

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# SVAŘOVÁNÍ ROZMĚRNÝCH HLINÍKOVÝCH SVAŘENCŮ

WELDING OF ALUMINIUM SIZABLE WELDMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAN TKANÝ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2008/2009

## **ZADÁNÍ BAKALÁRSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jan Tkaný

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Svařování rozměrných hliníkových svařenců**

v anglickém jazyce:

### **Welding of aluminium sizable weldments.**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tavné svařování vytvrditelných hliníkových slitin bez následného tepelného zpracování degraduje mechanické vlastnosti svarového spoje na úroveň čistého hliníku. Vzhledem k tomu, že tepelné zpracování rozměrných svařenců naráží na praktické obtíže, je výhodné svařovat tyto celky tlakovými metodami.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Zpracování přehledu vytvrditelných a nevytvrditelných slitin Al vhodných ke svařování
- 2) Tavné technologie svařování Al slitin a jejich vliv na mechanické vlastnosti spoje
- 3) Svařování Al slitin vybranými metodami tlakového svařování

Seznam odborné literatury:

1. ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3
2. Kolektiv autoru. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: ZEROSS 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3
3. Kolektiv autoru. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Danek, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 18.11.2008

L.S.

---

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

TKANÝ Jan: Svařování rozměrných hliníkových svařenců.

---

Práce vytvořená v rámci obecného bakalářského studia podává pohled na základní dělení hliníkových slitin, résumé technologií a principů svařování hliníku a jeho slitin. Je zaměřena na popis dělení slitin Al a jejich vhodnost ke svařování, charakteristiku jednotlivých metod a popis problémů při svařování rozměrných hliníkových svařenců. U každé z metod jsou uvedeny možnosti aplikace, popis a schéma činnosti a specifika týkající se ochranných plynů nebo elektrod. Problémy při svařování rozměrných dílců jsou zde charakterizovány vnějšími a vnitřními deformacemi, složitostí napěťových polí, popřípadě teplotních polí. Pro zjištění velikosti úhlových deformací je uvedena ukázka grafu pro praktické použití. V závěru je uvedeno, které metody je vhodné aplikovat u rozměrných svařenců.

Klíčová slova: Hliník,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , tavné a tlakové svařování Al, FSW, rozměrné svařence, napětí, deformace

## **ABSTRACT**

TKANÝ Jan: Welding of aluminium sizable weldments.

---

This thesis created within the general Bachelor's study gives insight into the basic division of aluminum alloy, a summary of technologies and principles of welding aluminum and its alloys. It is focused on the description of cutting Al alloy and their suitability for welding, the characteristics of different methods and description of problems in the welding of large-scale aluminum weldments.

For each of the methods are given the possibility of application, a description and diagram of operation and specifics on the protective gas or electrodes. Problems in the welding of large parts are characterized by external and internal deformations, complex stress fields, where appropriate, the temperature fields. To determine the size of the deflection angle is given an example of the chart for the practical use. In conclusion it is stated that the method is appropriate to apply in case of large weldments.

Keywords: Aluminium,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , fusion and solid-phase welding, FSW, sizable weldments, strain, deformations



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

TKANÝ, J. *Svařování rozměrných hliníkových svařenců*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 32 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci *Svařování rozměrných hliníkových svařenců* vypracoval samostatně. Při práci jsem vycházel z pokynů vedoucího bakalářské práce, vlastních znalostí, odborných konzultací a odborné literatury. V seznamu jsem uvedl všechny zdroje..

V Brně dne 23.5.2009

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkovat všem, kteří mi byli jak při tvorbě bakalářské práce, tak i v průběhu mého dosavadního studia jakkoliv nápomocni, zejména však vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za připomínky a cenné rady.



## OBSAH:

	<b>Str.</b>
<b>0. ÚVOD</b> .....	8
<b>1. HLINÍK</b> .....	9
<b>1.1. Hliník ve strojírenské výrobě</b> .....	9
<b>1.2. Přehled slitin hliníku</b> .....	10
1.2.1. Vytvrditelné slitiny .....	10
1.2.2. Nevytvrditelné slitiny .....	11
1.2.3. Technický hliník .....	11
1.2.4. Slitiny hliníku .....	11
<b>1.3. Fyzikální vlastnosti hliníku</b> .....	13
<b>1.4. Nedostatky ve svarech</b> .....	13
1.4.1. Pórovitost svarů .....	13
1.4.2. Vliv nečistot na svařitelnost .....	14
<b>2. METODY SVAŘOVÁNÍ</b> .....	15
<b>2.1. Tavné způsoby svařování</b> .....	15
2.1.1. TIG .....	15
2.1.2. Ruční obalovaná elektrody (ROE) .....	17
2.1.3. Svařování plamenem .....	18
<b>2.2. Tlakové způsoby svařování</b> .....	19
2.2.1. Odporové svařování .....	19
2.2.1.1. Bodové svařování .....	20
2.2.1.2. Výstupkové svařování .....	21
2.2.1.3. Švové svařování .....	21
2.2.2. Svařování třením .....	22
2.2.3. Friction Stir Welding – FSW .....	22
<b>3. PROBLÉMY PŘI SVAŘOVÁNÍ ROZMĚRNÝCH DÍLCŮ</b> .....	25
<b>3.1. Deformace</b> .....	25
<b>3.2. Napětové pole</b> .....	26
<b>4. ZÁVĚR</b> .....	29
<b>5. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	30
<b>6. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK</b> .....	33

## 0 ÚVOD

Současné trendy miniaturizace a minimalizace zasahují samozřejmě i do oblasti strojírenské technologie. Svařování rozměrných dílců není výjimkou. Snahou konstruktérů moderních zařízení je minimalizovat hmotnost konstrukce vzhledem k zatížení a hybnosti dopravních prostředků. Z těchto důvodů se často uplatňují hliníkové slitiny. Ty vhodným legováním a tepelným zpracováním začínají dosahovat parametrů ocelí při zachování nízké hmotnosti. Pro srovnání: poměr pevnosti a hmotnosti je u čistého hliníku a železa téměř shodný. Měrná hmotnost hliníku je  $2700 \text{ kg.m}^{-3}$  a nízkouhlíková ocel má měrnou hmotnost  $7850 \text{ kg.m}^{-3}$ . Neoslavná pevnost hliníku se pohybuje od 70 do 100 MPa, železo je v rozmezí 300 – 400 MPa. Hliník je materiál, který dokáže při nárazu absorbovat větší deformační energii než ocel bez prasknutí nebo porušení. Na rozdíl od oceli hliník nemění svoji pevnost ani při nízkých teplotách. Vzniklá potřeba většího tepelného příkonu než u svařování ocelí je dána čtyřikrát větší tepelnou a elektrickou vodivostí než právě u ocelí. Proto je mnohdy potřeba svařované dílce předehřívát.

V poslední době je stále větší tlak vyvíjen ze strany automobilového průmyslu na efektivitu výroby. Jedná se především o problémy spojené s růstem cen pohonných hmot, zvyšující se počet motorových vozidel a přímý dopad na životní prostředí. Proto se výrobci automobilů snaží zmírnit vliv emisí skleníkových plynů, snížit spotřebu pohonných hmot fosilního původu, které mají přímou souvislost se znečišťováním ovzduší. Pokud pomineme nepopiratelný vliv ropného průmyslu na veškeré dění v automobilové sféře, konkrétně výrazně neklesající spotřebu paliva vozidel, jeví se jako vhodná cesta ke snížení emisí redukce hmotnosti vozidel. Pokud by se vývoj motorů ubíral takovým tempem, jako je tomu ve vývoji domácích spotřebičů, už dávno by jezdily automobily se spotřebou pod 3l paliva na 100 km. To vytváří široké spektrum využití hliníku a jeho slitin ve výrobě.

Hliník díky své nízké hmotnosti se využívá hlavně u rozměrných svařenců, aby rozměrné celky nebyly moc těžké. S těmi by souvisela těžkopádná manipulace, vyšší náklady na pohonné jednotky, případné ekologické znečištění a samozřejmě vyšší pořizovací náklady. Čistý hliník se zpravidla nepoužívá, protože nemá potřebné mechanické vlastnosti, je poměrně měkký. Najde využití např. v obalech nápojů. Vzhledem k dnešnímu vývoji hliníkových slitin, které vedou k zajištění značné úspory materiálu, je potřeba zajistit i vhodné způsoby spojování dílců. Mezi klasické způsoby patří i využití metod svařování.

# 1 HLINÍK

Dle posledních měření je hliník obsažen v zemské kůře v míře 7,5–8,3 %, čímž je v přírodě nejrozšířenějším kovovým prvkem. Vyskytuje se pouze ve sloučeninách. Základní surovinou pro výrobu hliníku je minerál bauxit, což vlastně je Al s neurčitým obsahem vázané vody ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ). Základ tvoří hydratované oxidy hliníku doprovázené oxidy železa, titanu a křemíku. Další, poněkud méně významný zdroj je minerál kryolit, čili hexafluorohlinitan sodný ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). Jedna tuna hliníku odpovídá výnosnosti asi 4 – 6 tunám vytěžené bauxitové rudy.

Přírodní oxid hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je velmi tvrdý minerál korund a v Mohsově stupnici<sup>1</sup> tvrdosti je na 9. místě z 10. Desátý je diamant. Korund se vyskytuje též v barevných odrůdách, jako je například červený rubín nebo modře zbarvený safír.

## 1.1 Hliník ve strojírenské výrobě

Ve strojírenské výrobě patří hliník a hliníkové slitiny k nejpoužívanějším neželezným kovům v oblasti výroby. Do této oblasti spadá obrábění (pro jeho relativně dobrou obrobitelnost), lisování, tváření a povrchové úpravy. Dále se hojně využívá v chemickém, automobilovém (části motorů, profily pro výplně dveří, pouzdra tlumičů), potravinářském (obalová technika - alobal), elektrotechnickém (kabely, dráty), sklářském, slévárenském a dopravním průmyslu, ve stavebnictví (fasádní profily, profily pro výrobu dveří a oken) a stále více v letectví a kosmonautice.

Do výrobní oblasti patří výroba plechů, drátů, fólií, konstrukčních dílců atd. V povrchových úpravách se jedná hlavně o technologické úkony, jako jsou eloxování, galvanizace a moření.

---

<sup>1</sup> Mohsova stupnice tvrdosti nám udává schopnost jednoho materiálu rýpat do druhého.

## 1.2 Přehled slitin hliníku

Hliníkové materiály, které se používají ve strojírenství, je možné dělit do dvou hlavních skupin dle způsobu výroby a vlastností na:

- slévárenské slitiny
- slitiny určené ke tváření

Tvářené slitiny se dále dělí na:

- tepelně vytvrditelné
- tepelně nevytvrditelné, zpevněné tvářením

### 1.2.1 Vytvrditelné slitiny

Mají na jednu stranu výhodu v možnosti výrazného zvýšení pevnosti tepelným zpracováním, avšak na druhou stranu tímto procesem klesá jejich tažnost. „Účelem tepelného zpracování je získat určitý nerovnovážený stav struktury, který zajišťuje požadované vlastnosti výrobku.“ [1]

Tepelné zpracování má tři stádia. Prvním je rozpouštěcí žíhání, následuje rychlé ochlazení a konečný technologický proces je vytvrzování. Tepelné zpracování začíná ohřevem, takzvaným rozpouštěcím žíháním (homogenizací) na teplotu kolem 500 °C s dostatečnou výdrží. Vychází se totiž z fázového diagramu konkrétní slitiny, kdy nesmí dojít k překročení křivky solidu, aby se nenatavily hranice zrn. Následuje rychlé ochlazení do vody nebo do oleje, aby vznikl přesycený tuhý roztok. Přesycený tuhý roztok vykazuje daleko větší obsah rozpuštěné příměsi než při její rovnovážné rozpustnosti při dané teplotě. U rozměrných součástí s rizikem výskytu deformací se nechladí do vody, ale do jiných kapalin. Konečný proces je umělé nebo přirozené stárnutí slitin. Obecně je rozpad přesyceného tuhého roztoku difúzní proces, který začíná nukleací a vznikem koherentních precipitátů, tzv. Guinierových-Prestonových zón. Výsledkem je pnutí v mřížce hliníku v okolí zón, které je překážkou pro pohyb dislokací, s čímž je spojený vytvrzovací efekt. Tyto zóny postupně rostou a ztrácejí koherenci. Proces končí vznikem nekoherentního rovnovážného precipitátu. Vznik rovnovážného precipitátu je spojen s poklesem tvrdosti. Při delší výdrži na teplotě stárnutí dochází k nežádoucímu hrubnutí rovnovážného precipitátu, klesá tvrdost. Toto stádium označujeme jako přestárnutí. „Přesycený tuhý roztok je termodynamicky nestabilní, dochází k jeho rozpadu. U některých slitin dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku již při teplotě okolí - pochod označujeme jako přirozené stárnutí. Při umělém stárnutí se proces urychlí ohřevem.“ [2] U přirozeného stárnutí proces vytvrzování probíhá dny až týdny s přihlédnutím na teploty okolí. Umělé stárnutí probíhá při zvýšených teplotách 50 °C – 180 °C daleko rychleji, v řádu hodin.

## 1.2.2 Nevytvrditelné slitiny

Na zpevnění je potřeba hliník legovat Mg, Mn, Si, Fe. Pevnost je dána substitučním zpevněním tuhého roztoku a pro další zpevnění se používá tváření za studena. U těchto slitin je zbytečné používat na zvýšení tvrdosti a pevnosti tepelné zpracování. Docházelo by ke zbytečným nákladům. Nejvýznamnější nevytvrditelné slitiny jsou AlMn, AlMg.

Tvářené slitiny se většinou ještě dělí podle chemického složení na dvě skupiny:

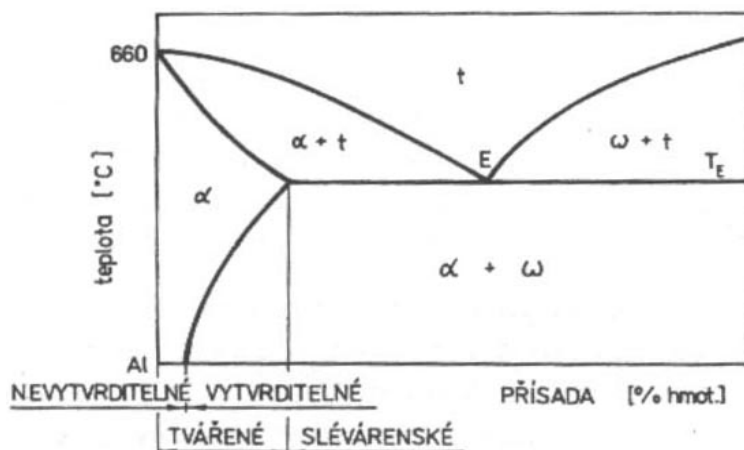
- technický hliník
- slitiny hliníku

## 1.2.3 Technický hliník

Obsahuje minimálně 99 % Al, obvykle se elektrolýzou vyrábí hliník o čistotě 99,5%. Pro speciální a laboratorní účely se rafinací dá docílit čistoty až 99,99 %. Na čistotě přímo závisí kvalita hliníku.

## 1.2.4 Slitiny hliníku

Hliníkové slitiny mají v oblasti strojírenství daleko větší využitelnost. Obsahují víc jak 1% legujících prvků. Legování hliníku je však omezeno jeho nízkou teplotou tavení. Legury mají díky nízké teplotě tavení Al omezenou rozpustnost. Proto se vyskytují převážně nízkolegované slitiny.



Obr. 1 Přehled vytvrditelných a nevytvrditelných slitin hliníku [3]

Způsob svařování	Tvářené slitiny												Slévárenské slitiny																		
	Al99,98 až Al99		AlMn		AlMg		AlMgSi		AlCuMg Al-CuSiMn		AlZnMg		AlZnMgCu		AlSi		AlSiMg		AlSiCu		AlMg		AlCuTi		AlZnMg						
	AlMnMg		AlMgMn																AlMgSi												
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B			
Svařování plynem	2	2	2	2	3	3	-	2	-	4	-	3	-	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	-	4	-	4	-	4
Obloukové svařování	-	4	-	4	-	4	-	4	-	4	-	4	-	4	-	3	-	3	-	3	-	4	-	4	-	4	-	4	-	4	
Svařování TIG	1	1	1	1	1	1	-	1	-	4	-	2	-	4	1	1	1	1	2	2	1	1	-	3	-	1	-	1	-	1	
Svařování MIG	-	1	-	1	-	1	-	1	-	4	-	1	-	4	-	1	-	1	-	2	-	1	-	3	-	1	-	1	-	1	
Plazmové svařování	1	1	0	0	1	1	-	1	-	4	-	1	-	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Svařování laserem	1	-	0	-	1	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	
Svařování elektronovým paprskem	1	0	1	0	1	0	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0	(1)	0	1	0	2	0	(1)	0	(2)	0	(2)	0	0	0	
Svařování pod práškem	-	(3)	-	0	-	(2)	-	0	-	0	-	(3)	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	
Elektrostruskové svařování	-	(4)	-	0	-	(3)	-	0	-	0	-	(4)	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	

A – bez přídavného materiálu, B – s přídavným materiálem

Stupnice relativního hodnocení: 1= nejlepší, 4 = nejhorší, - = z důvodů materiálu nebo způsobu svařování není možné svařovat,

0 = nejsou informace, údaje v závorkách značí hodnocení na základě laboratorních pokusů.

Tab. 1 Hodnocení svařitelnosti slitin pro různé způsoby tavného svařování [4]

Přehled používaných hliníkových slitin včetně čistého hliníku						
Označení		Chemie			Pevnost	Tah
hutní	ČSN	[hm. %]	nečistoty		[MPa]	[MPa]
Technický hliník		Al	Fe + Si		žíhaný	vytvrzený
Al 99,85	42 4002	99,85	max. 0,15		50	100
Al 99,7	42 4003	99,7	max. 0,3		60	110
Al 99,5	42 4005	99,5	max. 0,5		70	130
Tepelně nezpracovatelné slitiny		Legury				
		Al	Mg	Mn	žíhaný	vytvrzený
Al Mg2	42 4412	zbytek	2 - 2,8	0,15 - 0,35	180	270
Al Mg3	42 4413	zbytek	2,5 - 4	max. 0,5	200	300
Al Mg 5	42 4415	zbytek	4 - 6	0,5 - 0,8	250	350
Al Mn	42 4432	zbytek	-	1,0 - 1,6	110	190
Tepelně zpracovatelné slitiny		Al	Mg	Cu	žíhaný	vytvrzený
AlCu4Mg	42 4201	zbytek	0,4 - 0,8	3,8 - 4,8	180 - 240	380 - 400
AlCu4Mg1	42 4203	zbytek	1,2 - 1,8	3,8 - 4,9	180 - 240	430 - 450
AlMgSi	42 4400	zbytek	0,7 - 1,2	Si = 0,7 - 1,2	110	200 - 280
AlZn4Mg1	42 4441	zbytek	1 - 1,4	Zn = 4 - 5	180 - 200	300 - 360
Slévárenské slitiny		Al	Si	Mn	lité	vytvrzené
AlSi13	42 4330	zbytek	11 - 13,5	0,3 - 0,45	170 - 220	
AlSi10Mg	42 4331	zbytek	9 - 10	Mg = 0,3 - 0,45	180	240
AlMg5	42 4515	zbytek	0,6 - 1,5	Mg = 4,6 - 5,6	160 - 200	

Tab. 2 Přehled používaných hliníkových slitin včetně čistého hliníku [5]

### 1.3 Fyzikální vlastnost hliníku

Využitelnost hliníku je dána jeho dobrými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Mezi fyzikální patří malá měrná hustota  $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , nemagnetičnost, měrný elektrický odpor  $0,028 \text{ W}\cdot\text{mm}^2 / \text{m}$ , měrná elektrická vodivost  $36,0 \text{ m} / \text{W}\cdot\text{mm}^{-2}$  a měrné teplo  $0,900 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$ . Čistý hliník má vysokou tepelnou vodivost, která je vyšší než u mědi. S tím jsou spojeny ztížené podmínky s místním natavováním hliníku obloukem. Současně má Al vysoký součinitel teplotní roztažnosti. Teplotní roztažnost hliníku se pohybuje kolem  $\alpha = 2,3\cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  v závislosti na čistotě, a tohoto důvodu při tuhnutí svarového kovu klademe mimořádně velké nároky na potlačení vzniku deformací při chladnutí. Při nepotlačení těchto deformací vznikají trhliny, a to vždy, když se na hranicích dendritů mohou vylučovat stopy nízkotavitelných fází. U hliníku se jedná o eutektika tvořená základními legujícími prvky.

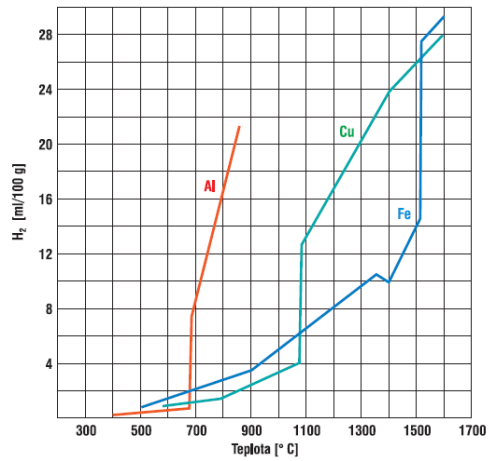
Rychlost tuhnutí svarového kovu je díky vysoké tepelné vodivosti při průběhu svařování nerovnoměrná. Zpočátku je rychlost tuhnutí vysoká díky dobrému odvodu tepla a postupem času výrazně klesá, protože se svařovaná součást rychle ohřeje na vyšší teplotu. Tato vlastnost má příznivý vliv na vznik pórovitosti vývaru. Přehřátí současně ale podporuje vznik hrubé dendritické struktury. Předcházet této hrubé dendritické krystalizaci je možno použitím přídavného materiálu obsahujícího přísady titanu nebo zirkonu. Jemnozrnější struktury lze také dosáhnout použitím zdrojů s vysokou plošnou hustotou energie, vyšší rychlostí svařování a svařováním pulzujícím zdrojem.

### 1.4. Nedostatky ve svarech

Při svařování hliníkových materiálů se vyskytují některé společné problémy, které vyplývají z chemických a fyzikálních vlastností a které nezávisí na složení slitiny. Mezi nejdůležitější patří pórovitost svarů, tj. vznik dutin, přítomnost oxidické vrstvy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , vznik trhlin při chladnutí svaru a pokles pevnosti u tenkých plechů v místě svaru a v tepelně ovlivněné oblasti (TOO).

#### 1.4.1 Pórovitost svarů

Hliník a hliníkové slitiny v tekutém stavu v sobě rozpouštějí ve velkém množství vodík. Zdrojem vodíku je nevodivá vrstva oxidu hlinitého, která je hydrofilní, tedy váže vodu. Množství rozpuštěného vodíku je úměrné teplotě v tavné lázni, kdy u teplot kolem  $2000 \text{ } ^\circ\text{C}$  se může do svarového kovu rozpustit až  $50 \text{ cm}^3 \text{ H}_2$  v  $100 \text{ g}$  kovu. Těsně nad teplotou tuhnutí je rozpustnost  $0,7 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$  a těsně pod teplotou tavení je to pouhých  $0,036 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ . K úplnému vyloučení vodíku ze svarového kovu nedojde. Z tohoto vyplývá, že během rychlé krystalizace svarového kovu se musí hliník zbavit vodíku z 95 % původního objemu. Vznik pórů a bublin tedy závisí na rychlosti tuhnutí svaru.



Graf. 1 Diagram rozpustnosti vodíku v hliníku [6]

#### 1.4.2 Vliv nečistot na svařitelnost

Nejčastěji se vyskytujícími nečistotami v hliníku jsou železo (Fe) asi z 0,005 % a křemík (Si) z přibližně 0,05 %. Ty se dostanou do tavby během výrobního procesu a mají negativní vliv na svařitelnost. Platí, že čím má hliník méně nečistot, tím je jeho svařitelnost lepší.



## 2 METODY SVAŘOVÁNÍ

Svařitelnost je schopnost materiálu vytvořit svarový spoj. Náležitá svařitelnost čistého a technického hliníku je dána přítomností  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na povrchu materiálu. Pokud se svařuje elektrickým obloukem v ochranném plynu (MIG, WIG, plasmový oblouk), který rozrušuje oxidické povrchy, je svařitelnost dobrá. Takzvané duraly mají zpravidla obtížnou svařitelnost. Výjimku tvoří pouze slitiny AlCuMg. Oxidickou vrstvu můžeme dále při svařování odstranit použitím tavidla. Použití tavidel je dobré důkladně zvážit. Způsobují korozi a její následné odstranění je v porovnání se svařováním nákladnější. Svařitelnost hliníkových slitin má podobné znaky jako svařování technického hliníku. Některé metody budou podrobněji popsány v následujícím textu.

Metody svařování hliníku dělíme podle způsobu vzniku svaru:

- tavné (svařování v tekutém stavu)
- tlakové (svařování v tuhém stavu)

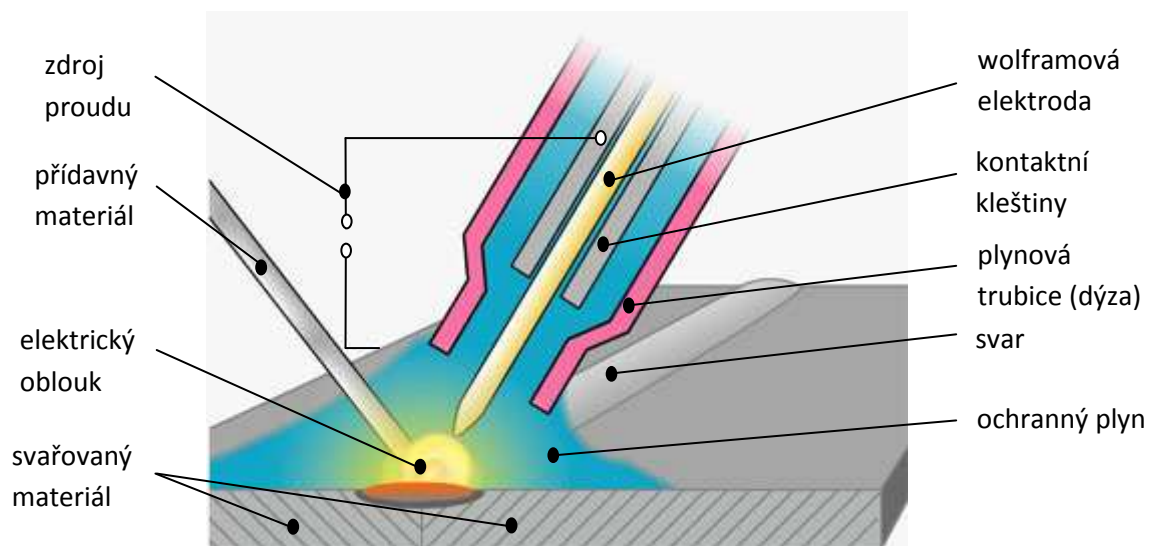
Z tavného svařování, kam patří obloukové svařování, kterým lze svařovat všechny slitiny hliníku, svařování elektrickým odporem a fyzikální způsoby svařování (elektronový paprsek, laser, plasma), se zde budeme zabývat převážně svařování metodou TIG (Tungsten Inert Gas), svařováním ruční obalovanou elektrodou a svařování plamenem.

### 2.1 Tavné způsoby svařování

#### 2.1.1 TIG

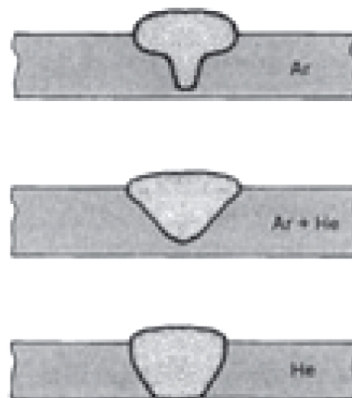
V současnosti se ve všech oborech svařovaných konstrukcí a technických zařízeních uplatňuje nejprogresivněji se rozvíjející metoda svařování kovů TIG. Jedná se o obloukové svařování netavnou wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu. Někdy je také nazývána WIG – wolfram inert gas. Tato metoda oproti jiným technologiím působí příznivě na svarovou lázeň, kde je inertním plynem chráněna proti nepříznivým účinkům okolní atmosféry. Umožňuje svařovat materiál ve všech polohách a snadno se automatizuje a robotizuje. Hodí se jak pro svařování nejnáročnějších aplikací v jaderné energetice, tak i pro ruční malosériové svařování ve výrobě a při montážních pracích. Metodou TIG lze svařovat hliník a všechny jeho slitiny.

Princip obloukového svařování netavnou elektrodou v netečném plynu spočívá ve vzniku a hoření elektrického oblouku mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Zároveň je při hoření roztavený kov, elektroda a blízké okolí svaru chráněno inertním plynem. Jeho hlavní úlohou je chránit právě roztavené či ohřáté části základního nebo přídavného materiálu, hlavně před negativními účinky vzduchu. Do místa určení je přiváděn dýzou hořáku.



Obr. 2 Princip svařování metodou TIG [7]

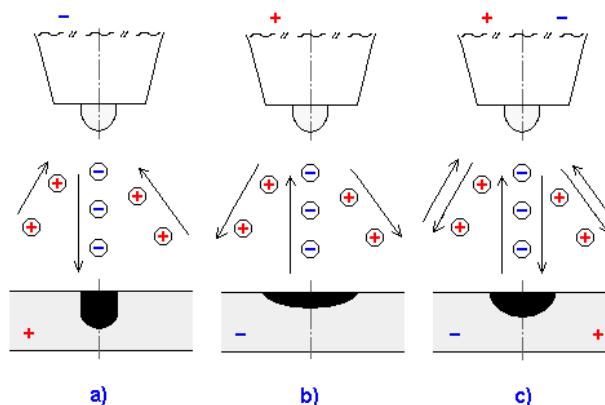
Jako inertní plyn se využívá velice čistý argon, helium a jejich směsi. Kombinací argonu a helia v různém poměru koncentrací můžeme ovlivnit výši přeneseného tepla, což umožňuje svařovat materiál o větších tloušťkách. Helium zvyšuje napětí na oblouku, umožňuje větší přenos výkonu a tím i pozitivně ovlivňuje hloubku závaru a s tím spojený výkon svařování. Ochranný plyn také ovlivňuje povahu svaru (povrch, závar,...) a určuje charakteristiku hořícího oblouku (napětí, stabilitu oblouku apod.)



Obr. 3 Vliv ochranného plynu na průřez svaru [8]

Bombardováním elektrony a ionty ochranného inertního plynu (ionizovaný plyn) se mechanickým způsobem rozrušuje na povrchu materiálu pasivující vrstva oxidů  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . To je první způsob čištění.

Při takzvané přímé polaritě při stejnosměrném proudu (TIG DC-) je elektroda katoda o slabším průměru a základní materiál je zapojen na anodu. Z elektrody odletují vysokou rychlostí lehké elektrony a tvoří v materiálu úzký hluboký závar. Při obrácené polaritě a opět stejnosměrném proudu (TIG DC+) ze silné elektrody (anoda) odletují těžké protony a tvoří v materiálu (katoda) mělký široký závar. U svařování hliníku se kombinují oba druhy závaru dle potřeby, ale s využitím střídavého proudu (TIG AC). Střídavý proud totiž dovede elektrickým obloukem čistit kysličníky, tedy to je druhý způsob čištění. Půlperioda svažuje a půlperioda čistí.



Obr. 4 TIG svařování DC: a) nepřímá b) přímá polarita c) AC [9]

Netavná elektroda je čistě wolframová, popřípadě obsahuje aktivující přísadu, aby odolala vysokým tepelným nárokům. Metoda TIG využívá jako zdroj tepla elektrický oblouk. Svarová lázeň vzniká natavením svarových ploch základního materiálu a místním odtavením potřebného množství přídavného materiálu. Roztavený kov začne tuhnout a po ztuhnutí vytváří potřebný nerozebíratelný spoj. Při svařování rozměrných svařenců se využívá pro první průvar metoda TIG a poté se použije sprchový přenos kovu, ten má větší transfer přídavného kovu do svarové lázně, čímž se urychlí pracovní činnost.

## 2.1.2 Ruční obalovaná elektroda (ROE)

Svařování ruční obalovanou elektrodou je v současnosti na ústupu. Má totiž poměrně malou ochranu svarového spoje. Používá se při opravách, především vadných či poškozených výrobků. I z této oblasti je vytěšňováno metodou TIG. Oproti svařování plamenem má tento způsob výhodu v tom, že minimalizuje TOO a je produktivnější. Svařování ROE má výhodu v jednoduché manipulaci, kdy stačí využít běžný invertorový zdroj a nemusíme se zaobírat požadavky na plyn apod. Zdroje se nijak neliší od invertorů ke sváření ocelí.

Princip spočívá v hoření oblouku, který je zdrojem tepla, mezi obalovanou elektrodou a základním materiálem. Dochází k postupnému odtavování elektrody a místního povrchu základního materiálu. Při zchladnutí vzájemně smíšených roztavených materiálů vzniká svar a na jeho povrchu struska.

Hořící oblouk má značné tepelné účinky na své okolí, v důsledku toho vznikají deformace. Je to způsobeno přesunem částic v elektrickém oblouku, tedy uvolňováním elektronů z rozžhavené katody na anodu. Na kladné elektrodě získáváme více tepla než na záporné, protože katoda se ochlazuje termoeemisí elektronů a tím pádem se anoda ohřívá.

Používané obalované elektrody jsou velmi náchylné na navlhnutí, proto se musí věnovat pozornost jejich správnému uskladnění. Vlhkost v obalu elektrody je totiž případným zdrojem vodíku. V případě potřeby lze elektrody před svařováním přesušit při teplotách nepřesahujících 150 °C. Důležitou funkcí obalu elektrody je zamezení přístupu vzduchu ke svarové lázni plynem, který vzniká při hoření, obsažené prvky napomáhají k rozpuštění oxidické vrstvy, stabilizuje oblouk a u dobře formované svarové housenky utváří strusku, která je lehce odstranitelná. Průměr elektrody se volí dle tloušťky svařovaného materiálu. Při tloušťkách základního materiálu (TZM) do 6 mm je elektroda  $d = \text{TZM} - 1$  mm. Nad 6 mm je to  $d = \text{TZM}/2 + 3$  mm. Elektrody se značkují OK.<sup>2</sup>

### 2.1.3 Svařování plamenem

Přestože se jedná o jednu z nejstarších metod svařování, u svařování hliníku se moc nepoužívá. Většinou se používá u zámečnických prací, pokud není k dispozici jiná metoda. Teplo potřebné na roztavení základního kovu se získává spalováním hořlavých plynů a kyslíku. Především se využívá acetylen  $\text{C}_2\text{H}_2$  smíšený s kyslíkem  $\text{O}_2$ . Tato směs má totiž nejvyšší výhřevnost - teplotu plamene. Uvolňování tepla má více fází. V první fázi se rozkládá acetylen na uhlík a vodík při nedokonalém hoření. Uhlík se spaluje na oxid uhelnatý (CO). Druhá fáze spočívá v dokonalém hoření, kdy plamen odebírá potřebný kyslík ze vzduchu a tím roste teplota.



Obr. 5 Porovnání redukčního a neutrálního plamene [10]

<sup>2</sup> Označení elektrod – OK - je na památku vynálezce obalované elektrody Oscara Kjellberga ze Švédska. Elektroda byla patentována v roce 1904.

„Pro vlastní svařování se použije mírně redukční plamen (tj. s cca 3x delším bílým svítícím kuželem oproti neutrálnímu ostře ohraničenému plameni, navíc je tento plamen charakteristický neostrým ukončením tohoto kuželu).“ [11]

„Před vlastním svařováním se musí dokonale odstranit oxid hlinitý, nejlépe speciálním mořidlem na bázi hydroxidu sodného v koncentraci 100 g na litr s přídavkem chloridu sodného 20 g na litr. Pracuje při teplotě 70 °C. Jinak je možné vrstvu oxidu odstranit mechanicky například nerezovým kartáčem.“ [12] Kartáč by měl být z nerez oceli a měl by se používat výhradně jen na hliník, aby nedošlo k přenosu částic z jiných kovů, které způsobují korozi.

Přídavný materiál volíme dle tloušťky základního materiálu. U středních tloušťek do 8 mm se volí drát o stejném průměru jako šířka základního materiálu nebo o 1 mm tenčí. U plechů silnějších než 8 mm je průměr drátu 2/3 tloušťky plechu. Přídavný materiál by měl mít stejné nebo hodně podobné chemické složení jako svařovaná slitina. Jako přídavný materiál můžeme použít i kousky odstřížků svařovaného materiálu.

Velikost hořáku se volí podobně jako u oceli podle tloušťky svařovaného materiálu. Je to nutné díky vysoké tepelné vodivosti hliníku. Způsoby svařování jsou dva a to svařování vpřed a vzad.

Vpřed je vedeno zprava doleva a přídavný materiál se přidává před hořákem ve směru svařování. U tohoto způsobu dochází k přehřívání materiálu a tím pak k deformacím a zvýšeným pnutím v materiálu. U svařování vzad je drát přidáván do roztavené lázně za hořákem. Ochrana svaru je lepší než u dopředného svařování, dochází k menším deformacím a lépe se provaří kořen.

## 2.2 Tlakové způsoby svařování

### 2.2.1 Odporové svařování

Odporové svařování je způsob, při kterém se kovy spojují bez přídavného materiálu. Do prostoru, kde vzniká svar, se na krátkou chvíli přivede elektrický proud o vysoké intenzitě při současném působení tlaku. Množství tepla vnesené do materiálu tedy závisí na elektrickém odporu v místě svaru, vznikající ve svařovaném materiálu mezi elektrodami odporové svářečky. Po tomto principu dostala také metody pojmenování – odporová. Vnesené teplo určuje Joul – Lenzův zákon - odpor  $R$ , kterým protéká proud  $I$ , se zahřívá.

$$Q = U \times I \times t \text{ [J]}$$

Kde  $U$  je úbytek napětí na odporu [V]

$I$  – protékající proud odporem [A]

$t$  – je doba, po kterou proud prochází odporem [s]

Ohmový odpor hliníku je poměrně nízký a proto, má-li teplo vyvinuté odporem natavit materiál, musí být svařecí proud velký. Naopak dobrá tepelná vodivost hliníku rychle odvádí teplo z místa svaru, ale i přesto musí svar vzniknout v krátkém časovém intervalu. K tomu nám dopomáhá nízká teplota tavení. Shrnuto podtrženo, hliník a jeho slitiny musíme svařet velkou proudovou intenzitou a krátkým svařecím časem. Svaření za takovýchto podmínek se nazývá tvrdý režim svaření.

Parametry svařování:

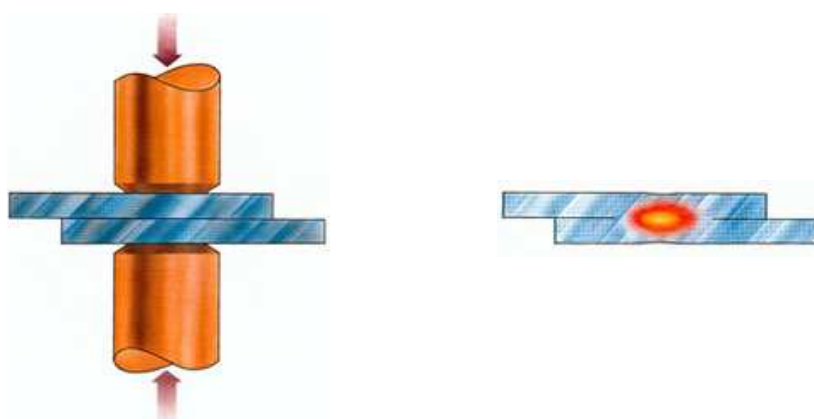
- svařovací proud  $I=10^3 - 10^5$  A
- přítláčná síla  $P=500 - 10000$  N
- svařovací čas  $t=0,04 - 2$  s

Druhy odporového svaření použitelné u rozměrných svařenců:

- bodové svařování
- výstupkové svařování
- švové svařování

### 2.2.1.1 Bodové svařování

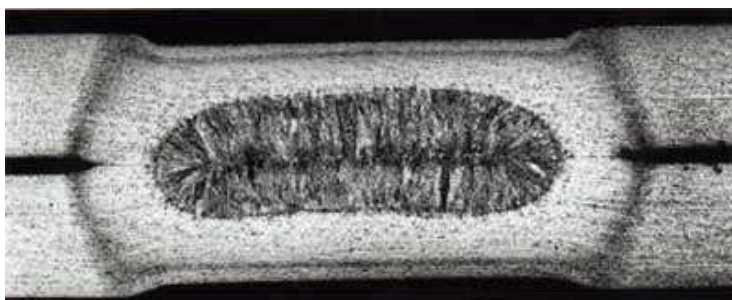
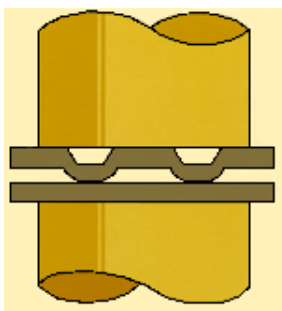
Jedná se o nejběžnější způsob, kdy má svařečka dvě protilehlé elektrody. Spoj je tvořen přepřátováním plechů jedním nebo několika bodovými svary. Tato metoda se používá především u plechů tloušťky nepřesahující většinou 5 mm. „Pro svařování se používají zvláštní kontaktní špičky. Bodové svařování je průběžný proces využívající otáčejících se elektrod na překrývajících se plochách.“ [13]



Obr. 6 Způsob svařování odporem bodově [14]

### 2.2.1.2 Výstupkové svařování

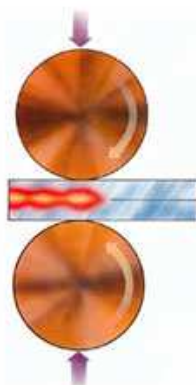
Jedná se o nejproduktivnější způsob odporového svařování. Stroj se nazývá svařovací lis a využívá deskové elektrody, kde jejich délka musí být taková, aby obsáhla všechny svary. Deskové elektrody stisknou jeden element s výstupky k druhému, obvykle rovnému dílci. Za koncentrovaného průchodu svařovacího proudu a tlaku dojde v místě styku součástí k natavení a svaření.



Obr. 8 Naznačení metody výstupkového svařování, obr. 9 Detail ztuhlého svarového kovu [15]

### 2.2.1.3 Švové svařování

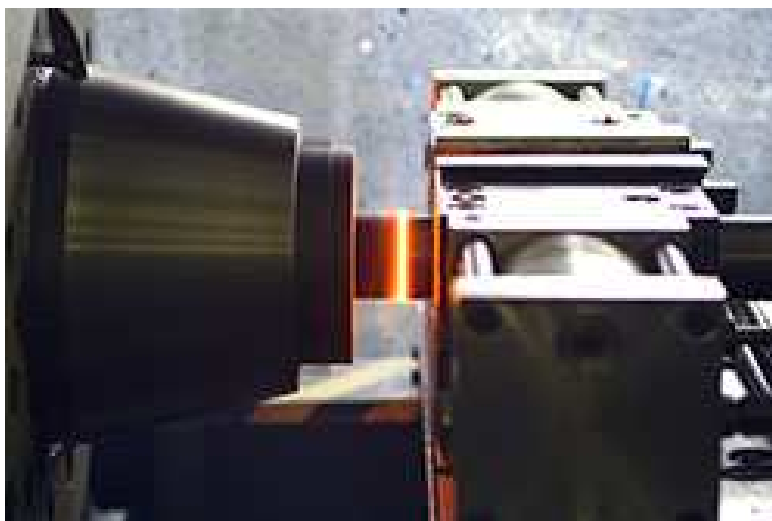
Je obdobnou metodou bodového svařování. Elektrody jsou dva otáčející se vodou chlazené kotouče, které mezi překrývajícími plechy vytváří průběžný svar. Větší tloušťky plechů se svařují přerušovaným proudem. V současné době je švové svařování nezastupitelné pro konkrétní aplikace.



Obr. 9 Zhotovení průběžného svaru kotoučovými elektrodami [16]

## 2.2.2 Svařování třením

Tato nekonvenční a velmi perspektivní metoda se využívá především u rotačních dílců. Rotací jedné z komponent upnuté v hlavě speciálního soustruhu a současným přitlačením na druhou součást upnutou nehybně přes momentovou spojku dojde k vývinu tepla. Materiál se ohřevem dostane do plastického (těstovitého) stavu a dojde k rychlému spojení a tvorbě výrobku. Ve výrobku jsou obsaženy oxidy, které se spolu s výrobkem po dokončení spoje odstraní.



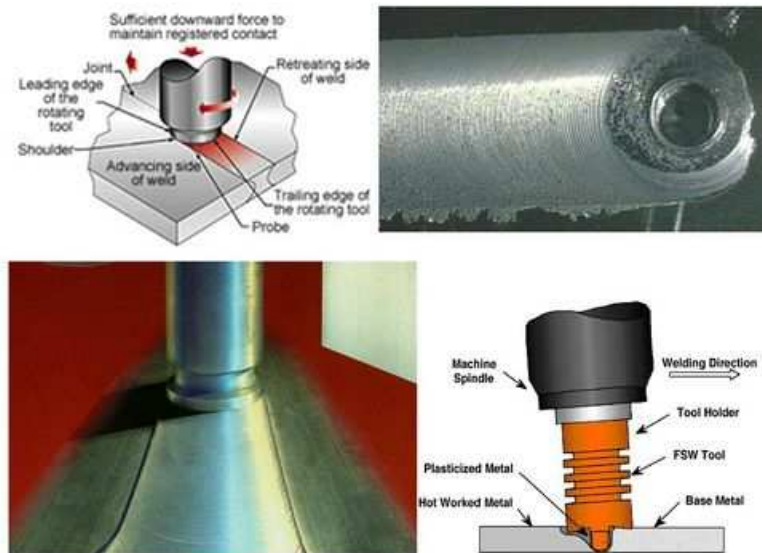
Obr. 10 Ukázka svařování třením na třecí svářečce ZT 22 [17]

## 2.2.3 Friction Stir Welding – FSW

Postupným vývojem svařování třením se dospělo v roce 1991 v Cambridge ve Velké Británii k metodě zvané Friction Stir Welding - FSW. Tato metoda byla vyvíjena především pro potřeby svařování hliníku a jeho slitin. Reálné využití metody pokračuje dalším rozvojem pro různé varianty konkrétního použití.

Princip metody spočívá ve spojení dvou hliníkových součástí za vysokých teplot, které nepřesáhnou bod tavení slitiny. Zdrojem tepla je válcový nástroj s profilovaným kolíkem, který se zaboří do materiálu a pohybuje se podél spáry mezi dvěma deskami. Při tomto způsobu dosahuje materiál teploty kolem 0,8 teploty tavení. „Změklý materiál je přenesen na vlečný okraj nástroje a je vykován těsným kontaktem ramene nástroje a profilem kolíku. Při chlazení mezi těmito dvěma kusy povoluje vazba pevné fáze.“[18]



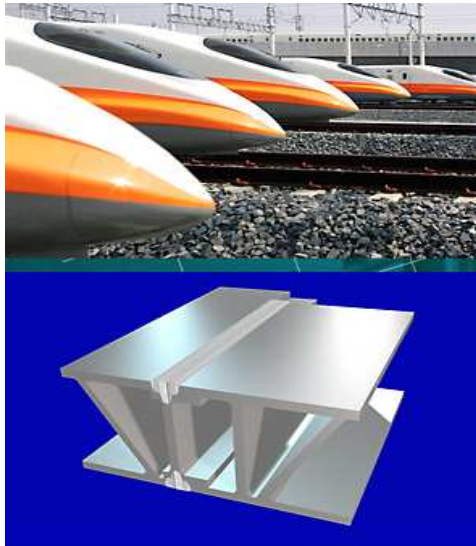


Obr. 11 Tvorba svaru metodou FSW [19]

„Výhodou FSW je vysoká kvalita spoje a jeho výborné mechanické vlastnosti, jako je pevnost a chování spoje při ohybu. Ve srovnání s ostatními metodami svařování má spoj vynikající únavové vlastnosti, protože neobsahuje vměstky a nečistoty. Spoje mohou být vytvořeny rychleji, při svařování nedochází k velkým deformacím a lze spojovat díly v tloušťkách od 1,6 do 30 mm. Nová technologie tak může nahradit klasické a většinou obtížné svařování součástí z hliníkových slitin v oborech jako je stavba lodí, letecký průmysl, výroba železničních vagónů, automobilový průmysl, chladiřnictví, a další.“ [20]

Protože nedochází k žádnému vzniku hořícího oblouku, nedochází proto ani ke vzniku problémové tepelně ovlivněné oblasti s deformacemi vyžadujícími následné rovnání. Nevznikají žádné zplodiny, tím je metoda šetrná k životnímu prostředí a zdraví svářečů. Nemusí se připravovat svarové plochy a svar nese pouze stopy po nástroji, což inspirovalo designéry k tvorbě nových vzhledů výrobků. U velmi produktivní metody FSW odpadají náklady na pořizování přídavných materiálů a ochranných plynů a stroje mají nízkou spotřebu energie. Pokud budeme svařovat materiály oboustranně, lze dosáhnout „průvaru“ do hloubky 50 mm. Svařovací rychlost je závislá na vlastnostech spojovaných materiálů a pohybuje se od 50 do 3000 mm/min.

Všechny svařence, které byly provedeny metodou FSW, jsou tvořeny z více jak 70 % slitinami hliníku. Jedná se většinou o slitiny Al sérií 2xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx a 8xxx a slitiny AlLi. U těchto slitin se daří dosáhnout vysoké kvality svaru a celistvosti s nízkou deformací. Dnes se bez problémů svařují pomocí této metody materiály, které jsou považovány z pohledu tavných metod za obtížně svařitelné. Mezi příklady uveďme slitiny AlCu, AlMg, AlSiMg, AlZn, AlLi a AlTi. Slitiny AlLi jsou velmi lehké, díky legování nejlehčím prvkem vůbec – lithiem. Jsou speciálně vyvíjeny pro letectví a kosmonautiku.



Obr. 12 Železniční aplikace FSW, japonské rychlovlaky Taiwan High Speed Rail 700T Train<sup>3</sup> [21]

Svařování třením je po technologické stránce velice složitý proces. Probíhá při něm mnoho změn a jeho teplotní simulace značnou měrou přispěla k řešení celé problematiky a dopomáhá dalšímu vývoji.

---

<sup>3</sup> Rychlovlak získal prestižní ocenění Grand Prize Good Design Award 2006 Japonsko, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

### 3 PROBLÉMY PŘI SVAŘOVÁNÍ ROZMĚRNÝCH DÍLCŮ

Vnášením tepla do chladného základního materiálu přinášíme se záměrem spojit dva a více dílců současně také problémy s napěťovým, deformačním a teplotním polem.

#### 3.1 Deformace

Jednoduše popsáno, jsou deformace změny rozměrů součástí vyvolané vnitřním napětím nebo vnějším zatížením. Deformace, které vzniknou v teplem zasažené oblasti, při přechodu z elastického do plastického stavu, mají negativní vliv na konečné rozměry svařence. Mezi napětím a deformací jsou vzájemné vazby, jež mají vliv na mechanické vlastnosti spoje.

Deformace se dělí na vnitřní a vnější.

Vnější deformace:

- elementární – deformace svarového spoje jako element složitého svařence
- lokální – deformace vyvolaná změnou tvaru průřezu jen v některých místech svařence
- celková – deformace doprovázená změnou tvaru nebo rozměru celého svařence

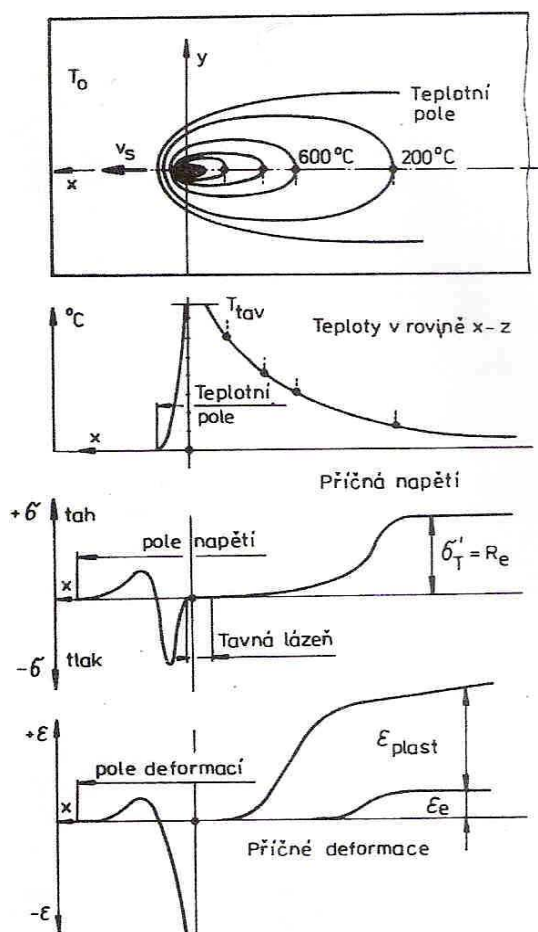
Vnitřní deformace:

- makroskopické – souvisí s existencí ustálených napětí v materiálu
- mikroskopické – souvisí s fázovými přeměnami v TOO a způsobují strukturní napětí

„Ve fázi ohřevu teplota ovlivněné oblasti spojitě vzrůstá až na teplotu tavení; s růstem teploty současně klesá mez kluzu materiálu, a proto klesají i tepelná pnutí. Ohřátý materiál se proto snadno pěchuje i účinkem relativně nízkých napětí. Při ochlazování, kdy se teplota pole vyrovná na teplotu základního materiálu, probíhají pochody opačného směru. Protože s poklesem teploty vzrůstá mez kluzu, tahové deformace vyžadují stále vyšší napětí. V materiálu, u kterého probíhá v místě ohraničené oblasti teplotní cyklus, narůstají postupně tahová pnutí a v konečné fázi dosahují zbytková napětí až mez kluzu.“ [22]

### 3.2 Napěťové pole

Co se týče složitosti napěťových polí, jsou několikanásobně složitější než teplotní pole. Napětí a deformace totiž na rozdíl od teplotního pole vznikají i daleko od TOO. Tedy i v místech vůbec nezasažených zvýšenou teplotou se objeví napětí v materiálu. Další důvod složitosti napěťových polí je v tom, že v každém místě vzniká víceosá napjatost, kde podélná a příčná napjatost mají odlišné hodnoty. Pro popis napěťových polí slouží metoda konečných prvků, ale pro rozsáhlé svařence s velkým počtem svarů se moc nehodí. Vzniklo by totiž velké množství konečných prvků, rozsáhlé modely s obrovskými nároky na hardware a čas. Proto byl pro řešení těchto úloh v rámci Sysweldu<sup>4</sup> navržen tzv. lokálně-globální přístup vycházející z následujících předpokladů o místním či celkovém charakteru působení určitých jevů vznikajících při svařování.“ [23]



Obr. 13 Průběh teplot, příčných napětí a deformací [24]

<sup>4</sup> Analýza kritických míst svařovacího procesu na základě simulací v programu SYSWELD = The analysis of critical points during the welding process on the basis of simulation calculations of the SYSWELD software

Z obrázku 17 je vidět, že napěťové a deformační pole zasahují dále do materiálu než teplotní pole. V blízkosti tavné lázně se křivka deformace a napětí náhle obrací a za tavnou lázní je křivka napětí ovlivňována závislostí teploty na mezi kluzu a pak také tím, že teplotní pole postupuje a roztahování vzdálenějších oblastí částečně vyrovnávají stahující se chladnoucí místa vedle svarového kovu. Podobný původ má i zpožďující se nástup deformací.

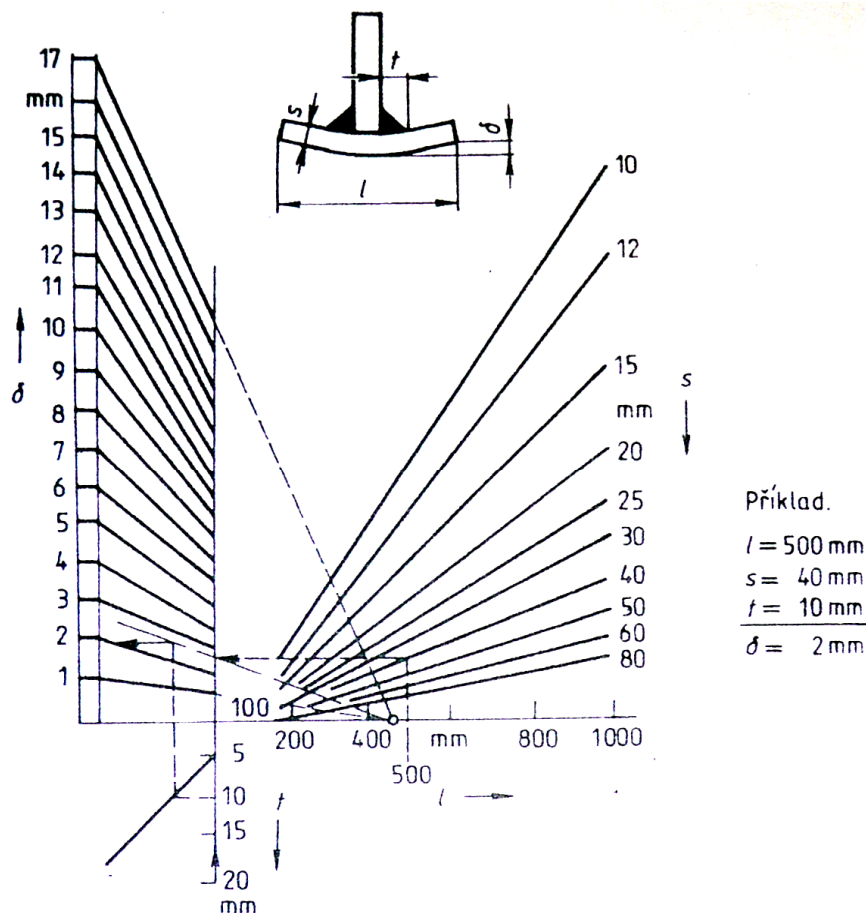
Od svarového kovu se vyžaduje vysoká plasticita. Je to proto, že rozložení příčných deformací v ose svaru, který si nejdéle drží teplotu, je podstatně větší než odpovídá teplotní dilataci.

U podélných zbytkových napětí také dochází k inverzi křivky. V TOO, která se za působení tlaku trvale deformovala, a ve svarovém kovu, kde došlo k výraznému poklesu meze kluzu, je podélné zbytkové napětí tahové. Oblasti, které nebyly tak zasaženy vysokou teplotou, se deformovaly jen pružně. Tyto oblasti vykazují po úplném vychladnutí tlakové zbytkové napětí.

Do míst svarového kovu a jeho blízkého okolí se koncentrují plastické deformace. U svařenců z tlustých plechů nebo při nevhodném křížení svarů může dojít k prostorovému tahu (trojosý tah), který způsobuje pokles plasticity. Plasticita nezávisí na fyzikálních a metalurgických vlastnostech materiálu, ale na stavu napjatosti. Před tahovými pnutími ve svarovém kovu a blízké TOO se musíme bránit, jinak dosahují až meze kluzu.

Úhlové deformace se odstraňují a redukují daleko obtížněji než délkové. Na velikost deformace má vliv jak úhel rozevření svařovaných ploch, tak i množství na sebe kladených svarů a způsob jejich navařování. K omezení velikosti deformací a napětí je třeba respektovat konstrukční a technologické principy.

Jako typickou ukázkou z praxe můžeme uvést případ řešení úhlové deformace pomocí diagramu pro určení velikosti úhlových deformací. Tyto deformace se dají určit i výpočtem, ale pro jednoduchost a názornost použijeme diagram.



Obr. 18 Diagram pro určení velikosti úhlových deformací [25]

Postup nalezení deformace je z grafu jistě patrný. Začíná se výběrem tloušťky materiálu  $s$ , pokračujeme výběrem délky svaru  $l$ , charakteristického rozměru svaru  $t$  až ke stanovení deformace  $\delta$ , která v našem případě na délce 500 mm tvoří 2 mm. Se vzrůstající délkou svařence samozřejmě úhlová deformace výrazně nabývá.

## 4 ZÁVĚR

Existující technologie a metody pro svařování soudobých hliníkových materiálů bezpečně nejsou v konečné fázi vývoje. Do budoucna se očekává další rozmach materiálů na bázi Al.

Ze současných slitin s vysokým potenciálem využití se můžeme zmínit o Al-Li, kdy nám nabízí za nízké hmotnosti značnou pevnost. S novými materiály přicházejí ruku v ruce i nové technologie svařování a spojování. Proto je pravděpodobně oblast svařování hliníku do budoucna značně perspektivní.

V oblasti svařování rozměrných hliníkových svařenců musíme zohledňovat metody, u kterých pokud možno nebudeme vnášet do materiálu značné množství tepla. Čím více vneseme měrného tepla, tím větší budou i deformace svařence. Tedy naší snahou je vnášet co nejmenší teplo do svaru. Z uvedených metod svařování hliníku a jeho slitin je potřebné mít na zřeteli, že rozsah použití metod z hlediska tloušťky a produktivity svařování je odlišný. Vhodné způsoby by poskytovaly metody tlakového svařování. Většinou to ale není uskutečnitelné z důvodu nedostatečného přístupu svařovacího zařízení do místa budoucího spoje. Volíme tedy tavné metody (TIG) a klademe důraz na stehování spojovaných dílců a na výběr vhodného přídavného materiálu, odstranění oxidické vrstvy a v neposlední řadě na samotný proces svařování. Svarový spoj totiž většinou rozhoduje o budoucích vlastnostech svařeného dílce.

Pokud mluvíme o rozměrných svařencích, jedná se v praxi o svařované konstrukce v řádech jednotek až desítek metrů. Mezi klasické užití takovýchto aplikací se řadí spojování částí kolejových vozidel, především vagonů, svařování ropných plošin, trupů lodí, speciální konstrukce v leteckém a kosmickém průmyslu a další.

## 5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Tepelné zpracování hliníkových slitin - teorie* [online]. 2008-12-02 [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: <[http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_tepelne\\_zprac\\_hlin\\_sl/index.htm](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_hlin_sl/index.htm)>.
- [2] *Tepelné zpracování hliníkových slitin - teorie* [online]. 2008-12-02 [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: <[http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_tepelne\\_zprac\\_hlin\\_sl/index.htm](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_hlin_sl/index.htm)>.
- [3] *Studijní podklady pro výuku předmětů: Mezní stavy materiálů* [online]. 2007 [cit. 2009-03-23]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/vyukals.html>>.
- [4] MICHNA, Štefan, et al. *Encyklopedie hliníku*. Prešov : [s.n.], 2005. 700 s. Dostupnost z CD-Rom. ISBN 80-89041-88-4.
- [5] HÁJEK, Jaroslav. Svařování hliníku v ochranných plynech. *MM Průmyslové spektrum*. 2008, č. 10, s. 40-42. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-hliniku-v-ochrannych-plynech>>.
- [6] NEUŽIL, Vladimír, FLEISCHMANN, Pavel, STACH, Zdeněk. Problematika svařování hliníku. *Svařování, dělení, spojování materiálů* [online]. 2004 [cit. 2009-04-07], s. 28. Dostupný z WWW: <[http://www.tmvydavatelstvi.cz/svarovani/0402/str\\_28.pdf](http://www.tmvydavatelstvi.cz/svarovani/0402/str_28.pdf)>.
- [7] *ESAB Zváranie a rezanie : Zváranie TIG* [online]. 2006 [cit. 2009-03-27]. Dostupný z WWW: <<http://sk.esab.net/sk/sk/education/processes-gtaw-tig.cfm>>.
- [8] HAJDÍK, Jiří, HEINRICH, Michal. *Svět svaru : Svařování hliníku a jeho slitin* [online]. 2007 [cit. 2009-04-07]. Dostupný z WWW: <[http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Svar\\_hlinik1\\_2007.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Svar_hlinik1_2007.pdf)>.
- [9] *SVARINFO : Svařování prakticky a s nadhledem* [online]. 2009 [cit. 2009-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008122801>>.
- [10] *SVARINFO : Svařování prakticky a s nadhledem* [online]. 2007 [cit. 2009-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2007010802>>.



- [11] HÁJEK, Jaroslav. Svařování hliníku v ochranných plynech. *MM Průmyslové spektrum*. 2008, č. 10, s. 40-42. Dostupný z WWW:  
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-hliniku-v-ochrannych-plynech>>.
- [12] HÁJEK, Jaroslav. Svařování hliníku v ochranných plynech. *MM Průmyslové spektrum*. 2008, č. 10, s. 40-42. Dostupný z WWW:  
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-hliniku-v-ochrannych-plynech>>.
- [13] *Schinkmann : Specialista na odporové svařování* [online]. 2008 [cit. 2009-04-09].  
Dostupný z WWW: <<http://www.schinkmann.cz/bodove-svarovani?popup=0>>.
- [14] *ESAB Svařování a řezání: Bodové svařování* [online]. c2006 [cit. 2009-04-05].  
Dostupný z WWW: <<http://www.esab.cz/cz/cz/education/processes-spot-welding.cfm>>.
- [15] *LSAUNITED : Production Resistance Welding* [online]. 2009 [cit. 2009-05-03].  
Dostupný z WWW: <<http://www.lsaunited.net/welding.htm>>.
- [16] *Schinkmann : Specialista na odporové svařování* [online]. c2008 [cit. 2009-04-23].  
Dostupný z WWW: <<http://www.schinkmann.cz/svove-svarovani>>.
- [17] *SilvaART* [online]. 1991-2009 [cit. 2009-04-17].  
Dostupný z WWW: <<http://www.silvaart.cz/index.php?go=moznosti>>.
- [18] *ESAB Svařování a řezání : Svařování třením* [online]. c2006 [cit. 2009-05-01].  
Dostupný z WWW: <<http://www.esab.com/cz/cz/education/processes-fsw.cfm>>.
- [19] *LOXIN : Technologies* [online]. 2002 [cit. 2009-05-06].  
Dostupný z WWW: <<http://www.loxin2002.com/index.php/en/technologies>>.
- [20] BITTNER, Karel. *HUMUSOFT : Technické výpočty, řídicí technika, simulace* [online]. 1991-2009 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.humusoft.cz/old/pub/femlab/comsol/welding/welding.htm>>.
- [21] *NOVA - TECH ENGINEERING LLC* [online]. 1996 [cit. 2009-04-08].  
Dostupný z WWW: <[http://www.stirwelding.com/rail\\_applications.htm](http://www.stirwelding.com/rail_applications.htm)>.
- [22] ŽÁK, Jan, NOVÁK, Miroslav. *Teorie svařování*. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1988. 142 s.

- [23] *Vědecká knihovna v Olomouci* [online]. 2006 [cit. 2009-04-29].  
Dostupný z WWW: <<http://aleph.vkol.cz/pub/svk01/00086/67/000866731.htm>>.
- [24] BARTÁK, Jiří, et al. Učební texty : pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory. 1. vyd. Ostrava : ZEROSS, 2002. 418 s. ISBN 80-85771-97-7.
- [25] TURŇA, Milan. Špeciálne metódy zvárania. 1. vyd. Bratislava : ALFA, 1989. 384 s. ISBN 80-05-00097-9.
- [26] NOVOTNÝ, Ján, HOLÁSEK, Ján, MATEJE, Michal. Zváranie a rezanie hliníka. 2. vyd. Bratislava : ALFA, 1975. 480 s.
- [27] ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3.
- [28] Kolektiv autorů. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: ZEROSS 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
- [29] Kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
- [30] HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan, PAŇÁK, Rudolf. Strojírenská technologie 2 : Polotovary a jejich technologičnost. 2. upr. vyd. Praha : Scientia, 2001. 316 s. ISBN 80-7183-244-8.
- [31] ŽÁK, Jan, NOVÁK, Miroslav. Teorie svařování. 1. vyd. [s.l.] : Vysoké učení technické v Brně, 1988. 142 s.
- [32] KŘÍŽ, R., VÁVRA, P.: Strojírenská příručka, vyd. Scientia, s. r. o., 1998, 8. sv.: Tváření, 255 str., ISBN 80-7183-054-2

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

FSW – Friction Stir Welding

MIG – Metal Inert Gas

ROE – Ruční Obalovaná elektroda

TIG – Tungsten Inert Gas

TIG AC – Tungsten Inert Gas Alterting Current

TIG DC- - Tungsten Inert Gas Direct Current-

TIG DC+ - Tungsten Inert Gas Direct Current+

TOO – Tepelně Ovlivněná Oblast

TZM – Tloušťka Základního Materiálu

WIG – Wolfram Inert Gas