALIFIKACE

6.1 Kvalifikace postupu svařování

Obecná výroba netopených tlakových nádob se uvádí dle normy *ČSN EN 13445-4* a obsahuje tyto zásadní body. Výrobce musí dokládat k dané výrobě specifikaci postupu svařování (WPS - Welding Procedure Specification) dle *ČSN EN ISO 15609-1 - Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Stanovení postupů svařování - Část 1: Obloukové svařování pro všechny svary*. Již zmíněná norma *ČSN EN 13445 - 8 - Netopené tlakové nádoby - Část 8: Doplnující požadavky na nádoby z hliníku a jeho slitin* je pak zaměřená pouze na Al a jeho slitiny. [1]

U tlakem zatěžovaných svarů tlakových nádob musí být specifikace postupů kvalifikovány odkazem na příslušnou WPQR (Welding Procedure Qualification Record) a musí být provedeny příslušné kvalifikační zkoušky postupu svařování dle *ČSN EN ISO 15614-2 - Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 2: obloukové svařování hliníku a jeho slitin* (pokud se jedná o normalizovaný kus) pro všechny svary s výjimkou pro přípustnost radiografické kontroly. Pokud se jedná o nenormalizovaný zkušební kus, který je zároveň předmětem této bakalářské práce, jedná se o kvalifikaci pomocí *ČSN EN ISO 15613 - Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Kvalifikace na základě předvýrobní zkoušky svařování*. [1]

Všechna nedestruktivní zkoušení musí být provedena podle tabulky 6 na zkušebních kusech před jejich rozřezáním na zkušební vzorky. V závislosti na geometrii spoje, materiálech a výrobních požadavcích, musí být provedeno zkoušení podle požadavků v tabulce 6.

U makroskopické/mikroskopické kontroly musí být vzorek připraven a kontrolován podle ISO 17639 na jedné straně tak, aby byla jasně patrná hranice natavení, tepelně ovlivněná oblast TOO a způsob kladení housenek. [28]

Tabulka 6 Kontrola a zkoušení zkušebních vzorků podle ČSN EN ISO 15614-2 [28]

Zkušební kus	Druh zkoušky	Rozsah zkoušení	Poznámka
Tupý spoj s plným průvarem	Vizuální kontrola	100%	-
	Radiografická nebo ultrazvuková zkouška	100%	-
	Kapilární zkouška	100%	-
	Příčná zkouška tahem	2 zkušební vzorky	-
	Příčná zkouška lámavosti nebo zkouška rozlomením pro lité materiály nebo kombinace litých a tvářených materiálů	Zkušební vzorky ze strany kořene a 2 z lícni strany	a
	Kontrola makrostruktury	1 zkušební vzorek	-
	Kontrola mikrostruktury	1 zkušební vzorek	b
T-spoj s plným průvarem	Vizuální kontrola	100%	-
	Kapilární zkouška	100%	-
Přípoj odbočky ^c s plným průvarem	Kontrola makrostruktury	4 zkušební vzorky	d
	Kontrola mikrostruktury	1 zkušební vzorek	b

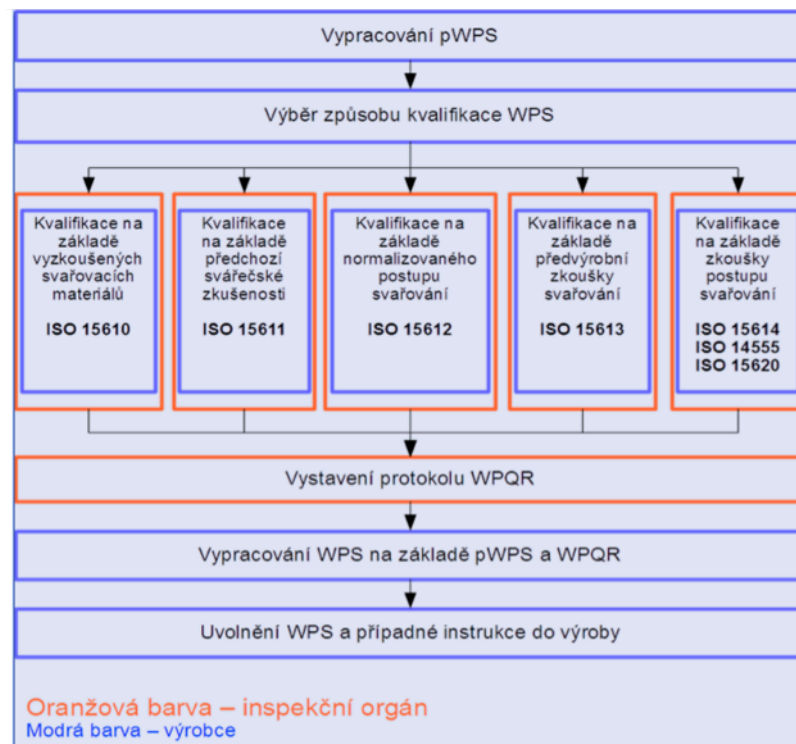
Koutové svary ^c	Vizuální kontrola	100%	-
	Kapilární zkouška	100%	-
	Kontrola makrostruktury	2 zkušební vzorky	-
	Kontrola mikrostruktury	1 zkušební vzorek	b

a --> Pro tloušťku $t \geq 12\text{mm}$ mohou být dvě zkušební tyče ze strany kořene a dvě zkušební tyče lícní strany nahrazeny přednostně čtyřmi zkušebními tyčemi pro boční zkoušku lámavosti

b --> Pouze pro materiály skupiny 23 a všechny slitiny pro odlitky

c --> Zkoušky neposkytují podrobné údaje o mechanických vlastnostech spoje. Kde však jsou tyto vlastnosti důležité pro použití, musí být získány doplňkovou kvalifikací, například kvalifikací tupého svaru

d --> Zkoušky zkušebního kusu pro T - spoj pouze dva zkušební vzorky pro kontrolu makrostruktury



Obř. 28 Obecný postup kvalifikace [29]

Obecný postup kvalifikace začíná zhotovením předběžné specifikace postupu svařování pWPS (Preliminary Welding Procedure Specification) a výběrem způsobu kvalifikace WPS viz (Obr. 28). U následujících kvalifikací musí být přítomen příslušný inspekční orgán. Na základě vybraného způsobu kvalifikace (příslušné normy), musí být provedeny všechny předepsané zkoušky, na základě jejich výsledků musí být vystaveny příslušné protokoly a vytvořen celkový záznam WPQR (Welding procedure Qualification record), na základě kterého je možné vytvořit konečný protokol WPS.

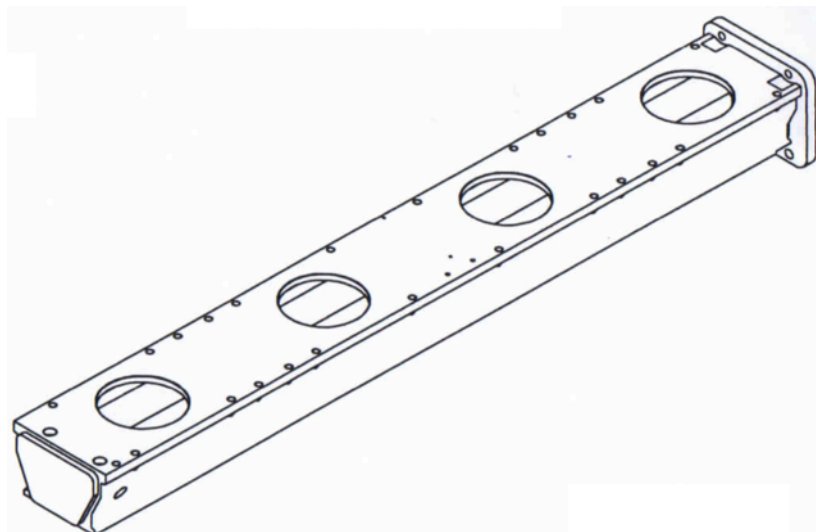
Metody kvalifikace pro tlaková zařízení spadají pod ČSN EN ISO 15614-2 (norma stanovující způsob kvalifikace předběžné specifikace postupu svařování zkouškami postupu svařování) nebo ČSN EN ISO 15613 (jedná se o zkoušku svařování, která je založena na nenormalizovaném zkušebním kusu, který je typický pro výrobní podmínky). [30] [29]

6.2 Kvalifikace personálu

Svářeči pro ruční a poloautomatické svařování musí být kvalifikováni podle ČSN EN ISO 9606-2 - *Zkoušky svářečů - Tavné svařování - Část 2: Hliník a jeho slitiny pro ruční a poloautomatické metody svařování* nebo podle ČSN EN ISO 14732 - *Svářečský personál - Zkoušky svářečských operátorů a seřizovačů pro mechanizované a automatizované svařování kovových materiálů pro plně automatizované a robotizované způsoby svařování*. K přezkušování dochází obvykle každé dva roky a je prováděno na základě výše zmíněných norem. Nové normy připouští i tříleté období a u operátorů až šestileté. Výrobce je odpovědný za pracovní způsobilost svářečského personálu a jeho kontrolu. [1]

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

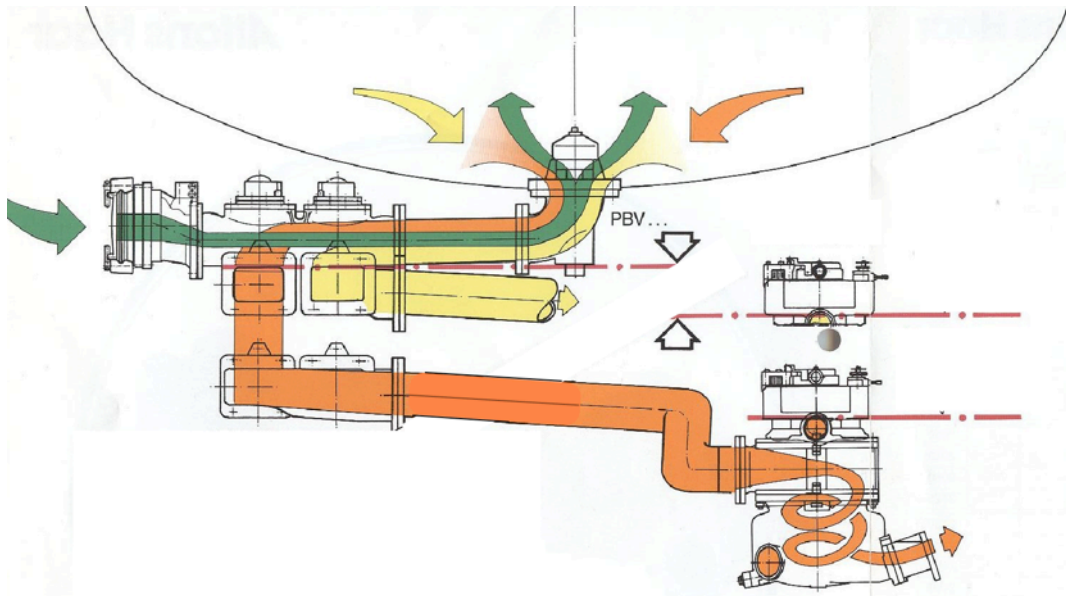
BP je řešena pro součást, která se nazývá "kolektor" a používá se na cisternách pro rozvoz pohonných hmot. Jedná se o kompaktní sestavu uzavíracích ventilů umožňující výdej produktů (nafta, benzín) z jednotlivých komor jedním nebo dvěma výdejnými potrubími s měřiči. Hlavní funkcí kolektoru je možnost rozvozu více druhů produktů, aniž by přišly jednotlivé produkty vzájemně do styku a zachovala se tím kvalita jednotlivých produktů. Cisterna je rozdělená přepážkami na více komor. Pokud je měřicí systém schopen střídat jednotlivé druhy produktů, postačí jeden kolektor. V případě požadavku současného stáčení dvěma hadicemi se používá dvojitý kolektor a dva měřiče. Kolektor je uspořádán tak, že při správném spádování potrubí umožňuje nezávislé plnění jednotlivých komor. Obvykle se plní více komor současně různými produkty a současně při stáčení dojde k úplnému vypuštění komory včetně potrubí do kolektoru. Následně je možné plnění jiného produktu do komory. [31]



Obr. 29 Kolektor [31]

Kolektor významným způsobem zjednodušuje potrubní rozvody cisterny. Umožňuje snížení stavební výšky potrubních rozvodů a tím i výšku vozu a těžiště cisterny. Na kolektor se připojují plnicí spojky spodního plnění (API spojka - bezúkapová spojka spojující pevné a pružné armatury). Délka kolektorů je dána

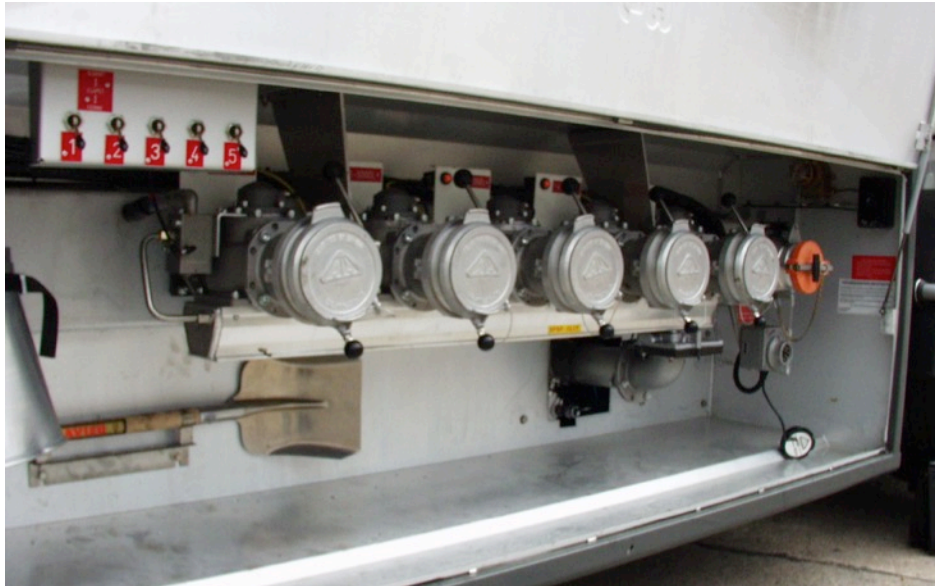
požadovanou roztečí plnicích spojek, což je dáno podmínkami při spodním plnění cisterny (musí být dost místa na připojení dvou plnicích ramen na dvě sousední spojky). Potrubní rozvody jsou uspořádány ve dvou vrstvách. Potrubí je vzhledem ke komorám v jedné vrstvě a jsou spádovány do kolektoru. Stáček potrubí se nachází o vrstvu níže, trubky se nekříží a vše je propojeno v kolektoru. Jmenovitý tlak v kolektoru je 10 barů. viz (Obr. 30). [31]



Obr. 30 Funkce kolektoru [31]



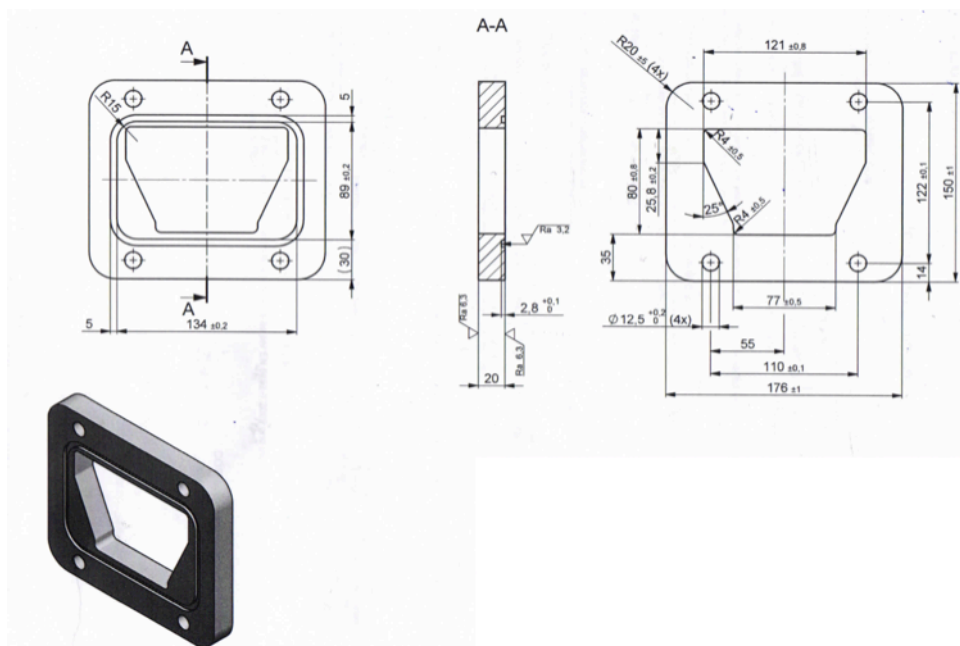
Obr. 31 Umístění kolektoru [31]



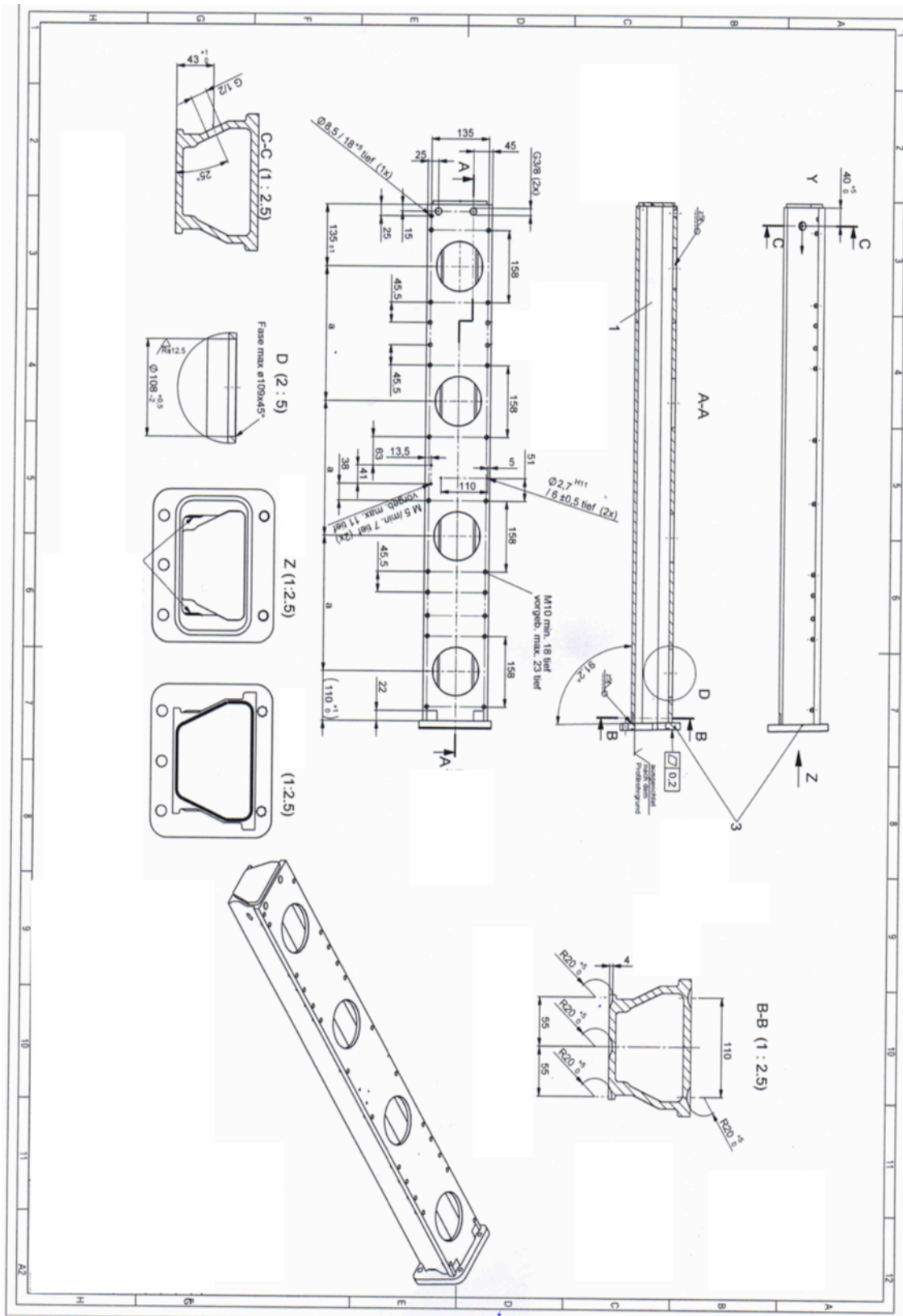
Obr. 32 Detail umístění kolektoru [31]

7.1 Výkresová dokumentace

Tato bakalářská práce neřeší kompletní výrobu kolektoru, ale zabývá se problematikou svaření čela kolektoru s kolektorovým profilem. Hlavní problém vyskytující se při svařování je rozdílná tloušťka svařovaných materiálů, a dále také geometrický tvar profilu kolektoru.



Obr. 33 Čelo kolektoru [31]



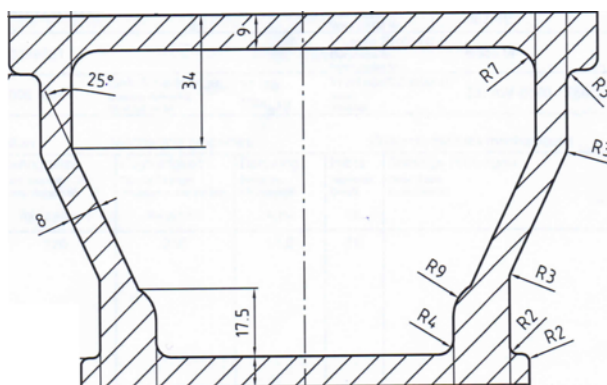
Obr. 34 Výrobní výkres kolektoru [31]

7.2 Svařovací postup

Postup dle ČSN EN ISO 15613 - Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Kvalifikace na základě předvýrobní zkoušky svařování. Spojení je řešeno koutovým svarem, bez upnutí svařovaného kusu v přípravku.

Základní materiál 1 - kolektorový profil

- **Tloušťka 8-14mm**, pro svařování je rozdílná tloušťka svařovaného materiálu pohoršující okolnost, která může zapříčinit vznik vad a zhoršit tak celkovou kvalitu spoje. Profil zobrazen na Obr. 35.
- **Materiál EN AW - 6060 T66**. Jedná se o precipitačně vytvrzenou slitinu patřící do skupiny 6xxx, tudíž se jedná o slitinu s hlavními legujícími prvky: Hořčíkem a Křemíkem. Označení (T6) znamená tepelné zpracování rozpouštěcím žíháním s následným umělým stárnutím. Chem. složení a mech. vlastnosti jsou převzaty z inspekčního certifikátu 3.1 poskytnuté firmou Haar CZ s.r.o. viz (Tabulka 7 a Tabulka 8). [32]



Obr. 35 Základní materiál 1 - rozdílná tloušťka stěny [31]

Tabulka 7 Chemické složení AlMgSi0,5 [31]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb
0,51	0,2	0	0,03	0,47	0,001	0,008	0,013	0,001

Tabulka 8 *Mechanické vlastnosti ZM 1 - kolektorový profil [31]*

Mez kluzu $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Mez pevnosti R_m [N/mm ²]	Prodloužení A_5 [%]	Tvrдость HB
226	256	11,0	76

Základní materiál 2 - čelo kolektoru

- **Tloušťka 20mm.** Jedná se o poměrně vysokou hodnotu tloušťky materiálu a z toho důvodu byl navrhnut předehřev materiálu na 350°C. U běžnější tloušťky materiálu např. 10mm se v případě požadavku na předehřev pohybujeme okolo 100-200°C. Předehřev byl proveden pomocí kyslíko - acetylenového plamene, který je vhodný díky obsahu vlhkosti (pouze max 4%) viz (Obr. 37) [33]
- **Materiál AlMgSi0,5.** Jedná se stejnou slitinu jako u základního materiálu 1 pouze s drobným rozdílem chemického složení, které bylo spolu mechanickými vlastnostmi poskytnuté z inspekčního certifikátu 3.1 firmou Haar CZ s.r.o. viz (Tabulka 9 a Tabulka 10).
- **Měření teploty** bylo uskutečněno pomocí digitálního teploměru GMH 3250 viz (Obr. 38).



Obr. 36 *Základní materiál 2 - tloušťka materiálu 20mm [31]*

Tabulka 9 Chemické složení AlMgSi0,5 [31]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb
0,43	0,23	0,02	0,03	0,44	0,004	0,007	0,015	0,001

Tabulka 10 Mechanické vlastnosti ZM 2 - čelo kolektoru [31]

Mez kluzu $R_{p0,2}$ [N/mm ²] MPa?	Mez pevnosti R_m [N/mm ²] MPa?	Prodloužení A_5 [%]	Tvrdość HB
190	221	13,23	76

Svařovací (přídavný) materiál

- **OK Tigrod 5183** (AlMg4,5Mn0,7), Klasifikace S Al 5183 (ČSN EN ISO 18273). Tento přídavný materiál byl zvolen z důvodu vhodného chemického složení a také jeho dostupnosti. Doporučuje ho i norma ČSN EN 1011-4. Je vhodný na svařování slitin s vysokým obsahem hořčíku, u kterých dosahujeme vysoké pevnosti, houževnatosti a zároveň odolnosti spoje proti korozi a vnějším vlivům prostředí. Průměr drátu byl zvolen vzhledem k tloušťkám ZM 3,2mm. Chemické složení a mechanické vlastnosti viz (Tabulka 11 a Tabulka 12). [34]

Tabulka 11 Chemické složení přídavného materiálu [34]

Si	Mn	Al	Fe	Mg	Zn
<0,40	0,80	základ	<0,40	4,80	<0,25

Tabulka 12 Mechanické vlastnosti přídavného materiálu [34]

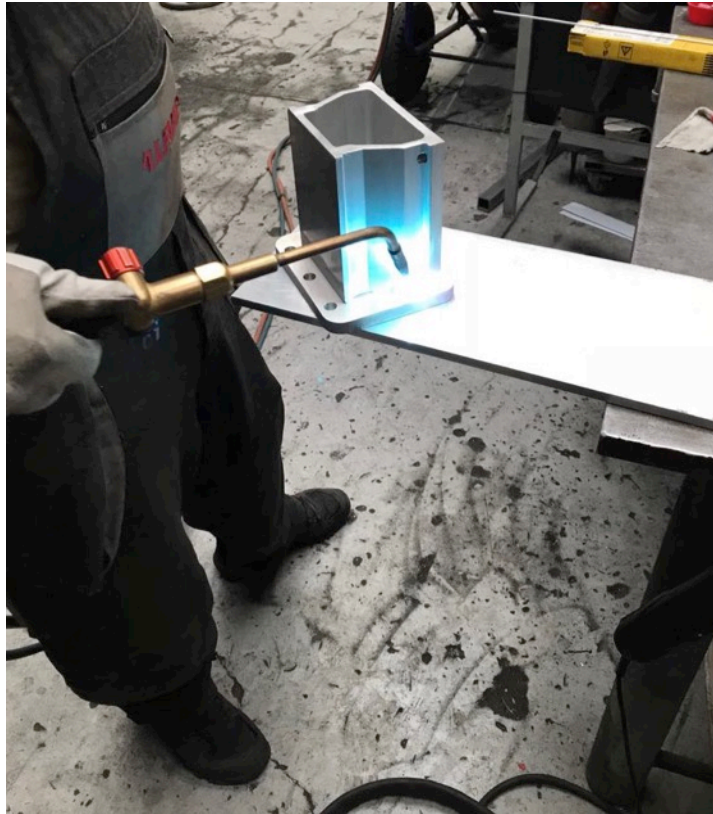
R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_5	KV(J)/°C +20
290	140	25	30

Ochranný plyn a pozice

- Jedná se o skupinu ochranných plynů I1 podle ČSN EN ISO 14 175
- byl použit ochranný plyn Ar 4.8
- průtok 10 - 12 l/min
- Byla zvolena základní poloha svařování pro koutové svary, označená podle ČSN EN ISO 6947 - PA a PB

Navržené svařovací parametry

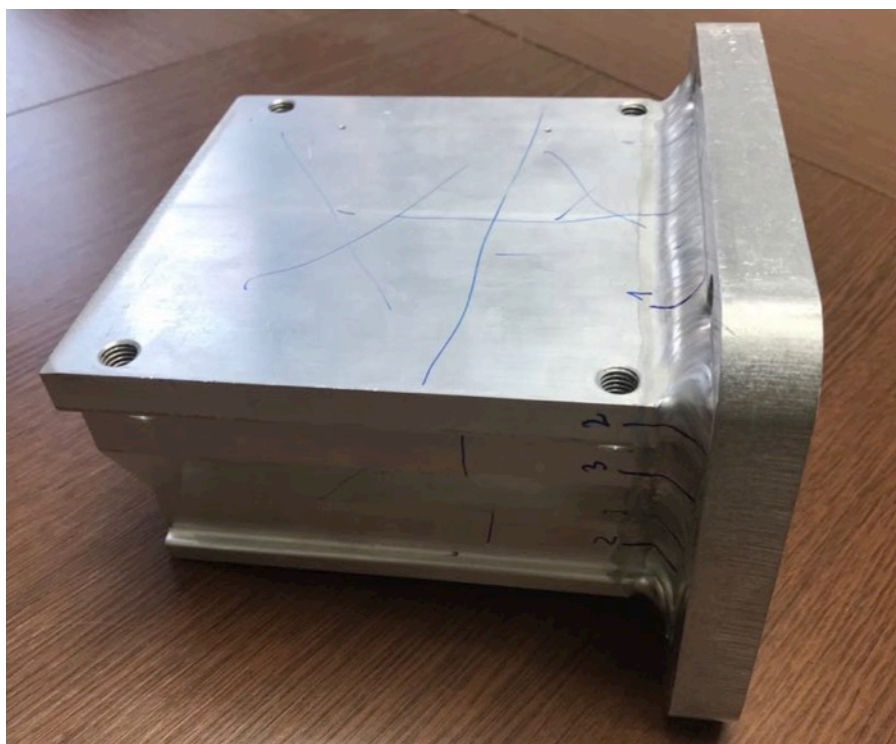
- Počet vrstev: 1
- Metoda 141
- Typ svařovacího proudu: AC
- Svařovací proud 190 A
- Napětí 12 V



Obr. 37 Předehřev materiálu [zdroj vlastní]



Obr. 38 Měření teploty předehřevu [zdroj vlastní]



Obr. 39 Svařený zkušební kus, připravený na NDT a DT zkoušení [zdroj vlastní]



Obr. 40 Detail svaru [zdroj vlastní]

8 VYHODNOCENÍ KVALITY VYTVOŘENÝCH ZKUŠEBNÍCH KUSŮ

Po svaření zkušebního vzorku viz (Obr. 39) následuje prozkoušení příslušnými NDT a DT zkouškami. Zkušební vzorek byl nejprve podroben vizuální zkoušce, poté následovala kapilární zkouška pro kontrolu povrchových vad a zkouška prozářením pro kontrolu vnitřních vad. Nakonec byly provedeny destruktivní zkoušky pro vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury na metalografickém výbrusu a ověření mechanických vlastností změřením tvrdosti. Zkouška RT a zkouška tvrdosti byla dle požadované kvalifikace EN ISO provedena nad rámec.

8.1 Zkouška vizuální

Tato základní zkouška se běžně provádí hned po dokončení procesu svařování. Kontroluje se velikost, pravidelnost a povrchová celistvost kresby svarové housenky viz (Obr. 40).

8.2 Zkouška kapilární

Zkouška kapilární neboli penetrační je proces zjištění povrchových vad následující po vizuální zkoušce. Povrch svaru musí být řádně očištěn čistícím prostředkem a následně se aplikuje penetrant, který bývá výrazně barevný (červená, zelená). Tento penetrant se nechá po dobu 5-30 minut působit na povrchu svaru a pronikne do případných necelistvostí svaru. Vzorek poté očištíme a nanese vývojku (zvýrazňovač obvykle bílé barvy), která vlivem kapilárních sil vytáhne penetrant z necelistvostí svaru a určí tak místo a velikost vad zobrazením jejich indikací. Délka trvání působení vývojky je ve stejném rozmezí, jako u penetrantu. Nalezené indikace jsou poté hodnoceny dle normy ČSN EN ISO 23277 -

Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení kapilární metodou - Stupně přípustnosti.
Viz (Obr. 41 a 42) - příklad vzorku č. 3, kde byly všechny indikace vad přípustné.



Obr. 41 Nanesení penetrantu [zdroj vlastní]

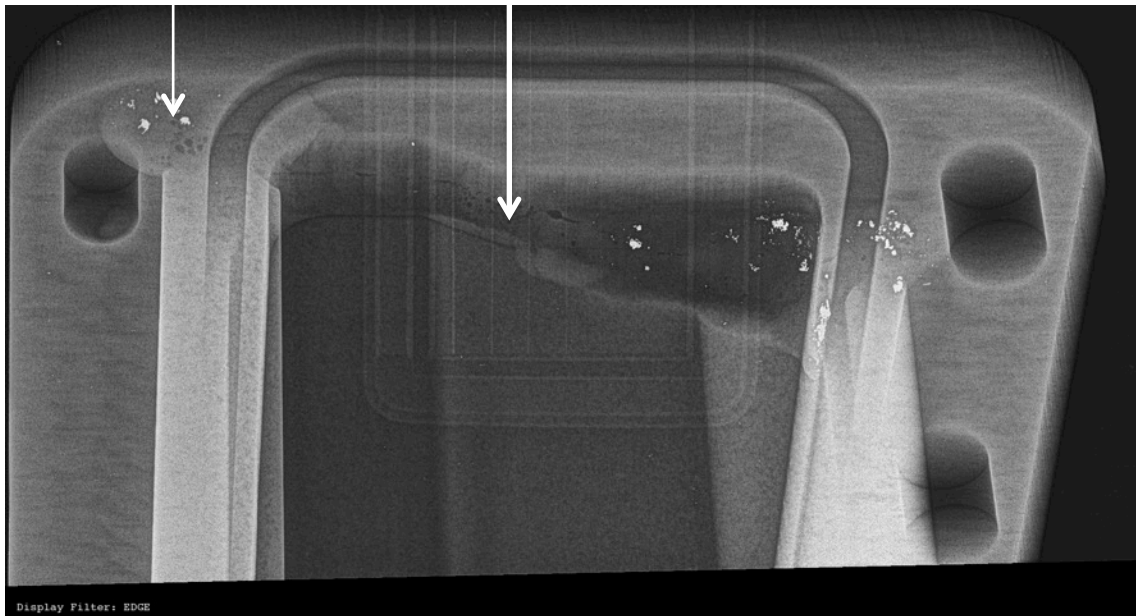


Obr. 42 Nanesení vývojky [zdroj vlastní]

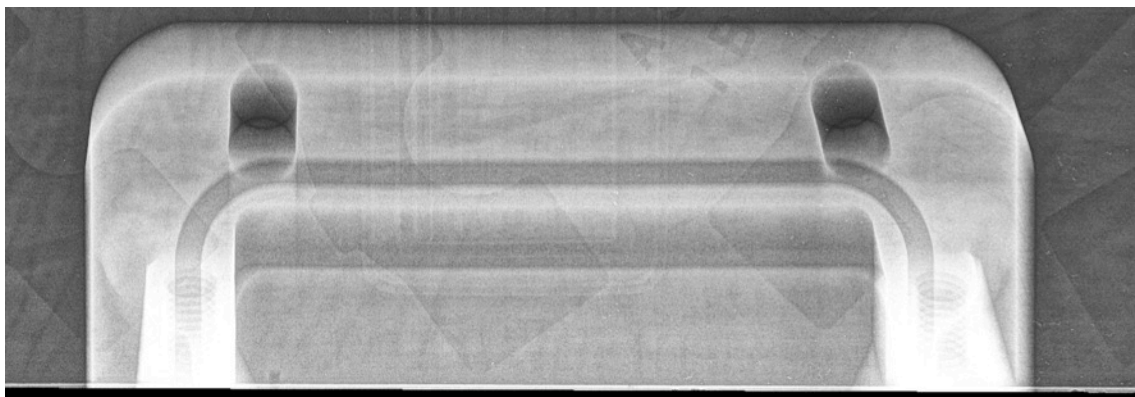
8.3 Zkouška prozářením

Na následujících snímcích je možné porovnat RTG snímek vzorku s nepřípustnými vadami z prvního zkušebního kusu (Obr. 43) se vzorkem vyhovujícím z posledního zkušebního kusu (Obr. 44). Zkoušku prozářením provedla firma DEKRA CZ a.s. Svary jsou na základě protokolu viz (Obr. 45) související s RTG snímkem na Obr. 44 vyhovující. Zkouška proběhla dle norem uvedených v kapitole 5.2.




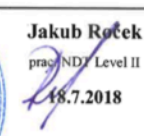

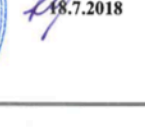
Vada 2013 viz kapitola 5.1 Vada 2013 a 1011 viz ČSN EN ISO 6520-1



Obr. 43 RTG snímek - nepřijatelné vady [zdroj vlastní]



Obr. 44 RTG snímek - čistota svaru [zdroj vlastní]

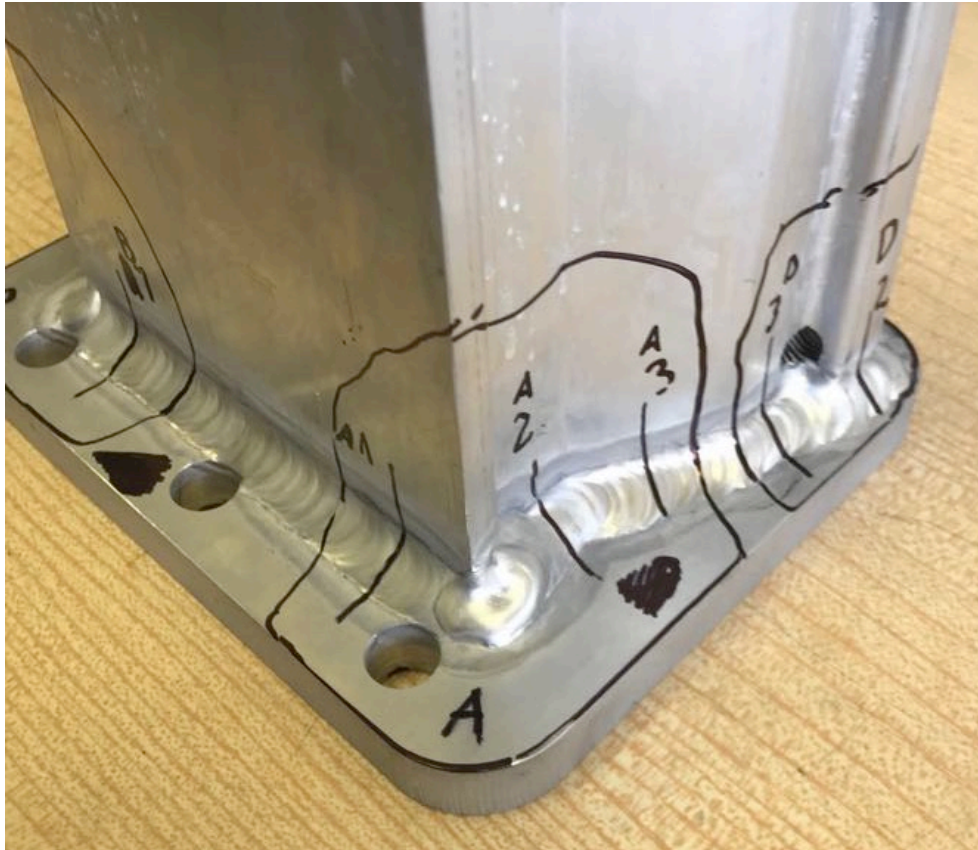
 DEKRA CZ a.s. provozovna Motoristů 77, 530 06 Pardubice tel.: 466 415 507, 466 310 203, 466 310 354 www.dekra.cz	 PROTOKOL REPORT PROTOKOLL				Zákazník Client Kunde		ALFIMEX s.r.o. Kutnohorská 369 Praha 10										
	RADIOGRAFICKÁ ZKOUŠKA D RADIOGRAPHIC TESTING D DURCHSTRAHLUNGPRÜFUNG D						Protokol č. Report No		Strana Page		z of		1 1		Zakázka č. Order No Bestellnum.		3069
Zkoušený díl Tested part Prüfteil	Objekt Object Objekt Zkušební vzorek svařenec 1, 2 Al						Zkušeb. místo Place of test Prüfort Provozovna Pardubice										
	Výrobce Producer Hersteller ALFIMEX s.r.o.						Typ svaru Type of weld Nahttype FW										
Materiál Material	Hliník						Postup svařování Welding process Schweißverfahren 141		Rozsah zkouš. Testing extent Prüfumfang 100%		Po tepelném zprac. Heat treated Wärmebehandelt ano yes ne no ja nein						
	Zkoušební postup Test procedure Prüfverfahren QT-310-006		Zk. norma Test standard Prüfnorm ČSN EN ISO 17636-2		Zk. třída Test class Prüfklasse B		Hodnocení dle Evaluation acc. to Auswertung nach ČSN EN ISO 10042 St. jak. D										
Zkoušební údaje Testing data Prüfdaten	Zdroj záření Radiation source Strahlenquelle RTG		Přístroj – typ a číslo Equipment – type and No Gerät – Typ und Nr. Yxlon 160		90/5		kV / mA Ci		Velikost ohniska Focus size Brennfleckgröße Ø 0,4 mm								
	Zvětšení na detektoru Zoom on detector Zoom auf den Detektor 1:1		Typ a umístění měřky Type and placement of IQI Art und Lage des BPK 10 AL EN		Str. zdroje Source side Quelleseite		Str.-det. Det.-side Det.-Seite		Folie, filtry Screens, filters Folien, Filter 0 mm								
	Detektor Detector Detektor HD IP Plus DÜRR		Skener Scanner Scanner HPX PRO Carestream		Velikost laser. ohniska Laser focus size Laserfokusgröße 25 µm		Digit. filtr Digital filter Digitalfilter EDGE										
	Způsob prozařování – obr. č. Method of radiography – Fig. No Aufnahmeanordnung – Bild Nr. 1		Min. citlivost Min. sensitivity Min. Sensibilität W 13		Zákl. prostor. rozlišení SR_b Basic spatial resolution SR _b Basisortsauflösung SR _b 100 µm		Min. SNR_N Min. SNR _N 120										
VÝSLEDEK RESULT ERGEBNIS																	
Označení polohy / č. svaru Mark of position / Weld No Kennzeichnung der Lage / Schweißnaht Nr.		Rozměr Dimension Maße Ø / t [mm]		Rozměr det. Size of det. Detektormaße cm x cm		FFD FFA cm	Expozice Exposition Belichtung min / s	Citlivost Sensitivity Sensibilität č., No, Nr.	SR_b µm	SNR_N	Typ a poloha vad Type and position of faults Typ und Lage der Fehler			Hodnocení Evaluation Bewertung v NE			
Vzorek 1/Poz. 1		-18,0		10 x 48		90	1/50	W13	100	146	402, 2011			X			
Vzorek 1/Poz. 2		-18,0		10 x 48		90	1/50	W13	100	146	402, 2011			X			
Vzorek 1/Poz. 3		-18,0		10 x 48		90	1/50	W13	100	146	402, 2011			X			
Vzorek 1/Poz. 4		-18,0		10 x 48		90	1/50	W13	100	146	402, 2011			X			
Vzorek 2/ Poz. 1		-18,0		10 x 48		90	1/50	W13	100	146				X			
Vzorek 2/ Poz. 2		-18,0		10 x 48		90	1/50	W13	100	146				X			
Vzorek 2/ Poz. 3		-18,0		10 x 48		90	1/50	W13	100	146	402			X			
Vzorek 2/ Poz. 4		-18,0		10 x 48		90	1/50	W13	100	146	402			X			
*) V rámci aktualizace norem v návaznosti na normu: In acc. with rules of the standard up-date in relation to standard: ----- Im Rahmen der Normaktualisierung ersetzt durch die Norm:																	
*) V - vyhovuje acceptable zulässig NE - nevyhovuje unacceptable unzulässig																	
Svar Weldment Schweißnaht Ozn. IIW a čísla vad dle ČSN EN ISO 6520-1 IIW designation and numbers of faults acc. to ČSN EN ISO 6520-1 IIW Bezeich. und Nummer nach ČSN EN ISO 6520-1 Aa - 2011, 2012 Ac - 2014 Ba - 3012 Be - 3011 C - 401 Db - 402 Ea - 101 Ee - 106 Fb - 514 Ab - 2015, 2016 Ad - 2013 Bb - 3012 Bb - 3012 Bd - 304, 3042 Da - 515 Dc - 402 Eb - 102 Fa - 5041 Fe - 5011, 5012																	
Tento protokol nesmí být bez písemného souhlasu zkušební laboratoře reprodukován jinak než celý This report can be reproduced in incomplete form only with written consent of testing laboratory Dieser Protokoll kann in unvollständiger Form nur mit schriftlicher Zustimmung des Prüflabor reproduziert werden																	
Počet svarů / snímků Number of welds / images Zahl 8 / 8		Zkoušel Examined Prüfer Michal Kolouch		Stupeň a č. certif. Level & cert. No Stufe und Zert. Nr. ČSN EN ISO 9712 II,101 – 02436		Dne Date Datum 9.7.2018		Podpis Signature Unterschrift				Schválil Approved Genehmigt Jakub Roček prac. NDT Level II					
		Hodnotil Evaluated Bewerter Karel Süssenbeck		Stupeň a č. certif. Level & cert. No Stufe und Zert. Nr. ČSN EN ISO 9712 II,101 – 00305		Dne Date Datum 18.7.2018		Podpis Signature Unterschrift				Dne Date Datum 18.7.2018					

QT-310-151 r0

Obr. 45 Protokol Radiografické zkoušky [zdroj vlastní]

8.4 Metalografický výbrus

Metalografický výbrus byl vytvořen v prostorách fakulty strojní ČVUT. Obecný postup metalografického výbrusu je popsán v kapitole 5.3. V následujících krocích jsou popsány jednotlivé parametry metalografického výbrusu. Pozice řezů je znázorněna na Obr. 46.



Obr. 46 Pozice řezů [zdroj vlastní]

Řezání

- Pila Labotom 3, přesná metalografická rozbrušovací pila s intenzivním chlazením vodou s aditivem CorroZip na ochranu vzorku a ochranu zařízení. Výrobce Struers
- Kotouč pro dělení měkkých slitin železa ocelových trubek a malých kusů (HV 80 - 400). Oxid hliníku, pryskyřičná matrice. Označení 20A25. Výrobce Struers



Obr. 47 Řezání vzorku v pile Labotom 3 [zdroj vlastní]

Lisování za tepla (preparace)

- Lis CitoPress - 1, plně automatické elektro - hydraulické jednoválcové zařízení určené pro lisování vzorků za tepla. Výrobce Struers
- Parametry lisování: teplota 180°C, tlak 250 barů, čas lisování jednoho vzorku 390 vteřin



Obr. 48 Lis CitoPress - 1 [zdroj vlastní]

Broušení a leštění

- Metalografická bruska/leštička Phoenix Beta s automatickou hlavou Vector. Výrobce Buehler
- Broušení 1: brousící papír SiC, zrnitost 180, přítlak 25N, otáčky 300 ot/min, čas 150 vteřin, chlazení vodou
- Broušení 2: brousící papír SiC, zrnitost 1200, čas 60 vteřin, ostatní parametry stejné, jako předchozí operace
- Broušení 3: Brousící papír SiC, zrnitost 2400, ostatní parametry stejné, jako předchozí operace
- Leštění 1: leštící plátno MDdur, smáčedlo MetaDi Fluid, přítlak 30N, diamantová suspenze 1 μ m, čas 180 vteřin
- Leštění 2: Nanocloth 0,05 μ m, Suspenze MasterPrep 0,05 μ m, ostatní parametry stejné, jako předchozí operace
- Leštění 3: Coloidní silica (křemík v roztoku) OP-U, ostatní parametry stejné, jako předchozí operace



Obr. 49 Broušení a leštění [zdroj vlastní]

Čištění v ultrazvukové vaně

- ultrazvuková čistička CT400C, 35/60W, objem 0,5L. Výrobce CT Brand



Obr. 50 Ultrazvukové čištění [zdroj vlastní]

Leptání

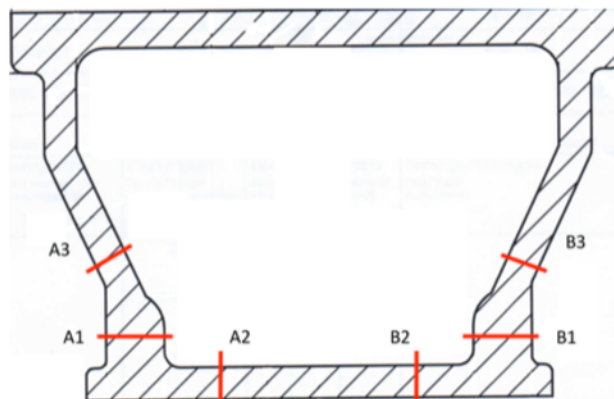
- chemické leptadlo na Al a jeho slitiny
 - 10ml kys. fluorovodíková
 - 15ml kys. uhlovodíková
 - 25ml kys. dusičná
 - 50 ml destilovaná voda



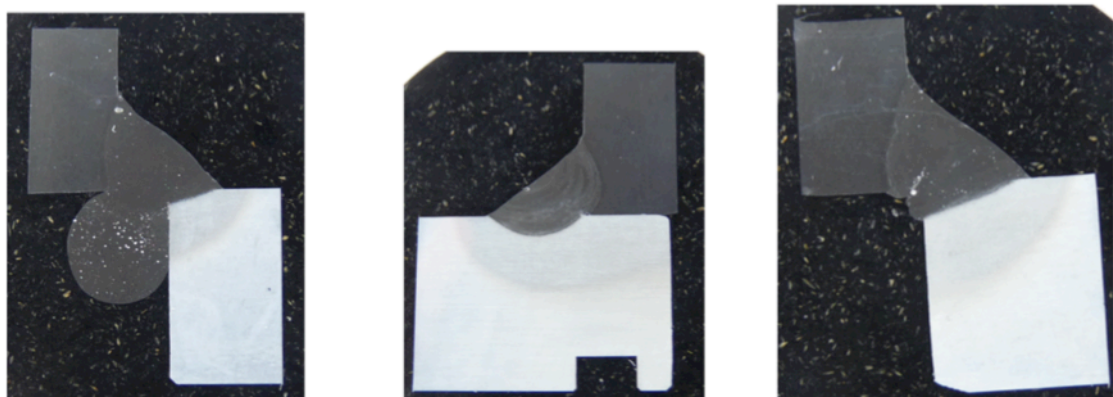
Obr. 51 Sušení naleptaných vzorků [zdroj vlastní]

Výsledek metalografických výbrusů

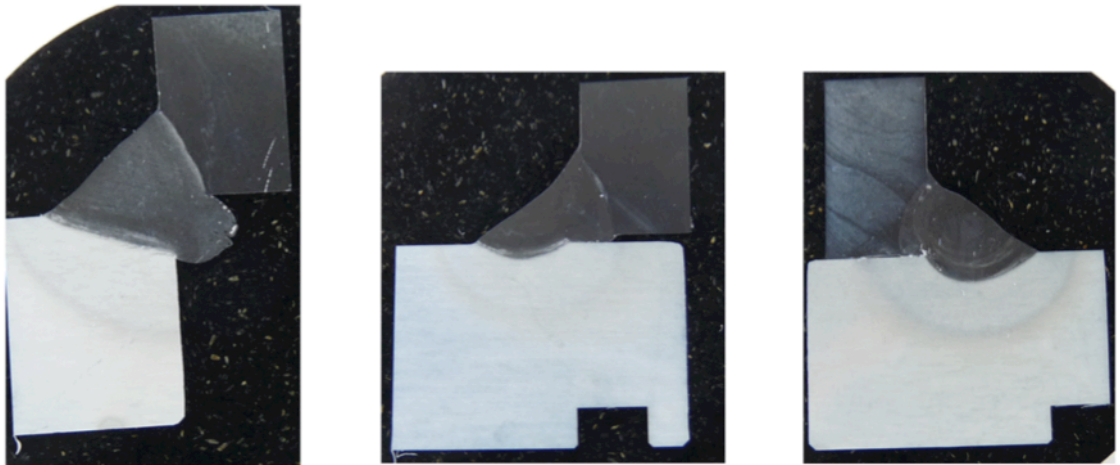
Celkově byly touto zkouškou podrobeny 3 zkušební kusy a byly tedy získány 3 série zkušebních vzorků (celkem 30 výbrusů). Výsledek metalografických výbrusů je v této práci zhotoven z prvního a třetího vzorku. Na výbrusech z prvního zkušebního vzorku jsou vidět značné nedostatky v nedodržení svařovacího postupu (nepřípustné vady). U druhého zkušebního vzorku došlo k mírné aproximaci postupu svařování a teprve až u třetího vzorku došlo k výrazné korekci svařovacích parametrů pod dohledem příslušné oprávněné osoby. Následující obrázky (Obr. 53-54) zobrazují makrostruktury prvního zkušebního kusu, kde jsou viditelné vady a teplotně ovlivněné oblasti dvou materiálů rozdílných tlouštěk (přechod mezi čelem a profilem kolektoru). Na obrázcích (Obr. 56-57) jsou výsledky metalografického výbrusu posledního zkušebního kusu.



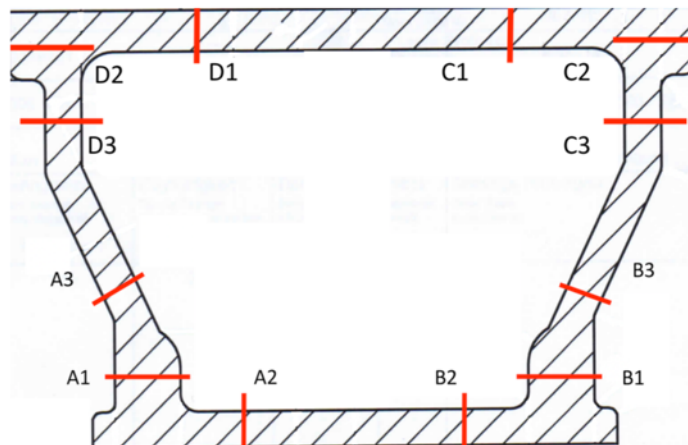
Obr. 52 Schématické zobrazení řezů pro metalografické výbrusy z 1. série [zdroj vlastní]



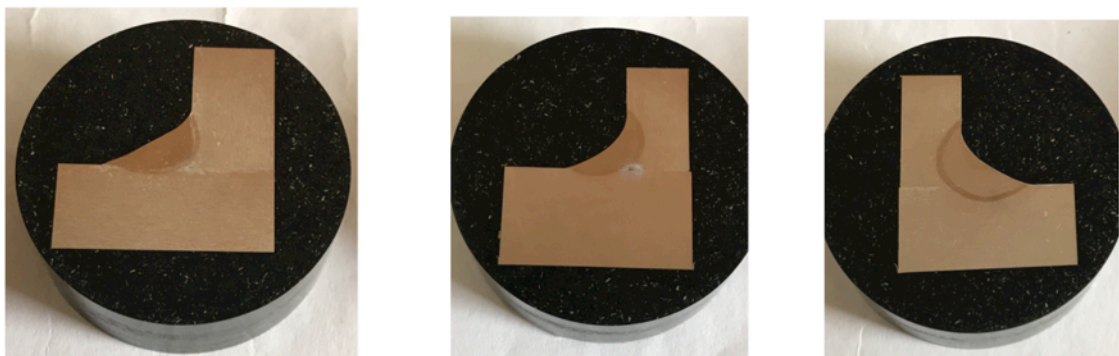
Obr. 53 Výbrusy 1. série, zleva: A1, A2, A3 [zdroj vlastní]



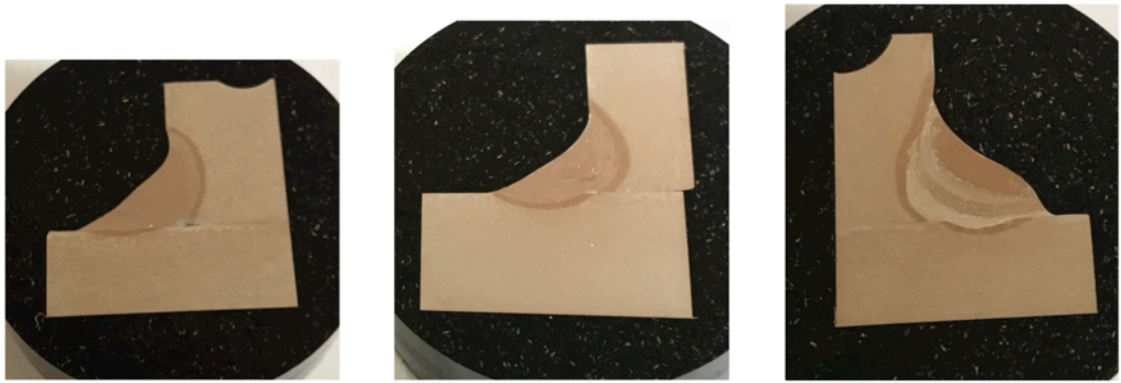
Obr. 54 Výbrusy 1. série, zleva: B1, B2, B3 [zdroj vlastní]



Obr. 55 Schématické zobrazení řezů 3. série [zdroj vlastní]



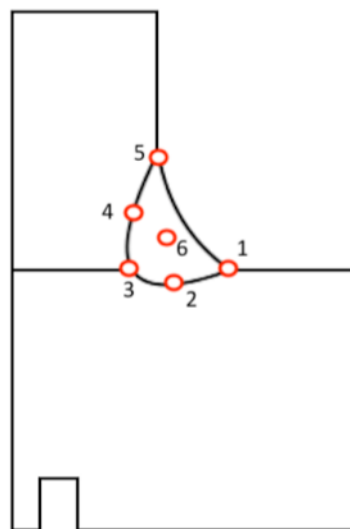
Obr. 56 Výbrusy 3. série, zleva: A1, A2, B1 [zdroj vlastní]



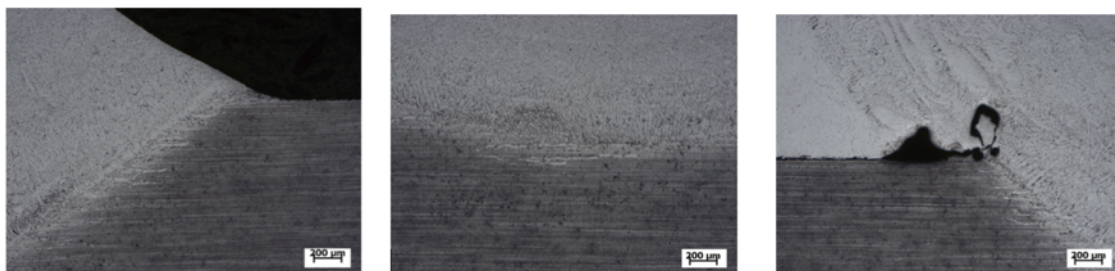
Obr. 57 Výbrusy 3. série, zleva: D2, D1, C2 [zdroj vlastní]

8.5 Porovnání mikrostruktury

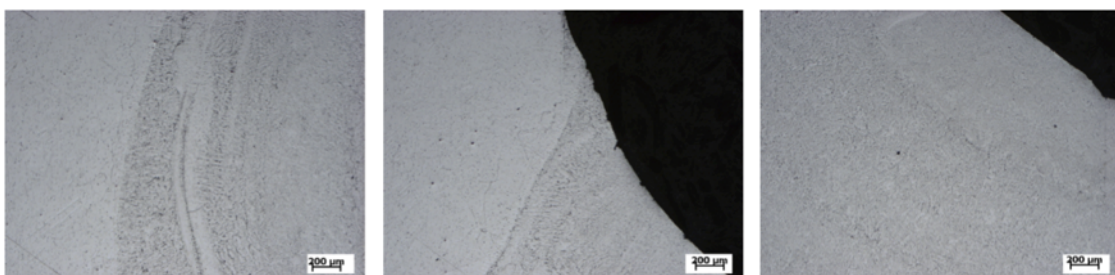
Mikrostrukturní snímky byly vytvořeny v prostorách fakulty strojní ČVUT. Pro vyzobrazení mikrostruktury byl použit invertovaný metalografický mikroskop Zeiss Axio observer D1m. Na čtyřech uvedených vzorcích byla následně ještě provedena zkouška tvrdosti. Následující obrázky ukazují vybrané vzorky pro porovnání částí s nepřijatelnými vadami s dobře provedenými vzorky.



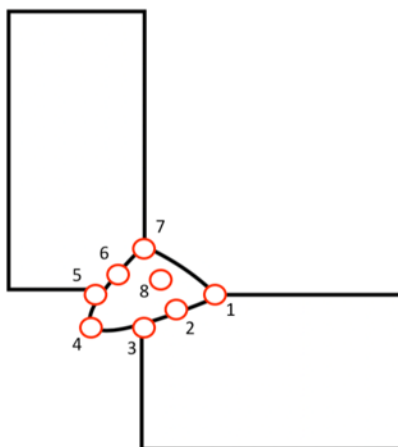
Obr. 58 Schématické zobrazení místa snímků vzorku A2 z 1. série [zdroj vlastní]



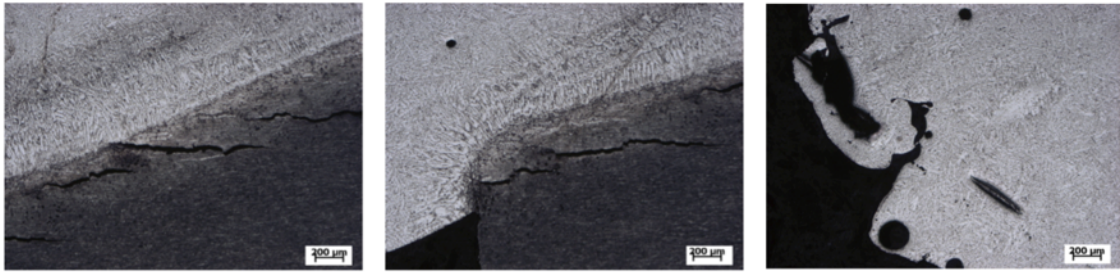
Obr. 59 Mikroskopické snímky vzorku A2 z 1. série, umístění podle obr. 58 - zleva: 1, 2, 3 [zdroj vlastní]



Obr. 60 Mikroskopické snímky vzorku A2 z 1. série, umístění podle obr. 58 - zleva: 4, 5, 6 [zdroj vlastní]

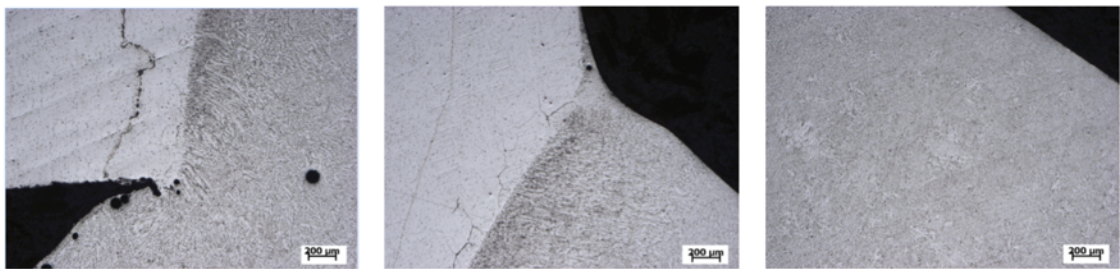


Obr. 61 Schématické zobrazení místa snímků vzorku B1 z 1. série [zdroj vlastní]



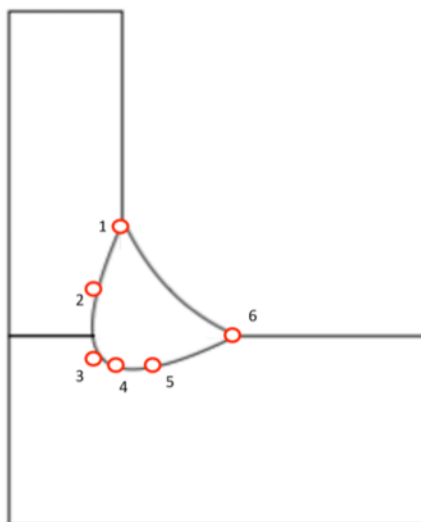
Obr. 62 Mikroskopické snímky vzorku B1 z 1. série, umístění podle obr. 61 - zleva: 2, 3, 4 [zdroj vlastní]

- Na Obr. 62 (2 a 3) jsou velmi dobře viditelné nepřijatelné vady (trhliny) klasifikované podle ČSN EN ISO viz (kapitola 5).

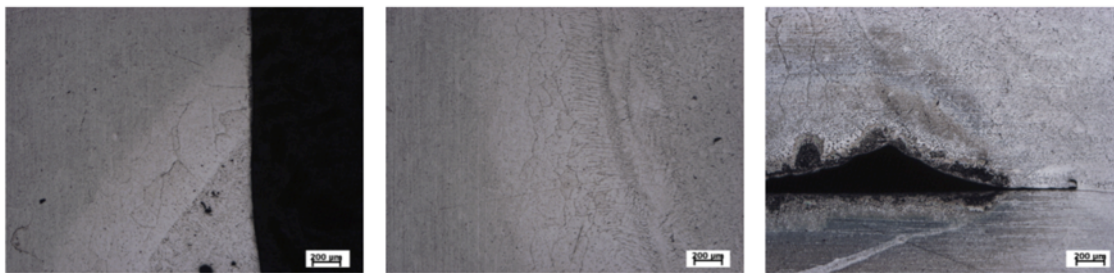


Obr. 63 Mikroskopické snímky vzorku B1 z 1. série, umístění podle obr. 61 - zleva: 5, 7, 8 [zdroj vlastní]

- Na Obr. 63 (1) je vidět studený spoj klasifikovaný podle ČSN EN ISO viz (kapitola 5).

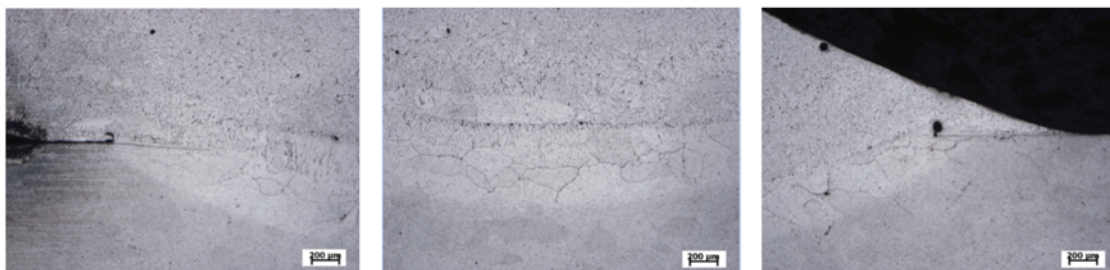


Obr. 64 Schématické zobrazení místa snímků vzorku A2 z 3. série [zdroj vlastní]

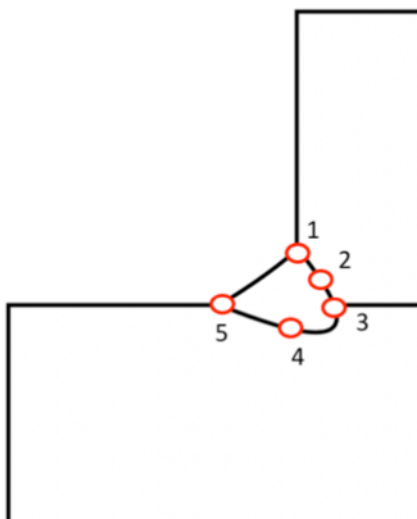


Obr. 65 Mikroskopické snímky vzorku A2 z 3. série, umístění podle obr. 64 - zleva: 1, 2, 3 [zdroj vlastní]

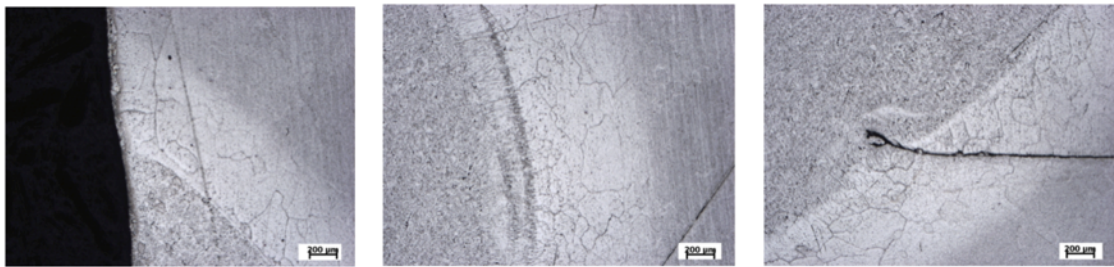
- I přes splnění všech předepsaných parametrů u posledního zkušebního kusu je možný vznik vad, jako je na Obr. 65 (3). Tato vada vznikla vlivem zručnosti svářeče a zároveň je neúmyslně zvýrazněna procesem leptání.



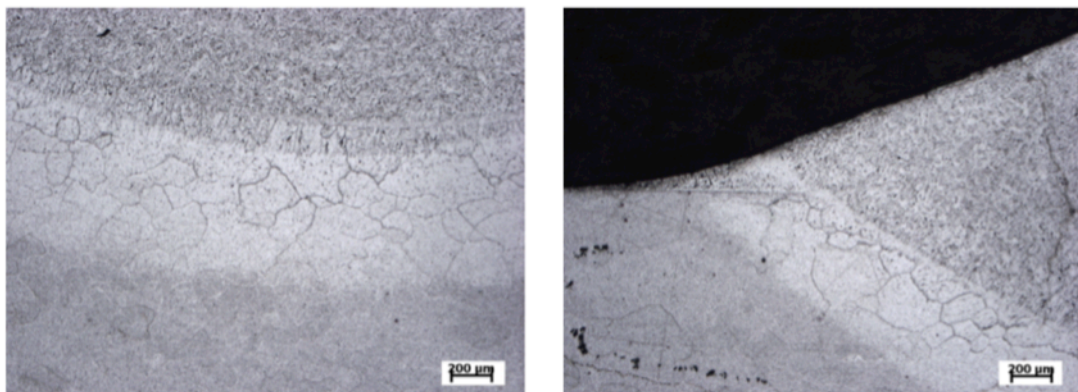
Obr. 66 Mikroskopické snímky vzorku A2 z 3. série, umístění podle obr. 64 - zleva: 4, 5, 6 [zdroj vlastní]



Obr. 67 Schématické zobrazení místa snímku vzorku B1 z 3. série [zdroj vlastní]



Obr. 68 Mikroskopické snímky vzorku B1 z 3. série, umístění podle obr 67 - zleva: 1, 2, 3 [zdroj vlastní]



Obr. 69 Mikroskopické snímky vzorku B1 z 3. série, umístění podle obr. 67 - zleva: 4, 5 [zdroj vlastní]

Vyhodnocení mikroskopických snímků

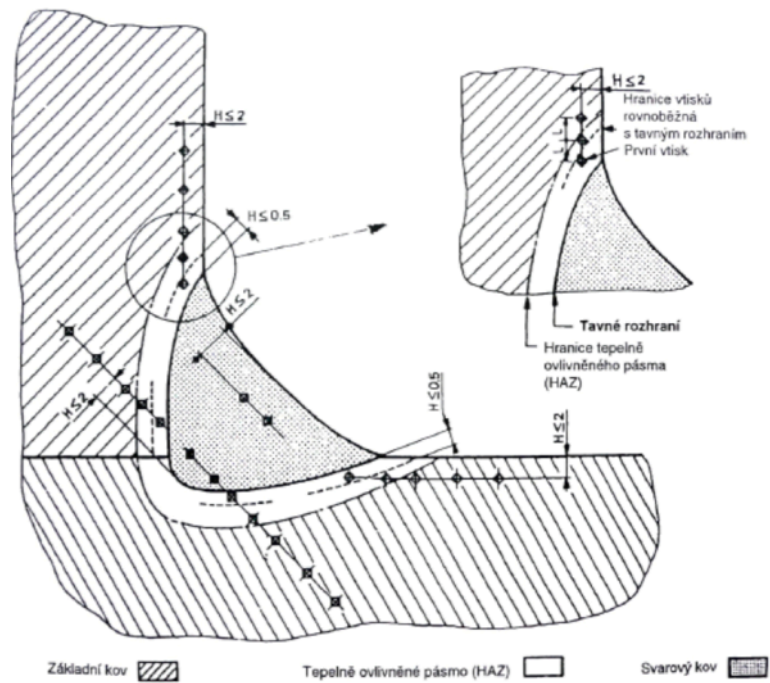
Z dosažených makroskopických a mikroskopických materiálů je zřejmé, že u prvního zkušebního kusu nebyl dodržen správný svařovací postup a byla vyhodnocena celá řada vad, které jsou nepřijatelné. Předpoklad vzniku vad mohl být např. nepoužití předehřevu, zručnost svářeče, nevhodně zvolený přídatný materiál nebo nevhodné svařovací parametry. Např. (Obr. 62) zobrazuje nepřijatelné trhliny ve struktuře svaru v TOO mezi ZM 1 a ZM 2. Na základě zjištění těchto vad byl upraven svařovací postup, ale výsledky druhého zkušebního kusu nevykazovaly výrazné zlepšení kvality svarového spoje. Proto byl navrhnut třetí postup, u kterého se dodržely všechny nově předepsané parametry, včetně relativně vysoké hodnoty předehřevu (350°C kvůli tloušťce ZM 2 - 20mm). Celý proces třetího zkušebního kusu, jak již bylo zmíněno, byl pod dozorem oprávněné osoby.

8.6 Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti byla též vytvořena v prostorách fakulty strojní ČVUT. Tvrdost byla měřena pomocí tvrdoměru IndentaMet 1104, Vickers, od výrobce Buehler. Způsob měření tvrdosti viz (Obr. 70).

Tabulka 13 Průměrné naměřené hodnoty tvrdosti podle Vickerse [zdroj vlastní]

Tvrdosti HV1				
Vzorek	A1	A2	B1	B2
ZM 1	41,6	44,2	49,9	53,1
	44,7	46,3	51,6	53,3
	42,2	46,4	51,4	52,8
	<u>∅ 42,8</u>	<u>∅ 44,2</u>	<u>∅ 50,9</u>	<u>∅ 53,06</u>
TOO 1	43,3	45,2	61,7	60,3
	45,0	45,9	66,2	63,1
	48,0	45,6	70,4	72,3
	<u>∅ 45,4</u>	<u>∅ 45,5</u>	<u>∅ 66,1</u>	<u>∅ 65,2</u>
SK	56,8	49,1	60,4	62,7
	55,5	50,5	61,2	66,1
	60,6	53,6	63,2	66,7
	<u>∅ 57,6</u>	<u>∅ 51,06</u>	<u>∅ 61,6</u>	<u>∅ 65,1</u>
TOO 2	42,1	40,3	52,2	55,3
	46,3	42,1	51,4	52,0
	46,6	47,3	66,7	65,6
	<u>∅ 45</u>	<u>∅ 43,2</u>	<u>∅ 56,7</u>	<u>∅ 57,6</u>
ZM 2	49,2	43,9	48,6	49,3
	46,7	48,3	51,5	55,8
	49,9	48,2	50,7	50,4
	<u>∅ 48,6</u>	<u>∅ 46,7</u>	<u>∅ 50,2</u>	<u>∅ 51,8</u>



Obr. 70 Rozmístění vtisků dle ČSN EN ISO 9015-2 [29]

Vyhodnocení zkoušky tvrdosti

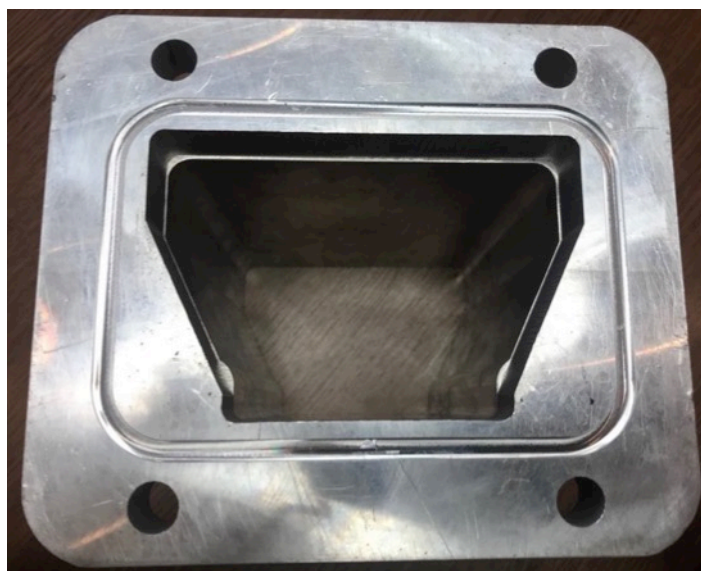
Vzorky A1 a A2 jsou ze třetího zkušebního kusu, který byl předeřán na hodnotu 350°C. Podle Tabulky 13 je možné identifikovat pokles tvrdosti neboli odpevnění Al slitiny vlivem předeřevu.

9 VYHODNOCENÍ

Postupným vyhodnocováním vad a úprav svařovacích postupů bylo docíleno optimálního návrhu svařovacího postupu, podle kterého byl zhotoven poslední zkušební kus. Parametry tohoto zkušebního kusu (koncová část kolektoru - čelo, profil) jsou vyhovující z hlediska radiografické kontroly, makrostruktury, mikrostruktury a v neposlední řadě i ve zkoušce tvrdosti. Jedná se o atypický (nenormalizovaný) díl, u kterého se kladou vysoké nároky na zručnost svářeče, kvůli geometrickému tvaru profilu a rozdílným tloušťkám.

Ačkoliv tato práce pojednává o problematice tlakových nádob ze slitin hliníku, kolektor není klasifikován jako tlaková nádoba, protože neskladuje produkt a neprobíhají zde žádné revize. Neprobíhá zde běžně ani zkouška prozářením, protože je kolektor řešen konstrukčně tak, aby nedošlo k provaření (natavení) vnitřní hrany viz (Obr. 71). Důvodem je možnost kontaminace produktu se svarovým kovem. Musí být však dimenzován na jmenovitý tlak 10 barů, kterého se může docílit při napuštění produktu do kolektoru. Materiály běžně používané na výrobu tlakových nádob ze slitin hliníku jsou stejné, jako jsou materiály používané na výrobu kolektorů. [31]

Jednotlivé vzorky se od sebe liší hlavně výskytem trhlin, které jsou u prvního zkušebního kusu nepřijatelné. Řešením na odstranění těchto trhlin je vhodně zvolený svařovací postup se správnými svařovacími parametry a teplotním cyklem, správně zvoleným přídatným materiálem a hlavně také výše zmíněnou zručností svářeče. Na základě provedeného experimentu a vyhodnocených zkoušek bylo možné sestavit pWPS s vyhovujícími parametry, které při svaření a odzkoušení za požadovaného dozoru inspekčního orgánu může vést k vytvoření požadované kvalifikace WPS.



Obr. 71 *Nenatavené vnitřní hrany kolektoru [zdroj vlastní]*



PWPS Welding Procedure Specification
Specifikace svařovacího postupu

WPS No./č.: **WPS FW - 5 Verteiler 1**
Date/Datum: 26.6.2018

Rev.: **0**
Pg./Str.: 1/1

Welding Process/Metoda: 1. 141 2.	Supporting/Související WPQR:
Type of Weld/Typ svaru: FILET WELD / KOUTOVÝ SVAR	Application/Aplikace: ČSN EN ISO 15614 - 2
Backing/Podložka: N.	
Other/Ostatní:	

Base metal / Základní materiál:			
Material 1: AIMgSi0,5F22	Group/Sk.: 1	Outside Dia./Vnější ϕ : profilrohr mm	Thickness/Tloušťka: 8-14 mm
to/k Material 2: AIMgSi0,5	Group/Sk.: 1	Outside Dia./Vnější ϕ : plate mm	Thickness/Tloušťka: 20 mm
Remark/Poznámka:			

Filler Material / Svařovací materiál:				Gas / Plyn:			
Classification: 1. ČSN EN ISO 18273 2.				%	l/min	%	l/min
Klasifikace: S Al 5183				Shielding/O. svaru: 1. 99,998%Ar	10-12 2.		
Designation 1. AIMg4,5Mn20,7 2.				Backing/O. kořene: 1. 99,998%Ar	10-12 2.		
Označení: OK Tigrod 5183				Trailing/Dodatečná: 1. N.	2.		
Size/Průměr: 1. 3,2 mm 2.				Remark/Poznámka:			
Name-Type of Flux/Jméno-typ tavidla: N.				Ar 4.8			
Drying of F.M./Sušení svař. mat.: 1. N. 2.				Ar 4.8			
Replace/Náhrada: 1. NE 2.				Position / Pozice:			
Remark/Poznámka:				Groove/Do úkosu: 1. N. 2.			
				Filler/Koutový: 1. PA, PB 2.			

Joint Design / Tvar spoje: **a = 5 mm** root spacing / kořenová mezera: 0+0,5 mm

Welding Sequences / Postup svařování:

Preheat / Předehřev:						
Preheat Temp./Teplota předehřevu: 350 °C	Interpass: N. °C	Post Heating/Dohřev: N. °C h	Cooling After W./Ochlazení po svař.: still air	Temp. Control/Kontrola teploty:	Remark/Poznámka:	
klidný vzduch						

Post Weld Heat Treatment / Tepelné zpracování po svařování:						
Type/Typ: N.	Temperature/Teplota: °C	Time/Čas: min.	Heating Rate/Rychlost ohřevu: °C/h	Cooling Rate/Rychlost ochlazování: °C/h	Remark/Poznámka:	

Technique / Technika svařování:						
Tungsten El./Mořframová elektroda: ϕ 3,2 mm	Type - N.	Type of Bead/Tvar houseniky: 1. string-rovná 2.				
Edge Preparation/Připrava úkosu: mechanical - mechanicky		Weaving / Rozkyv: 1. max 3x ϕ electrode 2.				
Method of Cleaning/Metoda čištění: mechanical - mechanicky		Pulsing/Pulzace: 1. ano nebo ne 2.				
Method of Back Gouging/Drážkování kořene: N.		Oscillator/Oscilace: 1. N. 2.				
Remark/Poznámka:						

Welding Parameters / Svařovací parametry:								
Layer(s) Vrstva	Process Metoda	Filler Material/Svařovací materiál		Type/Polarity Typ /Polarita	Amperage/ Proud (A)	Voltage/Napětí (V)	Wire speed (m/min) Rychl. drátu (m/min)	Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)
		ϕ (mm)	Classification/Klasifikace					
1	141	3,2	OK Tigrod 5183	AC (~)	190-260	12	5:51	

Remarks / Poznámky:

JE MOŽNÉ KÝVAT A NECHAT PŘIJATELNĚ PŘEDBĚHNOUT LÁZEŇ PŘED OBLOUK

NASTAVENÍ STABILITY SVAŘOVACÍHO PROCESU :
NAPĚTÍ NASTAVIT NA RYCHLOSTNÍ PROCES HSW ESAB = TAK HODNĚ, AŽ JE ROZSTŘÍK PŘIJATELNÝ
SVAŘOVACÍ RYCHLOST PŘÍSPŮSOBIT MNOŽSTVÍ ODTAVENÉHO SVAROVÉHO KOVU = ZMENŠENÍ DEFORMACÍ
A VELIKOST SVARU ODPOVÍDÁ POŽADAVKŮM (+ POKUD MOŽNO NEPŘEVÝŠENÝ, BEZ ŽAPALŮ)

Prepared (Name, Date, Signature): Matěj Pertlík 26.6.2018 Approved (Name, Date, Signature): Miroslav Fišer 26.6.2018
 IWT

Obr. 72 Protokol pWPS [zdroj vlastní]

10 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce popisuje problematiku svařování elektrickým obloukem materiálů na bázi hliníku. Jaké druhy materiálů jsou vhodné pro výrobu tlakových nádob a které metody jsou z hlediska produktivity a zároveň dosažení kvality nejpříjemnější. Následuje podrobná charakteristika slitin hliníku a jejich svařitelnost, včetně popisu kvalifikace postupu svařování a kvalifikace personálu. Výsledkem experimentální části je navržení vhodného odzkoušeného postupu svařování pro konkrétní součást a vystavení pWPS v závislosti na jednotlivých NDT a DT zkouškách. Byly provedeny normou požadované kvalifikační zkoušky: VT, PT, a zkoušky makro a mikrostruktury. Tyto zkoušky byly doplněny o další zkoušky: RT, zkouška tvrdosti. Výše zmíněné zkoušky jasně definují dostatečnou kvalitu svarů a na jejich základě bylo možné regulovat parametry svařovacího postupu až k finálnímu výsledku.

SEZNAM LITERÁRNÍCH ZDROJŮ

- [1] KOLAŘÍK PH.D., IWE, doc. Ing. Ladislav. Svařování hliníku a jeho slitin při výrobě tlakových nádob. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie. Hradec Králové, 2018.
- [2] KOLAŘÍK PH.D., IWE, doc. Ing. Ladislav. *1-uvod-tsv-2016: Studijní materiály předmětu technologie svařování* [online]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2016 [cit. 2018-08-14]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/predmety/detail/111>
- [3] MARTINEC, Ing. Jiří a Ing. Aleš PLÍHAL. Hliník a jeho slitiny. Vamberk.
- [4] KOLAŘÍK PH.D., IWE, doc. Ing. Ladislav. *3-MMA-tsv-2016: Studijní materiály předmětu technologie svařování* [online]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2016 [cit. 2018-08-14]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/predmety/detail/111>
- [5] MMA (Manual Metal Arc Welding). Automig.cz [online]. [cit. 2018-08-10]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/obalena-elektroda-mma/>
- [6] KOLAŘÍK PH.D., IWE, doc. Ing. Ladislav a Ing. Vladislav KOLÁŘ. Metody svařování hliníkových slitin. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2018.
- [7] KOLAŘÍK PH.D., IWE, doc. Ing. Ladislav. *7-mig_mag-tsv-2016: Studijní materiály předmětu technologie svařování*[online]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2016 [cit. 2018-08-14]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/predmety/detail/111>
- [8] MIG/MAG (CO2). Automig.cz [online]. [cit. 2018-08-12]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/>
- [9] Principy 4-kladkových podavačů. *Svarbazar.cz* [online]. 2008 [cit. 2018-08-12]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008020702>
- [10] KOLAŘÍK PH.D., IWE, doc. Ing. Ladislav. *6-Tig-tsv-2016: Studijní materiály předmětu technologie svařování* [online]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2016 [cit. 2018-08-14]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/predmety/detail/111>

-
- [11] Svařovací metoda TIG (Tungsten Inert Gas). *Alfin-trading.cz* [online]. 2018 [cit. 2018-08-12]. Dostupné z: <https://www.alfin-trading.cz/o-svarovani-tig>
- [12] MARTINEC, Jiří. Svařování Al -SVV Firemní materiály ESAB. Praha, 2006.
- [13] TRUXOVÁ, Eva. Výroba hliníku elektrolýzou. *Slideplayer.cz* [online]. [cit. 2018-08-12]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3092077/>
- [14] ŠIMEČEK, Ondřej. *Výroba hliníku elektrolýzou* [online]. [cit. 2018-08-12]. Dostupné z: <http://mail.zsebenese.opava.cz/tabulka/al.html>
- [15] Hodnoty fyzikálních veličin vybraných kovů. *Tzb-info.cz* [online]. [cit. 2018-08-12]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/37-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-kovu>
- [16] KOLAŘÍK PH.D., IWE, doc.Ing. Ladislav a Ing. Vladislav KOLÁŘ. Vlastnosti a rozdělení hliníku a jeho slitin. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2018.
- [17] Schématické znázornění celého tepelného ošetření. *Alunet.cz* [online]. [cit. 2018-08-12]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/tepelne-zpracovani>
- [18] KOLAŘÍK PH.D., IWE A SPOL., doc.Ing. Ladislav. Konstrukce a navrhování svarových spojů kapitola 3.10. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2017.
- [19] KOLAŘÍK PH.D., IWE, doc.Ing. Ladislav. Svařitelnost hliníku a jeho slitin. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2018.
- [20] Značení neželezných kovů. *Online.ferona.cz* [online]. [cit. 2018-08-12]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/znaceni-nezelezných-kovu/?typ=2>
- [21] KOLAŘÍK PH.D., IWE, doc. Ing. Ladislav. *4-Ochranné-plyny-tsv-2016: Studijní materiály předmětu technologie svařování* [online]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2016 [cit. 2018-08-14]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/predmety/detail/111>
- [22] KOLAŘÍK PH.D., IWE, doc.Ing. Ladislav a Ing. Vladislav KOLÁŘ. *Svařitelnost hliníku a jeho slitin*. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2018.

-
- [23] ING. KOLÁŘ, Vladislav. Netavitelná vrstva oxidu hlinitého. *Cws-anb.cz* [online]. 2015 [cit. 2018-08-12]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=502>
- [24] KOLÁŘ, Ing. Vladislav. Svařitelnost Al slitin v praxi. DOM ZO 13, 2014.
- [25] ČSN EN ISO 6520 - 1 - Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [26] Metalografie. *Ukmki.vscht.cz* [online]. [cit. 2018-08-12]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Metalografie%20I.pdf?redirected>
- [27] Zkoušky tvrdosti [online]. [cit. 2018-08-14]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [28] ČSN EN ISO 15613: Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Kvalifikace na základě předvýrobní zkoušky svařování. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [29] KOLÁŘÍK PH.D., IWE, doc. Ing. Ladislav. Svařitelnost konstrukčních ocelových materiálů. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2018 [cit. 2018-08-14].
- [30] ČSN EN ISO 15614-2- Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 2: Obloukové svařování hliníku a jeho slitin. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [31] Firemní dokumentace Haar CZ s.r.o, Praha 2018
- [32] KOLÁŘ, Ing. Vladislav. Hliník a jeho slitiny, Kurz pro IWT,IWE. DOM ZO 13, 2018.
- [33] KOLÁŘ, Ing. Vladislav. 02 Svařování Al slitin v praxi. DOM ZO 13, 2018.
- [34] Přídavný drát OK Tigrod 5183. *Okweld.cz* [online]. [cit. 2018-08-12]. Dostupné z: http://www.okweld.cz/PDF/draty-wig-tig/hlinik/OK_TIGROD_5183.pdf