

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**VLIV TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ NA MECHANICKÉ
VLASTNOSTI SPOJŮ Z HLINÍKOVÝCH SLITIN**

**THE INFLUENCE OF FUSION WELDING ON MECHANICAL
PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOY JOINTS**

AUTOR: Miroslav Chobotský

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D., IWE

PRAHA 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chobotský** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **466549**
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:

Vliv tavného svařování na mechanické vlastnosti spojů z hliníkových slitin

Název bakalářské práce anglicky:

The influence of fusion welding on mechanical properties of aluminum alloy joints

Pokyny pro vypracování:

- Rozbor vlastností hliníku a jeho slitin
- Popis nepoužívanějších metod svařování hliníkových slitin
- Svařitelnost hliníkových slitin a analýza základních problémů svařitelnosti
- Návrh experimentu na posouzení vlivu svařování na mechanické vlastnosti svarových spojů
- Vyhodnocení experimentu a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Weman Klas: Welding proces handbook, second edition, Woodhead publishing, 2012, ISBN 978-0-85709-510-7
[2] Mathers Gene: The welding of aluminium and its alloys, CRC Press, 2002, ISBN 0-8493-1551-4
[3] Kolařík, L a kolektiv: Konstrukce a navrhování svarových spojů: učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT), ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

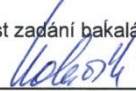
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Karel Kovanda, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**



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



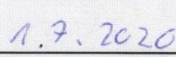
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



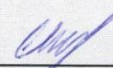
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

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.



1.7.2020
Datum převzetí zadání



Převzal studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma **Vliv tavného svařování na mechanické vlastnosti spojů z hliníkových slitin** vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava Kolaříka, Ph.D., IWE s použitím literárních pramenů a zdrojů informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Jméno, Příjmení

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi Ph.D., IWE za odborné vedení, cenné rady a čas, který mi věnoval v průběhu zpracování bakalářské práce. Dále děkuji doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE a Ing. Vítu Novákovi za výpomoc v laboratořích. V neposlední řadě patří obrovské poděkování mé rodině za podporu během studia.

Anotační list

Jméno autora: Miroslav Chobotský

Název bakalářské práce: Vliv tavného svařování na mechanické vlastnosti spojů z hliníkových slitin

Anglický název bakalářské práce: The influence of fusion welding on mechanical properties of aluminium alloy joints

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

Ústav: Ústav strojírenské technologie

Rok vyhotovení: 2020

Bibliografické údaje: počet stran: 79

počet obrázků: 61

počet tabulek: 23

Anotace:

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem zvolených svařovacích parametrů tavného svařování na mechanické vlastnosti svarových spojů u hliníkových slitin. Teoretická část je věnována vlastnostem hliníku a hliníkových slitin, jejich rozdělení, svařitelnosti, hlavním metodám svařování těchto slitin, kontrole a zkoušení svarových spojů. Při experimentu byly při odlišných svařovacích parametrech, metodou MIG, svařeny tupé I svary na tloušťce 2 mm ze základního materiálu z nevytvrditelné slitiny hliníku EN AW 5754 H22 (AlMg3) za použití přídavného materiálu S Al 5356 (AlMg5Cr). Následně byly odebrány vzorky, vyhodnoceny hlediska změny mechanických vlastností (provedena tahová zkouška, zkouška makrostruktury a tvrdosti).

Klíčová slova: Hliník, hliníkové slitiny, rozdělení hliníkových slitin, vytvrditelné hliníkové slitiny, nevytvrditelné hliníkové slitiny, svařitelnost hliníkových slitin, destruktivní zkoušky svaru

This bachelor thesis deals with the influence of selected welding parameters of fusion welding on the mechanical features of welded joints in aluminum alloys. The theoretical part is devoted to the features of aluminum and aluminum alloys, their distribution, weldability, the main methods of welding of these alloys, inspection and testing of welded joints. In the experiment, at different welding parameters, two plates of aluminum alloy base material EN AW 5754 H22 (AlMg3) were butt-welded together using an additional material S Al 5356 (AlMg5Cr). Subsequently, samples were taken and tensile test, macrostructure and hardness test were performed.

Key words: aluminium, aluminium alloy, distribution of aluminum alloys, hardenable aluminum alloys, non-hardenable aluminum alloys, weldability of aluminum alloys, destructive weld tests

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Úvod | 9 |
| 2. | Hliník | 10 |
| 3. | Hliníkové slitiny a jejich rozdělení | 14 |
| 3.1 | Slitiny určené k tváření | 16 |
| 3.1.1 | Slitiny nevytvrditelné | 16 |
| 3.1.2 | Slitiny vytvrditelné | 17 |
| 3.2 | Slévárenské slitiny | 19 |
| 3.3 | Rozdělení hliníkových slitin do skupin podle svažitelnosti | 19 |
| 4. | Značení hliníkových slitin | 20 |
| 4.1 | Značení tvářených hliníkových slitin | 20 |
| 4.2 | Značení slévárenských hliníkových slitin | 21 |
| 5. | Svažitelnost hliníkových slitin | 22 |
| 5.1 | Povrchová vrstva Al_2O_3 | 22 |
| 5.1.1 | Princip čistícího účinku | 23 |
| 5.2 | Pórovitost | 25 |
| 5.3 | Snížení pevnosti v důsledku svařování | 26 |
| 5.4 | Vznik trhlin | 28 |
| 5.5 | Neměnnost barvy při ohřevu | 30 |
| 6. | Metody svařování | 30 |
| 6.1 | Metoda MIG | 30 |
| 6.2 | Metoda TIG (WIG) | 33 |
| 7. | Ochranné atmosféry | 35 |
| 7.1 | Argon | 35 |
| 7.2 | Helium | 36 |
| 7.3 | Směs argon + helium | 37 |
| 8. | Kontrola svarových spojů | 37 |
| 8.1 | Nedestruktivní zkoušky | 37 |
| 8.1.1 | Vizuální zkouška | 38 |
| 8.1.2 | Zkouška kapilární (penetrační) | 38 |
| 8.1.3 | Zkouška magnetická prášková | 39 |
| 8.1.4 | Zkouška ultrazvukem | 39 |
| 8.1.5 | Zkouška prozářením | 39 |
| 8.2 | Destruktivní zkoušky | 39 |

| | | |
|--------|---|----|
| 8.2.1 | Zkouška tahem | 40 |
| 8.2.2 | Zkouška rázem v ohybu..... | 42 |
| 8.2.3 | Zkouška tvrdosti | 44 |
| 8.2.4 | Zkoušky metalografické (makroskopická a mikroskopická)..... | 48 |
| 8.2.5 | Zkouška lámavosti..... | 49 |
| 9. | Kvalifikace svařovacího procesu..... | 50 |
| 10. | Praktická část | 51 |
| 10.1 | Základní a přídavný materiál..... | 51 |
| 10.2 | Rozměry vzorku pro svařování..... | 52 |
| 10.3 | Pracoviště pro svařování..... | 52 |
| 10.3.1 | Svařovací zdroj Elmatech MIDI MIG 300/800 AC/DC..... | 53 |
| 10.3.2 | Manipulátor Weldycar NV..... | 53 |
| 10.3.3 | Přípravek pro upnutí | 54 |
| 10.4 | Svařování vzorků | 55 |
| 10.5 | Řezání vzorků | 58 |
| 10.6 | Tahová zkouška | 60 |
| 10.7 | Zkouška makrostruktury | 64 |
| 10.8 | Zkouška tvrdosti | 67 |
| 11. | Závěr..... | 69 |
| 12. | Seznam použité literatury..... | 70 |
| 13. | Seznam použitých zkratk a symbolů | 74 |
| 14. | Seznam obrázků | 76 |
| 15. | Seznam tabulek..... | 79 |

1. Úvod

Hliník je třetí nejrozšířenější prvek v zemské kůře, kde se vyskytuje ve formě sloučenin. Podle posledních dostupných údajů tvoří hliník 7,5–8,3% zemské kůry [1]. Slitiny hliníku jsou v dnešní době po slitinách železa nejpoužívanější skupinou kovů. Každý kov má svou určitou výhodnou vlastnost, kterou se snažíme upřednostnit a využít v náš prospěch. Příznivou vlastností hliníku je především malá měrná hmotnost ($2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Z tohoto důvodu se řada součástí, u kterých je rozhodujícím faktorem hmotnost, vyrábí z hliníkových slitin, které nahrazují materiály s větší měrnou hmotností. Toho se využívá například u dopravních prostředků. Celková hmotnost dopravního prostředku se sníží, klesá tak spotřeba paliva a s tím spojené množství emisí vypuštěných do ovzduší.

Často je zapotřebí spojit součásti jednoduchých tvarů do tvarově složitějšího celku pomocí technologie nazývané svařování, při které vytvoříme nerozebíratelný spoj. Během svařování hliníku, respektive hliníkových slitin, ovlivňuje výslednou kvalitu svarového spoje řada faktorů, kterým je potřeba věnovat zvýšenou pozornost. Jeden z nejdůležitějších faktorů, který musíme sledovat je pokles pevnosti v tepelně ovlivněné oblasti a ve svarovém kovu vlivem svařování. U hliníkových slitin ve vytvrzeném stavu je tento pokles pevnosti o mnoho výraznější než u slitin v nevytvrzeném stavu.

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit, jak velký vliv má změna jednotlivých svařovacích parametrů (rychlost posuvu svařovacího hořáku, velikost svařovacího proudu) na mechanické vlastnosti běžně svařované nevytvrditelné hliníkové slitiny AlMg3.

2. Hliník

Hliník (chemická značka Al, latinsky Aluminium) je neželezný kov, který se díky svým vlastnostem používá v dnešní době ve všech průmyslových oblastech. Jeho světová produkce každoročně narůstá (viz obr. 1). Vyznačuje se bílým až stříbrně lesklým zbarvením a taví se při teplotě 660,3 °C.

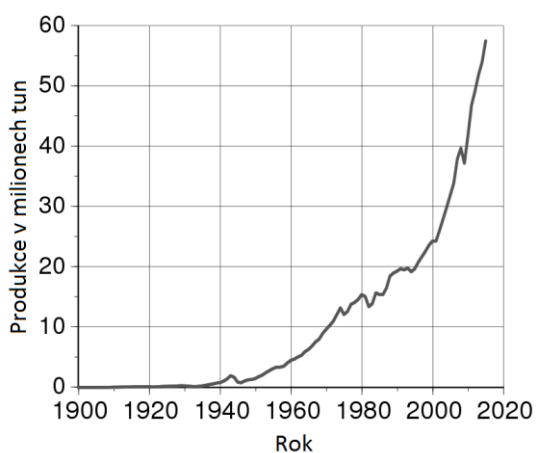
Mezi jeho důležité vlastnosti patří malá hodnota měrného elektrického odporu (0,027 $\mu\Omega\cdot\text{m}$ při 0 °C), tepelná vodivost (229 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) s relativně vysokou hodnotou měrného tepla (896 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) i relativně přijatelná cena. Malá měrná hmotnost (2700 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) ho řadí mezi tzv. „lehké kovy“. Dále se vyznačuje dobrou korozivzdorností, kterou způsobuje tenká vrstva Al_2O_3 na jeho povrchu, která vzniká při kontaktu hliníku se vzdušným kyslíkem. Další výhodou je i recyklovatelnost. [2] [3]

Al krystalizuje v kubické soustavě s plošně středěnou mřížkou K12. Z tohoto důvodu má dobré plastické vlastnosti za tepla i za studena. [4]

Jeho nevýhodou oproti jiným technickým kovům jsou horší mechanické vlastnosti jako je např. pevnost v tahu (70 až 190 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$). Modul pružnosti je pouhých 66 000 až 68 000 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ (viz tab. 1). Z těchto důvodů se s čistým hliníkem ve strojírenství a při výrobě různých konstrukcí spíše nesetkáme. Používají se jeho slitiny. Mechanické vlastnosti lze zlepšit tepelným zpracováním či přidáním legujících prvků (Cu, Mg, Si, Zn, Mn) nebo mikrolegujících prvků (Be, B). [2] [3]

Tabulka 1 Základní fyzikální a mechanické vlastnosti hliníku [3]

| VLASTNOST | HODNOTA |
|--|-----------------|
| Teplota tavení [°C] | 660,3 |
| Teplota varu [°C] | 2500 |
| Měrná hmotnost při 20 °C [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] | 2700 |
| Měrná tepelná kapacita při 20 °C [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] | 896 |
| Modul pružnosti v tahu [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$] | 66 000 – 68 000 |
| Modul pružnosti ve smyku [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$] | 26 000 – 28 000 |
| Pevnost v tahu [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$] | 70 – 190 |
| Tepelné vodivosti při 20 °C [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] | 229 |
| Měrný elektrický odpor při 0 °C [$\mu\Omega\cdot\text{m}$] | 0,027 |



Obrázek 1 Světová produkce hliníku od roku 1900 [5]

Hliník je nejrozšířenější kov v zemské kůře. Ve volné přírodě se s hliníkem setkáme jen ve formě sloučenin. Vyskytuje se v mnoha nejrůznějších minerálech jako je např. boehmit, gibbsit, diaspor, korund, spinel a mnoho dalších. Základní surovinou na bázi Al je hornina bauxit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (viz obr.2).

Čištění bauxitu probíhá většinou pomocí Bayerovy metody, kdy z rudy získáváme Al_2O_3 . Následnou elektrolýzou potřebujeme získat z Al_2O_3 čistý hliník (o čistotě okolo 99,5 %). Nečistoty v něm obsažené jsou především železo a hořčík jako pozůstatky z bauxitu. Do elektrolyzéru, ve kterém je hlavní složkou elektrolytu roztavený kryolit, postupně přidáváme a rozpouštíme Al_2O_3 . Na katodě se nám vylučuje téměř čistý hliník. Následnými speciálními rafinačními metodami můžeme čistotu ještě zvýšit.

Podle bohatosti bauxitu je na získání kilogramu hliníku zapotřebí čtyři až šest kilogramů této rudy. Naleziště bauxitu jsou především v tropech a subtropích. [4]



Obrázek 2 Bauxit – základní minerál pro výrobu Al [6]

Kryolit (Na_3AlF_6) je velice významný minerál, který se používá jako tavidlo pro snížení teploty tání bauxitu při elektrolytické výrobě hliníku. Jeho naleziště jsou především v Severní Americe a Rusku. [7]



Obrázek 3 Kryolit – minerál používaný při elektrolytické výrobě Al [7]

Hliník a jeho slitiny mají díky svým vlastnostem širokou škálu použití. Nejvíce hliníku ze světové produkce je spotřebováno ve strojírenství na výrobu dopravních prostředků, a to především při výrobě letadel, v automobilovém průmyslu a při výrobě kolejových vozidel.

Čím dál častěji se s ním setkáváme v oblasti stavebnictví. Vyrábí se z něho funkční i dekorativní prvky domů, nákupních center, kancelářských budov či nádraží jako jsou tvarované profily, trubky, střešní krytina, profily pro výrobu oken nebo dveří. Řemeslníci na stavbách ocení lehká hliníková trubková lešení a žebříky.

Hliník si našel taky své nenahraditelné místo v potravinářském průmyslu. Velmi rozšířeným a oblíbeným produktem jsou tenké fólie, které se používají k balení potravin (čokolády, cukrovinky, sýry, tuky atd.) a tím je chrání před účinky světla a vlhkostí vzduchu. Jsou hygienicky nezávadné, bez zápachu, lehké a odolné proti vysokým teplotám při pečení a proti nízkým teplotám při zamražení potravin. Dalším běžným produktem jsou hliníkové mísy a tácy nebo plechovky pro uchování nápojů a potravin.

Dále se využívá v hutnictví, chemickém průmyslu (pro svou chemickou odolnost) a jako čistý Al v elektrotechnice a energetice. [4]



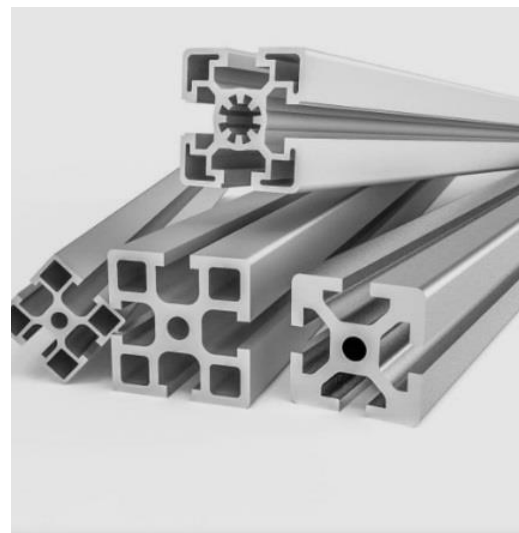
Obrázek 4 Nápoje v plechovkách z hliníku [8]



Obrázek 5 Alobal - hliníková fólie [9]



Obrázek 6 Trojdílný hliníkový žebřík [10]



Obrázek 7 Hliníkové profily [11]

3. Hliníkové slitiny a jejich rozdělení

Z důvodu relativně malé pevnosti a tvrdosti čistého hliníku se spíše využívá jeho slitin s ostatními prvky, které tyto vlastnosti zlepšují. I další vlastnosti slitin je možné rozvinout nebo potlačit přidáním vhodných přísadových prvků a dobře zvolenou výrobní metodou.

Z chemického hlediska se slitiny skládají ze základního prvku, hlavních přísad, vedlejších přísad a prvků doprovodných.

Základní prvek

Je to prvek, který je ve slitině zastoupen ve většinovém množství a určuje druh slitiny. Zde se jedná o hliník, jehož základní vlastnosti byly popsány v kapitole 1.

Hlavní přísady

Jedná se o prvky, které jsou prvořadě pro stanovení základních vlastností slitin. Společně se základním prvkem nám určují typ slitiny. Hned po základním prvku je ve slitině nejvíce zastoupen. U hliníkových slitin jsou nejběžnějšími přísadami měď (Cu), křemík (Si), hořčík (Mg) a v menším množství také zinek (Zn) nebo mangan (Mn).

Měď (Cu)

U hliníkových slitin je to právě měď, která bývá zastoupena nejčastěji. Zvyšuje pevnost, tvrdost a výrazným způsobem zlepšuje obrobitelnost. Mezi nevýhody slitin s mědí patří zhoršená odolnost vůči korozi nebo snížená tažnost, a především velmi špatná svařitelnost. Tyto slitiny se nedají využít ani v potravinářském průmyslu (max. 0,05 % Cu).

Křemík (Si)

Obsah křemíku ve slitinách zlepšuje slévárenské vlastnosti. Mechanické vlastnosti se zlepšují přidáním menšího množství legujících prvků (Cu, Ni a Mg). Slitiny s křemíkem jsou svařitelné.

Hořčík (Mg)

Díky obsahu hořčíku ve slitinách Al-Si můžeme provádět vytvrzování za tepla. Ve vytvrzeném stavu zvyšuje pevnost. Ve srovnání s Cu nesnižuje korozivzdornost. Slitiny s hořčíkem jsou vhodné pro svařování.

Mangan (Mn)

Jeho hlavní funkcí ve slitinách je kompenzace nevhodného dopadu železa. Dochází ke snížení křehkosti. Na slévárenské vlastnosti, v množství okolo 50 % obsahu železa, nemá téměř žádný vliv. Tyto slitiny jsou velmi dobře svařitelné.

Zinek (Zn)

Zinek není zcela obvyklý přísadový prvek. Zlepšuje obrobitelnost, tekutost slitin a jejich zabíhavost. Při vyšším obsahovém množství se zvyšuje pravděpodobnost na vznik trhlin. Slitiny hliníku a zinku jsou obtížně svařitelné.

Vedlejší přísady

Jedná se o chemické prvky, které především zlepšují mechanické vlastnosti slitin, umožňují jejich tepelné zpracování či vyrovnávají nechtěné účinky doprovodných prvků. Mezi hlavní představitele vedlejších přísadových prvků patří nikl (Ni) a Titan (Ti).

Nikl (Ni)

Nikl se do slitin přidává především z důvodu uchování dobrých mechanických vlastností i při zvýšených teplotách. Nikl nemá vliv na korozivzdornost ani obrobitelnost. S narůstajícím výskytem niklu dochází ke zhoršování slévárenských vlastností.

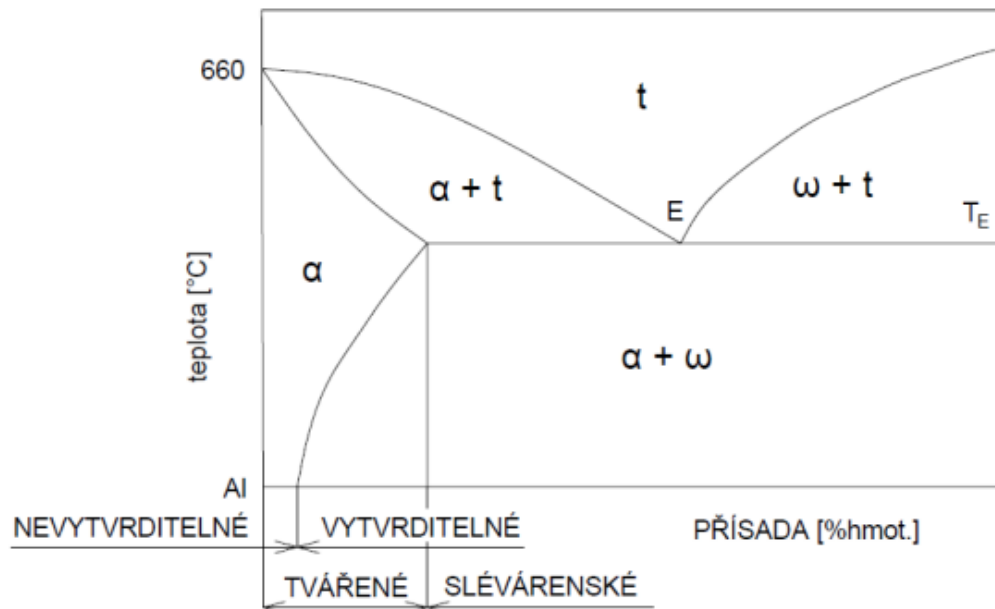
Titan (Ti)

Hlavním důvodem použití titanu ve slitinách hliníku je zjemnění zrnité struktury.

Doprovodné prvky

Jsou to takové chemické prvky, které se do slitin dostali nezáměrně. Jedná se o tzv. nečistoty, které zhoršují jejich vlastnosti (mechanické, chemické, technologické). Do slitin se většinou dostanou ze vsázky, vyzdívky pece, náradí, přetavovaného šrotu atd. V některých případech se do slitin přidávají i záměrně. Jedná se například o železo a vápník. Olovo, vizmut a kadmium výrazně zhoršují houževnatost. [12]

Slitiny hliníku rozdělujeme podle několika hledisek, avšak nejpoužívanější obecné rozdělení je podle způsobu zpracování, a to na slitiny určené k tváření a slévárenské slitiny (viz obr. 8). [2] [13]



Obrázek 8 Základní rozdělení hliníkových slitin [14]

3.1 Slitiny určené k tváření

Tyto hliníkové slitiny se vyznačují především menším obsahem legujících prvků. Podle způsobu tepelného zpracování je můžeme ještě dále dělit na nevytvrditelné a vytvrditelné.

3.1.1 Slitiny nevytvrditelné

Jedná se o slitiny, u kterých nelze tepelným zpracováním dosáhnout výrazného zlepšení pevnosti či tvrdosti nebo by toto zpracování bylo jen velmi málo efektivní. Avšak jejich vlastnosti můžeme zlepšit deformačním zpevněním (tvářením za studena). Patří sem slitiny Al-Mn a Al-Mg(-Mn). Obě tyto skupiny se vyznačují především dobrou odolností proti korozi a svařitelností.

Slitiny **Al-Mn** jsou nevytvrditelné slitiny kvůli malé rozpustnosti manganu v α fázi. Tyto slitiny obsahují maximálně 1,5 % Mn. Při obsahu více jak 2 % Mn dochází ke vzniku primárních krystalů Al₆Mn, které jsou příčinou zhoršení mechanických vlastností. Jsou velmi dobře svařitelné. Nejpoužívanější slitinou je AlMn1.

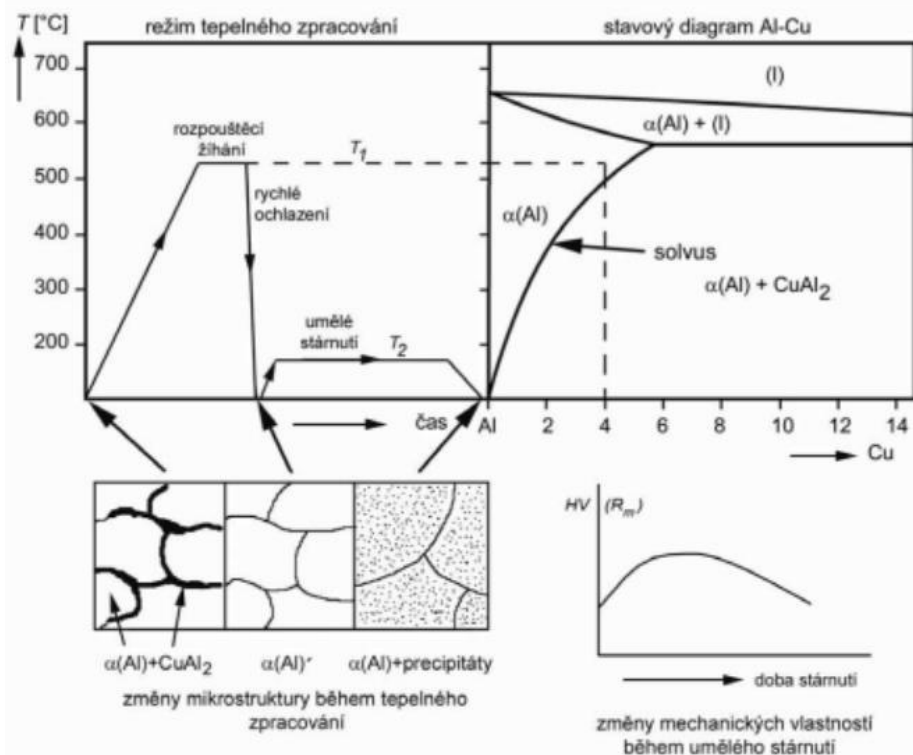
Slitiny **Al-Mg** se rovněž nevytvrzují, a to z důvodu neefektivnosti. Pouze malé zvýšení pevnosti s sebou přináší velké snížení tažnosti. Vyšší obsah než 7 % Mg zhoršuje tvářitelnost a korozivzdornost. Mimo této binární slitiny se především v zahraničí používá ternární slitina AlMg4,5Mn ke stavbě lodních konstrukcí z důvodu dobré odolnosti proti korozi v mořské vodě. Dalšími často používanými slitinami jsou AlMg2 v potravinářském a chemickém průmyslu a AlMg5 s vyšší pevností díky legování Mg na výrobu karosérií automobilů. [2]

3.1.2 Slitiny vytvrditelné

U vytvrditelných slitin můžeme díky tepelnému zpracování výrazně zvýšit pevnost a tvrdost při současném snížení tažnosti. Hlavní podmínkou vytvrzení slitin je existence tuhého roztoku s omezenou rozpustností, která klesá s teplotou. Je tedy nutná přítomnost některé přísady, která má dostatečně výraznou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$.

Vytvrzování (precipitační zpevnění) je komplexní proces tepelného zpracování, skládající se z několika na sebe navazujících fází, a to z rozpouštěcího žíhání, rychlého ochlazení a přirozeného či umělého stárnutí (viz obr. 9).

Princip vytvrzování spočívá v ohřevu na teplotu T_1 (470-530 °C podle typu hliníkové slitiny), kdy se získává homogenní tuhý roztok. Následuje prudké ochlazení do vody či oleje za vzniku přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})'$, kde je obsah legujícího prvku vyšší v porovnání s rovnovážnou rozpustností. Po ochlazení přichází na řadu přirozené stárnutí (při pokojové teplotě), které může trvat několik dní až měsíců nebo umělé stárnutí, což je zahřátí na teplotu T_2 (140-200 °C), trvá obvykle několik hodin. V tomto stádiu vytvrzování dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})'$, který souvisí s procesem zvaným precipitace. Jedná se o proces, kdy dochází k vyloučení velice malých částic (precipitátů) intermediálních fází. A protože jsou tyto precipitáty účinnou bariérou pro skluz dislokací, tak při jejich vzniku dochází ke zvýšení pevnosti a tvrdosti slitin. [2] [15] - viz. obr. 9



Obrázek 9 Postup precipitačního zpevnění slitiny AlCu4 [15]

Mezi nejvýznamnější představitele vytvrditelných slitin patří:

Al-Cu-Mg jsou známy pod názvem duraly. Množství jejich přísadových prvků je 1-6 % Cu a do 2 % Mg. Jejich výhodou jsou velmi dobré mechanické vlastnosti ($R_m = 400 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$). Dále se ale vyznačují horší odolností proti korozi z důvodu obsahu Cu. Jsou méně tvařitelné a obtížně svařitelné. Při vhodném obsahu Mg ve slitinách můžeme slitiny použít i při vyšších teplotách (do 300 °C). Slitiny mohou také obsahovat další legury (Al-Cu-Mg-Pb-Bi, Al-Cu-Mg-Si, Al-Cu-Mg-Ni atd.)

Al-Mg-Si neboli avialy jsou dalším představitelem vytvrditelných slitin. Po tepelném zpracování dosahují menší pevnosti ($R_m = 280 \text{ až } 350 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$) než Al-Cu-Mg. Oproti duralům mají o mnoho lepší odolnost proti korozi. Jejich výhodou je také dobrá elektrická vodivost. Jsou to materiály se zhoršenou svařitelností. Nejpoužívanější je AlMg_{0,5}Si_{0,5} (AlMg1Si1) pro výrobu tvarově složitých součástí a profilů pro stavbu kolejových vozidel.

Al-Zn-Mg (případně **Al-Zn-Mg-Cu** – tzv. superdural s pevností až 700 N·mm⁻²) jsou slitiny, které se používají především v leteckém a automobilovém průmyslu na výrobu velmi namáhaných součástí. Jejich nedostatkem je sklon ke korozi. Mezi nejběžnější patří AlZnMg1

a AlZnMg3. Z důvodu dosažení vysokého lesku se používají jako dekorativní prvky ve stavebnictví nebo automobilovém průmyslu. Jsou obtížně svařitelné.

Al-Li a Al-Li-X (X=Cu, Mg, Zr) jsou právě díky Li (lithium) velmi lehké vytvrditelné slitiny, které jsou v současnosti stále intenzivněji zkoušeny a vyvíjeny. Aplikují se především v leteckém a kosmickém průmyslu. Jejich největší nevýhodou je prozatím vysoká cena. [2] [15]

3.2 Slévárenské slitiny

Hliníkové slitiny určené pro odlitky obsahují ve většině případů větší množství legujících prvků. Oproti tvářeným slitinám nejsou tak tvárné a mají horší svařitelnost. Mezi jejich hlavní výhody patří zabíhavost do formy, menší výskyt vzniku trhlin za tepla a staženin. Mechanické vlastnosti odlitku nezávisí jen na chemickém složení, ale rovněž na použitém způsobu lití. Nejvyšší pevnosti dosáhneme po lití do kokil, po kterém následuje tepelné zpracování. Naopak u tlakového lití je tepelné zpracování nevhodné.

Al-Si (siluminy) patří k nejběžnější slitině pro odlitky. Vyznačuje se dobrou zabíhavostí a odolností proti trhlinám za tepla. Jedná se například o slitinu AlSi12.

Al-Mg (hydrionalium) je nejlepší slitina na odlitky. Její výhodou je výborná korozivzdornost. Jedna z nejpoužívanějších slitin je AlMg5 a AlMg9.

Al-Cu (duraluminium) se vyznačuje odolností proti opotřebení za vysokých teplot. Používá se na výrobu pístů spalovacích motorů. Např.: AlCu4MgTi.

Al-Zn se lehce tepelně zpracovává, vyznačuje se dobrou slévatelností, má dobré mechanické vlastnosti (AlZn5Mg). [2] [16]

3.3 Rozdělení hliníkových slitin do skupin podle svařitelnosti

Dalším způsobem, jak lze rozdělit hliníkové slitiny je rozdělení do skupin podle jejich svařitelnosti dle technické zprávy TNI CEN ISO/TR 15608 Svařování – Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin. Hliník a jeho slitiny jsou rozděleny do šesti skupin označených příslušným číslem. Do první skupiny (označení 21) se řadí čistý hliník s maximálním podílem nečistot do 1 % s nejlepší svařitelností. Do poslední skupiny (skupina 26) patří hliníkové slitiny s mědí, coby slitiny s nejhorší svařitelností.

Tabulka 2 Rozdělení hliníkových slitin podle směrnice TNI CEN ISO/TR 15608 [17]

| Skupina | Podskupina | Druh hliníku a hliníkových slitin - EN 573-3, EN 1706 | Příklady |
|---------|---|---|------------------|
| 21 | | Čistý hliník s obsahem ≤ 1 % nečistot nebo legur | EN AW-Al 99,98 |
| 22 | Tepelně nevytvrditelné slitiny | | |
| | 22.1 | Slitiny hliníku a manganu | EN AW-AlMn1 |
| | 22.2 | Slitiny hliníku a manganu s $Mg \leq 1,5$ % | EN AW-AlMg1 |
| | 22.3 | Slitiny hliníku a manganu s $1,5$ % $\leq Mg \leq 3,5$ % | EN AW-AlMg3 |
| | 22.4 | Slitiny hliníku a manganu s $Mg > 3,5$ % | EN AW-AlMg4 |
| 23 | Tepelně vytvrditelné slitiny | | |
| | 23.1 | Slitiny hliníku, manganu a křemíku | EN AW-AlMg1SiCu |
| | 23.2 | Slitiny hliníku, zinku a manganu | EN AW-AlZn4,5Mg1 |
| 24 | Slitiny hliníku a křemíku s $Cu \leq 1$ % | | |
| | 24.1 | Slitiny hliníku a křemíku s $Cu \leq 1$ % a 5 % $\leq Si \leq 15$ % | EN AC-ALSi11 |
| | 24.2 | Slitiny hliníku, křemíku a hořčíku s $Cu \leq 1$ %; 5 % $\leq Si \leq 15$ % a $0,1$ % $< Mg \leq 0,8$ % | EN AC-ALSi7Mg |
| 25 | Slitiny hliníku, křemíku a mědi s 5 % $< Si \leq 14$ %; 1 % $< Cu \leq 5$ % a $Mg \leq 0,8$ % | | EN AC-ALSi6Cu4 |
| 26 | Slitiny hliníku a mědi s 2 % $< Cu \leq 6$ % | | EN AC-ALCu4MgTi |

4. Značení hliníkových slitin

Každá skupina hliníkových slitin má své specifické označení. Pro hliníkové slitiny tvářené se dnes používá označení dle normy ČSN EN 573-1 až 3 Hliník a slitiny hliníku. Chemické složení a druhy tvářených výrobků. Pro odlitky z hliníkových slitin se používá značení dle normy ČSN EN 1706 Hliník a slitiny hliníku – Odlitky – Chemické složení a mechanické vlastnosti.

4.1 Značení tvářených hliníkových slitin

Značení tvářených hliníkových slitin probíhá následovně: nejdříve předpona EN (značící evropskou normu) následuje mezera a písmena A (Aluminium) a W (tvářené výrobky – Wrought), následuje spojovací čárka a čtyřčíslí, které identifikuje chemické složení. V některých případech může být ještě použito písmeno určující stav slitiny. – viz tabulka 4

První číslo nám určuje skupinu slitin, které jsou rozděleny podle hlavního legujícího prvku od 1xxx do 8xxx. – viz tabulka 3

Ve skupině 1xxx se jedná o technicky čistý hliník, kde je jeho obsah vyšší jak 99 %. Druhá číslice nám určuje mezní obsah doprovodných nebo slitinových prvků. Poslední dvě

číslíce ze čtyřčíslí nám udávají obsah hliníku v procentech za desetinnou čárkou. Například když bude označení AW 1095 = 99,95 %Al.

Ve skupinách označených jako 2xxx až 8xxx nám druhá číslice udává primární slitinu a modifikaci. Poslední dvě číslice slouží k rozlišení tvářených slitin ve skupině. [2]

Tabulka 3 Označení tvářených hliníkových slitin dle ČSN EN 573-1 až 3 [2]

| HLAVNÍ LEGUJÍCÍ PRVEK | OZNAČENÍ SÉRIE | TYP SLITINY | STAV |
|-------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|
| Hliník čistoty min. 99% | 1xxx | Al | Nevytvrditelné |
| Měď | 2xxx | Al-Cu-Mg | Vytvrditelné |
| Mangan | 3xxx | Al-Mn | Nevytvrditelné |
| Křemík | 4xxx | Al-Si | Nevytvrditelné |
| Hořčík | 5xxx | Al-Mg | Nevytvrditelné |
| Hořčík a křemík | 6xxx | Al-Mg-Si | Vytvrditelné |
| Zinek | 7xxx | Al-Zn-Mg | Vytvrditelné |
| Jiné prvky | 8xxx | Al + různé prvky | Vytvrditelné i nevytvrditelné |
| Neobsazená řada | 9xxx | | |

Tabulka 4 Značení stavů tepelného zpracování dle ČSN EN 515 Hliník a slitiny hliníku. Výrobky tvářené. Označování stavů [18]

| OZNAČENÍ | STAV VÝROBKU | CHARAKTERISTIKA |
|----------|------------------------|---|
| F | z výroby | tepelně nezpracován, bez udání mezí mech. vlastností |
| O (1-3) | žíhaný | žíhání na snížená vnitřních pnutí |
| H (1-4) | deformačně zpevněný | výrobky tvářené za studena |
| W | po rozpouštěcím žíhání | po rozpouštěcím žíhání nastává přirozené stárnutí při normální teplotě |
| T (1-9) | tepelně zpracovaný | výrobky s nebo bez dodatečného deformačního zpevnění k získání stabilního stavu |

4.2 Značení slévárenských hliníkových slitin

Slévárenské slitiny se označují následovně: písmeny EN (evropská norma), následuje mezera a písmena AC (Aluminium Casting) a na závěr pět čísel. První z nich určuje hlavní přísadový prvek, a tedy skupinu slitin. Další číslice udávají chemické složení (viz tab. 5). [2]

Tabulka 5 Označení slévárenských hliníkových slitin dle ČSN EN 1706 [2]

| HLAVNÍ LEGUJÍCÍ PRVEK | OZNAČENÍ SÉRIE | TYP SLITINY |
|-------------------------|----------------|------------------|
| Hliník čistoty min. 99% | 10 000 | Al |
| Měď | 20 000 | Al-Cu-Mg |
| Mangan | 30 000 | Al-Mn |
| Křemík | 40 000 | Al-Si |
| Hořčík | 50 000 | Al-Mg |
| Hořčík a křemík | 60 000 | Al-Mg-Si |
| Zinek | 70 000 | Al-Zn-Mg |
| Jiné prvky | 80 000 | Al + různé prvky |

5. Svařitelnost hliníkových slitin

Při svařování hliníkových slitin se setkáváme s mnoha faktory, které vyplývají z jejich chemických a mechanických vlastností. Tyto faktory ovlivňují postupy před svařováním, při svařování a také kvalitu výsledného svarového spoje. Mezi nejpodstatnější faktory ovlivňující svařování hliníkových slitin patří [19]:

- přítomnost povrchové oxidické vrstvy Al_2O_3
- tvorba pórů a bublin ve svaru
- snížení pevnosti v důsledku svařování
- vznik trhlin ve svaru
- obtížné sledování stavu tavné lázně (s rostoucí teplotou hliník nemění barvu)

5.1 Povrchová vrstva Al_2O_3

Hliník má velkou afinitu ke kyslíku, což znamená, že se na jeho povrchu rychle tvoří vrstva Al_2O_3 (oxid hlinitý). Tato vrstva oxidu má řadu pozitivních vlastností, především způsobuje korozivzdornost hliníkových slitin. V oblasti povrchových úprav se tato vrstva vytváří často záměrně s různým zabarvením tzv. anodickou oxidací (eloxováním). Vrstva oxidu je však nežádoucí v oblasti svařování. Oxid hlinitý má ve srovnání s čistým hliníkem (660 °C) velmi vysokou teplotu tavení (2060 °C) a v procesu tavného svařování je obtížně tavitelný. Tato elektricky nevodivá vrstva na základním materiálu zabraňuje správnému vytvoření svarové lázně, metalickému spojení základního a přídavného materiálu a komplikuje nastavení správných svařovacích parametrů při obloukovém svařování. Má také vyšší měrnou hmotnost ($3,96 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) než základní materiál ($2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) a to znamená, že případné zbytky oxidu mohou při svařování propadat do svarové lázně. To vede ke vzniku

oxidických vměstků ve svaru, které následně zvyšují náchylnost na vznik trhlin ve svarovém spoji. [19] [20] [21]

Oxidická vrstva je rovněž silně hygroskopická a z tohoto důvodu může docházet vlivem zadržované vlhkosti ke zvýšené tvorbě pórů ve svaru.

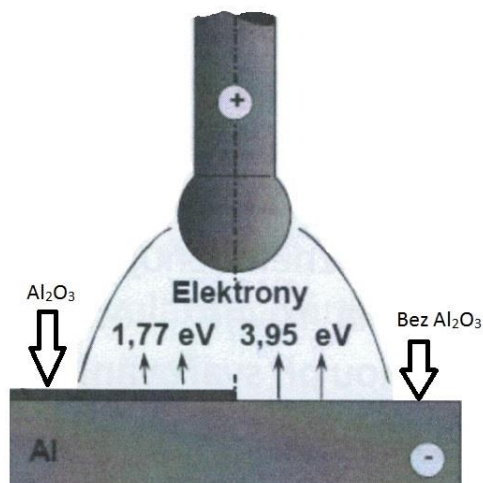
Vrstva má obvykle tloušťku okolo 0,01 μm . Odstraňování této vrstvy probíhá mechanickým (nejčastěji kartáčováním pomocí kartáčů z austenitické oceli) nebo chemickým způsobem (mořením). Nicméně okamžitě po odstranění vzniká na povrchu Al vrstva nová. Z tohoto důvodu je vhodné zajistit narušení a odstranění oxidické vrstvy i během svařování. To se provádí buď chemickým způsobem (prostřednictvím tavidel) nebo účinkem elektrického oblouku při svařování v ochranném plynu Ar (tzv. čistící účinek elektrického oblouku). [2]

5.1.1 Princip čistícího účinku

Princip čistícího účinku popisují dvě teorie, které spolu úzce souvisí.

Teorie katodové skvrny

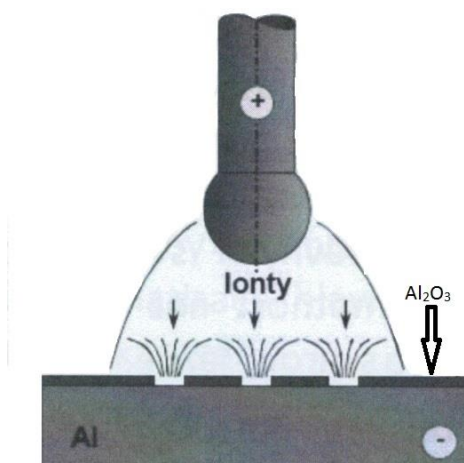
Používá se stejnosměrný proud se zapojením s nepřímou polaritou (elektroda musí být připojena ke kladnému pólu svařovacího zdroje). Při hoření elektrického oblouku se katodová skvrna vytváří na záporné elektrodě, kterou je zde základní materiál. Skvrna se pohybuje po materiálu a vyhledává místa s minimálním emisním napětím (místa kde je základní materiál pokryt vrstvou oxidů). Katodová skvrna (o teplotě cca 2600 °C) zasáhne místo pokryté oxidy, které se začnou vysoce přehřívat až se odpaří. Poté co se oxidy v daném místě odpaří, přesune se katodová skvrna ve směru svařování na další oxidy a proces se opakuje. [22] [23]



Obrázek 10 Schématické znázornění teorie katodové skvrny [2]

Teorie kladných iontů

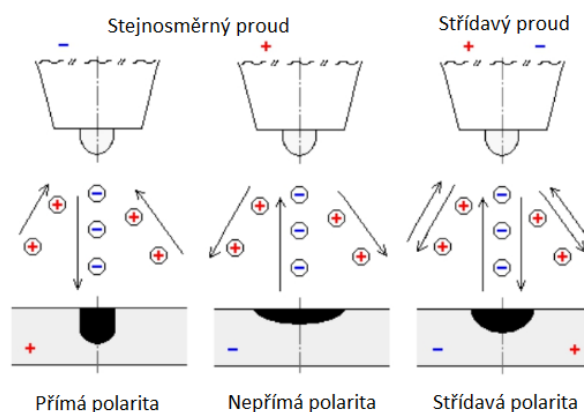
Jedná se o narušení oxidické vrstvy pomocí dynamického účinku proudu kladných iontů, které vznikají společně s elektrony při ionizaci argonu. Proud kladných iontů je urychlován směrem k tavné lázni, kde ionty bombardují povrch a rozrušují tak oxidickou vrstvu vlivem mnohonásobně větší hmotnosti než mají elektrony. Záporné elektrony se pohybují ze svařovaného materiálu směrem k elektrodě. Dynamickým účinkem proudu kladných iontů dochází ke stažení oxidů k okraji svarové lázně. Toto je možné pouze při zapojení s nepřímou polaritou. [21] [23]



Obrázek 11 Schématické znázornění teorie kladných iontů [2]

Nejllepšího čistícího účinku dosáhneme při použití stejnosměrného proudu se zapojením na nepřímou polaritu. To lze ale z praktických důvodů použít pouze u metody MIG.

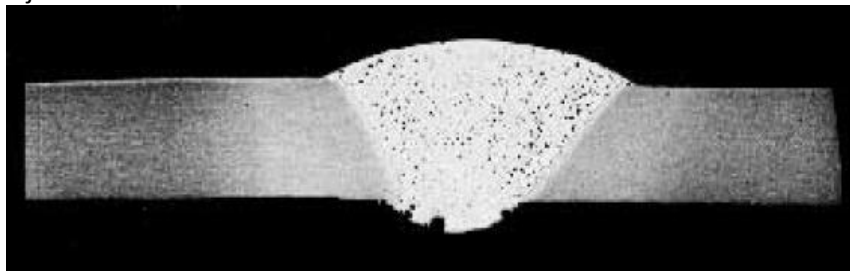
U metody TIG, kde potřebujeme při svařování využít čistící účinek se používá střídavý svařovací proud, protože nedochází k přehřívání wolframové elektrody a je dosaženo dostatečného průvaru. [22]



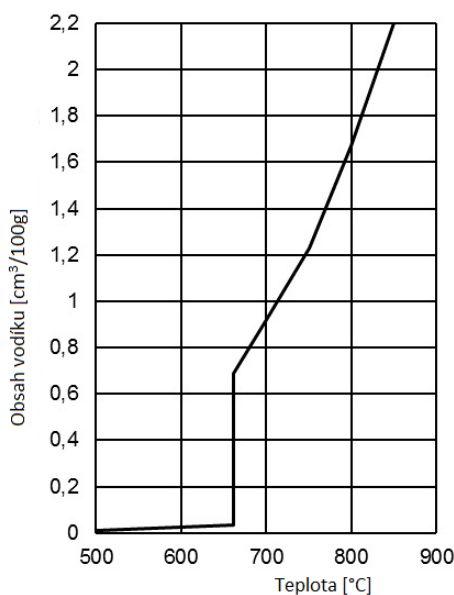
Obrázek 12 Způsoby zapojení el. oblouku při TIG svařování s ohledem na čistící účinek el. oblouku [22]

5.2 Pórovitost

Dalším problémem při svařování hliníkových slitin je velká rozpustnost plynů v Al, především vodíku (H_2). Hlavní příčinou výskytu H_2 je vrstva Al_2O_3 na povrchu základního materiálu, která je hygroskopická – zadržuje vlhkost. Dalšími zdroji H_2 může být přídavný materiál nebo okolní vzdušné prostředí. Tyto zdroje H_2 je zapotřebí před svařováním minimalizovat. Rozpustnost vodíku v hliníku roste se zvyšující se teplotou. Protože Al velmi dobře odvádí teplo, dochází k rychlé krystalizaci, tak se část H_2 nestačí vyloučit. K úplnému vyloučení dochází až pod teplotou solidu. Když už je Al v pevném plastickém stavu vyvolá vylučující se H_2 vznik nežádoucích pórů a bublin (viz obr. 13). Z důvodu těchto vlivů je zapotřebí minimalizovat zdroje H_2 před svařováním, zkrátit čas přímého tavení svarového kovu, zabránit přehřátí svarového kovu a v neposlední řadě použít vždy inertní ochrannou atmosféru. [24]



Obrázek 13 Rozložení pórů v tupém svaru po svařování metodou TIG [21]



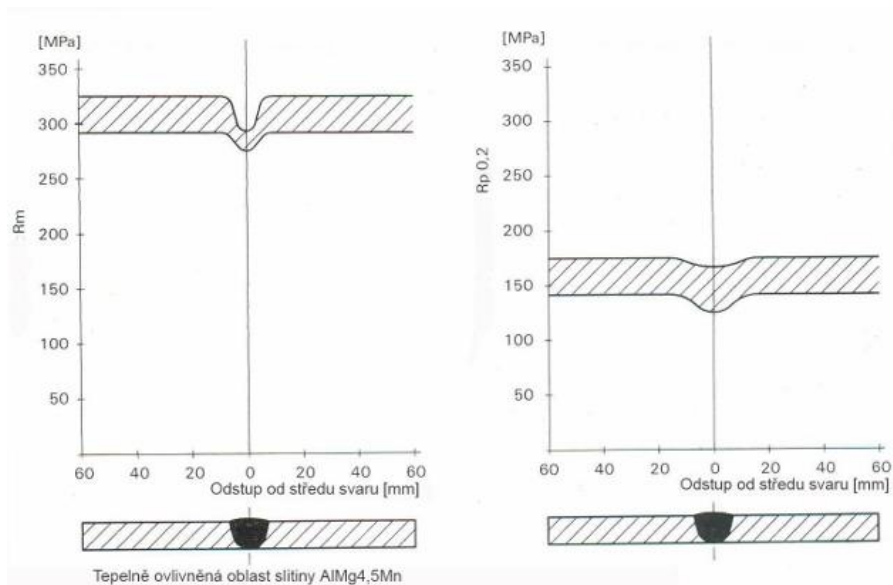
Obrázek 14 Rozpustnost vodíku v hliníku v závislosti na teplotě [25]

5.3 Snížení pevnosti v důsledku svařování

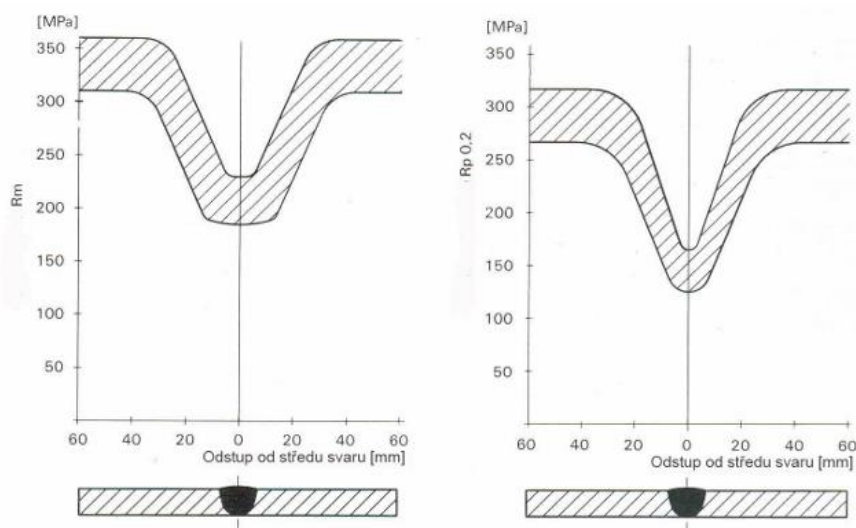
Při svařování hliníkových slitin dochází v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) i ve svarovém kovu (resp. tam, kde teplota překročí hodnotu 200 °C) k rozpouštění vytvrzující fáze, a tím k výraznému snížení hodnot mechanických vlastností a odolnosti proti korozi. Ve vytvrzeném stavu je tento pokles mnohem výraznější než ve stavu nevytvrzeném (viz obr. 15, 16). V celé této oblasti ohřáté nad teplotu 200 °C, kde dále probíhají precipitační děje se podle velikosti teploty ztrácí pevnost a tvrdost svařované slitiny dosažená při předchozím tepelném zpracování. Nejmenší hodnoty pevnosti jsou v pásmu přehřátí. Výsledný pokles pevnosti závisí na době, po kterou působí teplota nad 200°C.

U slitin Al-Cu-Mg je řešením svařený díl dodatečně tepelně zpracovat (tzn. svařovat díly v nevytvrzeném stavu a vytvrdit až po svaření). U přirozeně stárnuoucích slitin Al-Zn-Mg dojde k návratu pevnosti na původní hodnoty do 90 dnů díky tzv. samovytvrzení. U Al slitin

typu Al-Mg-Si (aviály) se opětovné tepelné zpracování z ekonomických důvodů nedoporučuje, protože nevede ke značnému zlepšení mechanických vlastností. [2]



Obrázek 15 Změna meze pevnosti (R_m), resp. smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) po svařování nevytvrditelné slitiny AlMg4,5Mn ve svarovém spoji [26]



Obrázek 16 Výrazná ztráta meze pevnosti (R_m), resp. smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) po svařování vytvrditelné slitiny AlMgSi1 v okolí svaru [26]

5.4 Vznik trhlin

Trhliny mohou vznikat jak ve svarovém kovu, tak v TOO. Nejčastějšími typy trhlin jsou tzv. „trhliny za tepla“, které vznikají ve svarovém kovu (interkrystalické solidifikační trhliny) a někdy i v tepelně ovlivněné oblasti (likvační trhliny) v procesu krystalizace. Můžeme se také setkat s praskáním v oblasti svarového spoje v tuhém stavu (interkrystalické trhliny „za studena“) nebo u některých slitin s korozním praskáním pod napětím. Tento faktor nesmíme opomíjet a musíme s ním počítat při návrhu základního a přídatného materiálu.

Důvodem vzniku trhlin za tepla je způsob krystalizace a segregace. Nejnáchylnější na vznik trhlin za tepla jsou svary s širokým intervalem tuhnutí. Zásadním faktorem pro vznik těchto trhlin je typ a především množství eutektické fáze. Ve chvíli, kdy je objem eutektika malý a nevyplňuje dostatečným způsobem prostory mezi rostoucími dendrity, hrozí vznik trhlin. K potlačení vzniku trhlin za tepla je potřebný objem eutektické fáze v rozmezí 15–25 %, dle typu slitiny a podmínek svařování. [19]

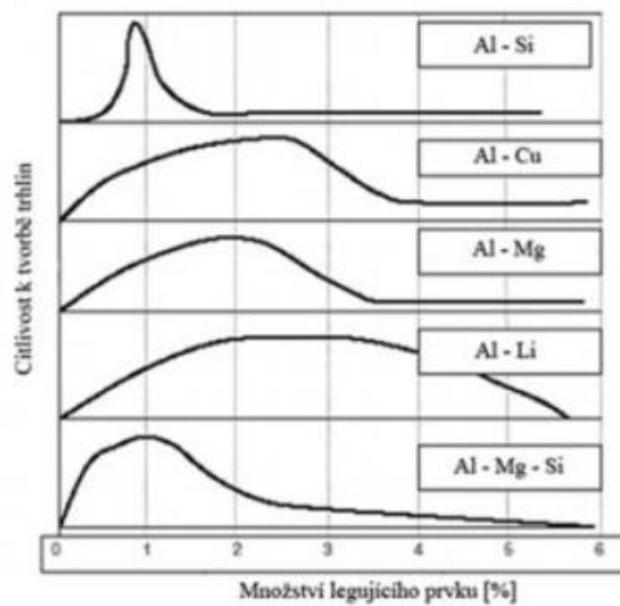
Největší sklon ke vzniku trhlin za tepla mají tepelně zpracované slitiny hliníku (např. Al-Mg-Si), nízkolegované slitiny hliníku (např. AlMg₂) nebo některé typy technického hliníku. Pro každou skupinu slitin hliníku je největší sklon ke vzniku trhlin dán kritickou hodnotou legujícího prvku (viz obr. 18). [21] [24]

Hliník má vysokou tepelnou roztažnost, proto tuhnoucí svarová lázeň vyvolává velká napětí. Solidifikační trhliny se obvykle šíří od osy svaru (z místa, které tuhne jako poslední). Proto je výhodné svařovat s malým tepelným příkonem do svaru, počet housenek volit co nejmenší a nevytvářet velkou tavnou lázeň. Dále můžeme zamezit vzniku solidifikačních trhlin elektromagnetickým mícháním svarové lázně v průběhu svařování. Za použití vhodného přídatného materiálu zajistíme potřebné množství eutektické fáze ve svarovém kovu. Jako přídatný materiál se nejčastěji používá AlSi5 (vhodný pro svařování slitin Al-Si nebo Al-Cu-Mg) nebo AlMg₅ (pro svařování Al-Mg, Al-Zn-Mg). Dále se můžeme setkat s přídatnými materiály, které obsahují prvky zjemňující velikost zrna svarového kovu jako jsou např. titan, zirkon a niob (např. AlMg_{4,5}MnZr). Dalšími způsoby, jak snížit riziko vzniku trhlin je především předehřev a vhodně zvolená technologie svařování, která umožní velkou rychlost svařování (např. metoda MIG). [19] [27]

Občas se můžeme setkat s praskavostí hliníkových slitin za studena. Studené trhliny vznikají obvykle při teplotách v rozmezí 200 až 400 °C a mají transkrystalický průběh. [27]



Obrázek 17 Příklad solidifikační trhliny [21]



Obrázek 18 Citlivost k tvorbě trhlin v závislosti na množství legujícího prvku [19]

| Typ (skupina) | Označení slitiny | Chemické složení |
|---------------|------------------|------------------|
| 1 | 1450 | Al 99,5 Ti |
| | 1080A | Al 99,8 |
| 3 | 3103 | AlMn1 |
| 4 | 4043A | AlSi5 |
| | 4046 | AlSi10Mg |
| | 4047A | AlSi12(A) |
| | 4018 | AlSi7Mg |
| 5 | 5249 | AlMg2Mn0,8Zr |
| | 5754 | AlMg3 |
| | 5556 | AlMg5,2Mn |
| | 5183 | AlMg4,5Mn0,7(A) |
| | 5087 | AlMg4,5MnZr |
| | 5356 | AlMg5Cr(A) |

5.5 Neměnnost barvy při ohřevu

Velice důležitou vlastností, na kterou nesmíme zapomínat při svařování hliníku a jeho slitin, je neměnnost jeho barvy v závislosti na teplotě. Proto při svařování nastávají problémy s určením bodu tavení a se sledováním tavné lázně. [29]

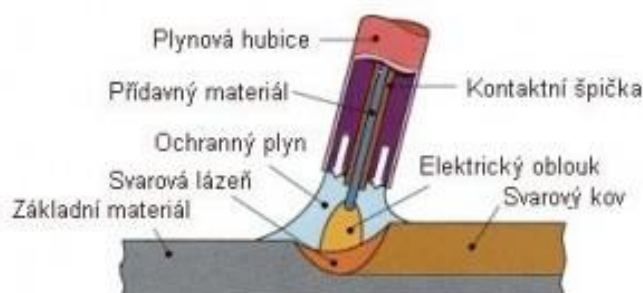
6. Metody svařování

Hliník a jeho slitiny je možné svařovat například plamenem, obloukovými metodami (obalenou elektrodou, MIG, TIG), třením, tlakem za studena, plazmou, elektronovým a laserovým paprskem. Mezi nejpoužívanější konvenční metody svařování patří metody obloukového svařování v ochranných atmosférách - MIG a TIG, proto jim bude v další části práce věnována zvýšená pozornost.

6.1 Metoda MIG

MIG (Metal Inert Gas) je metoda tavného obloukového svařování, kdy hoří elektrický oblouk mezi tavící se elektrodou a základním materiálem v ochranné atmosféře inertního plynu (argonu, helia nebo jejich směsí). Elektroda ve formě drátu je zde použita i jako přídavný materiál. Přídavný materiál navinutý na cívce je pomocí kladkového podavače, teflonového bowdenu a přes napájecí průvlak umístěný uvnitř ochranné hubice na konci hořáku, podáván konstantní rychlostí do svarové lázně. Využívá se stejnosměrného svařovacího zdroje (DC) a zapojení na nepřímou polaritu (ke kladnému pólu zdroje je připojen

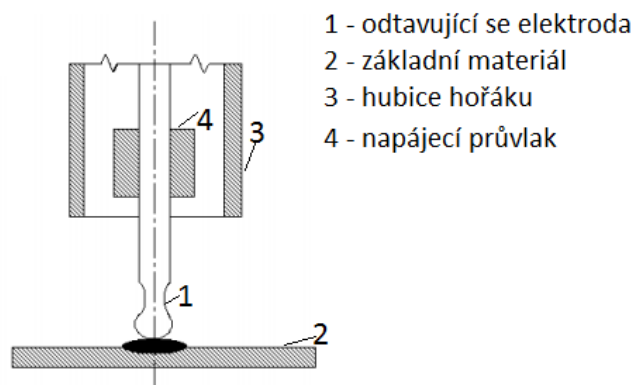
Za těchto podmínek působí maximální čistící efekt elektrického oblouku. Ochranný plyn se přivádí do místa svaru hubicí hořáku. Svarová lázeň se vytváří lokálním natavením svarové plochy základního materiálu a odtavením přídavného materiálu. Z pohledu přenosu přídavného materiálu do svarové lázně existují dva základní druhy procesů – zkratový a bezzkratový. [29]



Obrázek 19 Schéma svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu [30]

Zkratový proces

Narůstající kapka se dotýká tavné lázně dříve, než se oddělí od elektrody, vytváří se vodivý můstek mezi elektrodou a tavnou lázní a nastává zkrat. Zkratový proud zvýší teplotu vodivého můstku a dochází k odtavení části kovu od elektrody. Po odtavení se proces opakuje. Počet odtavených kapek se pohybuje v rozmezí od 200 do 300 kapek za sekundu. Tento proces se používá při svařování, kdy požadujeme malé množství tepla vnesené do svarového kovu jako je například svařování plechů menších tloušťek, protože je proces realizován při krátkém oblouku (tzn. při malém napětí na oblouku a nižších hodnotách elektrického proudu). [29]



Obrázek 20 Princip zkratového přenosu svarového kovu [29]

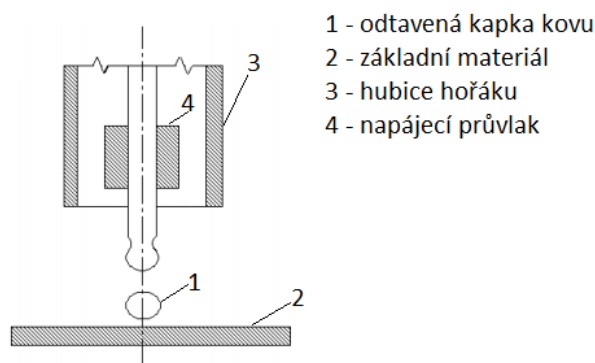
Bezzkratový proces

Při tomto procesu je průměr kapek menší než vzdálenost mezi elektrodou a svarovou lázní. Proces je realizován při větší délce oblouku (tzn. větší napětí na oblouku). Bezzkratový proces vzniká při vyšším proudovém zatížení elektrody. Používá se pro svařování větších tlouštěk materiálů. Přídavný materiál se přenáší sprchovým přenosem nebo řízeným pulzem. [29]

Bezzkratový sprchový přenos kovu vzniká při vyšší hodnotě svařovacího proudu (nadkritická proudová hustota) a delším oblouku (vyšším napětí). Kapky tekutého kovu roztavené elektrody jsou jemně rozptýleny a pohybují se ve směru osy elektrody a tvoří tzv. sprchu. Sprchový přenos je typický pro svařování v atmosférách bohatých na Ar. V průběhu celé periody oddělované kapky je velikost proudu konstantní, pouze v okamžiku přerušení můstku je zřetelné mírné zvyšování proudu. Oblouk nezhasíná a do materiálu se vnáší velké množství tepla. Sprchový přenos je charakteristický velkou hloubkou průvaru, klidným hořením oblouku a vysokým výkonem navaření. [31] [32]

Pulzní přenos je založen na principu elektronicky řízeného přechodu odtavujících se kapek přídavného svařovacího materiálu do svarové lázně. Pro pulzní přenos je charakteristické periodické střídání dvou hodnot svařovacího proudu (základní a impulzní). Funkcí základního proudu je udržení ionizace sloupce oblouku, a tím i vedení proudu. Jeho hodnota se pohybuje v rozmezí 20 až 50 A. Impulzní proud je nastavitelný, tvarově i časově řízený a v konečné fázi jeho amplitudy dochází k odtavení kapky přídavného materiálu.

V celém průběhu amplitudy impulzního proudu intenzivně hoří oblouk, který vnáší teplo do svarové lázně i přídavného materiálu. Výhodou svařování pulzním proudem je především vnášení menšího množství tepla do svaru a tím dochází k menším deformačním účinkům. [32]



Obrázek 21 Princip bezkratového přenosu svarového kovu [29]

Obecně se metoda MIG používá nejčastěji pro svařování dílců s tloušťkou od 3 do 50 mm. Rychlost svařování je dvakrát až třikrát vyšší než u metody TIG. [2]

6.2 Metoda TIG (WIG)

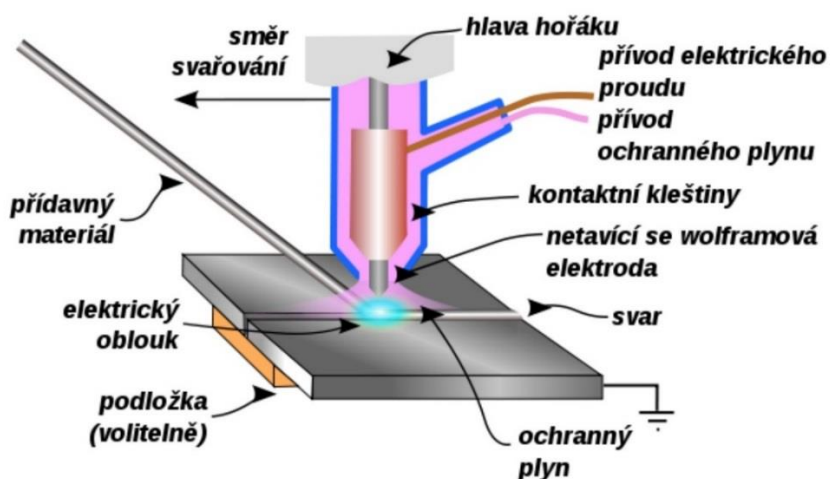
Zkratka metody TIG (Tungsten Inert Gas) pochází z angličtiny. Občas se můžeme setkat i s německou terminologií WIG (Wolfram Inert Gas). Jedná se o identickou metodu.

Metoda TIG je jednou z metod obloukového svařování. Princip je založen na svařování netavící se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu (argonu, helia nebo jejich směsí), kde elektrický oblouk hoří mezi netavící se elektrodou a základním materiálem. Netavící se elektroda je vyrobena z wolframu, aby odolávala vysokému tepelnému zatížení. V některých případech může být wolframový materiál legován thoriem, cérem nebo zirkonem.

Při využití stejnosměrného zdroje (DC) a zapojení elektrody ke kladnému pólu svařovacího zdroje (nepřímá polarita) dochází sice k maximálnímu čistícímu účinku, ale zároveň k vysokému tepelnému zatížení a přehřívání elektrody. Naopak při zapojení elektrody k zápornému pólu zdroje nedochází k vysokému tepelnému zatížení, ale také nelze využít čistícího účinku elektrického oblouku. Proto se pro svařování hliníku a jeho slitin metodou TIG používá střídavý proud (AC), kdy v jedné půlperiodě dochází k čistícímu účinku

a ve druhé je tepelný nápor na elektrodu snížen a využít k tvorbě svarové lázně. Používají se svařovací zařízení, které pracují na principu řízeného přepínání polarity. Nejdříve je elektroda připojena ke kladnému pólu zdroje, dochází k poklesu napětí na oblouku (odpaření Al_2O_3), následuje přepojení polarity, elektroda se stává katodou a základní materiál anodou. Následuje růst napětí, přepojení polarity a proces se opakuje. Tento proces zaručuje minimalizaci tepelného namáhání elektrody při zachování čistícího účinku.

TIG svařování se využívá na svařování menších tlouštěk materiálu (1 až 6 mm), především pro svařování tenkých plechů a potrubí. Svary vyrobené touto metodou jsou velice úhledné a nevyžadují téměř žádné opracování. Rychlost svařování je ve srovnání s metodou MIG nižší a tepelně ovlivněná oblast je větší. S elektrodami se musí manipulovat opatrně, protože jsou křehké. Jako přídavný materiál se pro ruční svařování používá svařovací drát ve formě tyček, který se nejčastěji vyrábí v délce 1 m a průměru: 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,2; 4,0 mm. Pro robotizované a mechanizované svařování se využívá svařovací drát navinutý na cívce. Dráty se vyrábí zpravidla v průměrech 0,6 až 2,4 mm. Svařovací drát vybíráme podle základního materiálu, jeho mechanických vlastností a typu svarového spoje tak, aby měl svarový spoj stejnou nebo větší pevnost než materiál základní. Účelem svařovacího drátu je doplnit objem svarového kovu, legovat svarový kov a snižovat tak riziko vzniku trhlin a dutin, zlepšovat formování svaru a dosáhnout požadovaného tvaru spoje. [29] [33]



Obrázek 22 Schéma svařování metodou TIG [34]

7. Ochranné atmosféry

Pro svařování hliníku a jeho slitin se využívají výhradně inertní ochranné plyny, a to především proto, že je známa zvýšená oxidace neželezných kovů při zvýšených teplotách. Inertní (netečné) plyny jsou takové plyny, které se neúčastní chemických reakcí. Chrání svarovou lázeň a její okolí proti vlivům okolního vzduchu, především právě proti oxidaci. Současně vytváří příznivé podmínky pro zapálení oblouku a jeho stabilitu, přenos tepla do svaru i jeho tvarování. Ochranné plyny jsou uchovávány a přepravovány v tlakových lahvích různých velikostí. Tyto lahve jsou barevně označeny dle plynu, který obsahují. [32] [35]

7.1 Argon

Argon je základní jednoatomový inertní plyn. Je bezbarvý, bez chuti a zápachu. Vyrábí se destilací zkapalněného vzduchu, kde je teplota varu argonu při atmosférickém tlaku $-185,8$ °C. Vzduch obsahuje 0,934 % argonu. Argon má poměrně nízký ionizační potenciál (15,8 eV). To je velmi výhodné z hlediska zapalování oblouku a udržení jeho stability hoření, a proto je často používán i jako základ směsných plynů. Jeho nevýhodou je nejmenší tepelná vodivost ($17,7 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ze všech ochranných plynů, proto bývá někdy částečně nahrazován heliem, které má mnohem lepší tepelnou vodivost ($0,151 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Závar je hluboký a užší. Také nám umožňuje vysokou proudovou zatížitelnost a sloupec oblouku dosahuje vysokých teplot. Měrná hmotnost argonu je $1,784 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, což je ve srovnání se vzduchem ($1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) o málo větší. Minimální doporučená čistota je 3.0 (99,9 % Ar). Prakticky se ale používají čistoty 4.6 (99,996 % Ar) a 4.8 (99,998 % Ar). Jedná se o minimální rozdíly v řádech tisícín procenta, ale to je pro některé aplikace zásadní. Cenový rozdíl je značný, a proto je vždy důležité správně vybrat danou čistotu plynu. Podíl nečistot je důležitý, ale zásadní je především to, o jaký typ nečistoty se jedná (nepříznivá je vlhkost a přítomnost kyslíku). Při svařování tenkých dílů se dává přednost právě argonu z důvodu nižšího tepelného výkonu. Obecně je argon nejrozšířenější ochranný plyn pro svařování vůbec. Lze ho použít jak v samostatné podobě, tak i do směsných plynů inertních (Ar+He) nebo tvoří základ aktivních směsí (Ar+CO₂+O₂) [32] [35]



Obrázek 23 Označení tlakové láhve s argonem [36]

7.2 Helium

Helium rovněž patří mezi inertní plyny. Je to jednoatomový plyn bez barvy a zápachu. Vyrábí se separací z některých druhů zemního plynu. Obsah helia je zde okolo 1 %. Ve srovnání s argonem má helium podstatně vyšší tepelnou vodivost, ale zároveň i větší ionizační potenciál (24,6 eV). Z tohoto důvodu se oblouk špatně zapaluje (při ručním svařování v čistém He) a není stabilní při větší délce hoření (musíme nastavit vyšší napětí na oblouku). Narozdíl od argonu má mnohem menší měrnou hmotnost ($0,178 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Z tohoto důvodu dochází ke snížení efektivity plynové ochrany, a proto jsou pro ochranu svaru vyžadovány vyšší objemové průtoky. Helium potřebuje vyšší napětí svařovacího proudu, poskytuje vysoký tepelný výkon, a proto se používá především pro svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí větších tlouštěk jako např. hliník a jeho slitiny. Vyrábí se s čistotou 4.6 (99,996 % He). V cenovém srovnání je helium mnohem dražší než argon, a ten zase mnohem dražší než CO_2 (v našich zeměpisných šířkách). Helium se také používá pro mechanizované způsoby svařování. [32] [37]



Obrázek 24 Označení tlakové láhve s heliem [38]

7.3 Směs argon + helium

Směs argonu a helia se využívá z důvodu spojení výhodných vlastností obou plynů. Při použití této směsi se zvyšuje rychlost svařování a hloubka závaru. Můžeme rovněž snížit přehřev kovů s vysokou tepelnou vodivostí. Obsah helia může být až 95 %, ovšem s obsahem helia roste i cena směsi. Mezi nejčastější směsi patří 70 % Ar + 30 % He, Ar-He 50/50, 30 % Ar + 70 % He. Směsi argonu a helia se používají pro svařování větších tloušťek svařovaných dílů nebo v případech, kdy chceme zamezit vzniku pórovitosti. V závislosti na tloušťce se volí obsah helia. Se zvyšujícím se obsahem helia se zvyšuje napětí na oblouku a rovněž tepelný výkon, což se pozitivně projevuje na tvaru a rozměrech svaru. [32] [35]



Obrázek 25 Označení tlakové láhve se směsí Ar + He [39]

8. Kontrola svarových spojů

Veškeré zkoušky svarových spojů jsou velmi důležité z hlediska zajištění bezpečnosti svařovaného celku. Zjišťování kvality svarového spoje se odvíjí od požadavků na daný spoj. Kontrola svaru se musí provádět jak na povrchu, tak uvnitř svaru. Zkoušky rozdělujeme na nedestruktivní, při kterých nedochází k trvalému porušení vzorku, ani ke změnám struktury nebo chemického složení (lze je tedy realizovat i na reálných součástech, které mohou být dále provozovány), a na destruktivní, při kterých k trvalému porušení a změnám dochází (vyžadují vždy odebrání zkušebních vzorků ze zkoušených součástí). [40]

8.1 Nedestruktivní zkoušky

Nedestruktivní zkoušky patří v dnešní době k nejčastěji používaným kontrolám svarových spojů. Při zkouškách se vychází z jednoduché teorie, že pokud ve svarovém spoji vady nejsou nalezeny dostupnými metodami nebo jsou málo četné či málo závažné, tak je svarový spoj vyhovující. Nedestruktivní zkoušky určují tzv. charakteristiky celistvosti (ne charakteristiky mechanických vlastností) svarů. Mechanické vlastnosti tak musíme určit

pomocí zkoušek destruktivních. Nedestruktivní zkoušky rozdělujeme podle identifikace vady na povrchu svarového spoje nebo uvnitř. [41]

Metody pro zjištění povrchových vad

- vizuální
- kapilární (penetrační)
- magnetická prášková

Metody pro zjištění vad vnitřních

- ultrazvukem
- prozářením

8.1.1 Vizuální zkouška

Vizuální zkouška je nejjednodušší, nejlevnější a nejdostupnější nedestruktivní kontrola svarů. Vizuální kontrolou zjišťujeme povrchové vady (nepřípustné nerovnoměrnosti, převýšení svaru, trhliny, studené spoje atd.) a ověřujeme podmínky pro další nedestruktivní zkoušky. Vizuální kontrola může být přímá nebo nepřímá. U přímé kontroly se jedná o pozorování svaru zrakem nebo jednoduchými optickými přístroji (lupa). Při nepřímé kontrole sledujeme detaily, které nejsou přímou metodou pozorovatelné. K nepřímé metodě je používán např. endoskop. Pro vizuální zkoušku musí být svar dostatečně očištěn a pracoviště dobře osvětleno. Zkouška se provádí před dalšími technologickými operacemi. Pokud jsou vizuální kontrolou odhaleny nepřípustné vady, není třeba součást dále testovat. Tuto zkoušku upravuje norma ČSN EN ISO 17 637 – Nedestruktivní zkoušení svarů. Vizuální kontrola. [41] [42]

8.1.2 Zkouška kapilární (penetrační)

Jedná se o zkoušku, která s velkou citivostí zjistí výskyt povrchových vad (póry, trhliny), které musí být na povrchu otevřené, aby do nich pronikla detekční kapalina. Výhodou této metody je jednoduchost a nízká cena. Základním principem kapilární zkoušky je zvolení vhodné kapilárně aktivní kapaliny, která pronikne do necelistvostí a po odstranění přebytku z povrchu zkoušeného kusu vzlíná vlivem kapilárních sil. Dochází tak ke zviditelnění necelistvosti. Tuto zkoušku upravuje norma ČSN EN ISO 3452-1 Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška - Část 1: Obecné zásady, a hodnocení nalezených indikací se provádí podle

8.1.3 Zkouška magnetická prášková

Tato zkouška umožňuje zjišťovat povrchové nebo těsně podpovrchové (max. 2-3 mm) vady. Základním principem je zviditelnění magnetických siločar. V případě, že je na povrchu nebo těsně pod ním necelistvost, dojde v tomto místě k vytvoření rozptylového magnetického pole. Vystupující siločáry lze zviditelnit např. jemným železným prachem, který může být suchý nebo rozptýlen v kapalině (např. petrolej). Hlavní nevýhodou této zkoušky je možnost využití pouze pro feromagnetické materiály. Proto je pro hliník a jeho slitiny nepoužitelná. Tuto zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 17638 Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení magnetickou metodou práškovou. [41]

8.1.4 Zkouška ultrazvukem

Zkouška ultrazvukem se využívá pro zjištění vnitřních vad ve velké hloubce zkoušených vzorků. Tato zkouška využívá šíření ultrazvukových vln prostředím. Je založena na odrazu vlnění na rozhraní dvou prostředí, které mají odlišné vlastnosti při šíření tohoto vlnění. Se změnou prostředí se mění rychlost a frekvence vlnění. Jako zdroje ultrazvukových vln se používají ultrazvukové zkušební sondy. Tuto zkoušku upravuje norma ČSN EN 1714 Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení svarových spojů ultrazvukem. [41]

8.1.5 Zkouška prozářením

Jedná se o zkoušku, pomocí které je možné zjistit vnitřní vady zkoušeného dílu. Princip této zkoušky spočívá v pohlcování ionizačního záření a následného zviditelnění prošlého záření vhodným detektorem. Tímto způsobem lze určit místa, kde se vyskytují vady. V místě vady je záření pohlcováno méně a při vyhodnocení se jeví jako tmavší místo. Jako zdroj radioaktivního záření se používají rentgenové lampy. Při použití záření gama vychází z malého množství radioaktivního zářiče (např. iridium). Zkoušku upravuje norma ČSN EN 1435 Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení svarových spojů. [41]

8.2 Destruktivní zkoušky

Pro zjištění mechanických vlastností svarového spoje jsou využívány zkoušky destruktivní. Destruktivní zkoušky jsou zaměřeny na kontrolu vlastností svarového spoje jako je především pevnost, tvrdost, houževnatost a na určení makroskopických a mikroskopických strukturních charakteristik. Při destruktivních zkouškách dochází k působení vnějších sil na zkušební vzorek. Vzorek se deformuje elasticky nebo plasticky, popřípadě může dojít ke

vzniku trhlin a později k lomu. Zkušební vzorek je po destruktivní zkoušce a vyhodnocení mechanických vlastností určen k likvidaci. Aby bylo možné jednotlivé materiály mezi sebou porovnávat musí být zkušební postupy, vzorky a podmínky totožné a přesně definované. K tomuto účelu se využívá standardních EN norem. Destruktivní zkoušky dále dělíme podle rychlosti zatěžování na statické (krátkodobé nebo dlouhodobé) a dynamické (rázem v ohybu nebo namáhání cyklickým zatížením). [41] [43]

Mezi základní destruktivní zkoušky svarových spojů patří [44]:

- zkouška tahem - příčná
- zkouška lámavosti
- zkouška rázem v ohybu
- zkouška tvrdosti
- zkouška únavové pevnosti
- zkoušky metalografické (makroskopické a mikroskopické)

8.2.1 Zkouška tahem

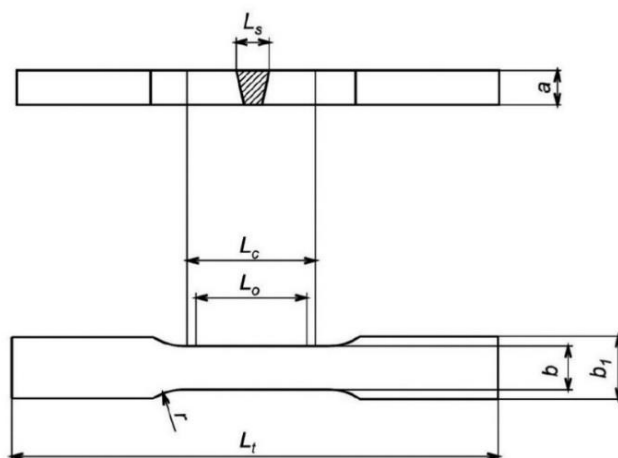
Zkouška tahem je nejrozšířenější destruktivní zkouška. Tato zkouška se provádí na zkušebním trhacím stroji. V průběhu zkoušky je zaznamenána závislost deformace na napětí. Z této závislosti jsou následně určeny [44]:

- Mez kluzu (R_e) [MPa]
- Mez pevnosti v tahu (R_m) [MPa]
- Tažnost (A) [%]
- Kontrakce (Z) [%]

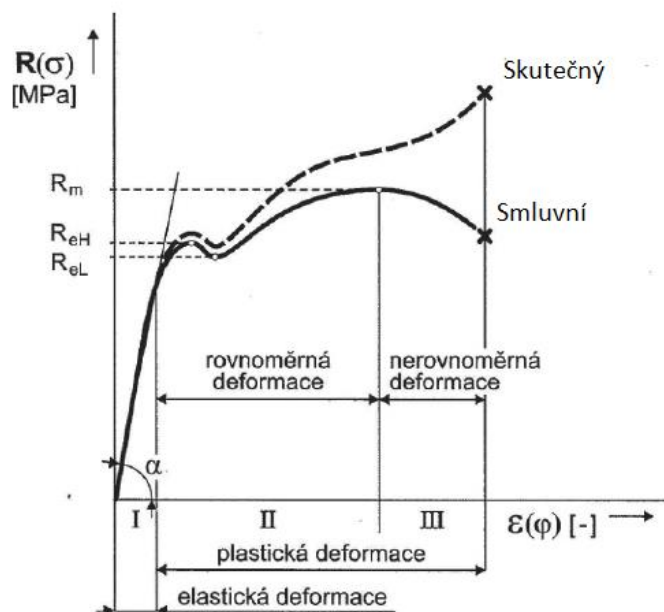
Princip zkoušky

Zkouška svarového spoje tahem se při okolní teplotě provádí dle ČSN EN ISO 6892-1 Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Specifické požadavky na provádění příčně tahové zkoušky svarových spojů jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 4136 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem. Princip zkoušky spočívá v jednoosém zatěžování zkušebního vzorku předepsanou plynulou rychlostí.

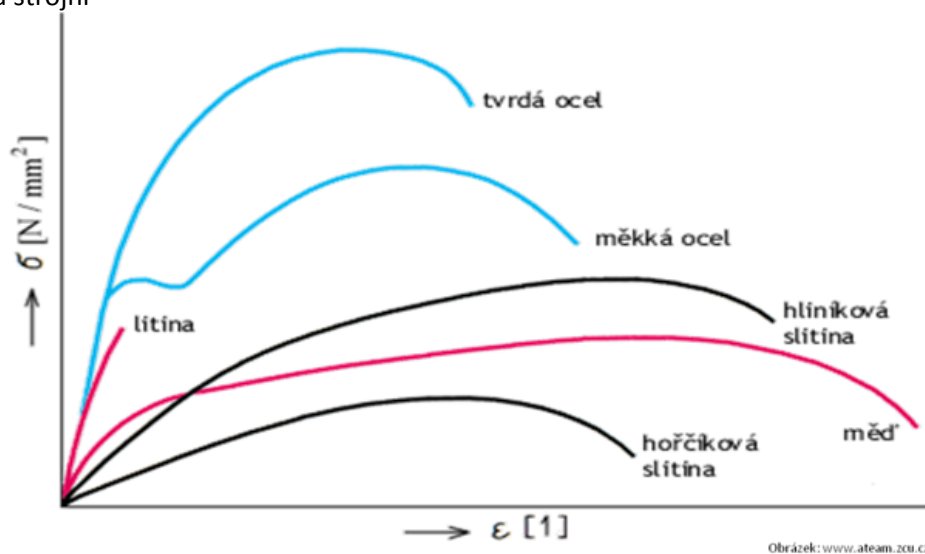
Vzorek je odebrán napříč svarovým spojem tak, aby osa svaru zůstala ve středu zkušební délky. Dochází k postupné deformaci vzorku, vzorek se prodlužuje a zároveň dochází ke zmenšování příčného průřezu vzorku. Zkouška končí v okamžiku lomu. Normalizovaný zkušební vzorek může mít kruhový, čtvercový nebo obdélníkový průřez. Veškeré rozměry zkušebního vzorku jsou uvedeny v náležité normě. Pro přesné kontaktní měření se používají extenzometry. Moderní stroje jsou vybaveny a ovládány počítači a měření deformace probíhá kontaktně nebo nekontaktně laserem. Výsledkem tahové zkoušky je smluvní nebo skutečný tahový diagram (viz obr 27) a pracovní diagram (viz obr. 28). [40] [45] [46]



Obrázek 26 Vzorek ploché zkušební tyče [46]



Obrázek 27 Srovnání skutečného a smluvního tahového diagramu pro ocel s výraznou mezí kluzu [45]



Obrázek 28 Pracovní tahový diagram pro uvedené kovy [47]

Ve smluvním diagramu je zobrazena závislost smluvního napětí R na smluvní deformaci ϵ . V tomto diagramu se smluvní napětí vyhodnocuje k počáteční ploše průřezu S_0 . Pro reálnou představu o deformaci materiálů musíme použít tahový diagram skutečný, kde se skutečné napětí σ určuje z okamžité plochy příčného průřezu S . [45]

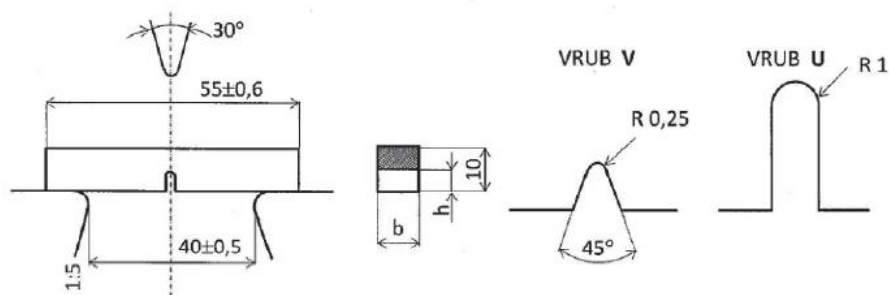
8.2.2 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu je nejjednodušší zkouškou používanou ke zjištění odolnosti proti křehkému porušení. Slouží ke zjištění absorbované energie na normou definovaných vzorcích. Zkušební vzorek obsahuje vrub tvaru U nebo V. Zkouška se provádí podle normy ČSN EN ISO 148-1 Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda. Zkouška probíhá při pracovních teplotách. Normovaný vzorek má délku 55 mm, čtvercový průřez 10 x 10 mm a ve středu jeho délky musí být vrub tvaru U s hloubkou 5 mm nebo V s hloubkou 2 mm. Správný způsob umístění vzorku se svarovým spojem, jejich počet a orientace vrubu se provádí podle normy ČSN EN ISO 9016 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušky rázem v ohybu - Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení. Při odebrání zkušební vzorku ze svarového spoje musíme dodržet, aby byla podélná osa vzorku kolmá na svar. Pro použitý materiál (resp. tloušťku materiálu) v experimentální části nelze vytvořit normalizovaný vzorek. Tato zkouška je navíc pro hliník obvykle nepodstatná, protože nevykazuje tranzitní chování (nekřehne při záporných teplotách).

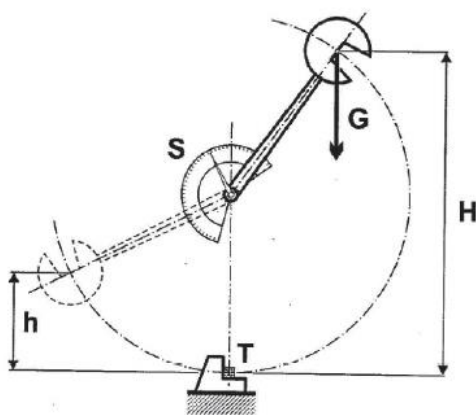
Jedná se o zkoušku, kdy dojde pomocí Charpyho kyvadlového kladiva za podmínek definovaných normou k přeražení zkušební vzorku s vrubem jedním nárazem kladiva. K úderu břitem kyvadlového kladiva musí dojít na opačné straně vzorku proti vrubu a v rovině souměrnosti vrubu (viz obr. 29). Kladivo o tíze G je zavěšeno ve výšce H a zde má svou potenciální energii. Po uvolnění se tato potenciální energie postupně přeměňuje na energii kinetickou. Následně dochází k přelomu zkušební vzorku (T) a kladivo s nadbytečnou energií vykoná pohyb na opačnou stranu do výšky h (viz obr. 30). Nárazová práce (K) potřebná k přelomu vzorku se vypočítá jako rozdíl potenciální energie kladiva v počáteční poloze a potenciální energie kladiva v nejvyšší poloze po přelomu vzorku. [45] [46]

$$K = G \cdot (H - h) \quad (1)$$

Ručička (S) ukazuje velikost nárazové práce (KV nebo KU dle tvaru vrubu) potřebné k přeražení zkušební vzorku.

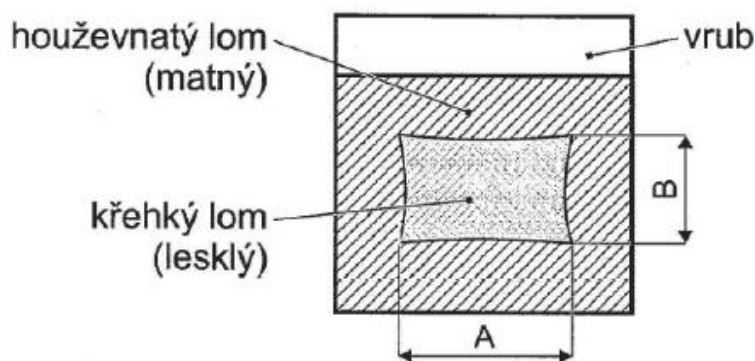


Obrázek 29 Uložení zkušební tělesa, tvary a rozměry vrubů při zkoušce rázem v ohybu [45]



Obrázek 30 Metoda měření absorbované energie [45]

Dalším způsobem vyhodnocení zkoušky je zjištění podílu houževnatého lomu FA [%]. Na lomové ploše přeraženého vzorku se ve většině případech vyskytuje směs houževnatého a křehkého porušení. Čím větší je procento houževnatého lomu, tím je odolnost vůči křehkému porušení vyšší.



Obrázek 31 Znárodnění lomové plochy po zkoušce rázem v ohybu [45]

8.2.3 Zkouška tvrdosti

Tvrдость je mechanická vlastnost, která je definována jako odpor proti vnikání cizího tělesa do zkoušeného materiálu (svarového spoje). Jedná se o levnou a rychlou destruktivní zkoušku. Tvrдость posuzujeme podle vtisku, který zanechá normalizované vlačované těleso (indentor) - kulička (Brinell), jehlan (Vickers, Knoop) nebo kužel (Rockwell) dostačující tvrdosti (kalená ocel, slinutý karbid, diamant) ve zkoušeném vzorku. Nejběžnějšími zkouškami tvrdosti jsou statické vnikací zkoušky (podle Brinella, Vickerse a Rockwella). U svarových spojů se tvrdost (resp. průběh tvrdosti) nejčastěji hodnotí pomocí zkoušky podle Vickerse. Principu a vyhodnocení těchto statických zkoušek je věnována další část práce. [44] [45]

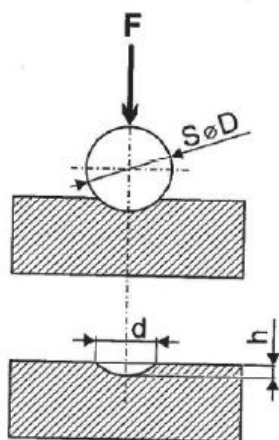
Zkouška tvrdosti podle Brinella

Tato zkouška se provádí dle ČSN EN ISO 6506-1 Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda. Povrch vzorku musí být před zkouškou očištěn a zbaven cizích těles, okují atd. Princip zkoušky spočívá ve vlačování kuličky z tvrdokovu nebo oceli do povrchu zkoušeného materiálu. Kulička má průměr D a působí na ní zkušební zatížení F , které je kolmé na povrch zkušební vzorku. Doba, po kterou obvykle působí

zkušební zatížení, se uvádí 10 až 15 s. Průměr kuličky D může být 1; 2,5; 5 a 10 mm. Pokud to rozměr zkušebního vzorku dovoluje, volí se vždy co největší průměr kuličky. Po odlehčení následuje měření průměru vtisku. Měří se ve dvou na sebe kolmých směrech a z těchto dvou hodnot se vypočítá průměr vtisku d. Tloušťka zkušebního vzorku musí být nejméně 8h a vzdálenost středu vtisku od okraje zkušebního vzorku by měla být alespoň 2,5d (viz obr. 32). Tvrdost podle Brinella se označuje HBW (pro kuličku z tvrdokovu) a dále následují číslice, které charakterizují podmínky zkoušky (průměr kuličky v mm, zkušební zatížení v kp, popř. doba zatížení, pokud zatížení trvá jinou dobu než 10 až 15 s). Např. zápis 450 HBW 5/850 znamená, že tvrdost 450 dle Brinella byla zjištěna kuličkou z tvrdokovu o průměru 5 mm a při zatížení 850 kp. [44] [45]

Tvrdost HBW se vypočítá podle následujícího vztahu [45]:

$$HBW = 0,102 \cdot \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$



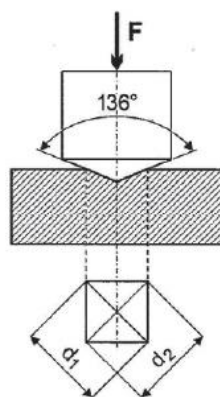
Obrázek 32 Princip zkoušky tvrdosti podle Brinella [45]

Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkoušku tvrdosti podle Vickerse popisuje norma ČSN EN ISO 6507-1 Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda. Princip zkoušky spočívá ve vtlačování indentoru, kterým je diamantový pravidelný čtyřboký jehlan, kolmo do povrchu zkušebního vzorku zkušebním zatížením F. Vrcholový úhel jehlanu je 136°. Po odlehčení se měří délka úhlopříček d_1 a d_2 a poté se vypočítá průměrná délka úhlopříček d. Tloušťka

zkušební vzorku musí být nejméně 1,5d a vzdálenost středů dvou vtisků by měla být alespoň 3d. Plné zkušební zatížení trvá od 10 do 15 s. Tvrdost podle Vickerse se označuje HV, před toho označení se zapisuje hodnota tvrdosti a za označení HV se zapisují podmínky zkoušky v pořadí: velikost zkušebního zatížení [kp], doba zatížení (pokud by byla použita jiná než 10 až 15 s). Např. 600 HV 2/20 znamená, že tvrdost podle Vickerse je 600 a byla stanovena zkušebním zatížením 2 kp a době zatížení 20 s. Tvrdost podle Vickerse se vypočítá následujícím vztahem [45] [48]:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3)$$



Obrázek 33 Metoda měření tvrdosti podle Vickerse [45]

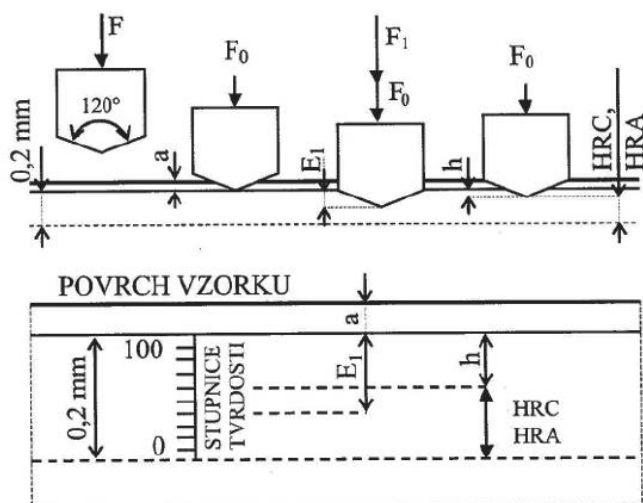
Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Tato zkouška tvrdosti se provádí dle ČSN EN ISO 6508-1 Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Část 1: Zkušební metoda. Při této zkoušce dochází ke vtlačování diamantového indentoru ve tvaru kužele (s vrcholový úhlem 120°) nebo kuličky z tvrdokovu do povrchu zkušební vzorku ve dvou postupných krocích. V prvním kroku dojde k předběžnému zkušebnímu zatížení F_0 o velikosti 98,07 N a indentor vnikne do hloubky a . Dochází k odstranění vlivu povrchové vrstvy. Hloubkoměr nastavíme do výchozí polohy. Ve druhém kroku se indentor zatíží zatížením F_1 a vnikne do hloubky E_1 . Následuje odlehčení o velikost zatížení F_1 , působí pouze zatížení F_0 . Hloubka E_1 se zmenší o pružnou deformaci. V případě, že by se odečítala hloubka při plném zatížení, tak by tvrdost byla značně menší z důvodu pružné deformace vtisku, stojanu stroje, podložky atd. Tvrdost podle Rockwella se určí jako rozdíl základní hloubky a hloubky trvalého vtisku po odlehčení na počáteční zatížení.

Základní hloubka pro diamantový kužel je 0,2 mm a je rozdělena na 100 dílků. Základní hloubka pro kuličku z tvrdokovu je 0,26 mm a je rozdělená na 130 dílků. Tvrdost podle Rockwella se zapisuje hodnotou tvrdosti a dále označením HRA, HRB, HRC dle indentoru. Např. 46 HRA znamená, že tvrdosti 46 podle Rockwella bylo dosaženo dle stupnice tvrdosti A (viz tab. 7). [45] [48]

Tabulka 7 Značení tvrdosti podle Rockwella [45]

| Stupnice tvrdosti | Značka tvrdosti | Vnikající těleso | F_0 [N] | F_1 [N] | $F (F_0 + F_1)$ [N] | Oblast použití |
|-------------------|-----------------|------------------|-----------|-----------|---------------------|----------------|
| A | HRA | Diamantový kužel | 98,07 | 490,3 | 588,37 | 20 – 88 HRA |
| B | HRB | Kulička 1,587 mm | 98,07 | 882,6 | 980,67 | 20 – 100 HRB |
| C | HRC | Diamantový kužel | 98,07 | 1373 | 1471,07 | 20 – 70 HRC |



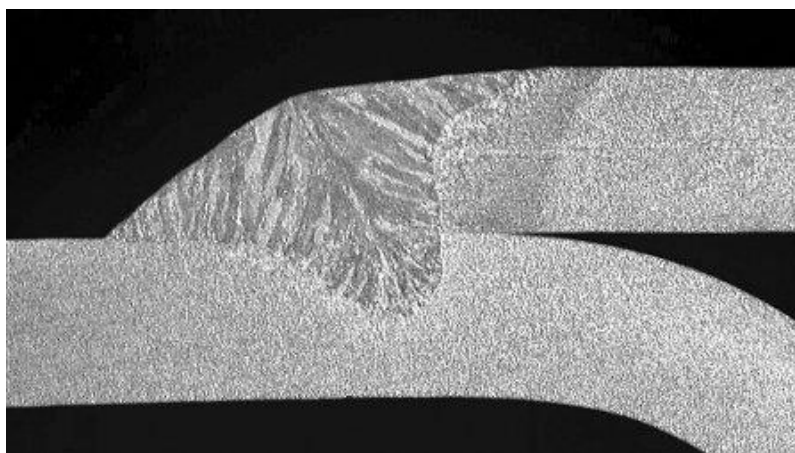
Obrázek 34 Průběh zkoušky tvrdosti podle Rockwella [45]

Zkouška tvrdosti svarových spojů se od klasické zkoušky tvrdosti povrchu materiálu odlišuje tím, že se provádí měření průběhu tvrdosti ve všech oblastech svarového spoje (na příčném řezu) - ZM1, TOO1, SK, TOO2, ZM2 – v několika liniích dle tloušťky zkoušeného kusu. Tuto zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 9015-1 a 2 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním, Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů.

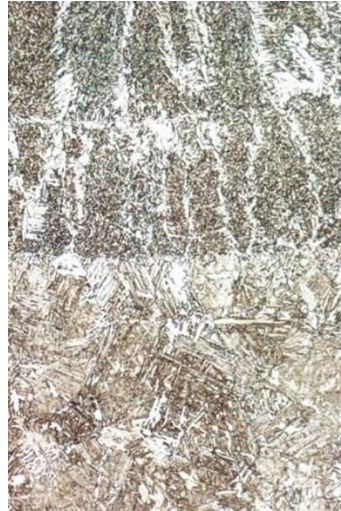
8.2.4 Zkoušky metalografické (makroskopická a mikroskopická)

Zkoušky makroskopické a mikroskopické se provádí podle normy ČSN EN ISO 17639

Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů. Používají se pro zjištění vad a jiných makroskopických a mikroskopických charakteristik svarového spoje (struktura, vměstky, trhliny atd.). Zkoušky se mohou provádět jak v naleptaném, tak v nenaleptaném stavu. Provádí se na zkušebním vzorku, který je příčně odebrán ze svařeného kusu. Zkušební vzorek musí být pro zkoumání vhodně připraven (rozřezán, vybroušen, vyleštěn, popřípadě naleptán). Jedná se o velmi pracnou přípravu vzorku. Při těchto procesech nesmí dojít k ovlivnění vzorku s ohledem na následné zkoumání. Pro makroskopické pozorování platí, že je vzorek zkoumán okem nebo při zvětšení maximálně 50x. Při makroskopické zkoušce se zjišťuje rozsah TOO, vady typu studených spojů nebo vměstků, spojení jednotlivých svarových housenek a způsob kladení jednotlivých svarových housenek a vrstev (u vícevrstvých svarů). Při mikroskopické zkoušce je vzorek pozorován při zvětšení 50x až 500x. Můžeme tedy pozorovat jednotlivá zrna, hranice zrn, strukturální složky materiálu svaru a TOO. [46] [49]



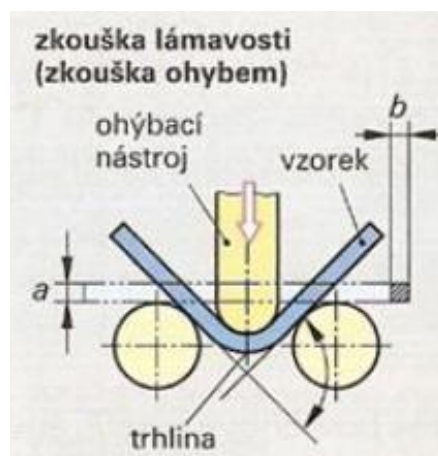
Obrázek 35 Ukázka makroskopické zkoušky koutového svaru [50]



Obrázek 36 Ukázka mikroskopické zkoušky tepelně ovlivněné oblasti svaru [49]

8.2.5 Zkouška lámavosti

Zkouška lámavosti (ohybová zkouška) je statická mechanická zkouška. Postup zkoušky určuje norma ČSN EN ISO 5173 – Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušky ohybem. Stanovuje typy a způsob odběru zkušebních vzorků z tupých svarových spojů pro příčné nebo podélné zkoušky ze strany kořene nebo ze strany líců nebo pro příčné boční zkoušky lámavosti u tupého spoje. Podstatou zkoušky je zatížení a následná deformace zkušebního vzorku jednostranným ohybem. Ohyb je prováděn plynulým zatížením trnu, který je umístěn kolmo k povrchu zkušebního vzorku. Osa svaru musí souhlasit s osou ohýbacího trnu. Zkušební vzorek je podepřen dvěma válečky s navzájem rovnoběžnými osami (viz obr. 37). Zkouška končí v okamžiku dosažení předepsaného úhlu ohybu. Zkouška slouží k určení plastických deformací materiálu a je využívána pro zkoušení deformační schopnosti tupých svarových spojů. [46]



Obrázek 37 Schématické zobrazení ohybové zkoušky [51]

9. Kvalifikace svařovacího procesu

Podle normy ČSN EN ISO 15614-2 [52] je nutné vytvořit svarový spoj na normalizovaných zkušebních kusech, jejichž rozměry závisí na typu spoje (tupý, koutový). Požadované nedestruktivní a destruktivní zkoušky pro jednotlivé typy spojů jsou uvedeny v tab. 8.

Tabulka 8 Kontrola a zkoušení zkušebních kusů z hliníku a jeho slitin podle ČSN EN ISO 15614-2 [52]

| Zkušební kus | Druh zkoušky | Rozsah zkoušení | Poznámka |
|--|---|--|----------|
| Tupý spoj s plným průvarem – obrázek 1 a obrázek 2 | 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 lící strany | a |
| | Kontrola makrostruktury | 1 zkušební vzorek | – |
| | Kontrola mikrostruktury | 1 zkušební vzorek | b |
| T-spoj s plným průvarem – obrázek 3 | Vizuální kontrola | 100 % | – |
| | Kapilární zkouška | 100 % | – |
| Připoj odbočky ^f s plným průvarem obrázek 4 | Kontrola makrostruktury | 4 zkušební vzorky | d |
| | Kontrola mikrostruktury | 1 zkušební vzorek | b |
| Koutové svary ^c obrázek 3 a obrázek 4 | Vizuální kontrola | 100 % | – |
| | Kapilární zkouška | 100 % | – |
| | Kontrola makrostruktury | 2 zkušební vzorky | – |
| | Kontrola mikrostruktury | 1 zkušební vzorek | b |
| <p>^a Pro tloušťku $t \geq 12$ mm mohou být dvě zkušební tyče ze strany kořene a dvě zkušební tyče z lící strany nahrazeny přednostně čtyřmi zkušebními tyčemi pro boční zkoušku lámavosti.</p> <p>^b Pouze pro materiál skupiny 23 a všechny slitiny pro odlitky</p> <p>^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.</p> <p>^d Pro zkoušky podle obrázku 3 pouze dva zkušební vzorky pro kontrolu makrostruktury.</p> | | | |

Protože Al a jeho slitiny nevykazují tranzitní chování, používá se místo zkoušky rázem v ohybu zkouška lámavosti (ohybová zkouška). viz tab. 8.

10. Praktická část

Praktická část bakalářské práce je věnována svařování hliníkové slitiny EN AW 5754 H22 metodou MIG stejnosměrným proudem při použití nepřímé polaroty. Následně byly zkoušky vyhodnoceny z hlediska celistvosti pomocí VT zkoušky a vyhodnoceny mechanické a strukturní vlastnosti (provedena tahová zkouška, zkouška makrostruktury a zkouška tvrdosti dle Vickerse).

10.1 Základní a přídatný materiál

Jako základní materiál pro praktickou část bakalářské práce byla zvolena nevytvrditelná hliníková slitina EN AW 5754 H22 (AlMg3). Její mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 9 a chemické složení v tab. 10.

Tabulka 9 Mechanické vlastnosti hliníkové slitiny EN AW 5754 H22

| Mechanická vlastnost | Hodnota |
|----------------------|-----------------|
| R_m | 190 – 240 MPa |
| $R_{p0,2}$ | 80 MPa |
| Tvrdost | 50 HBW 2,5/62,5 |
| A_{50} | 16 – 17 % |

Tabulka 10 Chemické složení hliníkové slitiny EN AW 5754 H22

| Chemické složení [%] | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|-------|------|
| Mg | Mn | Fe | Si | Cr | Zn | Ti | Cu |
| 2,6 - 3,6 | ≤0,5 | ≤0,4 | ≤0,4 | ≤0,3 | ≤0,2 | ≤0,15 | ≤0,1 |

Pro svařování byl použit přídatný materiál označený dle normy EN ISO 18273: S Al 5356 (AlMg5Cr(A)) o průměru 1,2 mm. Mechanické vlastnosti přídatného materiálu jsou uvedeny v tab. 11 a chemické složení v tab. 12.

Tabulka 11 Mechanické vlastnosti přídatného materiálu AlMg5Cr(A)

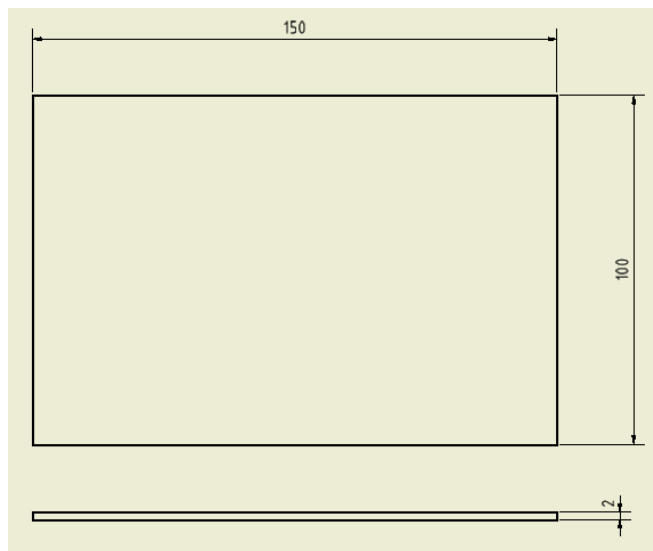
| Mechanická vlastnost | Hodnota |
|----------------------|---------|
| $R_{p0,2}$ | 120 MPa |
| R_m | 265 MPa |
| A_5 | 26 % |

Tabulka 12 Chemické složení přídatného materiálu AlMg5Cr(A)

| Chemické složení [%] | | | | | | | |
|----------------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| Al | Mg | Mn | Fe | Cr | Si | Zn | Cu |
| 94,56 | 4,9 | 0,13 | 0,13 | 0,12 | 0,05 | 0,01 | 0,01 |

10.2 Rozměry vzorku pro svařování

Pro tento experiment k sobě byly svařeny dvě desky, aby byly vytvořeny tupé I svař. Rozměry zkušebních desek jsou uvedeny na obr. 38.



Obrázek 38 Rozměry základního materiálu

10.3 Pracoviště pro svařování

Experimentální pracoviště pro svařování vzorků bylo vybaveno svařovacím zdrojem Elmatech MIDI MIG 300/800 AC/DC, manipulátorem Weldycar NV a přípravkem pro upnutí svařovaných desek.



Obrázek 39 Experimentální pracoviště pro svařování vzorků

10.3.1 Svařovací zdroj Elmatech MIDI MIG 300/800 AC/DC

Tento svařovací zdroj pro metodu svařování MIG(MAG) je vhodný pro svařování tenkých plechů. Je určen především pro svařování hliníku, mosazi, mědi a hořčíku. Lze s ním svařovat střídavým i stejnosměrným proudem. Při zvolení stejnosměrného proudu lze využít pulzní proud až 800 A.

Tabulka 13 Technická data Elmatech MIDI MIG 300/800 AC/DC [53]

| | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Síťové napětí | 3 x 400 V 50 Hz |
| Stupeň ochrany | P23 |
| Rozsah nastavení svařovacího výkonu | Od 10 A/14,5 V plynule do 300 A/29 V |
| Maximální pulzní proud při DC | 800 A |
| Rozměry | 670 x 325 x 700 mm |
| Hmotnost | 60 kg |



Obrázek 40 Svařovací zdroj Elmatech MIDI MIG 300/800 AC/DC

10.3.2 Manipulátor Weldycar NV

Jedná se o přenosný svařovací čtyřkolový traktor, vybaven magnetickým přitahovacím systémem, který zajišťuje svařování v mnoha polohách. Síla magnetu je 25 kg. Využívá se především pro svařování metodou MIG/MAG. Tento manipulátor je lehký (10 kg) a má robustní konstrukci. Napájení je zajištěno 14 V baterií. Rychlost je regulovatelná v rozmezí 5 až 70 cm·min⁻¹.

| | |
|------------------------|------------------------------|
| Hmotnost | 10 kg |
| Napájení | 14 V baterie |
| Autonomní bez oscilace | 6 hodin nepřetržité práce |
| Autonomní s oscilací | 4 hodiny nepřetržité práce |
| Kolečka | Průměr: 75 mm, Šířka: 30 mm |
| Svislé suporty | Pracovní rozsah 40 mm |
| Vodorovné suporty | Pracovní rozsah 40 mm |
| Programování | Ne |
| Rychlost | 5 až 70 cm·min ⁻¹ |
| Síla magnetu | 25 kg |
| Třída krytí | IP 235 |
| Pracovní teplota | -5 až +50 °C |



Obrázek 41 Svařovací manipulátor Weldycar NV

10.3.3 Přípravek pro upnutí

Protože byl jako základní materiál pro experimentální vzorky zvolen plech o malé tloušťce, byl zároveň pro realizaci zkušebních vzorků použit speciální upínací přípravek, který je zobrazen na obr. 42. Přípravek pro upnutí svařovaného základního materiálu byl složen ze dvou částí. První byla ocelová, do té byla vložena měděná lišta s drážkou a otvory určenými pro proudění ochranného plynu, který chránil kořen před okolní atmosférou během

svařování. Aby se zabránilo vzniku deformací, byly svařované plechy přichyceny příložkami pojištěnými šrouby a vzorky byly ponechány po svaření v přípravku až do vychladnutí.



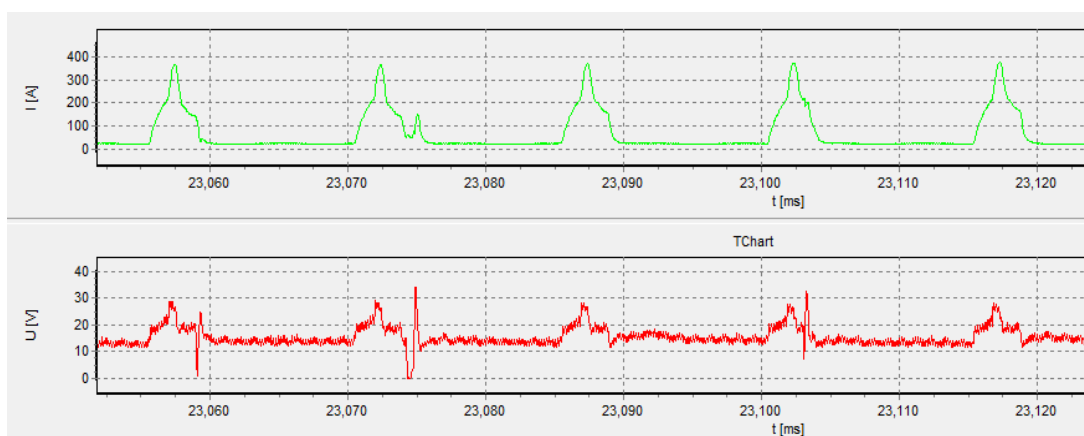
Obrázek 42 Přípravek pro upnutí základního materiálu

10.4 Svařování vzorků

Před samotným svařováním byla nejprve mechanicky narušena vrstva Al_2O_3 kartáčem z korozivzdorné oceli a dále byl základní materiál odmaštěn lihem. Poté se dva plechy upnuly do očištěného a odmaštěného přípravku tak, aby se svařované plechy dotýkaly nad drážkou měděné lišty. Při svařování vzorků byla využita metoda MIG a stejnosměrný proud se zapojením na nepřímou polaritu. Celkem bylo svařeno 10 vzorků různými svařovacími parametry. V průběhu svařování každého vzorku byla zajištěna konstantní zvolená svařovací rychlost manipulátorem Weldycar NV, který byl vybaven držákem na svařovací hořák. Výlet drátu byl 12 mm. Svařovací hořák svíral s rovinou kolmou na osu svaru úhel 35° . Svařený vzorek byl vyjmut až po jeho vychladnutí, aby nedocházelo k deformacím. Dále byly ke svařovacímu zdroji připojeny senzory na snímání průběhu proudu a napětí, pomocí systému Weldmonitor 4.5. Data byla monitorována přímo přes propojený notebook, který zajistil sběr informací pro následné zobrazení průběhu el. proudu a napětí v závislosti na čase.

Tabulka 15 Označení svařených vzorků a zvolené svařovací parametry (odečtené ze svařovacího zdroje)

| číslo vzorku | el. napětí [V] | el. proud [A] | Rychlost posuvu přídatného materiálu [m/min] | Rychlost manipulátoru [cm/min] |
|--------------|----------------|---------------|--|--------------------------------|
| 1 | 16 | 40 | 3,7 | 40 |
| 2 | 16 | 40 | 3,7 | 35 |
| 3 | 16 | 40 | 3,7 | 45 |
| 4 | 16 | 35 | 3,1 | 66 |
| 5 | 16 | 35 | 3,1 | 40 |
| 6 | 16 | 45 | 4,1 | 40 |
| 7 | 16 | 45 | 4,1 | 35 |
| 8 | 16 | 45 | 4,1 | 45 |
| 9 | 16 | 35 | 3,1 | 35 |
| 10 | 16 | 35 | 3,1 | 45 |



Obrázek 43 Průběh el. proudu a napětí v závislosti na čase během svařování vzorku č. 3 (software Weldmonitor 4.5)

Tabulka 16 Zaznamenané hodnoty parametrů pro jednotlivé vzorky softwarem Weldmonitor 4.5

| Číslo vzorku | Základní hladina proudu [A] | Pulzní proud [A] | Šířka pulzu [ms] | Šířka mezery mezi pulzy [ms] |
|--------------|-----------------------------|------------------|------------------|------------------------------|
| 1 | 11,1 | 389 | 3,75 | 11,25 |
| 2 | 11,1 | 395 | 3,8 | 11,2 |
| 3 | 11,1 | 390 | 3,9 | 11,1 |
| 4 | 10,6 | 380 | 3,8 | 14,3 |
| 5 | 10,5 | 385 | 3,85 | 14,5 |
| 6 | 12,2 | 397 | 3,8 | 9,1 |
| 7 | 11,8 | 388 | 4 | 9,2 |
| 8 | 11,8 | 391 | 4,1 | 9,2 |
| 9 | 9,9 | 465 | 3,75 | 15 |
| 10 | 10,3 | 378 | 3,8 | 14,5 |



Obrázek 44 Vzorek č. 6 před zhotovením svaru













Obrázek 45 Vzorek č. 6 po zhotovení svaru



Obrázek 46 Svařený vzorek č. 1

Tabulka 17 Zobrazení svarových spojů svařovaných vzorků v závislosti na svařovacích parametrech

| | 35 A | 40 A | 45 A |
|-----------|--|--|---|
| 35 cm/min |  |  |  |
| 40 cm/min |  |  |  |
| 45 cm/min |  |  |  |
| 66 cm/min |  | | |

Vzorky pro mechanické zkoušky byly svařovány různými svařovacími parametry. Byly zaznamenány průběhy el. proudu a napětí v závislosti na čase (viz obr. 43). Pomocí provedené vizuální kontroly byly nejlépe svařeny vzorky s nastaveným proudem na svařovacím zdroji o velikosti 40 A (vzorky 1, 2 a 3). Nejlépe ze všech vzorků se jeví vzorek č. 3. Naopak vzorky svařované velikostí proudu 35 A se jeví jako studené spoje a vzorky s použitím svařovacího proudu o velikosti 45 A jako spoje přehřáté. Velikost nastaveného el. proudu na svařovacím zdroji měla vliv především na velikost intervalu mezi jednotlivými pulzy. Se zvyšujícím se proudem se tento interval zkracoval.

10.5 Řezání vzorků

Pro tahovou zkoušku a zkoušku makrostruktury bylo zapotřebí ze svařených zkušebních kusů odebrat vzorky požadovaných rozměrů pro následné zkoušení. Ze svařeného celku byly odebrány 3 vzorky pro tahovou zkoušku o šířce 20 mm. Pro zkoušku makrostruktury byl odebrán vždy jeden vzorek o šířce 10 mm. Výjimkou byl svařenec číslo 9, ze kterého nebyl odebrán ani jeden vzorek, protože se nepodařilo vytvořit celistvý svar. Důvodem mohly být nevyhovující svařovací parametry nebo nedokonalé upnutí plechů do přípravku. U vzorku číslo 10 se podařilo odebrat pouze 2 vzorky pro tahovou zkoušku. Řezání

vzorků probíhalo na pásové pile Bomar ergonomic 275.230 DC při použití procesní kapaliny, aby nedocházelo k výraznému tepelnému ovlivnění.



Obrázek 47 Nevydařený svarový spoj u vzorku č. 9



Obrázek 48 Řezání vzorku pro tahovou zkoušku



Obrázek 49 Pásová pila Bomar ergonomic 275.230 DC

10.6 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena v laboratořích ústavu strojírenské technologie na FS ČVUT v Praze. Pro tahovou zkoušku byl použit zkušební trhací stroj od výrobce LaborTech (konkrétně LabTest model 5.100SP1). Technická data o tomto stroji jsou uvedena v tab. 18.

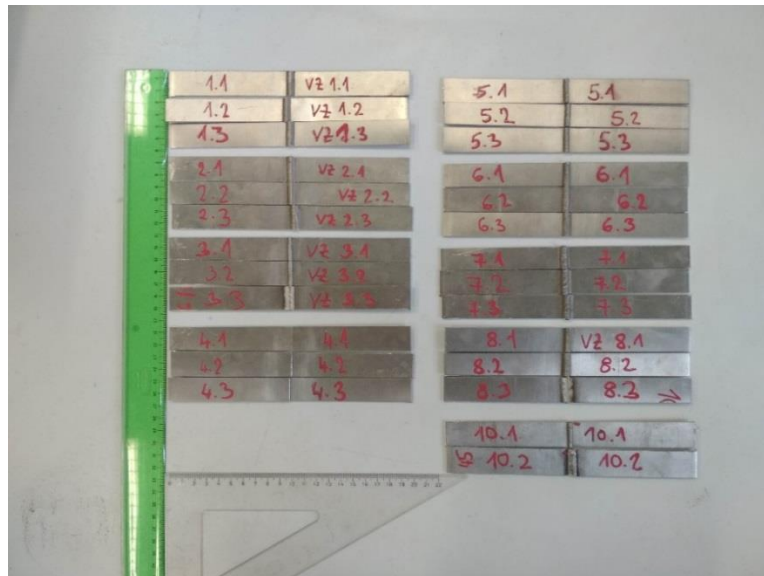
Tabulka 18 Technická data o LabTest 5.100SP1

| Technická data | 5.100SP1 |
|---------------------------------|--------------------------|
| Jmenovité zatížení [kN] | 100 |
| Max. zkušební rychlost [mm/min] | 600 |
| Přesnost řízení rychlosti [%] | ±0,5 |
| Rozlišení příčnicku [μm] | 1 |
| Tuhost rámu [mm/N] | 1,6 x 10 ⁻⁶ |
| Rozpětí sil [kN] | 500-600 |
| Přesnost měření síly [%] | ±0,3 z hodnoty v rozsahu |
| Přesnost dráhy [μm] | 1 - ČSN EN ř513 |
| Přesnost měření napětí [%] | ±0,5 průtahoměru |



Obrázek 50 Zkušební trhací stroj LabTest 5.100SP1

Byla provedena tahová zkouška dle ČSN EN ISO 6892-1. Byly použity nenormalizované zkušební kusy, kdy svarový spoj nebyl opracován a šířka zkušebního vzorku byla v celé délce konstantní. Vzorek byl upnut mezi trhací čelisti. Zkouška probíhala při zvolené rychlosti zatěžování 5 mm/min. Cílem bylo pro každý vzorek zjistit maximální zatížení v průběhu zkoušky.



Obrázek 51 Vzorky připravené na tahovou zkoušku

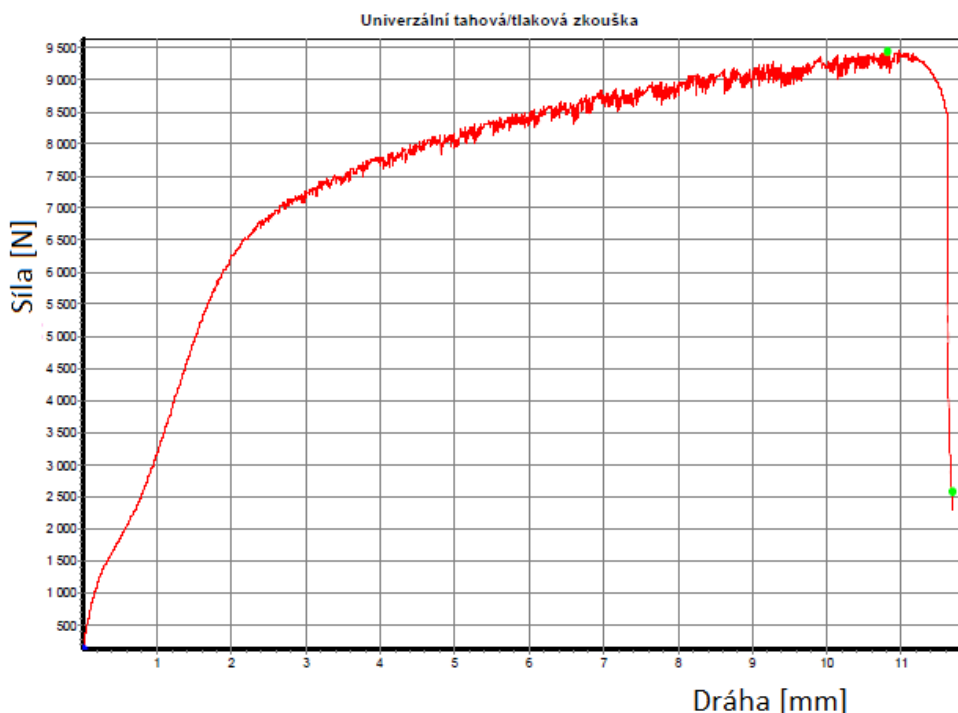


Obrázek 52 Upnutý vzorek ve zkušebním trhacím stroji



Obrázek 53 Přetržený vzorek č. 2.1

| Označení vzorku | Pořadí vzorku | Rozměry | | Maximální zatížení [N] | Oblast porušení |
|--------------------|------------------|----------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| | | a (šířka) [mm] | b (tloušťka plechu) [mm] | | |
| 1 | 1 | 20,02 | 2 | 9096 | mimo svar |
| | 2 | 19,42 | | 9191 | mimo svar |
| | 3 | 20,18 | | 9442 | mimo svar |
| 2 | 1 | 20,2 | | 9522 | mimo svar |
| | 2 | 18,8 | | 9008 | mimo svar |
| | 3 | 19,75 | | 9440 | mimo svar |
| 3 | 1 | 19,13 | | 9208 | mimo svar |
| | 2 | 20,08 | | 9458 | mimo svar |
| | 3 | 19,51 | | 9261 | mimo svar |
| 4 | 1 | 19,7 | | 4344 | ve svaru |
| | 2 | 19,87 | | 5046 | ve svaru |
| | 3 | 18,95 | | 5346 | ve svaru |
| 5 | 1 | 20,01 | | 9604 | mimo svar |
| | 2 | 18,4 | | 8827 | mimo svar |
| | 3 | 20,03 | | 8951 | přerušená zkouška-vypadl pohon stroje |
| 6 | 1 | 19,03 | 9021 | mimo svar | |
| | 2 | 19,69 | 9452 | mimo svar | |
| | 3 | 19,47 | 9104 | mimo svar | |
| 7 | 1 | 18,2 | 8550 | mimo svar | |
| | 2 | 19,65 | 8967 | mimo svar | |
| | 3 | 19,25 | 8757 | mimo svar | |
| 8 | 1 | 19,54 | 9089 | na hraně | |
| | 2 | 18,66 | 8644 | na hraně | |
| | 3 | 19,94 | 9089 | na hraně | |
| 10 | 1 | 20,48 | 9005 | na hraně | |
| | 2 | 21 | 9527 | na hraně | |



Tabulka výsledků

| | OK | Datum | Čas | Ozn.1 | Ozn.2 | FH N | RH N/mm | AH % | dLH mm | FB N | RB N/mm |
|---|----|----------|-----------|-------|-------|---------|------------|---------|-----------|---------|------------|
| 9 | x | 03.07.20 | 10:12 | | | 9458,30 | 235,52 | 21,62 | 10,81 | 2587,60 | 64,43 |
| | | AB % | dLB mm | | | | | | | | |
| 9 | | 23,36 | 11,68 | | | | | | | | |

Obrázek 54 Tahový diagram vzorku 3.2

U tahové zkoušky docházelo téměř u všech vzorků (konkrétně 1, 2, 3, 5, 6 a 7) k přetržení v blízkosti svarového kovu, tedy v TOO. Vzorky 8 a 10 byly přetrženy přímo na hraně svaru. Vzorek 4 byl porušen v ose svaru z důvodu nedostatečného provaření a vytvoření studeného spoje. V tabulce 19 jsou uvedeny maximální hodnoty zatížení, kterých bylo dosaženo v průběhu tahových zkoušek. Nejvyšších hodnot dosáhly vzorky 2 a 3 (tedy vzorky které byly svařovány svařovacím proudem 40 A). Naopak nejhůře dopadl vzorek 4, u kterého byla hlavní příčinou neúspěchu vysoká svařovací rychlost. Na obr. 54 je zobrazen tahový digram vzorku 3.2. Z výsledků je zřejmé, že zvyšující se svařovací proud a rychlost má za následek pokles maximální síly při přetržení vzorku. Rovněž příliš nízká zvolená svařovací rychlost má za následek pokles maximální síly.

10.7 Zkouška makrostruktury

Pro zkoušku makrostruktury bylo nejprve potřeba zhotovit metalografické výbrusy. Tyto výbrusy byly zhotoveny v laboratoři Ústavu strojírenské technologie, FS ČVUT v Praze. Při tomto experimentu byla pro řezání použita přesná metalografická pila Labotom-3 od výrobce Struers s intenzivním chlazením (viz obr. 55). K řezání byl použit kotouč 20A25. Byl proveden příčný řez svarem, aby byly zachyceny všechny oblasti vyskytující se ve vzorku (základní materiál a TOO po obou stranách svarového spoje a svarový kov).



Obrázek 55 Metalografická pila Labotom-3

Dalším krokem bylo lisování vzorků za tepla do zalévací hmoty Multifast. Zalisování bylo provedeno v metalografickém lisu CitoPress-1 (viz obr. 56). Parametry lisování jsou uvedeny v tab. 20.



Obrázek 56 Metalografický lis CitoPress-1

| Parametr | Hodnota |
|---------------------|---------|
| Teplota [°C] | 180 |
| Tlak [bar] | 250 |
| Doba ohřevu [min] | 4,5 |
| Doba chlazení [min] | 3 |



Obrázek 57 Vzorky po lisování za tepla

Po vytvrzení zalévací hmoty následovali 4 fáze broušení vzorků. Broušení probíhalo na brusce Phoenix Beta značky Buehler, která byla vybavena automatickou hlavou Vector (viz obr. 58). Parametry broušení jsou uvedeny v tab. 21. K broušení byly použity speciální kruhové brusné papíry SiC o hrubostech P180, P1200, P2000 a P4000.



Obrázek 58 Bruska Phoenix Beta od firmy Buehler

Tabulka 21 Parametry broušení vzorků

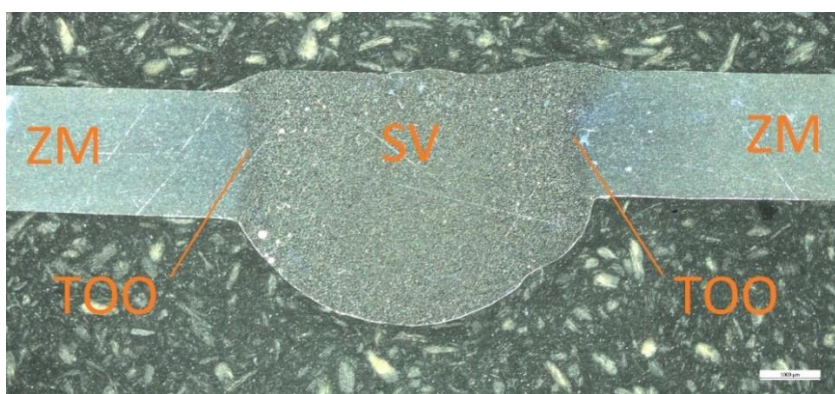
| | |
|-----------------------|------------|
| Otáčky [ot./min] | 300 |
| Čas broušení [s] | 50 |
| Přítlak na vzorek [N] | 30 |
| Točení | protiběžné |
| Chlazení | Vodou |

Další částí bylo leštění vzorků leštícími plátny. Leštění probíhalo při 150 ot./min, přitlaku 30 N na vzorek, po dobu 3,5 min. Jako první bylo použito leštící plátno MD Dac a smáčedlo MetaDi Fluid společně s diamantovou leštící suspenzí s velikostí zrn 1 μm . Ve druhém kroku probíhalo leštění pomocí leštícího plátna NanoCloth (0,05 μm) a smáčedla Masterpref. Ve třetím kroku leštění bylo použito leštící plátno MD Nap (0,05 μm) společně s koloidním silikátem OPU.

Následovala poslední fáze úpravy vzorků, leptání. Naleptání vzorků se provádělo pomocí leptadla se složením 95 ml H_2O , 5 ml HCl, 2,5 ml HNO_3 a 1 ml HF. Pro focení vzorků byl využit makroskop Stemi 508 a software ZEN od firmy Zeiss. Na pořízených snímcích mohl být rozeznán základní materiál, TOO a svarový kov (viz obr. 60).



Obrázek 59 Vzorky po leštění a leptání



Obrázek 60 Ukázka makrostruktury svarového spoje - Vzorek 3

| | 35 A | 40 A | 45 A |
|--------------|------|------|------|
| 35 cm/min | | | |
| 40 cm/min | | | |
| 45 cm/min | | | |
| 66 cm/min | | | |

Při pozorování metalografických výbrusů je možné od sebe odlišit ZM, TOO a SK. Je vidět, že TOO je velmi malá. Dále je možné zpozorovat drobné póry, které vznikaly při svařování. Ze snímků v tab. 22 je zřejmé, že nejvíce vyhovující jsou vzorky svařované proudem 40 A (při rychlostech 45 cm/min a poté 40 cm/min), kde docházelo k dostatečnému natavení základního materiálu a zároveň nedocházelo ke zbytečnému přehřátí. Nevhovující jsou vzorky svařované proudem 35 A.

10.8 Zkouška tvrdosti

Měření tvrdosti dle Vickerse probíhalo na tvrdoměru od výrobce Buehler. Pro měření bylo zvoleno zkušební zatížení HV1 (měření mikrotvrdosti svarového spoje) po dobu 12 s. U každého vzorku bylo provedeno celkem 15 vtisků (3 vtisky z obou stran do základního materiálu a do TOO a 3 vtisky do svarového kovu). Vzhledem k tloušťce svařovaných vzorků byla měřena jedna linie průběhu tvrdosti ve středu svařovaného vzorku. Vyhodnocení tvrdosti bylo provedeno změřením velikosti úhlopříček po vtisku indentoru za pomoci měřicí optiky tvrdoměru. Na základě změřených velikostí úhlopříček dopočítal tvrdoměr hodnoty tvrdosti.



Obrázek 61 Tvrdoměr Buehler

Tabulka 23 Výsledky z měření mikrotvrdomosti

| Tvrdomost HV 1/12 | | | | | | | | | | |
|-------------------|------|------------|------|-------------|------|-----------|------|-------------|------|------------|
| Číslo vzorku | ZM1 | průměr ZM1 | TOO1 | průměr TOO1 | SV | průměr SV | TOO2 | průměr TOO2 | ZM2 | průměr ZM2 |
| 1 | 62,3 | 60,5 | 60,9 | 62,0 | 64,4 | 63,3 | 59,2 | 61,3 | 60,6 | 60,6 |
| | 59,6 | | 63,4 | | 63,4 | | 62,2 | | 59,8 | |
| | 59,5 | | 61,7 | | 62,1 | | 62,6 | | 61,5 | |
| 2 | 66,9 | 63,5 | 63,2 | 63,1 | 64,7 | 64,7 | 63,2 | 62,2 | 57,3 | 58,2 |
| | 62,5 | | 62,9 | | 64,2 | | 62,5 | | 58,8 | |
| | 61,2 | | 63,2 | | 65,2 | | 60,8 | | 58,5 | |
| 3 | 62,8 | 62,0 | 57,7 | 60,1 | 63,5 | 64,3 | 54,3 | 58,2 | 61,9 | 62,9 |
| | 61,7 | | 59,2 | | 65,3 | | 57,4 | | 63,5 | |
| | 61,5 | | 63,5 | | 64,2 | | 62,8 | | 63,3 | |
| 4 | 54,6 | 56,6 | 58,9 | 59,4 | 72 | 71,7 | 63 | 62,1 | 68,5 | 68,8 |
| | 56,7 | | 60,4 | | 71,3 | | 63,3 | | 68,2 | |
| | 58,5 | | 59 | | 71,7 | | 60 | | 69,7 | |
| 5 | 68,1 | 68,3 | 62,6 | 61,6 | 64,6 | 65,0 | 61,4 | 63,9 | 67,3 | 65,0 |
| | 68,4 | | 62 | | 65,4 | | 63,5 | | 63,9 | |
| | 68,3 | | 60,2 | | 65,1 | | 66,7 | | 63,8 | |
| 6 | 61 | 62,1 | 68,8 | 67,8 | 67,1 | 67,1 | 56,8 | 62,7 | 66,7 | 66,0 |
| | 61,2 | | 68,5 | | 68,6 | | 63,1 | | 65,3 | |
| | 64,1 | | 66 | | 65,7 | | 68,1 | | 65,9 | |
| 7 | 67,7 | 66,7 | 68,4 | 64,1 | 63,6 | 63,7 | 63,5 | 64,8 | 60,3 | 61,1 |
| | 65,9 | | 62 | | 64,1 | | 65,1 | | 59,2 | |
| | 66,6 | | 61,8 | | 63,5 | | 65,8 | | 63,7 | |
| 8 | 56,6 | 56,0 | 57,8 | 58,4 | 66,4 | 64,2 | 60,3 | 58,0 | 57,2 | 58,2 |
| | 56,2 | | 58,5 | | 65,2 | | 57,2 | | 58,7 | |
| | 55,3 | | 58,9 | | 61 | | 56,5 | | 58,6 | |
| 10 | 66,9 | 66,2 | 58,6 | 61,4 | 65,9 | 66,7 | 59,2 | 58,4 | 56,4 | 60,3 |
| | 66,3 | | 60 | | 68,9 | | 57,6 | | 59,9 | |
| | 65,5 | | 65,6 | | 65,4 | | 58,4 | | 64,5 | |

V TOO byla očekávána nejnižší hodnota tvrdosti, což se potvrdilo u vzorků číslo 3, 5 a 10. U ostatních vzorků byla v TOO hodnota tvrdosti nejnižší pouze z jedné nebo žádné strany od SK (viz tab. 23). Vzorky č. 1, 2, 3, 4, 8 a 10 dosahovaly nejvyšších hodnot tvrdosti v oblasti SK. Při měření tvrdosti bylo největším problémem rozeznání TOO, která byla velmi

malá (cca 2-3 mm), od ZM. Z tohoto důvodu se vtisky do vzorků neprováděly jednoduše. Výsledné hodnoty tvrdosti v této oblasti, tak nemusí být naměřeny zcela správně. Byl použit PM o částečně rozdílném chemickém složení (s vyšším obsahem legujícího prvku než má ZM) a mechanických vlastnostech. I z tohoto důvodu mohou být hodnoty tvrdosti ve SK a TOO vyšší než u ZM.

11. Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na vliv tavného svařování na mechanické vlastnosti u spojů z hliníkových slitin. V teoretické části byly rozebrány vlastnosti hliníku, rozdělení hliníkových slitin, a především hlavní problémy spojené se svařitelností hliníku, resp. jeho slitin. Následně byly popsány nejpoužívanější metody svařování, kontrola a zkoušení svarových spojů u těchto slitin.

V praktické části bylo svařeno odlišnými svařovacími parametry 10 vzorků pomocí tupého svaru. Byla využita metoda pulzní MIG a stejnosměrný proud se zapojením na nepřímou polaritu. Svařována byla nevytvrditelná hliníková slitina EN AW 5754 H22 (AlMg3). Jako přídatný materiál byl použit S Al 5356 (AlMg5Cr) o průměru svařovacího drátu 1,2 mm. Ze svařenců byly odebrány vzorky pro následné zkoušky (tahová zkouška, zkouška makrostruktury a tvrdosti). Po provedení zkoušek následovalo jejich vyhodnocení.

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo ověřit, zda a jaký vliv mají zvolené svařovací parametry (svařovací proud a svařovací rychlost) na změnu mechanických vlastností nevytvrditelné hliníkové slitiny AlMg3 v okolí svarového spoje.

Ze všech provedených zkoušek a následného vyhodnocení je zřejmé, že zvolené svařovací parametry mají vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Vlivem vneseného tepla během svařování dochází ke snižování hodnot mechanických vlastností (pevnost, tvrdost) v TOO. Při tahové zkoušce docházelo téměř ve všech případech k přetržení vzorku v TOO. Při měření tvrdosti byl u některých vzorků zřejmý i pokles této hodnoty v TOO oproti základnímu materiálu. Mechanické vlastnosti se měnily v závislosti na zvolených svařovacích parametrech, avšak nejednalo se o výrazné změny. Důvodem může být především zvolená nevytvrditelná slitina, u které se nepředpokládá výrazný pokles hodnot mechanických vlastností nebo použití PM s vyšším obsahem legujícího prvku než obsahuje ZM.

12. Seznam použité literatury

- [1] *Alinvest: Výskyt hliníku v přírodě* [online]. b.r. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.alinvest.cz/cs/hlinik/hlinik-v-prirode>
- [2] *Konstrukce a navrhování svarových spojů*. 1.vydání. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2017. ISBN 978-80-01-06315-6.
- [3] *Matematické fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4.vydání. Prometheus, 1988. ISBN 978-80-7196-345-5.
- [4] *Encyklopedie hliníku*. 1.vydání. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [5] *History of aluminium* [online]. b.r. [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_aluminium
- [6] *Ložiska rud* [online]. b.r. [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/rudy/bauxit.html>
- [7] *Hexafluorohlinitan sodný* [online]. b.r. [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://web.natur.cuni.cz/~kudch/main/halogeny/HALOGENY/HALOGENY/fluor/vyznam/kryolit.html>
- [8] *Coca-Cola, fanta a sprite* [online]. b.r. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://cz.depositphotos.com/47007769/stock-photo-coca-cola-fanta-and-sprite.html>
- [9] *Fólie* [online]. b.r. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://obalto.cz/folie-alu/1023-alobal-03-x-10-m-8591425035125.html>
- [10] *VENBOS* [online]. b.r. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.zebriky-venbos.cz/trojdilny-zebrik-venbos-profi-3809-3x9/>
- [11] *Hliníkový konstrukční systém* [online]. b.r. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.aluteckk.cz/hlinikovy-konstrukcni-system>
- [12] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1.vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [13] Použití slitiny. *Alumeco* [online]. b.r. [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://www.alumeco.cz/technick%C3%A9-informace/%C3%BA-daje-o-hlin%C3%ADku/pou%C5%BE-it%C3%AD-slitiny>
- [14] *Využití slitin lehkých kovů v konstrukci moderní elektroniky* [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-12-04]. Dostupné z:

- https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=127628.
Bakalářská práce. VUT v Brně.
- [15] *Kovové materiály*. 1.vydání. Praha: VŠCHT Praha, 2006. ISBN 978-80-7080-600-5.
- [16] *Metalurgie slitin hliníku* [online]. b.r. [cit. 2020-02-05]. Dostupné z:
<https://www.strojnicketabulkyonline.cz/odlevani/metalurgie-slitin-hliniku/>
- [17] *Svařování Směrnice pro zařazení kovových materiálů do skupin* [online]. b.r. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10651413-Svarovani-smernice-pro-zarazeni-kovovych-materialu-do-skupin.html>
- [18] Značení neželezných kovů. *Ferona online* [online]. b.r. [cit. 2020-02-05]. Dostupné z:
<https://online.ferona.cz/znaceni-nezelezných-kovu/?typ=2>
- [19] *Svařitelnost hliníkových slitin* [online]. b.r. [cit. 2020-02-25]. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-hlinikovych-slitin.html>
- [20] Koroze hliníku. *Alumeco* [online]. b.r. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z:
<https://www.alumeco.cz/technick%C3%A9-informace/obecn%C4%9B/koroze-hlin%C3%ADku>
- [21] MATHERS, Gene. *The welding of aluminium and its alloys*. 1.vydání. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-1551-4.
- [22] *Svařování TIG - AC nebo DC?* [online]. b.r. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z:
<https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-ac-nebo-dc/t-68/t-122>
- [23] *Technologie svařování* [online]. b.r., , 30 [cit. 2020-02-22]. Dostupné z:
http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/ctv_technologie_vyroby_I_svarovani_kubicek.pdf
- [24] *Materiály a jejich svařitelnost*. 2.vydání. Ostrava: Zeross, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
- [25] *ResearchGate* [online]. b.r. [cit. 2020-02-25]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/figure/Change-in-the-hydrogen-solubility-in-aluminum-depending-on-the-temperature_fig1_321677066
- [26] *Svařitelnost hliníkových slitin* [online]. b.r. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z:
<http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=502>
- [27] HAJDÍK, Jiří a Michal HEINRICH. Technologie svařování hliníku a jeho slitin. In: *Svět svaru* [online]. b.r., s. 2 [cit. 2020-02-25].
- [28] ČSN EN 1011-4. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 4: Obloukové svařování hliníku a slitin hliníku*. 2002.
- [29] KOUTNÝ, Jiří. *Možnosti svařování hliníku a jeho slitin* [online]. b.r., , 25 [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <http://www.ews.cz/files/servis/hlinik.pdf>

- [30] *Svařování MIG/MAG, MIG svařování, MAG svařování, svařování plněnou elektrodou* [online]. b.r. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-co2>
- [31] *Obloukové svařování*. 2.vydání. Praha: Scientia, pedagogické nakladatelství, 2003. ISBN 80-7183-285-5.
- [32] *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
- [33] BALEJ, Zdeněk, Vladimír KUDĚLKA a Jan OPLETAL. *Základní kurz svařování metodou 141 se souborem testových otázek*. 2.vydání. Ostrava: Zeross, 2009. ISBN 80-866698-12-2.
- [34] *Svařování TIG - seznámení* [online]. b.r. [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120>
- [35] *Svařování hliníku v ochranných plynech* [online]. b.r. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-hliniku-v-ochrannych-plynech.html>
- [36] *Láhev 10l argon* [online]. b.r. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.tlakovelahve.eu/tlakove-lahve-10l-argon?search=argon>
- [37] MANDAL, Nisith R. *Aluminium welding*. 1.vydání. New Delhi: Narosa Publishing House, 2002. ISBN 0-87170-751-9.
- [38] *Láhev 10l helium* [online]. b.r. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.tlakovelahve.eu/tlakove-lahve-10l-helium-he>
- [39] *Ochranný plyn WIG* [online]. b.r. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.ewm-group.com/cs/fachwissen/schutzgase.html>
- [40] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. 1.vydání. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01507-6.
- [41] *Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I: Hodnocení kvality svarového spoje* [online]. In: . b.r., s. 10 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/104/def-kontrola-sv.pdf>
- [42] *Vizuální kontrola* [online]. In: . b.r. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRjhvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydQPm1WWkEcX7z_st-3-A4fw
- [43] *Nauka o materiálu I*. 1.vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-193-2.
- [44] *Zkoušky materiálů a svarů* [online]. b.r., , 7 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: https://fpe.zcu.cz/export/sites/fpe/kmt/kat/Download/mttga/zkousky_mat_a_svar_u.pdf

- [45] ČIŽMÁROVÁ, Elena, Jakub HORNÍK, Zdeňka JENÍKOVÁ a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: Cvičení*. 1.vydání. Praha: České vysoké učení v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [46] *Destruktivní zkoušky svarových spojů* [online]. b.r. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/destruktivni-zkousky-svarovych-spoju-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EuvDzS7ep4R2shHvEcodyGA/>
- [47] *Zkouška pevnosti v tahu* [online]. b.r. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/1903046/>
- [48] *Zkoušky tvrdosti* [online]. In: . b.r., s. 12 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [49] *Problematika hodnocení svarových spojů* [online]. b.r. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
- [50] *Aktuální možnosti v laserovém svařování* [online]. b.r. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-moznosti-v-laserovem-svarovani.html>
- [51] *Technologické zkoušky: Zkouška lámavosti* [online]. b.r. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3690193/>
- [52] ČSN EN ISO 15614-2. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 2: Obloukové svařování hliníku a jeho slitin*. 2006.
- [53] *Multifunkční svařovací zdroj MIDI MIG 300/800 AC/DC GW* [online]. b.r. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.elmatech-gmbh.de/index.php/de/produkte/plasma-lichtbogentechnologie/mig-mag/wechselstromanlagen/midi-mig-300-ac-dc#prospektblatt>
- [54] *WELDYCAR NV. Přenosný svařovací traktor pro svařování metodou MIG/MAG ve všech polohách* [online]. b.r. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/126313685-Weldycar-nv-prenosny-svarovaci-traktor-pro-svarovani-metodou-mig-mag-ve-vsech-polohach.html>

13. Seznam použitých zkratk a symbolů

| | | |
|-----|--|--------------------------------------|
| A | [%] | tažnost |
| AC | - | Alternating Current (střídavý proud) |
| c | [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] | měrná tepelná kapacita |
| CEN | - | Evropský výbor pro normalizaci |
| ČSN | - | česká technická norma |
| D | [mm] | průměr |
| DC | - | Direct Current (stejnoseměrný proud) |
| E | [N·mm ⁻²] | modul pružnosti v tahu |
| EN | - | evropská norma |
| eV | - | elektronvolt |
| F | [N] | síla |
| FA | [%] | podíl houževnatého lomu |
| G | [N] | tíha |
| G | [N·mm ⁻²] | modul pružnosti ve smyku |
| HBW | - | tvrdost dle Brinella |
| HRA | - | tvrdost dle Rockwella |
| HRB | - | tvrdost dle Rockwella |
| HRC | - | tvrdost dle Rockwella |
| HV | - | tvrdost dle Vickerse |
| ISO | - | mezinárodní norma |
| K | [J] | nárazová práce |
| kp | - | kilopond |
| KU | [J] | nárazová práce (tvar vrubu U) |

| | | |
|-------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| | | nárazová práce (tvar vrubu V) |
| MIG | - | Metal Inert Gas |
| R | [N·mm ⁻²] | smluvní napětí |
| R _e | [N·mm ⁻²] | mez kluzu |
| R _m | [N·mm ⁻²] | mez pevnosti v tahu |
| R _p | [N·mm ⁻²] | pevnost v kluzu |
| R _{p0,2} | [N·mm ⁻²] | smluvní mez kluzu |
| S | [mm ²] | okamžitá plocha průřezu |
| S ₀ | [mm ²] | počáteční plocha průřezu |
| SK | - | svarový kov |
| T | [°C] | termodynamická teplota |
| TIG | - | Tungsten Inert Gas |
| TOO | - | tepelně ovlivněná oblast |
| TNI | - | technická normalizační informace |
| TR | - | Technical Report (technická zpráva) |
| WIG | - | Wolfram Inert Gas |
| Z | [%] | kontrakce |
| ZM | - | základní materiál |
| ε | [1] | velikost deformace |
| λ | [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹] | tepelná vodivost |
| ρ | [kg·m ⁻³] | měrná hmotnost |
| ρ | [Ω·m] | měrný elektrický odpor |

14. Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 Světová produkce hliníku od roku 1900 [4] | 11 |
| Obrázek 2 Bauxit – základní minerál pro výrobu Al [5] | 11 |
| Obrázek 3 Kryolit – minerál používaný při elektrolytické výrobě Al [6] | 12 |
| Obrázek 4 Nápoje v plechovkách z hliníku [8] | 13 |
| Obrázek 5 Alobal - hliníková fólie [9] | 13 |
| Obrázek 6 Trojdílný hliníkový žebřík [10] | 13 |
| Obrázek 7 Hliníkové profily [11] | 13 |
| Obrázek 8 Základní rozdělení hliníkových slitin [13] | 16 |
| Obrázek 9 Postup precipitačního zpevnění slitiny AlCu4 [14] | 18 |
| Obrázek 10 Schématické znázornění teorie katodové skvrny [1] | 24 |
| Obrázek 11 Schématické znázornění teorie kladných iontů [1] | 24 |
| Obrázek 12 Způsoby zapojení el. oblouku při TIG svařování s ohledem na čistící účinek el. oblouku [21] | 25 |
| Obrázek 13 Rozložení pórů v tupém svaru po svařování metodou TIG [20] | 26 |
| Obrázek 14 Rozpustnost vodíku v hliníku v závislosti na teplotě [24] | 26 |
| Obrázek 15 Změna meze pevnosti (R_m), resp. smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) po svařování nevytvrditelné slitiny AlMg4,5Mn ve svarovém spoji [25] | 27 |
| Obrázek 16 Výrazná ztráta meze pevnosti (R_m), resp. smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) po svařování vytvrditelné slitiny AlMgSi1 v okolí svaru [25] | 27 |
| Obrázek 17 Příklad solidifikační trhliny [20] | 29 |
| Obrázek 18 Citlivost k tvorbě trhlín v závislosti na množství legujícího prvku [18] | 29 |
| Obrázek 19 Schéma svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu [29] | 31 |
| Obrázek 20 Princip zkratového přenosu svarového kovu [28] | 32 |
| Obrázek 21 Princip bezzkratového přenosu svarového kovu [28] | 33 |
| Obrázek 22 Schéma svařování metodou TIG [33] | 34 |
| Obrázek 23 Označení tlakové láhve s argonem [35] | 36 |
| Obrázek 24 Označení tlakové láhve s heliem [37] | 36 |
| Obrázek 25 Označení tlakové láhve se směsí Ar + He [38] | 37 |
| Obrázek 26 Vzorek ploché zkušební tyče [44] | 41 |
| Obrázek 27 Srovnání skutečného a smluvního tahového diagramu pro ocel s výraznou mezí kluzu [43] | 41 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 28 Pracovní tahový diagram pro uvedené kovy [46] | 42 |
| Obrázek 29 Uložení zkušební tělesa, tvary a rozměry vrubů při zkoušce rázem v ohybu [43] | 43 |
| Obrázek 30 Metoda měření absorbované energie [43]..... | 43 |
| Obrázek 31 Znázornění lomové plochy po zkoušce rázem v ohybu [43]..... | 44 |
| Obrázek 32 Princip zkoušky tvrdosti podle Brinella [43] | 45 |
| Obrázek 33 Metoda měření tvrdosti podle Vickerse [43]..... | 46 |
| Obrázek 34 Průběh zkoušky tvrdosti podle Rockwella [43]..... | 47 |
| Obrázek 35 Ukázka makroskopické zkoušky koutového svaru [47] | 48 |
| Obrázek 36 Ukázka mikroskopické zkoušky tepelně ovlivněné oblasti svaru [46] | 49 |
| Obrázek 37 Schématické zobrazení ohybové zkoušky [51] | 49 |
| Obrázek 38 Rozměry základního materiálu | 52 |
| Obrázek 39 Experimentální pracoviště pro svařování vzorků..... | 52 |
| Obrázek 40 Svařovací zdroj Elmatech MIDI MIG 300/800 AC/DC | 53 |
| Obrázek 41 Svařovací manipulátor Weldycar NV | 54 |
| Obrázek 42 Přípravek pro upnutí základního materiálu | 55 |
| Obrázek 43 Průběh el. proudu a napětí v závislosti na čase během svařování vzorku č. 3 (software Weldmonitor 4.5) | 56 |
| Obrázek 44 Vzorek č. 6 před zhotovením svaru | 57 |
| Obrázek 45 Vzorek č. 6 po zhotovení svaru | 57 |
| Obrázek 46 Svařený vzorek č. 1 | 57 |
| Obrázek 47 Nevydařený svarový spoj u vzorku č. 9..... | 59 |
| Obrázek 48 Řezání vzorku pro tahovou zkoušku | 59 |
| Obrázek 49 Pásová pila Bomar ergonomic 275.230 DC..... | 59 |
| Obrázek 50 Zkušební trhací stroj LabTest 5.100SP1 | 60 |
| Obrázek 51 Vzorky připravené na tahovou zkoušku..... | 61 |
| Obrázek 52 Upnutý vzorek ve zkušebním trhacím stroji | 61 |
| Obrázek 53 Přetržený vzorek č. 2.1..... | 61 |
| Obrázek 54 Tahový diagram vzorku 3.2 | 63 |
| Obrázek 55 Metalografická pila Labotom-3..... | 64 |
| Obrázek 56 Metalografický lis CitoPress-1..... | 64 |
| Obrázek 57 Vzorky po lisování za tepla..... | 65 |
| Obrázek 58 Bruska Phoenix Beta od firmy Buehler | 65 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 59 Vzorky po leštění a leptání..... | 66 |
| Obrázek 60 Ukázka makrostruktury svarového spoje - Vzorek 3 | 66 |
| Obrázek 61 Tvrdoměr Buehler | 68 |

15. Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 Základní fyzikální a mechanické vlastnosti hliníku [2] | 10 |
| Tabulka 2 Rozdělení hliníkových slitin podle směrnice TNI CEN ISO/TR 15608 [16] | 20 |
| Tabulka 3 Označení tvářených hliníkových slitin dle ČSN EN 573-1 až 3 [1] | 21 |
| Tabulka 4 Značení stavů tepelného zpracování dle ČSN EN 515 Hliník a slitiny hliníku. Výrobky tvářené. Označování stavů [17] | 21 |
| Tabulka 5 Označení slévárenských hliníkových slitin dle ČSN EN 1706 [1] | 22 |
| Tabulka 6 Rozdělení přídavných materiálů dle ČSN EN 1011-4 Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 4: Obloukové svařování hliníku a slitin hliníku [27] | 30 |
| Tabulka 7 Značení tvrdosti podle Rockwella [43] | 47 |
| Tabulka 8 Kontrola a zkoušení zkušebních kusů z hliníku a jeho slitin podle ČSN EN ISO 15614-2 [51] | 50 |
| Tabulka 9 Mechanické vlastnosti hliníkové slitiny EN AW 5754 H22 | 51 |
| Tabulka 10 Chemické složení hliníkové slitiny EN AW 5754 H22 | 51 |
| Tabulka 11 Mechanické vlastnosti přídavného materiálu AlMg5Cr(A) | 51 |
| Tabulka 12 Chemické složení přídavného materiálu AlMg5Cr(A) | 51 |
| Tabulka 13 Technická data Elmatech MIDI MIG 300/800 AC/DC [53] | 53 |
| Tabulka 14 Technická data k manipulátoru Weldycar NV [53] | 54 |
| Tabulka 15 Označení svařených vzorků a zvolené svařovací parametry (odečtené ze svařovacího zdroje) | 56 |
| Tabulka 16 Zaznamenané hodnoty parametrů pro jednotlivé vzorky softwarem Weldmonitor 4.5 | 56 |
| Tabulka 17 Zobrazení svarových spojů svařovaných vzorků v závislosti na svařovacích parametrech | 58 |
| Tabulka 18 Technická data o LabTest 5.100SP1 | 60 |
| Tabulka 19 Výsledky z tahové zkoušky | 62 |
| Tabulka 20 Parametry lisování vzorků pro zkoušku makrostruktury | 65 |
| Tabulka 21 Parametry broušení vzorků | 65 |
| Tabulka 22 Snímky vzorků (makrostruktura) | 67 |
| Tabulka 23 Výsledky z měření mikrotvrdosti | 68 |