



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

**Kondenzátorové svařování hliníkových slitin**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Havlín Martin

**VEDOUcí PRÁCE:** doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D

**STUDIJNÍ PROGRAM:** Výrobní inženýrství

**STUDIJNÍ OBOR:** Bez specializace

**Praha 2023**



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Havlín** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **476490**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Kondenzátorové svařování hliníkových slitin**

Název diplomové práce anglicky:

**Capacitor discharge welding of aluminum alloys**

Pokyny pro vypracování:

- problematika kondenzátorového odporového svařování
- problematika odporového svařování hliníku
- návrh experimentu
- vyhodnocení kvality svarů a jejich vlastností
- závěr

Seznam doporučené literatury:

- KOAL, Johannes, Martin BAUMGARTEN, Stefan HEILMANN, Jörg ZSCHETZSCHE a Uwe FÜSSEL. Performing an Indirect Coupled Numerical Simulation for Capacitor Discharge Welding of Aluminium Components. Processes doi:10.3390/pr8111330
- SCHWARTZ, D. S., J. H. DEVLETIAN, S. J. CHEN a J. GOULD. Capacitor Discharge and Flash Welding of SiC-Reinforced High Temperature Al Alloys. MRS Proceedings, doi:10.1557/PROC-314-163
- databáze WoS a Scopus

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis díkara(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Marie Kolaříkové, Ph.D, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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: .....

.....

Podpis autora

### Poděkování:

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., dále svým konzultantům pánům Ing. Martinovi Sahulovi, Ph.D. a Ing. Miroslavovi Sahulovi, Ph.D. za jejich čas, věcné připomínky, cenné rady a obětavost, které mi byly velkým přínosem během vypracování této diplomové práce.

## Anotace

<b>Název diplomové práce:</b>	Kondenzátorové svařování hliníkových slitin
<b>Autor práce:</b>	Havlín Martin
<b>Vedoucí práce:</b>	doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.
<b>Konzultant:</b>	Ing. Martin Sahul, Ph.D.
<b>Akademický rok:</b>	2022/2023
<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	12133 – Ústav strojírenské technologie
<b>Vedoucí ústavu:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Rozsah práce:</b>	70 stránek, 12 tabulek, 47 obrázků
<b>Klíčová slova:</b>	Kondenzátorové svařování, odporové svařování, slitiny hliníku

Tato diplomová práce se zabývá tématem kondenzátorového odporového svařování hliníkových slitin. Skládá se ze dvou částí. První část – teoretická, se zabývá způsoby, kterými lze hliníkové slitiny spojovat. Důkladněji je teoretická část zaměřena na problematiku svařování hliníkových slitin odporovým svařováním a následně kondenzátorovým odporovým svařováním. Experimentální část popisuje návrh a vývoj svařovacího cyklu. Svařené vzorky byly poté podrobeny destruktivním a nedestruktivním zkouškám. Jednalo se o mechanizovanou zkoušku střihem, zkoušku ultrazvukem a následně byly metalografické vzorky analyzovány na světelném a elektronovém mikroskopu. Dále byla provedena spektrální analýza chemického složení svaru a měření mikrotvrdosti.

## Annotation

<b>Title of the final thesis:</b>	Capacitor discharge welding of aluminium alloys
<b>Author:</b>	Havlín Martin
<b>Supervisor:</b>	doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.
<b>Consultant:</b>	Ing. Martin Sahul, Ph.D.
<b>Academic year:</b>	2022/2023
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík
<b>Extent:</b>	70 pages, 12 tables, 47 pictures
<b>Keywords:</b>	Capacitor discharge welding, resistance welding, aluminum alloys

This thesis deals with the topic of capacitor resistance welding of aluminum alloys. It consists of two parts. The first part, theoretical, deals with the ways in which aluminum alloys can be joined. The theoretical part focuses more thoroughly on the problem of welding aluminum alloys by resistance welding and then by capacitor resistance welding. The experimental part describes the design and development of the welding process. The welded samples were then subjected to destructive and non-destructive tests. These included a mechanized shear test, an ultrasonic test, and then the metallographic samples were subjected to light microscopy and scanning electron microscopy. In addition, spectral analysis of the chemical composition of the weld and microhardness measurements were performed.

## Obsah

Čestné prohlášení.....	1
Poděkování:.....	2
Anotace.....	3
Annotation.....	4
Seznam použitých zkratk.....	9
Seznam použitých veličin.....	11
<b>1. Úvod.....</b>	<b>12</b>
<b>2. Teoretická část.....</b>	<b>13</b>
2.1. Karoserie osobních vozidel.....	13
2.1.1. Obecné požadavky na karoserie.....	13
2.2. Odlehčování karoserí.....	14
2.3. Bezpečnost karoserí.....	15
2.3.1. Pasivní bezpečnost.....	15
2.3.2. Aktivní bezpečnost.....	15
2.4. Zelená doprava.....	15
2.5. Materiálový koncept karoserie.....	16
2.5.1. Vývoj v letech.....	16
2.6. Využití hliníkových slitin v automobilovém průmyslu.....	20
2.6.1. Obecné vlastnosti hliníku.....	21
2.7. Metody svařování hliníku.....	22
2.7.1. Laserové svařování.....	22
2.7.2. CMT (Cold Metal Transfer).....	24
2.7.3. Třecí svařování promíšením (Friction Stir Welding).....	25
2.7.4. Odporové svařování.....	26
2.7.5. Kondenzátorové odporové svařování.....	28
2.8. Zkoušky odporových spojů.....	30
2.8.1. Destruktivní zkoušky odporových spojů.....	30
2.8.2. Nedestruktivní zkoušky odporových spojů.....	31
<b>3. Experimentální část.....</b>	<b>32</b>
3.1. Návrh experimentu.....	32
3.2. Základní materiál a jeho vlastnosti.....	33
3.3. Svařovací stroj.....	34
3.4. Optimalizace svařovacího procesu.....	34
3.5. Mechanizovaná stříhová zkouška.....	39

3.6.	Zkouška ultrazvukem.....	41
3.7.	Metalografický postup .....	42
3.8.	Oblast zkřehnutí vlivem tekutého kovu .....	43
3.9.	Světelná mikroskopie .....	45
3.10.	Skenovací elektronový mikroskop .....	48
3.10.1.	Opotřebení elektrodových čepiček .....	61
3.11.	Měření mikrotvrlosti .....	62
4.	Diskuze a závěr .....	65
	Bibliografie .....	67
	Seznam obrázků .....	69
	Seznam tabulek .....	70
	Seznam grafů .....	70



## Seznam použitých zkratek

CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
DP oceli	(Dual Phase) Dvoufázové oceli
CP oceli	(Complex Phase) Vícefázové oceli
TRIP oceli	(Transformation Induced Plasticity) Multifázové oceli
TWIP oceli	(Twinning Induced Plasticity) Oceli s plastickou deformací dvojčatěním
HF oceli	(Hot Formed) Za tepla válcované oceli
HSLA oceli	(High Strength Low Alloy) Vysokopevnostní nízkolegované oceli
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý
MIG	Obloukové svařování s tavící se elektrodou v inertní ochranné atmosféře
MAG	Obloukové svařování s tavící se elektrodou v aktivní ochranné atmosféře
TIG	Obloukové svařování s netavící se elektrodou v inertní ochranné atmosféře
ND:YAG	Pevnolátkový laser (neodymem dopovaný yttrio-aluminiový granát)
HNO <sub>3</sub>	Kyselina dusičná
HCl	Kyselina chlorovodíková
HF	Kyselina fluorovodíková
TOO	Teplotně ovlivněná oblast
ZM	Základní materiál
SK	Svarový kov
ABS	(Antiblockiersystems) Protiblokovací systém
ESP	(Electronic Stability Program) Elektronický stabilizační program
K 1	Kondenzátor 1
K 2	Kondenzátor 2
Fe	Železo

Si	Křemík
Cu	Měď
Mn	Mangan
Mg	Hořčík
Cr	Chrom
Zn	Zinek
Ti	Titan
V	Vanad
Al	Hliník

## Seznam použitých veličin

Q	Množství vyvinutého tepla	[J]
R	Odpor	[ $\Omega$ ]
I	Proud	[A]
t	Čas svařování	[s]
R <sub>p0,2</sub>	Smluvní mez kluzu	[MPa]
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti	[MPa]
A	Tažnost	[%]
$\tau$	Smykové napětí	[MPa]
$\pi$	Ludolfovo číslo	[-]
F	Síla	[N]
i	Počet svarů na zatěžovaném vzorku	-
d	Průměr svarové čočky	[mm]
t <sub>1</sub>	Tloušťka materiálu 1	[mm]
t <sub>2</sub>	Tloušťka materiálu 2	[mm]
S <sub>el</sub>	Průběh pohybu elektrod	[mm]

# 1. Úvod

Tlak vyvíjený na automobilový průmysl nutí výrobce automobilů snižovat emise CO<sub>2</sub>. Vliv na tyto emise má z velké části hmotnost karoserie. Výrobci automobilů jsou nuceni investovat do vývoje vysokopevnostních materiálů, které by umožnily využít menší množství materiálu, za splnění podmínek bezpečnosti, tuhosti a funkce karoserií. Alternativou k ocelím mohou být hliníkové slitiny, které jsou lehčí. Spojovat hliníkové slitiny je možné několika způsoby, ovšem bodové odporové svařování, které je hojně využíváno v automobilovém průmyslu, je problémové. Je velmi obtížné vyhnout se prasklinám, pórům, nebo přílišnému stárnutí v místě svaru. Tato problematika je popsána v teoretické části této diplomové práce. Další možností by mohlo být odporové kondenzátorové svařování, které využívá vysokého svařovacího proudu v podstatně kratším svařovacím čase, než dokážou běžně průmyslově využívané stroje vygenerovat. Tato, ale i další metody, a jejich problematika je detailně popsána v teoretické části této diplomové práce.

V experimentální části je pak uveden návrh experimentu, kde je popsán použitý odporový kondenzátorový svařovací stroj, včetně materiálu použitého ke svařování a elektrodových čepiček. Následně detailně popisuje postup svařování, změny svařovacích parametrů a milníky průběhu svařování. Po dosažení dostatečně velké svarové čočky, která byla při odlupovací zkoušce vytržena až v TOO bylo svařování pozastaveno, aby byly svařené vzorky podrobeny detailní analýze pro budoucí optimalizaci svářecího procesu. Byla provedena mechanizovaná stříhová zkouška pro zjištění pevnosti svaru. Dále byla provedena zkouška ultrazvukem pro detekci vnitřních vad. Následně vzorky byly podrobeny světelné mikroskopii, kde byly měřeny rozměry svarových čoček roztržených na mechanizované stříhové zkoušce a dalších, nezničených svařencích. Byla vyhodnocena tepelně ovlivněná oblast, hloubka vtisku elektrod, rozstříky a rozměry svarových čoček. Skenovací elektronová mikroskopie umožnila analyzovat strukturu ve svarové čočce, tepelně ovlivněné oblasti a jevech, které se projevíly u světelné mikroskopie. Nakonec bylo provedeno měření mikrotvrdomosti svarových spojů.

## 2. Teoretická část

### 2.1. Karoserie osobních vozidel

Karoserie je obecně označována jako nosná konstrukce vozidla, jež je součástí podvozku a definuje prostor pro osoby či náklad. Hlavním účelem je zejména ochrana cestujících a řidiče vůči kolizím (deformačními zónami) a nepříznivým vnějším vlivům (meteorologické jevy) [1].

V dnešní době je u automobilů nejpoužívanější typ karoserie samonosná, jež zcela pojímá nosnou funkci vozidla. Hlavním přínosem je lehčí konstrukce, jež snižuje celkovou hmotnost automobilů, zlepšení jízdních vlastností a lepší možnosti automatizace výroby, což má za následek nižší výrobní náklady. Nevýhodou jsou komplikované modifikace karoserií. [1]

#### 2.1.1. Obecné požadavky na karoserie

Na karoserie jsou kladeny především funkční požadavky, které jsou spjaté s bezpečností silničního provozu, ale také požadavky výrobní a provozní. Je nutná dostatečná pevnost a tuhost karoserie, která je nucena přenášet různá namáhání s ohledem na maximální bezpečnost posádky. Zároveň je podmínkou co nejnižší hmotnost, se kterou souvisí vyšší úspora paliva a snížení emisí, již zmíněné jízdní vlastnosti, nižší spotřeba materiálů (nižší výrobní náklady). Karoserie musí být spolehlivá s co nejvyšší životností, jež zajišťuje dostatečnou odolnost proti korozi a opotřebení. Dále zajišťuje aerodynamické vlastnosti, zvukovou i tepelnou izolaci, těsnost konstrukce, maximální komfort pro posádku, bezpečný výhled z vozidla, přístup do servisních a udržovacích prostor vozidla a možnost rychle a snadno demontovat a montovat poškozené/vadné díly. [2]



Obrázek 1: Nároky kladené na karoserii [3]

Dalším podstatným hlediskem je pasivní bezpečnost. Jsou to konstrukční řešení na vozidle, která snižují následky v případě kolize, kdy je generována velká kinetická energie. Tato energie musí být absorbována konstrukcí, obklopující prostor posádky, za podmínky nepřekročení takové deformace, aby nebyl narušen vnitřní prostor posádky. [3]

## 2.2. Odlehčování karoserií

Automobilový průmysl je zatěžován emisními limity. Proto automobilové firmy investují značné finance do vývoje nových materiálů, kdy je snahou zvýšení jejich pevnosti, tuhosti při stejné, nebo ideálně menší hmotnosti. Toto řešení ve výsledku vede ke snížení spotřeby paliva a tím ke snížení emisí. Aktuálně se používají různé materiály, které jsou v kombinaci s konkrétním umístěním na karoserii vzhledem k lokálním požadavkům daného místa lépe využity pro splnění konkrétních požadavků. Konkrétní požadavky jsou:

- mechanické vlastnosti,
- nízká měrná hmotnost,
- nízká cena materiálu.

Nízká cena materiálu ovšem není pouze o co nejnižší ceně, záleží také na finanční náročnosti technologie, která je vyžadována pro jeho zpracování. [3]

## 2.3. Bezpečnost karoserií

Bezpečnost karoserií se dělí na aktivní a pasivní bezpečnost. Aktivní bezpečnost je možnost předcházet kolizím. Hlavním aspektem je bezpečný výhled z vozidla ven a snaha o minimální množství mrtvých úhlů. Pasivní bezpečnost znamená zabezpečení posádky a nákladu již při vzniku dopravní nehody. Zde je snaha o co největší šanci na přežití a minimální možnost zranění. [4]

### 2.3.1. Pasivní bezpečnost

- Ochrana posádky a nákladu při kolizi
- Vysoká životnost a spolehlivost
- Minimální hmotnost a zároveň dobrá tuhost
- Nízké náklady na opravy a údržbu

### 2.3.2. Aktivní bezpečnost

- Kondiční – mikroklima udržující řidiče v pozornosti
- Pozorovací – omezení mrtvých úhlů
- Jízdní – brzdě vlastnosti (hmotnostní hledisko)
- Ovládací – aerodynamická stabilita
- Asistenční systémy – ABS, ESP

## 2.4. Zelená doprava

Evropská Unie cílí na snižování emisí oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) u dodávek a osobních automobilů. Výsledkem má být splněná část balíčku Fit for 55 (soubor legislativních návrhů), které usilují o snížení emisí skleníkových plynů o 55 %. Tyto cíle mají zároveň zrychlit přechod k mobilitě s nízkými až nulovými emisemi. Důvodem je fakt, že dodávky a osobní automobily tvoří přibližně 15 % celkových unijních emisí CO<sub>2</sub> (2,5 % dodávky, 12 % automobily).

Toto nařízení má stanovený cíl do roku 2030 a poté má být stanoven nový cíl, jež bude vyžadovat snížení skleníkových plynů o 100 % do roku 2035. Tento cíl je limitní pro emisní dodávky a emisní osobní automobily, aby byly bezemisní. Očekávanými přínosy pro občany jsou: přechod k vozidlům s nulovými emisemi, méně znečištění, zlepšení kvality ovzduší, zdraví a životních podmínek občanů. Pro výrobce je cílem zejména zvýšení výroby a prodeje vozidel s nulovými emisemi, pro spotřebitele cenová dostupnost modelů a nižší náklady na energie. Pro automobilový průmysl je očekávaná rozsáhlá inovace technologií s nulovými emisemi, vedoucí postavení v oblasti technologií a konkurenceschopnosti, nové pracovní příležitosti ve vývoji či výrobě nových technologií. [5]

## 2.5. Materiálový koncept karoserie

### 2.5.1. Vývoj v letech

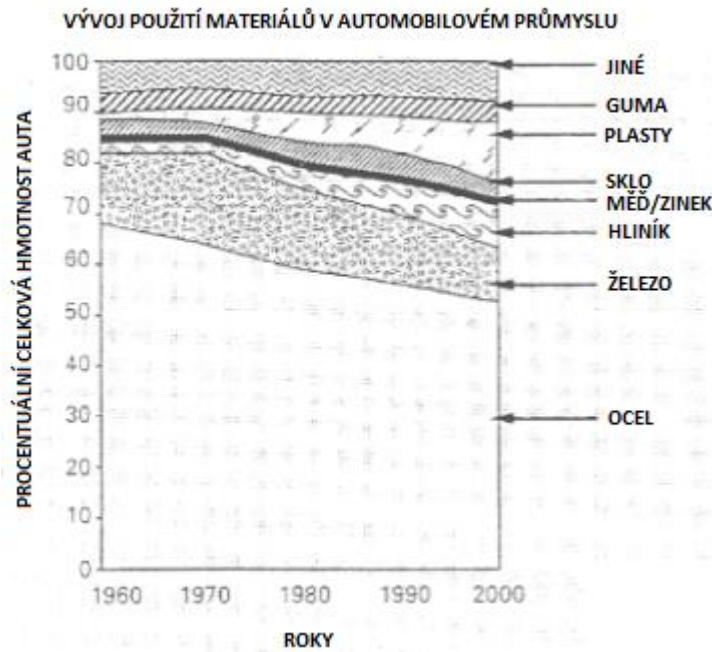
Nejpoužívanějšími materiály na výrobu karoserií jsou ocel, hliníkové slitiny a slitiny hořčíku. Největší podíl tvoří ocel vzhledem k velkému množství vhodných mechanických vlastností a dostupné technologie, jimiž se zpracovává, s cílem nízkých nákladů na výrobu a nízké zátěži životního prostředí. Materiál musí splňovat kritéria tvářitelnosti, tuhosti, pevnosti, teplotní a rozměrové stálosti a odolnosti proti rázovému zatěžování. Nároky na materiál se mění v závislosti k umístění na karoserii vzhledem ke své funkci. Vhodný materiál výrobku je formován vztahem mezi vlastnostmi, konstrukcí a technologií. [6]

Oceli používané pro přední a zadní deformační zónu jsou vícefázové oceli, DP oceli, CP oceli, TRIP oceli, TWIP oceli.

Oceli pro bezpečnou zónu posádky jsou určeny: martenzitické oceli, HF oceli, DP oceli, HSLA oceli.

V roce 1996 bylo v automobilech zakomponováno do 110 kg hliníku na automobil. Odhady pro rok 2015 bylo využití 250 kg bez započítání plechů karoserie nebo 340 kg se započítáním plechů či konstrukčních aplikací. Využívání hliníku v karoseriích je zdůvodněno sníženou hmotností až o 40 % oproti ocelové a tužší o 10-38 %. Dále se snižuje náročnost oprav, je možná dobrá kombinace s jinými materiály a nepodléhá korozním jevům. [7]

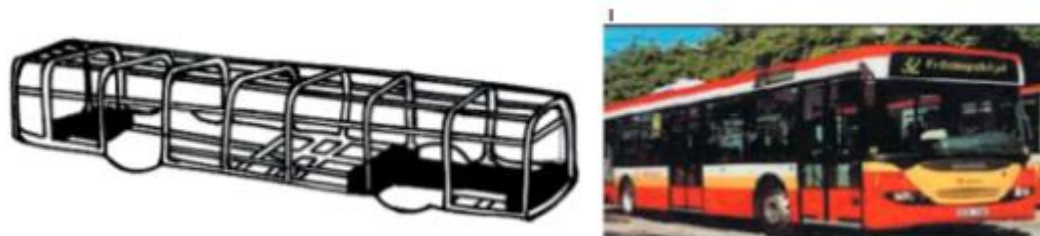




Obrázek 2.: Vývoj použití materiálů v automobilovém průmyslu [7]

Z počátku byly hliníkové slitiny využívány vzhledem k nákladným výrobním technologiím na například hlavice řadicích pák, volantů a litých kol. Poté následovaly hliníkové výměníky, tlumiče, bloky motorů, sací potrubí, písty, ojnice. S dostupnějšími technologiemi začaly vstupovat do konstrukcí automobilů i funkční prvky pro zvýšenou odolnost vůči krutu, ohybu a deformačním zónám. Jedná se například o sloupky, nárazníky, blatníky a deformační zóny. [7]

Problematika hmotnosti a tuhosti konstrukce je důležitá i v hromadné dopravě. Například u autobusů je z hliníkové slitiny vytvořena rámová kostra. [7]

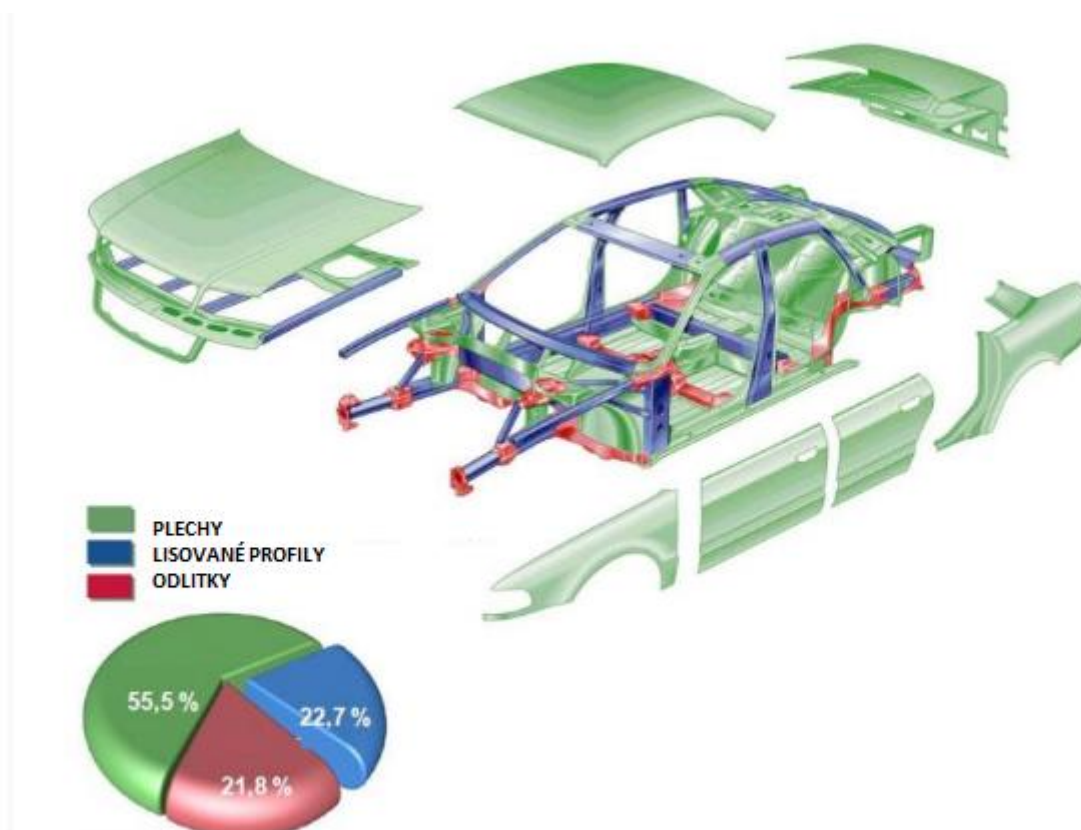


Obrázek 3.: autobus Scania Omnicity s hliníkovým skeletem [7]

Sériové celohliníkové karoserie vyrábí AUDI, Lotus, Honda, Lamborghini, Ferrari, Rolls-Royce [7]

## AUDI

Od roku 1994 do roku 2002 byla vyráběná AUDI A8 (D2). V tomto modelu byla snaha zvýšit podíl mezi ocelí a hliníkovými slitinami. Mimo dveře bylo využito na váhu modelu 249 kg hliníku. Karoserie byla tvořena z 334 dílů (47 hliníkových profilů, 50 odlitků, 237 plechových výlisků). Byly využity hliníkové slitiny 6060, 6016, 6009, 2182, A356. Z počátku byla taková konstrukce nucena projít tepelným zpracováním při teplotě 210 °C po dobu 30 minut z důvodu umělého stárnutí profilů a plechů, což zahrnovalo zvýšení výrobních nákladů. Následné zkušenosti byly využity u karoserie automobilu AUDI A2. Zjistilo se, že požadované pevnostní podmínky budou dosaženy i během operace lakování. Ta zahrnuje kataforetickou namáčecí lázeň a následně setrvání v peci o teplotě 180 °C po dobu 20 minut. [8]



Obrázek 4: Zobrazení využití hliníkových dílů a procentuální znázornění jejich zpracování (AUDI A8 D2) [8]

## **Mercedes-Benz**

Ve třídě S Coupé jsou komponenty vyrobeny z oceli, hliníku a hybridních plastů. Hliníkové slitiny se zde nacházejí ve formě odlitků, plechových a lisovaných dílů. Zasazují se do předních a zadních částí, vnějšího pláště, blatníků, klik a dveří. Bezpečnost posádky zde zajišťuje ultravysokopevnostní a vysokopevnostní ocel. Využívají také hybridní konstrukci hliníku, která je perforovaná a přelitá plastem. Díky této konstrukci je zvýšena tuhost dílu. Využívá se v přepážce mezi cestujícími a zavazadlovým prostorem. Konstrukce dveří je mimořádně dlouhá a bez okenních ráků. Je vytvořena z hliníkových dílů, které jsou spojovány laserovým svařováním, nýtováním a lepením. Výplň konstrukce dveří je tvořena vysokopevnostními slitinami a stejně tak vnitřní strana dveří, aby byla zajištěna co nejvyšší ochrana při čelních a bočních nárazech. V předních částech vozidla jsou opět preferovány hliníkové komponenty s ohledem na váhu, aby bylo dosaženo optimální rozložení hmotnosti celého vozidla. Mimo lepšího rozložení hmotnosti tato úprava dosáhla zlepšení vlastností při nárazu. [9]

## **Jaguar**

Zde má hliník využití již od roku 1940 pro závodní modely, kdy byl využíván díky výsledné nízké hmotnosti. V roce 2003 byl využit hliník v modelu XJ, jeho hmotnost snížil oproti přechozímu modelu o 40 %. Jaguar udává, že 100 kg ušetřené hmotnosti sníží emise vozidla CO<sub>2</sub> o 9 g/km. Používají plechy o tloušťce 0,9 mm, na vnější panely až 3 mm, vzhledem k pevnostním podmínkám odpovídajícím umístění dílce. Například model F-PACE obsahuje postranní panel, který váží pouze 5,8 kg. Podvozek je vyráběn nýtovaným lepením. Panely jsou spojeny lepidlem a poté jsou pojištěné nýty z bórové oceli. V lakovně je slepený podvozek vytvrzen za teploty 170 °C. [10]

## 2.6. Využití hliníkových slitin v automobilovém průmyslu

Tabulka 1: Hliníkové slitiny a jejich využití v automobilovém průmyslu [11]

Mezinárodní označení podle ČSN EN 573-1	Specifické vlastnosti	Použití
EN AW-2014	Velmi pevná slitina používaná pro konstrukční součásti; vzhledem k relativně vyššímu obsahu mědi má nižší odolnost proti korozi	ABS, tlumoče, ojnice
EN AW-5022	Vysoce pevný a vysoce tvárný materiál využívaný pro díly karoserie	kapoty, střechy, dveře, sloupky, podlahové plechy, zadní nárazníky
EN AW-5110A	Slitina s lesklým povrchem, dobrá tažnost a odolnost proti korozi	lišty, reflexní panely, odstíny žárovek světloometů
EN AW-5154	Vysoká pevnost, dobrá tvářitelnost a odolnost proti koroznímu praskání při namáhání	kola, součásti podvozku
EN AW-5182	Dobrá tvářitelnost a odolnost proti korozi	protiprachové kryty, rámy sedadel, pouzdra vzduchového filtru
EN AW-6060	Pevná, zakalená slitina s vysokou tvářitelností	kapoty, zadní nárazníky, přední nárazníky sloupky, kryty kol, střechy, dveře
EN AW-6063	Výborné vlastnosti tváření, svařitelná, odolná vůči korozi, elektro-chemicky lze upravit do lesku a anodizovat, pro nejvyšší dekorativní nároky	lišty, rámy sedadel, brány nákladních vozů, střešní zábradlí, potrubí
EN AW-7204	Slitina pro svařované konstrukce; pevnost ve svařované části přirozeným stárnutím se obnovuje téměř stejnou hodnotou, jako původní	součásti řízení, příčníky, brzdové pedály, zvedáky

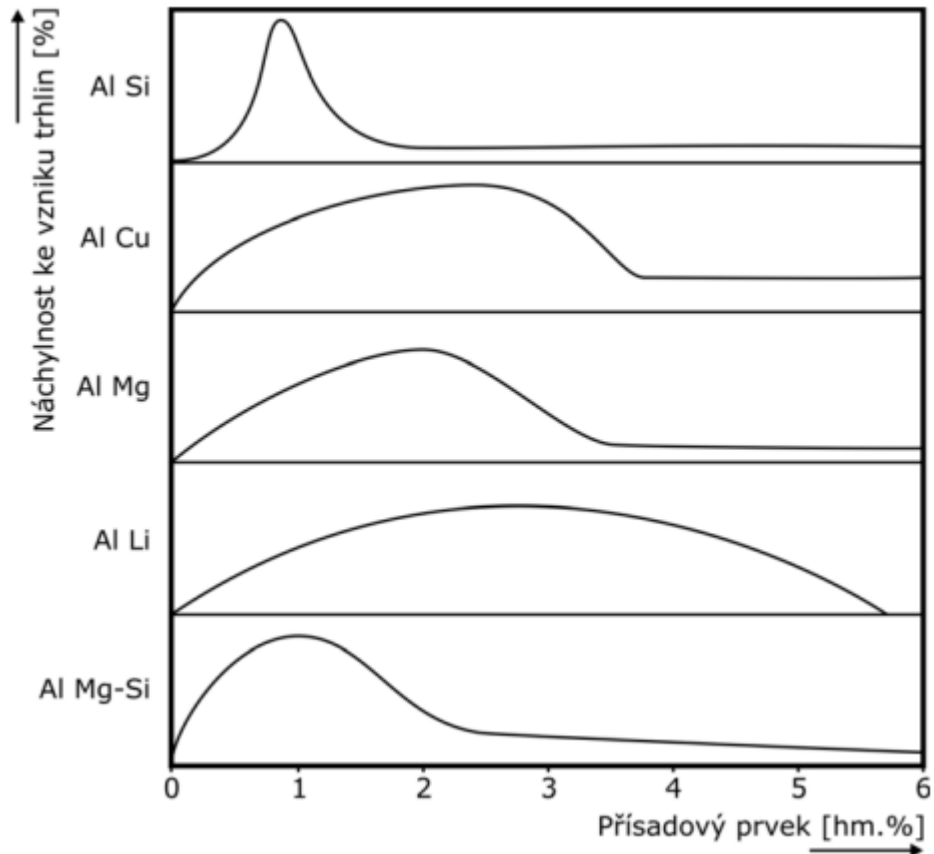
### 2.6.1. Obecné vlastnosti hliníku

Hliník je stříbrně šedý kov s vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí. Je velmi dobře tvárný a snadno se recykluje. Co se svařování týče je samotný čistý hliník obtížně svařitelný. Pro svařování se tedy využívá hliníkových slitin. Díky oxidační vrstvě, která vzniká na jeho povrchu má dobré korozivzdorné vlastnosti. Důležité je i připomenout jeho rozšíření v zemské kůře, kde tvoří 7,3 - 8,5 % podíl. [12]

Pro svařování hliníku je nutná pečlivá příprava svarových ploch, především odstranění oxidační vrstvy  $Al_2O_3$ , která má přibližně 3x vyšší teplotu tavení, než hliník. Vrstva  $Al_2O_3$  je při svařování nerozpustná, proto její přítomnost při svařování může vést k oxidickým vměstkům. Ovšem vměstky se mohou vyskytovat v celém objemu svarové lázně. Tloušťka oxidické vrstvy  $Al_2O_3$  je přibližně od 20 do 200 nm. Tato povrchová vrstva vzniká velice rychle, proto je nevhodnější ji odstranit v poslední chvíli, těsně před svařováním. Zde je vzhledem k velikosti vrstvy voleno mechanické čištění jako doplňkové. Hlavním způsobem je chemické očištění složkami v tavidlech anebo fyzikální metody – čistící účinek argonu. U metod MIG a TIG se využívá čistící účinek střídavého proudu. [13]

Vzhledem k vysoké tepelné vodivosti odvádí svařovaný díl velkou část tepla, které u svařování vzniká. Ovšem pokud je svařovaný díl malých rozměrů, které by nedovolily předat toto teplo okolí, je nutné svařovaný díl chladit (částečně nebo celý). Vysoká teplota představuje problém, protože po svařování, kdy je teplota svařovaného dílu přibližně 200 °C dochází k rozpouštění vytvrzující fáze v teplotně ovlivněné oblasti. Riziko neoptimálního svaru tvoří vodíková křehkost, kdy vodík obsažený ve svarovém spoji má za následek pórovitost. Vodík, který se rozpustí v likvidu, se při ochlazování usazuje na energeticky výhodných místech, kde pokud není možnost jeho difuze pryč, se vytváří póry. Tato rozpustnost vodíku v hliníku a jeho slitinách je několikanásobně větší, než je tomu u železa. Je proto nutné snížit možnost absorpce vodíku do svarové lázně ve větší míře, než u ocelí. [14]

Další častou vadou jsou trhliny za horka, které se vyskytují při řešení svarů oceli a neželezných slitin mědi, niklu, atd. Příčinou je snížená deformační schopnost zrn kovu a pokles soudržnosti na hranicích zrn. Při tuhnutí zde vznikají pnutí, která zde mohou vytvořit trhliny. Podstatný vliv na trhliny za horka mají legující prvky v závislosti na jejich obsahu. Podstatná je tedy technika svařování, jeho rychlost a příprava svarových ploch. [15]



Obrázek 5.: Vliv legujících prvků na vznik trhlin za horka [16]

## 2.7. Metody svařování hliníku

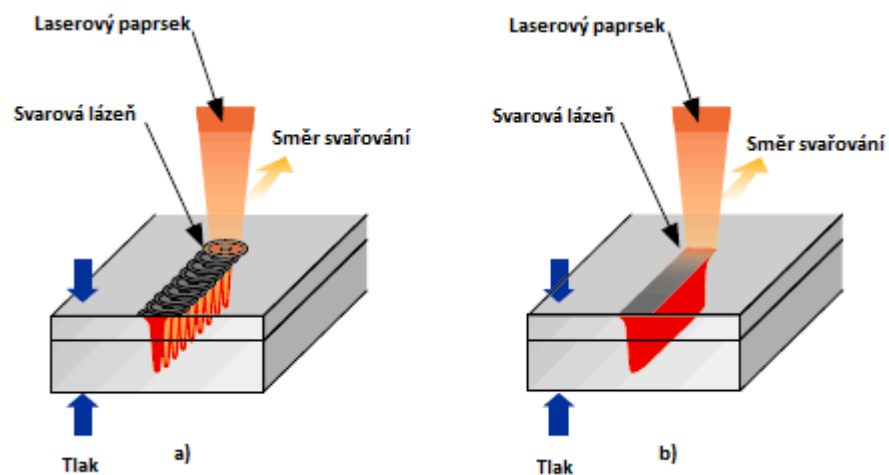
### 2.7.1. Laserové svařování

Laserové svařování využívá technologii nazývanou *Keyhole* (klíčová dírka), kdy je taven svařovaný materiál po stranách dopadajícího laserového paprsku a ve středu vzniká kapsa vyplněná výpary, vznikající při sublimaci. S pohybem laserového paprsku se posouvá i tato kapsa a její stopa je zalévána svarovou lázní. [12]

Laserové svařování je velmi produktivní metoda svařování, ovšem pouze CO<sub>2</sub>, Excimery, ND:YAG a diodové lasery mají dostatek výkonu pro svařování materiálů využívaných v průmyslových procesech. Výhodami této metody je vysoká rychlost svařování, vnášení malého tepla do svařovaného dílu (velmi malá teplotně ovlivněná oblast), velmi fokusovaný energetický tok, hluboký průvar, možnou míru automatizace. [12]

Pulzní laserové svařování je metodou, kdy laserový paprsek pracuje s vysokofrekvenčními pulzy. Každý tento pulz určuje svařovanou oblast a poté je aplikován další puls. V celku vytváří pulzy souvislou čočku, ale do svařence je vneseno menší teplo, čímž se omezuje vznik defektu ve svaru.

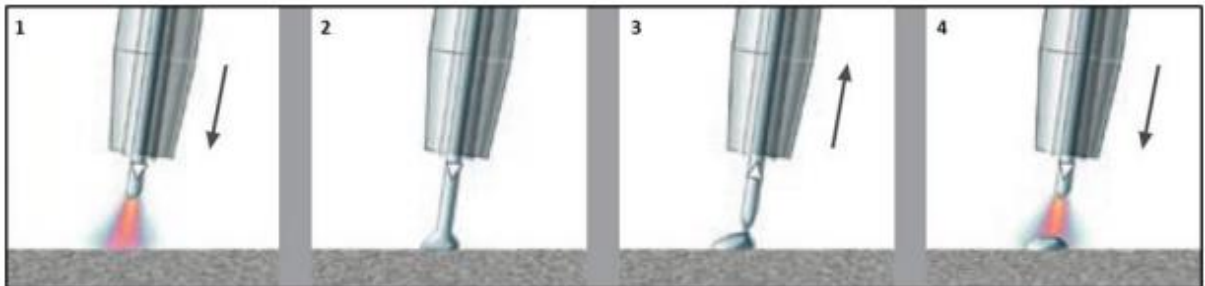
Kontinuální laserové svařování je využíváno pro zhotovení hlubokých svarů u slitin, které jsou citlivé na trhliny. [16]



Obrázek 6.: Znáornění pulzního (a) a kontinuálního (b) laserového svařování [16]

### 2.7.2. CMT (Cold Metal Transfer)

Technologie založena na principu svařování MIG/MAG. Jedná se o „studený“ přenos materiálu (takzvané kapky) pomocí digitálně kontrolovaného krátkého oblouku a vratného pohybu drátu. V zařízení je obsažen podavač umožňující dopředný i zpětný pohyb drátu označován jako push-pull systém. Ten umožňuje oscilaci podávaného drátu až o frekvenci 130 Hz. Rozdílem oproti klasické metodě MIG/MAG je schopnost mechanického odtržení svarového kovu (kapičky) při svařování. Tento přenos probíhá v téměř bezproudém stavu. Tímto způsobem není vnášeno do svarového kovu takové množství tepla. To má za následek významný vliv na materiálové vlastnosti a zbytková pnutí svařence. Tímto odkapáváním nevzniká při svařování žádný rozstřík. Jakmile je přenos kovu dokončen, drát se opět vysune s počátečním svařovacím proudem a opět zapálí oblouk. Tento cyklus je definován dobou potřebnou pro depozici kapky. Tuto metodu lze využít pro aditivní technologie, nebo právě pro svařování hliníkových slitin. [17]

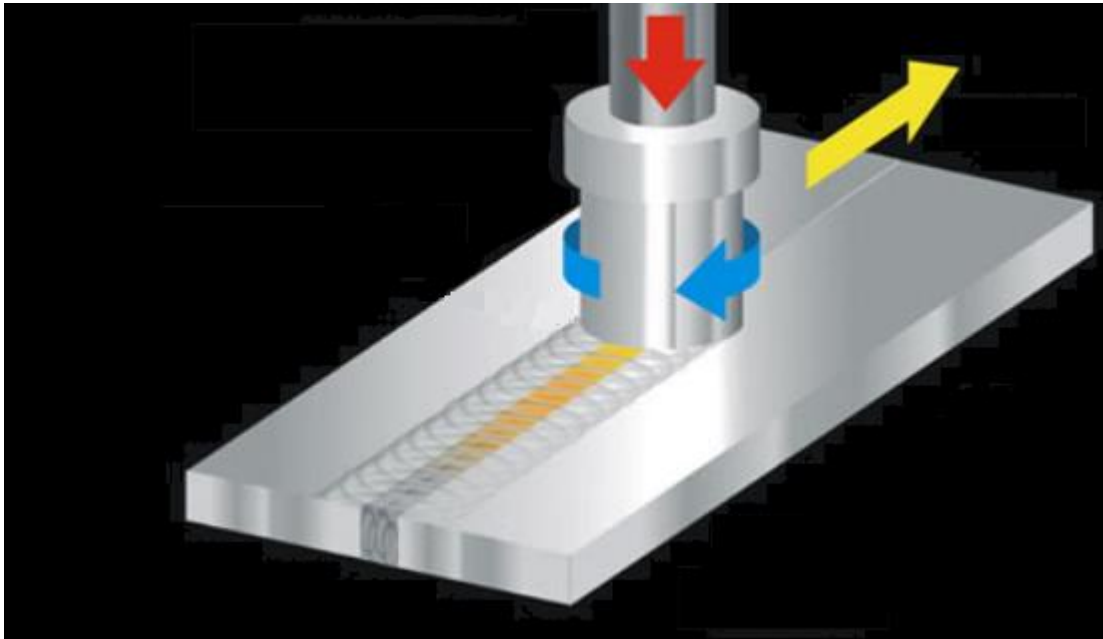


Obrázek 7.: Znárodnění průběhu při CMT svařování [17]



### 2.7.3. Třecí svařování promíšením (Friction Stir Welding)

Technologie svařování třením vytváří svar mezi dvěma, nebo více, díly zahřátím a plastickým tokem materiálu. Teplo zde vytváří tření rychle rotujícího nástroje po povrchu dílů. Teplota, která zde vzniká nepřesahuje bod tavení materiálu. Přesto je vzniklé teplo dostatečné pro změknutí materiálu. Nástroj se tak dokáže pohybovat podél svarové linie. Nástroj je ve tvaru kolíku. Při pohybu nástroje svarovou linií se změkklý materiál pohybuje od čela směru pohybu kolíku podél obvodu dozadu a je prokovan těsným kontaktem ramene nástroje. Materiál za nástrojem je mimo působení tření a tlaku, čímž dochází k ochlazení materiálu z plastického stavu do tuhého. V plastickém stavu dochází k spojení materiálu a tak je vytvořen pevný svarový spoj. [18]



Obrázek 8.: Třecí svařování promíšením [18]

Touto metodou lze efektivně svařovat hliník a jeho slitiny, dále slitiny hořčíku, mědi a zinku. [18]

### 2.7.4. Odporové svařování

Podstatou elektrického odporového svařování je průchod elektrického proudu svařovaným materiálem, kde vlivem odporu materiálu narůstá teplota a dochází k tavení svařovaného materiálu na rozhraní dotykových svařových ploch. [12]

Vznikající teplo v místě svaru je vyjádřeno vztahem:

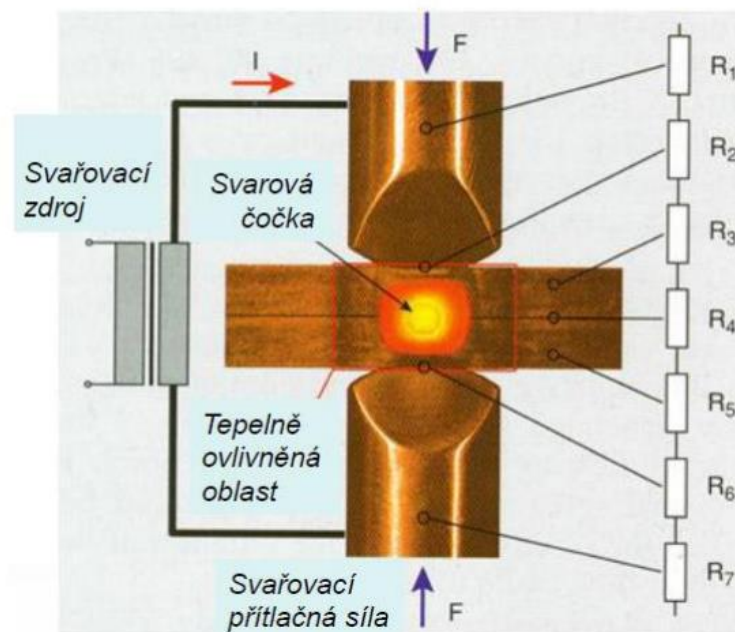
$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \text{ [J]} \tag{1} \text{ [19]}$$

Kde  $R$  ... celkový činný odpor mezi elektrodami [ $\Omega$ ]

$I$  ... proud protékající elektrodami [A]

$t$  ... čas svařování [s]

Proud, který prochází svařovanými materiály překonává dílčí odpory.  $R_1$  a  $R_7$  jsou odpory elektrod,  $R_2$  a  $R_6$  jsou kontaktní odpory mezi svařovanými díly a elektrodami,  $R_3$  a  $R_5$  – jsou kontaktní odpory styku mezi díly a  $R_4$  – přechodový odpor. Součtem těchto odporů je celkový činný odpor. [19]



Obrázek 9.: Odporový odporový svařování [19]

$$\Sigma = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \quad [\Omega] \quad (2) \quad [19]$$

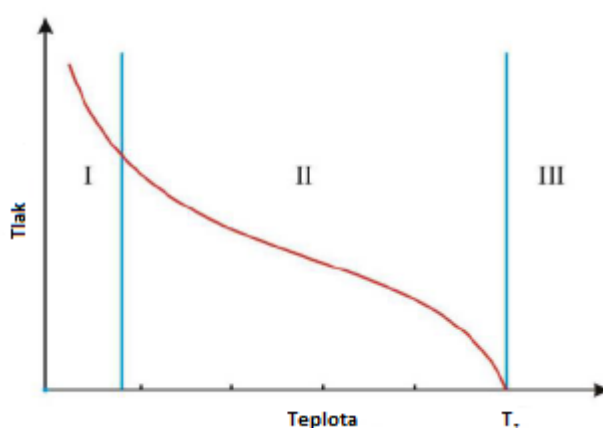
Kde:  $R_1, R_7$  – odpory elektrod

$R_2, R_6$  – kontaktní odpory mezi elektrodami a svařovanými díly

$R_3, R_5$  – Vnitřní odpory svařovaných dílů

$R_4$  – přechodový odpor

Velikost odporu  $R$ , je dán svařovaným materiálem a odporem elektrod pouze před svařováním. V průběhu svařování se odpor mění s teplotou, což výrazně ovlivňuje průběh svařování. Pravidlem u odporového svařování je dodržování tepelné rovnováhy. Pokud se svařují dva tloušťkou, či odporem rozdílné materiály, na tenčí materiál (nebo s nižším ohmickým odporem) je volena elektrodová čepička s menším průměrem. Na tlustší materiál (nebo s vyšším ohmickým odporem) je volena elektroda s větším průměrem. Dalším pravidlem je vzdálenost svarů od sebe či okrajů svářeného dílu. U odporového bodového svařování se využívá kombinací tlaku a vytvářeného tepla, viz. Obrázek 10. V první oblasti je znázorněné využití velkého tlaku, a nízké teploty, v druhé je znázorněna kombinace využití tlaku a tepla, ve třetí je znázorněn ohřev nad teplotu tavení svařovaného materiálu. Svařování hliníku a jeho slitin je náročné z hlediska životnosti elektrod. Elektrodové čepičky jsou velmi zatěžovány ulpíváním hliníkových slitin na jejich povrchu. [12] [20] [21]

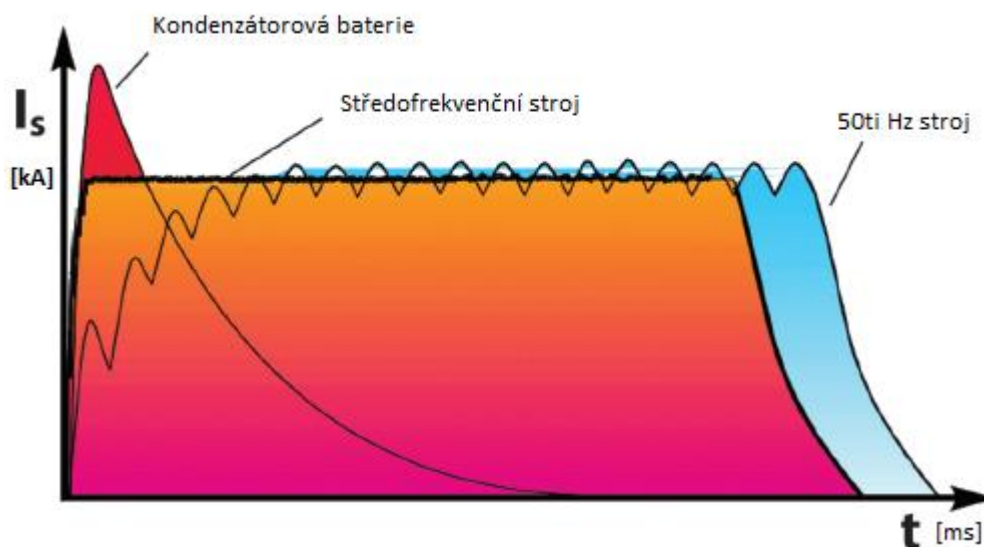


Obrázek 10.: Závislost tlaku na teplotě při odporovém svařování [12]

U svařování hliníku je podstatné svařovat co největším svářecím proudem v co nejkratším svařovacím čase – tvrdý režim. [12]

### 2.7.5. Kondenzátorové odporové svařování

Kondenzátorové odporové svařování je technologie, která umožňuje vnášet nahromaděnou energii z kondenzátorových bank skrz transformátor do místa svaru ve velice krátké době. Prochází velkým rozmachem především v automobilovém průmyslu, vzhledem k možnostem spojování dříve obtížně svařitelných materiálů, jako jsou hliníkové slitiny. Proto je možné vyrábět automobily lehčí a zároveň pevnější a tužší. Využívá se ke spojení svorníků, tenkostěnných dílů, čepů, nebo navařování šroubů či matic na výlisky z plechů. Proces svařování je identický s klasickým bodovým odporovým svařováním a využívá kombinace tlaku a tepla. Elektrody umístěné proti sobě stlačí svařované díly k sobě, aby byly v místě svaru v kontaktu. Po sepnutí protéká proud a na rozhraní svařovaných dílů vzniká přechodový odpor. Vlivem přechodového odporu se uvolňuje teplo a to následně vytváří svarovou čochku. Po uplynutí svařovacího času elektrody stále udržují přítlačnou sílu, zatímco v svarové čochce probíhá chladnutí a vytváření pevného svaru. Hlavní výhodou je zkrácení svařovacího času, čímž se zároveň sníží spotřeba elektrické energie. Přítlačná síla elektrod je nutná. Kdyby byla nedostatečná, nemusely by svařované části k sobě přilehnout a svar by nebyl celistvý, nebo by nevznikl vůbec. Pokud by ovšem přítlačná síla elektrod byla až příliš velká, mohla by způsobit geometrické a mechanické deformace spojovaných částí. [12] [21] [22]

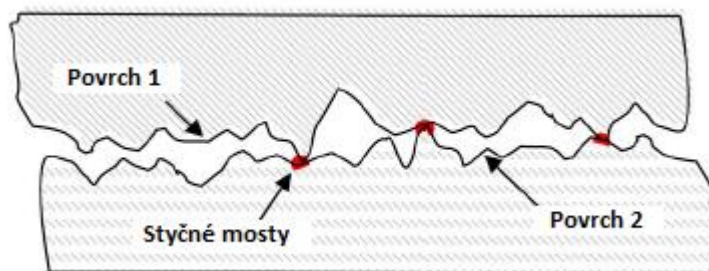


Obrázek 11.: Porovnání závislosti svařovacího proudu na čase svařování kondenzátorového stroje, středofrekvenčního a 50ti Hz stroje [23]

Kondenzátorové svařování se využívá ve dvou aplikacích – pro přivařování svorníků a odporové svařování.

1) Přivařování svorníků – zde se svařovací proces dělí na 3 části. První fází je tavení zápalného hrotu, po jehož roztavení se zapálí svařovací oblouku, který nataví protilehlou plochu (následné místo svarové čočky). Oblouk hoří po dobu kratší, než je 1 ms. Následuje třetí fáze, kdy se vyvine přitlačná síla elektrod, která spojí svařované části a vznikne svarová čočka. [12]

2) Odporové svařování – Vhodné pro materiály s vysokou teplotní a elektrickou vodivostí, například pro měď nebo hliníkové slitiny. Během svařování je použit velmi vysoký svařovací proud, který se především na rozhraní dvou plechů vlivem odporu mění na teplo. Při bližším pohledu na rozhraní dvou plechů jsou nejprve natavovány mosty mezi materiály, kde se teplo začne vyvíjet nejdříve kvůli vysoké proudové hustotě. Po jejich roztavení je vznik svaru dán objemovým odporem materiálu. [12]



Obrázek 12.: Detail povrchu svařovaných plechů [12]

Kondenzátorové odporové svařování vůči klasickému odporovému svařování má velice krátký svařovací čas, jehož svařovací proud je vyjádřen v koncentrovaném výboji. Svařovací časy se u této metody pohybují od 1,2 – 20 ms (porovnání viz. Obrázek 11), přičemž jeho opakovatelnost (znovu nabití kondenzátorových bank) je během 1 – 3 sekund po předchozím svařování. Vzhledem k těmto skutečnostem jsou teplotně ovlivněné oblasti výrazně menší, oproti klasickým středofrekvenčním a 50 Hz strojům, které jsou standartně používány v průmyslu. Díky tomu jsou do svarových míst vnášeny výrazně menší vnitřní pnutí a deformace. Dále kombinace vysokých svařovacích proudů a krátkých svařovacích časů eliminují hromadění dilatačních napětí na hranici teplotně ovlivněné oblasti a základního materiálu, a potlačují vznik vrubů. Tím se omezuje možnost vzniku mikrotrhlin při cyklickém zatěžování svařovaného materiálu.

Tato metoda zkrácením času procházejícím elektrodovými čepičkami zvyšuje jejich životnost, protože nedochází k tak výraznému teplotnímu zatížení. Není tedy podmíněné jejich chlazení. [12] [21] [24]

Nevýhodou je absence možnosti nastavení časového vybíjení kondenzátorových bank – svařovacího času. Kondenzátorové banky se během svařování absolutně vybíjí. Určujícím parametrem je zde svařovací proud. Další nevýhodou jsou pořizovací náklady svařovacího zařízení. [12]

## 2.8. Zkoušky odporových spojů

Zkoušení odporových svarů je nutné během optimalizace svařovacího procesu, ale i v provozu je nezbytné kontrolovat, zda jsou svary kvalitní. Pro záběhové i průběžné testování odporových svarů se používají destruktivní a nedestruktivní zkoušky.

### 2.8.1. Destruktivní zkoušky odporových spojů

U destruktivních zkoušek dochází k poškození, nebo znehodnocení zkoušeného svařence.

- Sekáčová zkouška – upnutí svařence a rozevření pomocí sekáče. Není účelem svar přeseknout, nýbrž odhalit křehké nebo difuzní spoje.
- Mechanizovaná stříhová zkouška – zaznamenaná stříhovou silou v průběhu zkoušky na trhacím stroji.
- Metalografická zkouška – Slouží především pro následnou světelnou mikroskopii, kde se vyhodnocuje výška a šířka svarové čočky, tepelně ovlivněné oblasti a velikosti vtisku. Dále je zde možná detekce trhlin, pórů, vměstků. Využití výbrusů i pro elektronovou skenovací mikroskopii.
- Zkouška tvrdosti – Na příčném řezu skrz svarovou čočku jsou provedeny vtláčky a sleduje se vývin tvrdostí ve svarové čočce, teplotně ovlivněné oblasti a základním materiálu.
- Odlupovací zkouška – Plechy jsou od sebe pomalu odlupovány, dokud nedojde k odlomení všech svarů. Realizuje se ručně, nebo pomocí mechanizovaného zařízení. Slouží k měření průměru svarové čočky. [25]

## 2.8.2. Nedestruktivní zkoušky odporových spojů

Nedestruktivní zkoušky jsou metody kontroly, při kterých nedochází k poškození zkoušeného vzorku. Kontrolují se u nich buď povrchové, nebo vnitřní vady.

- Vizuální kontrola – Povrchová, rychlá kontrola spoje na základě povrchových znaků. Kontroluje se dodržení počtů, umístění a tvar svarů. Možnost detekce vad, pomocí barvy svaru, velikosti vtisku a speciálních měrek
- Kapilární metoda – Povrchová, levná metoda využívající vzlínavost a smáčivost kapalin. Na svar je nanesen penetrant, jehož přebytek je odstraněn a je nanesena kontrastní vývojka, která vytvoří barevnou indikaci vad. Tyto indikace se vyhodnocuje vizuálně.
- Metoda magnetická prášková – Svařenec je zmagnetizován a v místě vady se vytvoří rozptylový tok. Tento rozptylový tok je indikován magnetickým práškem nebo sondami (povrchová metoda).
- Radiografická zkouška – Pro detekci vnitřních vad. Rentgenové záření prošlé zkoušeným materiálem dopadá na digitální detektor. Dutina, nebo trhlinka pohltí méně záření v porovnání s plným materiálem. Jeví se tedy jako tmavá skvrna.
- Ultrazvuková zkouška – Sonda je přikládána na kontrolovaný svařenec a vytváří ultrazvukový impuls, který se šíří materiálem. Pokud narazí impuls na hranu materiálu, nebo na hranu materiálu, tak se odrazí a je zachycován. Zachycené impulsy se porovnávají s echem, které vytváří hrana materiálu a echem, které vytváří vnitřní póry, nebo trhliny.
- Elektronová mikroskopie – na výbrusech se pomocí elektronové mikroskopie vyhodnocuje struktura, nebo se pomocí spektrální analýzy určuje chemické složení ve svarové čočce a teplotně ovlivněné oblasti. [26]

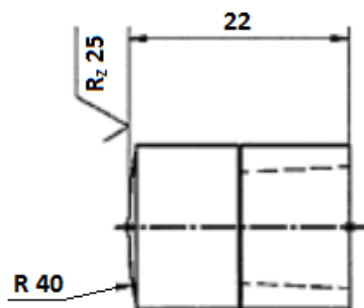
## 3. Experimentální část

Cílem experimentální části této diplomové práce bylo zjistit, zda je možné svařit hliníkovou slitinu Al091 kondenzátorovým odporovým svařováním, a zda tento způsob přináší výhody v podobě zkrácení svařovacího času, zmenšení teplotně ovlivněné oblasti, menší náchylnosti na vznik trhlin a podobně. Pro experiment byl využit kondenzátorový stroj firmy Dalex – PrimKo 04, který pro svařování využívá dvou kondenzátorových bank.

### 3.1. Návrh experimentu

Pro experiment byla využita hliníková slitina AL091, jež je ekvivalentem řady 6xxx hliníkových slitin o tloušťkách 1,5 a 1,7 mm. Tyto plechy byly k dispozici o rozměrech 500 x 250 mm. Plechy byly rozstříhány pákovými nůžkami na zkušební vzorky o rozměrech 50 x 50 mm v počtu 40 kusů od každé tloušťky. Tyto zkušební vzorky byly zvoleny vzhledem k úspoře materiálu, během ladění svařovacích parametrů. Experimentální vzorky byly o velikosti 120 x 45 mm. Těchto experimentálních vzorků bylo vyrobeno 20 kusů od každé tloušťky. Vzhledem k rozměrům dodaných plechů bylo využití materiálu u zkušebních vzorků 100 % a u experimentálních 90 %. Elektrodové čepičky FA byly zvoleny o průměru 16 mm. Jsou tvořeny slitinou mědi (99,12%), chromu (0,8) a zirkonu (0,08) – CuCr1Zr. Po dosažení optimální svarové čočky na zkušebních vzorcích byly vytvořeny svařence z experimentálních vzorků (jeden plech o tloušťce 1,5 mm a druhý 1,7 mm), které byly přeplátovány v jedné třetině své délky. Uprostřed tohoto přeplátování byl vytvořen svar. Tyto vzorky byly využity pro mechanizovanou stříhovou zkoušku pro zjištění maximální síly potřebné na přestřížení spoje. Na přestřížených vzorcích byla zkoumána svarová čočka a porovnána s podmínkou průměru svarové čočky. Dále byl vytvořen svařenec s celkově přeplátovanými plechy (opět od každé tloušťky jeden) a pěti svary. Tento svařenec byl podroben zkoušce ultrazvukem pro detekci vnitřních vad. Následně bylo na tomto svařenci provedena metalografická zkouška. Výbrusy byly provedeny v ose svaru a dále byly hodnoceny světelnou a skenovací elektronovou mikroskopií. V experimentální části byla provedena analýza stavu elektrodových čepiček a jejich opotřebení. Nakonec byla na výbrusech provedena zkouška mikrotvrdosti.





Obrázek 13.: Elektrodová čepička FA16 využitá pro experiment [27]

### 3.2. Základní materiál a jeho vlastnosti

Pro svařovaný spoj byly použity dvě tloušťky plechů, které byly vyrobeny technologií odlévání pásů. Hliníková slitina AL091 je slitinou s hlavním legujícím podílem prvků hořčíku a křemíku (AlMgSi).

Tabulka 2.: Chemické složení slitiny AL091 v % zastoupení [27]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V	Al
AL091 [%]	0,5÷1,5	≤ 0,5	≤ 0,25	≤ 0,4	0,25÷1	≤ 0,15	≤ 0,3	≤ 0,25	≤ 0,10	Zb.

Tabulka 3.: Mechanické vlastnosti slitiny AL091 [27]

	Tloušťka plechu	Smluvní mez kluzu	Poměr $R_{p0,2}/R_m$	Mez pevnosti	tažnost
	t	$R_{p0,2}$	$R_{p0,2}/R_m$	$R_m$	A
Jednotky	mm	MPa	MPa	MPa	%
AL091	0,80 – 2,00	≤ 140	0,60	224	≥ 23
	2,01 – 3,50	≤ 160	0,65	231	≥ 22

### 3.3. Svařovací stroj

Svařovací stroj firmy Kapkon má 2 kondenzátorové banky. Pokud se tyto kondenzátorové banky spustí společně, tak je jejich maximální kapacita energie 8200  $\mu\text{F}$ . Odděleně působí výkonnější kondenzátor energií 6560  $\mu\text{F}$ , zatímco druhý, slabší, má maximální kapacitu 1640  $\mu\text{F}$ . Svařovací stroj generuje svařovací proud o hodnotě 128 kA. Maximální přitlačná síla elektrod je 8 kN. Ta je vyvíjena pomocí servomotoru, který je schopen libovolného nastavení vzdálenosti mezi elektrodami.



Obrázek 14.: Dalex – PrimKo 04, kondenzátorový svařovací stroj [28]

### 3.4. Optimalizace svařovacího procesu

V optimalizaci svařovacího procesu byly základní svařovací hodnoty voleny dle zkušeností z podobných experimentů Ústavu strojírenské technologie s firmou Kapkon. Prvotní hodnoty nabíjecího napětí byly tedy zvoleny 700 V pro výkonnější kondenzátor, ovšem přitlačná síla elektrod byla zvolena o menší hodnotě – 5 kN. Nabíjecí hodnoty kondenzátorů byly po každém pokusu zvýšeny o 100 V a zároveň postupně navýšena přitlačná síla elektrod až na 7 kN, dokud nebylo dosaženo deformace plechů při snaze odtrhnout je.

Do té doby se jednalo o difúzní, nebo studené svary. Poté byl zapojen do svařovacího procesu druhý kondenzátor, který byl opět nastaven na nabíjecí napětí 700 V. Opoždění spuštění druhého kondenzátoru bylo nastaveno na 10 ms.

Následný proces optimalizace je zaznamenán v tabulce (Tabulka 4)

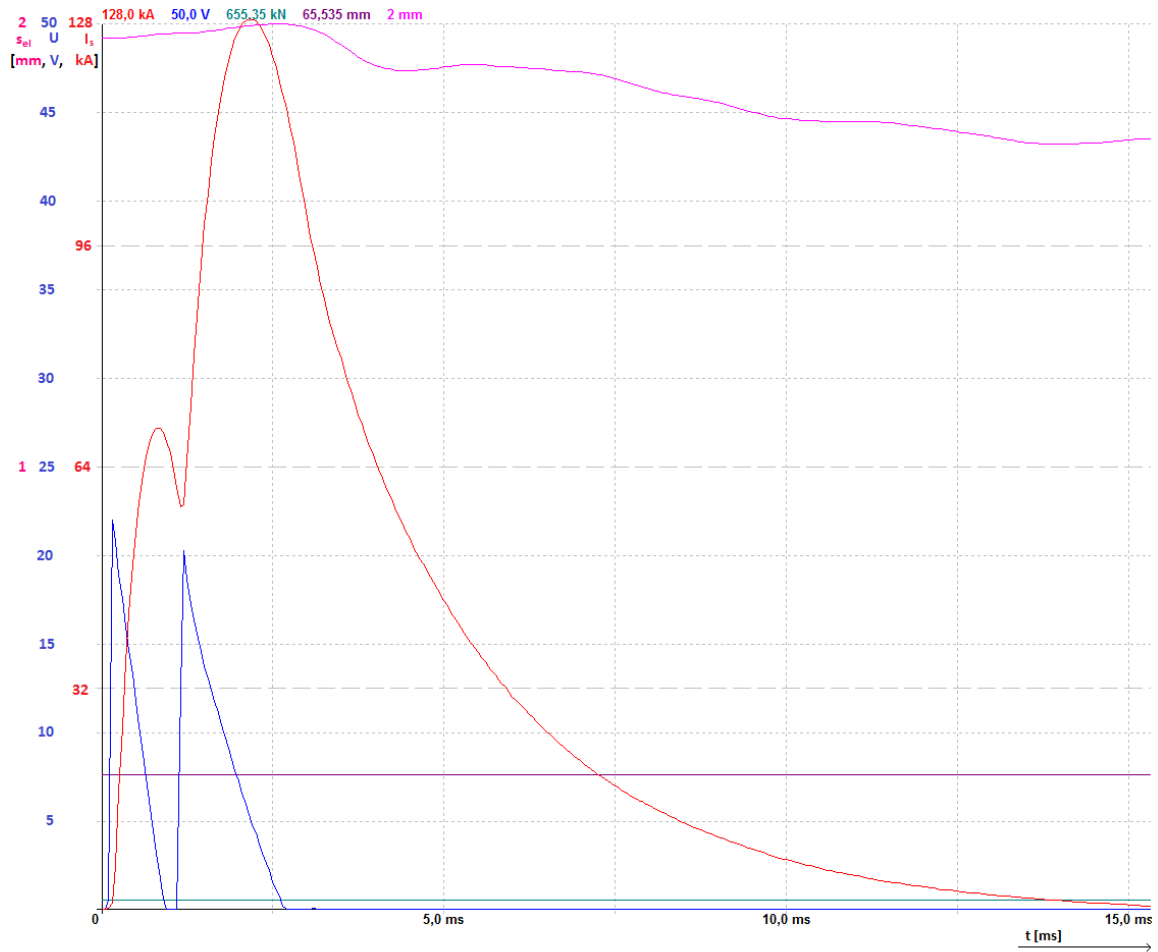
Tabulka 4.: Svařovací parametry kondenzátorového odporového svařování slitiny AL091

číslo svaru	číslo svaru v SW	přítlačná síla [kN]	K 1	[V]	t [ms]	K 2	[V]	Poznámka
1	322	5	A	700	-	-	-	Lehce difúzně slepeno
2	323	6	A	800	-	-	-	Už to dá práci na odtržení, ale nelze rukou
3	324	7	A	900	-	-	-	Mikrosoje
4	325	7	A	1000	-	-	-	Při odtržení rukou se ohnul plech
5	326	7	A	1100	-	-	-	Při odtržení rukou se ohnul plech
6	327	7	B	700	10	A	1100	Mikrosoje
7	328	7	B	800	10	A	1000	Menší mikrosoje
8	329	7	A	1100	10	B	800	Opět větší mikrosoje
9	330	7	A	1100	10	B	900	Stejně
10	331	7	A	1100	7,5	B	900	Stejně
11	332	7	A	1100	6	B	900	Větší mikrosoje (foto)
12	333	7	A	1200	6	B	900	Téměř žádná pevnost
13	334	7	A	1200	6	B	900	Odmaštěno, téměř žádná pevnost
14	335	7	A	1100	6	B	900	Žádná změna
15	336	7	A	1200	6	B	900	Nový plech, žádná změna
16	336	7	A	1200	5	B	900	Jemné zlepšení pevnosti sv. spoje
17	337	7	A	1200	5	B	1000	Větší mikrosoje než svar 11
18	338	7	A	1200	5	B	1100	Žádná změna
19	339	7	A	1200	4	B	1100	Skoro nesvařeno
20	340	7	A	1200	4	B	1200	Skoro nesvařeno
21	341	7	B	1200	6	A	1200	Větší mikrosoje než svar 11
22	432	7	B	1200	5	A	1200	Stejně
23	343	7	B	1200	4	A	1200	Stejně
24	344	7	B	1300	4	A	1200	Náznak tavení (foto)

25	345	7	B	1300	3	A	1200	Stejně, žádná svarová čočka
26	346	7	B	1300	2	A	1200	Porušeno v dělicí rovině, ale taveno po celé ploše
27	347	7	B	1300	1	A	1200	Náznak svarové čočky, roztržení dalo práci
28	348	7	B	1300	1	A	1300	Čočka
29	349	7,5	B	1300	1	A	1300	Čočka, přivařená čepička
Očištění elektrod								
30	350	7,5	B	1300	1	A	1300	Stejně
31	350	7,5	B	1300	1	A	1300	Stejně
Nové elektrodové čepičky								
32	352	7,5	B	1300	1	A	1300	Ideální svarová čočka, vytrženo v TOO (foto)
33	353	7,5	B	1300	1	A	1300	Odmaštěný vzorek, ideální svarová čočka
34 - 44	Svařeno 11 vzorků stejnými parametry pro mechanizovanou stříhovou zkoušku, vzorky odmaštěny, po každém svaru elektroda očištěna							
45 - 49	Svařeno dalších 5 totožných na metalografické výbrusy							
50	Další vzorek na mechanizovanou stříhovou zkoušku							

Po 29. svaru byl vyměněn pár elektrodových čepiček. Jejich povrch byl již značně znečištěn ulpělou hliníkovou slitinou na jejich povrchu. Následkem bylo zlepšení pevnosti svarů.

Poté již (od 34. svaru) byly využity experimentální vzorky pro následující zkoušky. Očišťování elektrodových čepiček bylo prováděno pomocí jemného brousku na elektrody.



Obrázek 15.: Křivka průběhu optimálních parametrů svaru č. 32

Na obrázku (Obrázek 15) je červenou barvou vyznačena křivka, vyznačující průběh svařovacího proudu, který v prvním peaku dosahuje hodnoty 69,6 kA a druhý hodnoty 128 kA. Modrá křivka označuje napětí, kde první peak dosahuje hodnoty 21,95 V a v druhém 20,4 V. Zelená vodorovná čára vyznačuje přitlačnou sílu elektrod. Růžová křivka zaznamenává průběh pohybu elektrod v průběhu svaru -  $s_{el}$ . Tyto parametry byly měněny viz. Tabulka 4. Po dosažení optimálního svaru bylo svařeno dalších 17 vzorků pro mechanické zkoušky a metalografii.



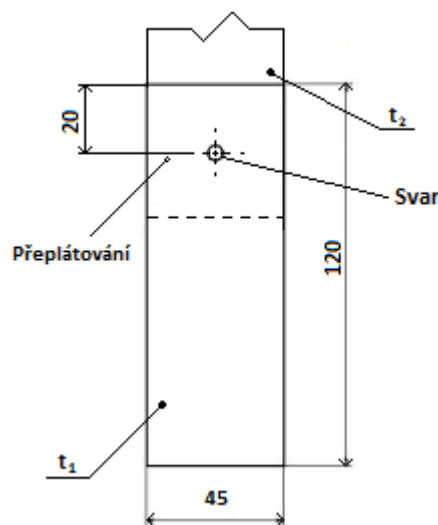
Obrázek 16.: Svar č. 24 s náznakem tavení svarové čočky



Obrázek 17.: Svar č. 32 s vytrženou svarovou čočkou

### 3.5. Mechanizovaná stříhová zkouška

12 zkušebních vzorků bylo zatěžováno rychlostí 10 mm/min. Rozměry vzorků byly 120 x 45 mm o tloušťkách  $t_1 = 1,5$  mm a  $t_2 = 1,7$  mm. Poté byly vzájemně přeplátovány 1/3 své délky a ve středu tohoto přeplátování byl vytvořen svar. Naměřená maximální síla potřebná pro porušení vzorku byla přepočítána na smykové napětí a porovnána se smluvní mezí kluzu materiálu.



Obrázek 18.: Schématické zobrazení přeplátování vzorků

$$\tau = \frac{4 \cdot F}{i \cdot \pi \cdot d^2} \text{ [MPa]} \quad (3) \text{ [25]}$$

Kde  $\tau$  ... smykové napětí [MPa]

F ... síla potřebná pro porušení [N]

i ... počet svarů na zatěžovaném vzorku

d ... průměr svarové čocky [mm]

Bodové spoje by měly splňovat podmínku průměru čocky dle:

$$d_p \geq 3,5 \cdot \sqrt{t_1 \cdot t_2} \text{ [MPa]} \quad (4) \text{ [25]}$$

Kde  $d_p$  ... podmínka průměru čocky [mm]

$t_1$  ... tloušťka materiálu 1

$t_2$  ... tloušťka materiálu 2

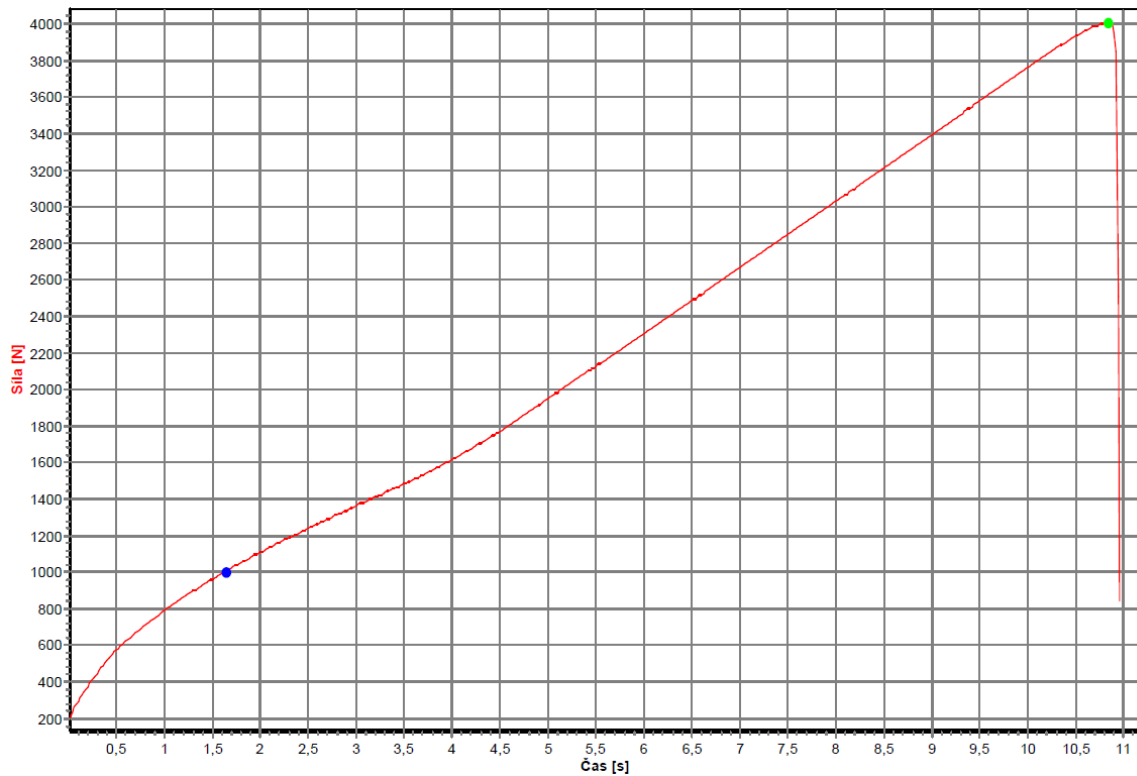
Tato hodnota je tedy 6,26 mm. Naprostá většina vzorků tuto podmínku splňuje až na dvě výjimky viz. Tabulka 5.

Tabulka 5.: Výsledky mechanizované stříhové zkoušky

Číslo svaru (Číslo sv. v HW)	1 (34)	2 (35)	3 (36)	4 (37)	5 (38)	6 (39)	7 (40)	8 (41)	9 (42)	10 (43)	11 (44)	12 (51)
Síla [N]	3724	3545	3258	3694	3902	3831	3293	3051	3836	3654	4006	3949
Smykové napětí [MPa]	156,8	149,3	137,2	155,6	164,3	161,3	138,7	128,5	161,5	153,9	168,7	166,3
Průměr sv. čocky [mm]	6,54	6,28	6,23	6,465	6,40	6,66	6,20	6,31	6,30	6,35	6,49	6,59
Splnění podmínky průměru čocky	ANO	ANO	NE	ANO	ANO	ANO	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Průměry svarových čockek byly měřeny pomocí světelného mikroskopu. Podmínku průměru svarové čocky nesplňuje svar č. 36 a 40 o maximálně 0,06 mm. Taková odchylka by mohla být způsobena i nepřesností měření. Velmi nízké smykové napětí vykazuje svar č. 41, ovšem průměr svarové čocky je dostatečně velký pro splnění podmínky průměru čocky. Tato výchylka mohla být zapříčiněna studeným spojem, nebo póry uvnitř svarové čocky.





Graf 1.: Mechanizovaná stříhová zkouška svaru č. 44

### 3.6. Zkouška ultrazvukem

Na zkoušku ultrazvukem bylo určeno 5 svarů. Cílem bylo detekovat možné vnitřní vady. U svaru 45, 46, 48 zkouška ultrazvukem nezaznamenala žádné vady. U vzorku č. 47 se výsledek jevil s póry ve svarové čočce, nebo jako studený spoj. Vzorek č. 49 měl odezvu během zkoušky vyšší, tudíž byl vyhodnocen jako svar s póry.

Tabulka 6.: Výsledky ultrazvukové zkoušky

Svary	45	46	47	48	49
Výsledky UT	OK	OK	OK (možné póry)	OK	Póry

### 3.7. Metalografický postup

Po zkoušce ultrazvukem bylo všech pět výše uvedených svarů nařezáno na pile Struers Labotom-3 mírně za středem čocky svaru. Řezný kotouč s použitím na hliník s označením Struers 20A25. Následně byly vzorky zalisovány za tepla na zařízení Struers CitoPress-1 (teplota lisování – 80 °C, tlak - 250 Bar). Použila se lisovací fenolová pryskyřice Struers MultiFast. Vzorky byly dále broušené a leštěné na zařízení Buehler Beta s automatickou hlavou Buehler Vector Power Head. Brusné kotouče byly značky SiC papíry se zrnitostí P P500, P1200 a P2000. Otáčky byly pro všechny kotouče totožné – 300 otáček za minutu, přítlak 30 N, souběžné otáčky. Čas pro P500 byl 2 minuty, P1200 – 3 minuty, P2000 – 3 minuty. Během procesu broušení byly vzorky chlazeny vodou.

Bylo leštěno na leštících plátnech Buehler UltraPad s diamantovou suspenzí Buehler MetaDi 9  $\mu\text{m}$  (nastavení stroje: 150 otáček za minutu, 30 N, souběžné otáčení, čas – 6 minut), Buehler Trident s diamantovou suspenzí Buehler MetaDi 3  $\mu\text{m}$  (150 otáček za minutu, 30 N, souběžné otáčení, po dobu 4 minut). Na zvlhčování kotoučů se použilo zvlhčovač Buehler MetaDi Fluid a finální leštění se realizovalo na plátně Buehler ChemoMet se suspenzí Buehler MaterMet s částicemi  $\text{SiO}_2$  o průměru 0,05  $\mu\text{m}$  (150 otáček za minutu, 30 N, protiběžné otáčení, 3 minuty). Leptadlo bylo použito Keller. Složení: destilovaná voda 190 ml, kyselina dusičná  $\text{HNO}_3$  5 ml, kyselina chlorovodíková  $\text{HCl}$  3 ml, kyselina fluorovodíková  $\text{HF}$  2 ml. Leptání probíhalo 30 sekund.

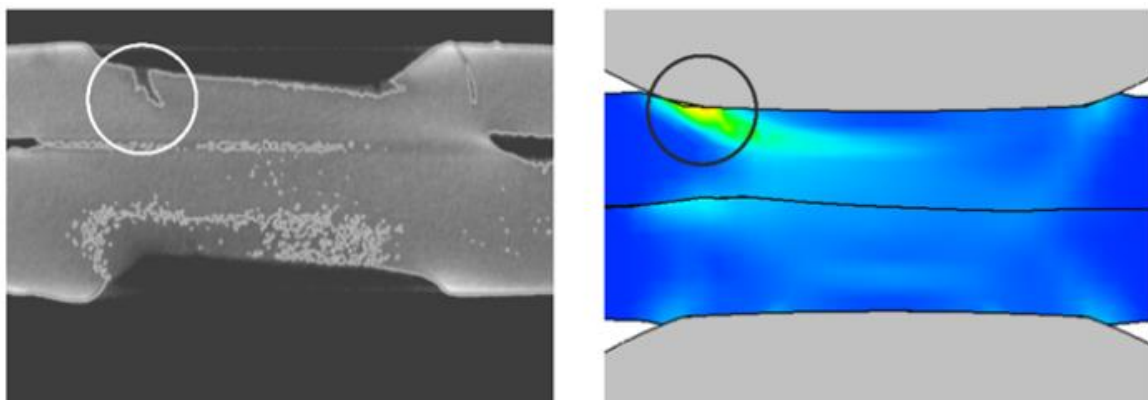
### 3.8. Oblast zkřehnutí vlivem tekutého kovu

Na všech znázorněných svařech ve světelné mikroskopii si lze povšimnout bílých oblastí na okrajích dosedů elektrodových čepiček. Tento jev je v literatuře popsán jako oblast zkřehnutí vlivem tekutého kovu.



Obrázek 19.: Oblast křehkosti tekutého kovu u svařence č. 49

Zkřehnutí vlivem tekutého kovu určuje novou okrajovou podmínku, kterou je nutné dodržet pro provedení kvalitního spoje. U železných kovů, které jsou využívány v automobilovém průmyslu je tento jev známý vzhledem k interakci povrchové vrstvy (zinku) s ocelovým základním materiálem. V těchto případech proniká roztavený zinek přes hranice zrn základního materiálu. Zinek má rozdílnou rychlost tuhnutí oproti svařovanému kovu a poté v těchto místech vznikají vnitřní pnutí nebo koncentrátoři napětí. Vnitřní pnutí může způsobit praskliny v této oblasti (podobně jako koncentrátoři napětí vzhledem k tendenci ostrých zakončení) a teplotně ovlivněné oblasti. [29]



Obrázek 20.: Ukázka snímku ze skenovací elektronové mikroskopie v oblasti zkřehnutí vlivem tekutého kovu (vlevo) a simulace koncentraci napětí v oblasti zkřehnutí vlivem tekutého kovu při zatěžování (vpravo)

(Viz článek v odkazované literatuře) [29]

Prvním parametrem, který ovlivňuje tvorbu trhlin v oblasti zkřehnutí vlivem tekutého kovu je povlak. Pokud je plech pozinkovaný, je šance, že bude svařenec obsahovat trhliny vyšší, než je tomu u nepozinkovaných plechů. Trhliny v případě svařování dvou plechů, které jsou pozinkované mohou nastat na povrchu, po hranách dotyku elektrod se svařovaným materiálem, nebo na pomezí obou svařovaných plechů. Námi svařované hliníkové slitiny nejsou povrchově upraveny zinkem, tudíž v našem případě je oblast zkřehnutí vlivem tekutého kovu vyplněna mědí z elektrodových čepiček. Tato situace je vysoce nežádoucí, vzhledem k nemožné vizuální kontrole. [30]

Dalším aspektem, který ovlivňuje zkřehnutí vlivem tekutého kovu vyplývá z faktu, že se vždy tvoří na okrajích dosedu elektrodových čepiček. Různé typy elektrodových čepiček vykazují rozdílné účinky vzhledem k tomuto jevu. Tvar elektrodových čepiček dokáže ovlivnit velikost trhlin, ale není takto možné je úplně eliminovat. Například čepičky, které jsou v dosedací ploše kulové, iniciují po okrajích dosedu k svařovanému materiálu jiskření a rozstříky, kvůli malé kontaktní ploše, kterou může svařovací proud procházet (vysoká proudová hustota v místě kontaktu). Elektrodové čepičky s mírným zaoblením a rovnou dosedací plochou dokážou potlačit trhliny na povrchu, ovšem přesunují je dovnitř do svaru, k rozhraní svařovaných plechů. [30]



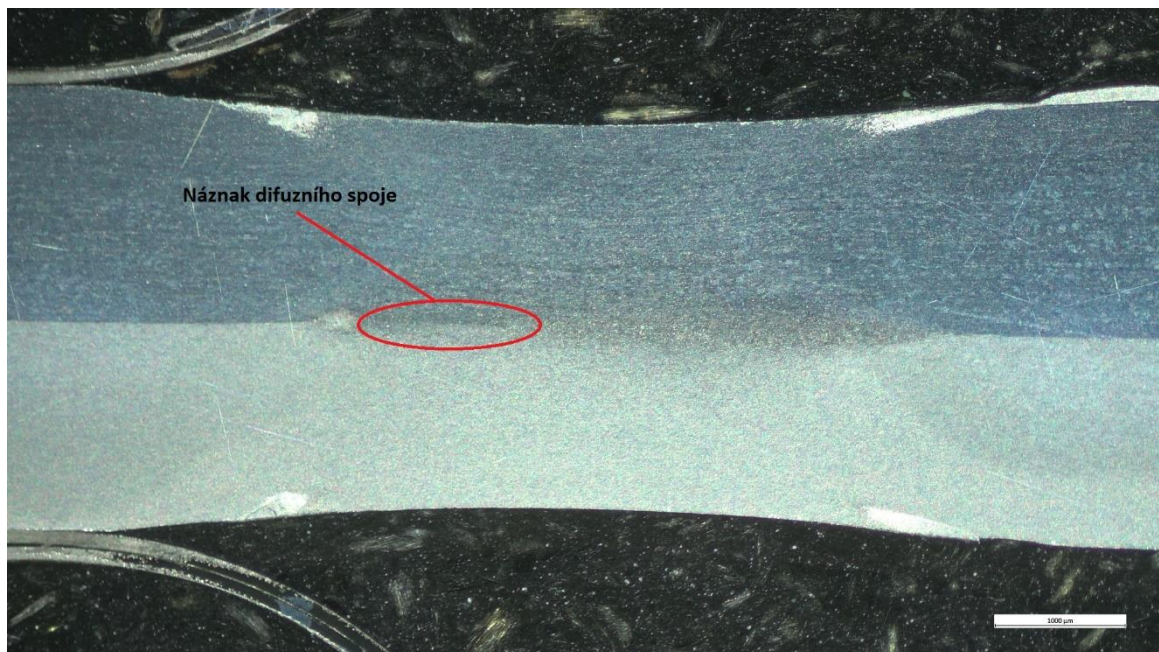
Obrázek 21.: Čepička s kulovou plochou (vlevo) a mírně zaoblenou, v dosedací ploše rovnou (vpravo) [30]

V experimentu byly využity elektrodové čepičky s radiusem R40. Cílem využití tohoto radiusu byla snaha o maximální potlačení zmíněného efektu.

### 3.9. Světelná mikroskopie

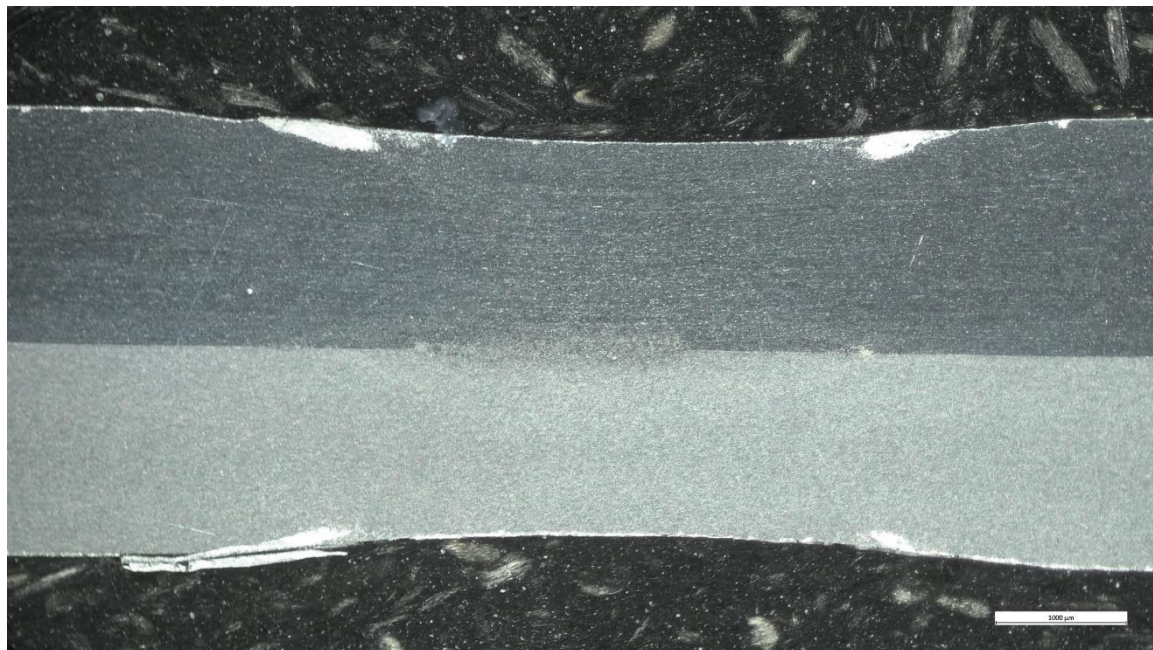
Na optické (světelné) mikroskopii byla zkoumána svarová čochka, kvalita provedení, přítomnost difuzních spojů, poretita, teplotně ovlivněná oblast, a různé praskliny, které standartně během svařování hliníkových slitin nastávají.

#### Svar č. 46



Obrázek 22.: Svar č. 46 - světelná mikroskopie

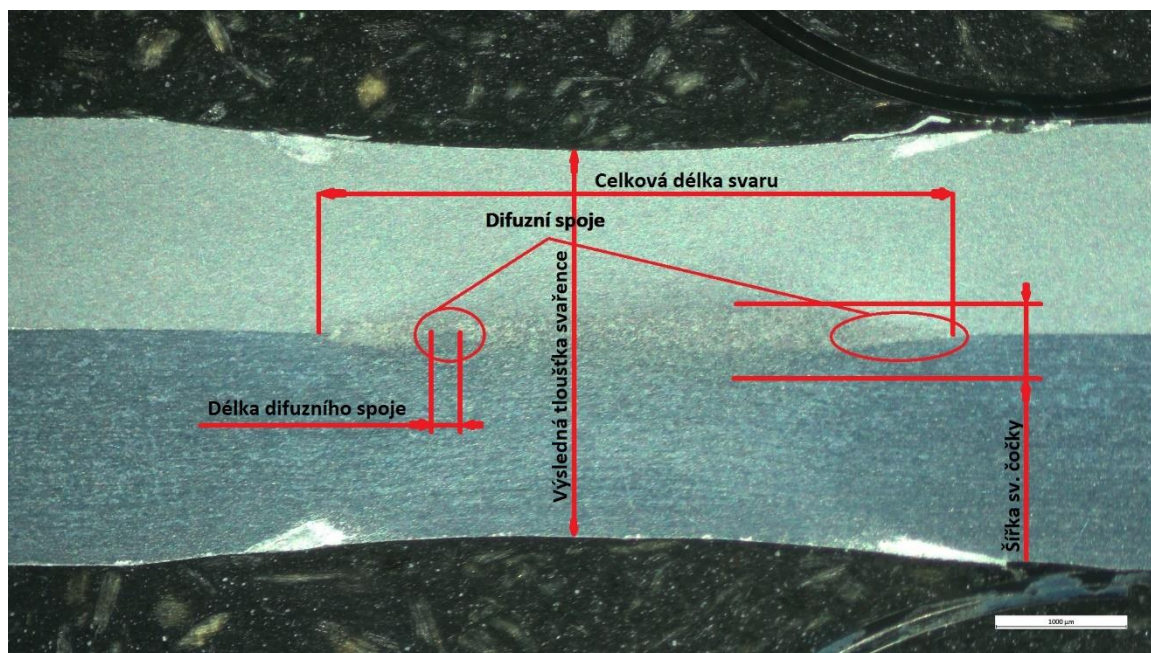
Svar č.46 se dle světelné mikroskopie svařil poměrně úspěšně, ovšem v levé straně při pohledu na snímek (Obrázek 22) se vyskytuje náznak difuzního spoje. Vzhledem k průměru svarové čochky by tento spoj nespĺňoval podmínku průměru svarové čochky. Průměr u tohoto svaru je 5,1 mm. Ovšem zde je nutné podotknout, že není zaručen přesný střed provedeného výbrusu. Ovšem vzhled svarové čochky by mohl naznačovat pevný svar.

**Svar č. 47**

*Obrázek 23.: Svar č. 47 - světelná mikroskopie*

Svar č. 47 má po obou stranách svarové čochky difuzní nebo studený spoj. Dle teplotně ovlivněné oblasti jsou tyto části spojené velmi slabě. Při porovnání se zkouškou ultrazvukem, kde byly u tohoto svaru detekovány možnosti póru, mohou být ozvěnou namísto pórů tyto difuzní spoje. Průměr svarové čochky určitě nespĺňuje podmínku průměru svarové čochky. Opět zde ale není zaručen výbrus přesně ve středu svarové čochky. Tento svar je tedy nevyhovující.

Svar č. 49



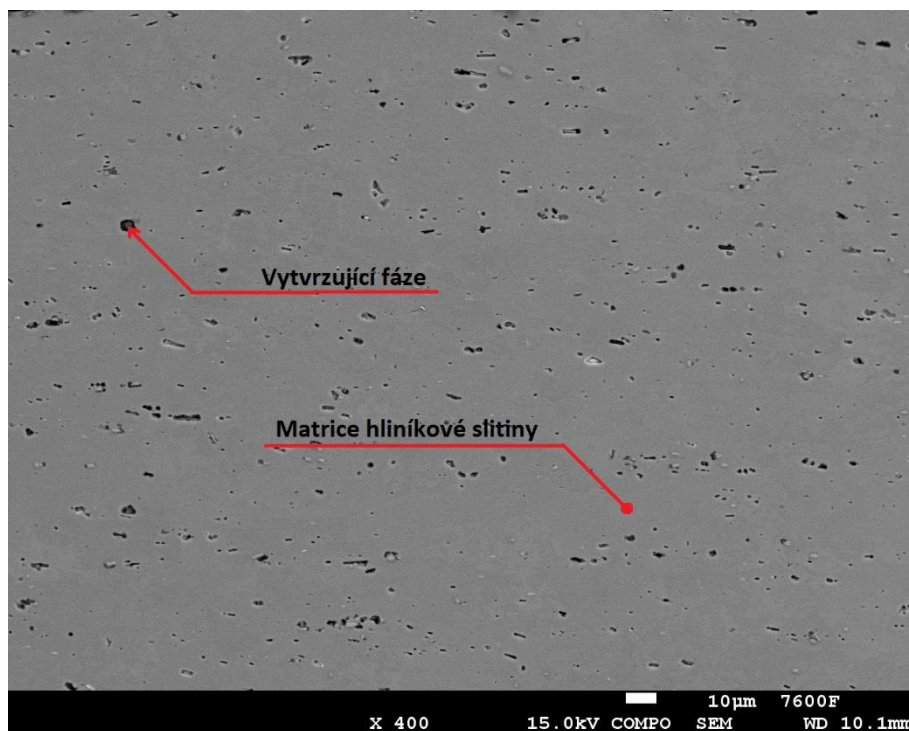
Obrázek 24.: Svar č. 49 - světelná mikroskopie

Svar č. 49 byl označen na ultrazvukové zkoušce jako svar s póry. Po obou stranách svarové čočky se nachází difuzní spoj. U difuzních částí se nachází zřetelná teplotně ovlivněná oblast. Jako u svaru č. 47 se výsledky ultrazvukové zkoušky, svar s póry, mohou jevit tyto difuzní spoje. Podmínka průměru svarové čočky na tomto výbrusu je nesplněná, ovšem svar vypadá, že by mohl být dostatečně pevný.

Tabulka 7.: Výsledné rozměry svarových čoček

	Celková délka svaru	Průměr sv. čočky	Délka difuzního spoje	Podíl difuzního spoje	Šířka sv. čočky	Výsledná tloušťka svařence
Jednotky	mm	mm	mm	%	mm	mm
Svar č. 45	4,29	3,424	0,865	20	0,17	3,28
Svar č. 46	4,89	4,15	0,74	15	0,42	2,92
Svar č. 47	4,11	1,82	2,29	56	0,37	3,06
Svar č. 48	3,63	3,63	-	-	0,37	3,11
Svar č. 49	5,11	4,2	0,91	18	0,59	2,97

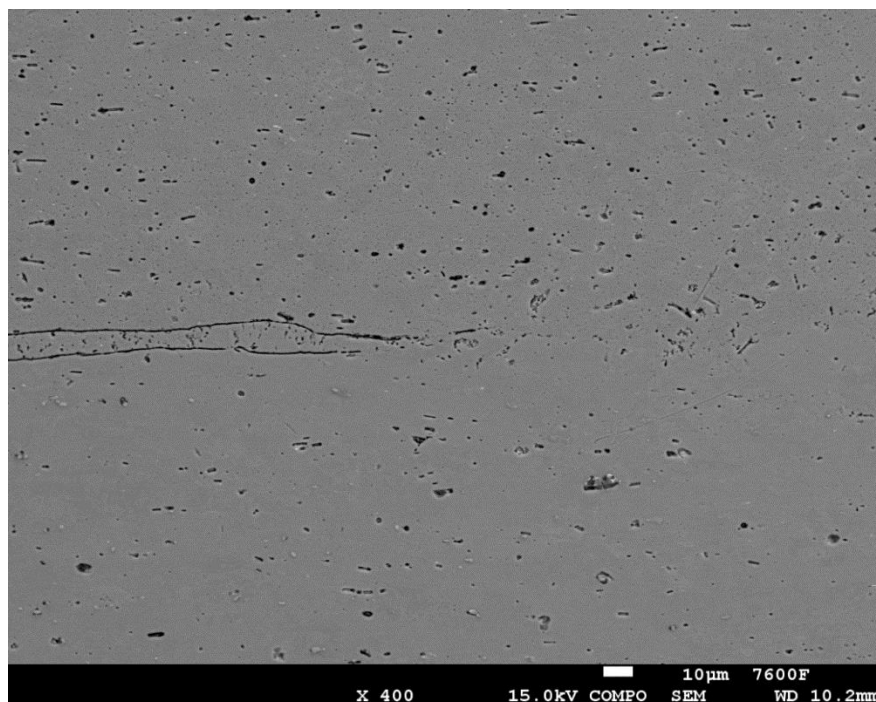
### 3.10. Skenovací elektronový mikroskop



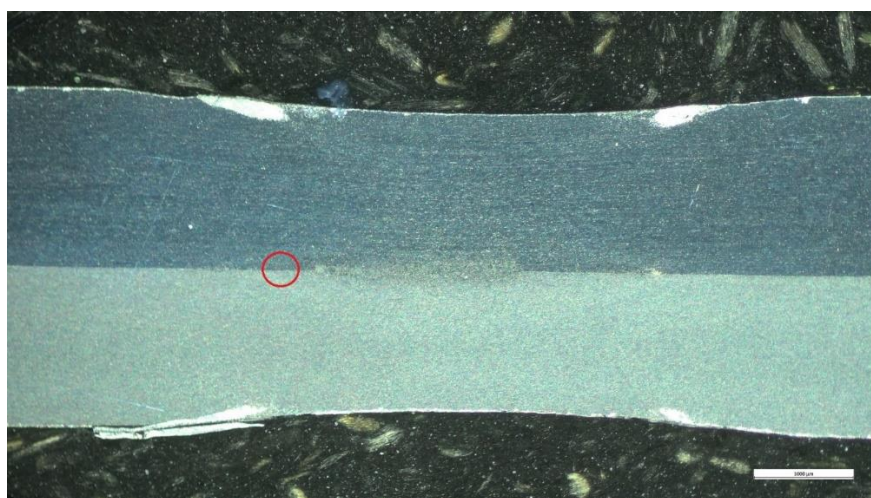
Obrázek 25.: Svar č. 47, SEM, Základní materiál AL091

Na obrázku je zobrazena základní matrice hliníkové slitiny spolu s vytvrzujícími fázemi, které jsou rovnoměrně rozloženy. Základní matrice je světle šedé barvy. Vytvrzující fáze jsou zbarveny tmavě a jsou rozprostřeny po celé matici. Jejich přítomnost prospívá k zlepšení mechanických vlastností slitiny, jako je pevnost nebo tvrdost.



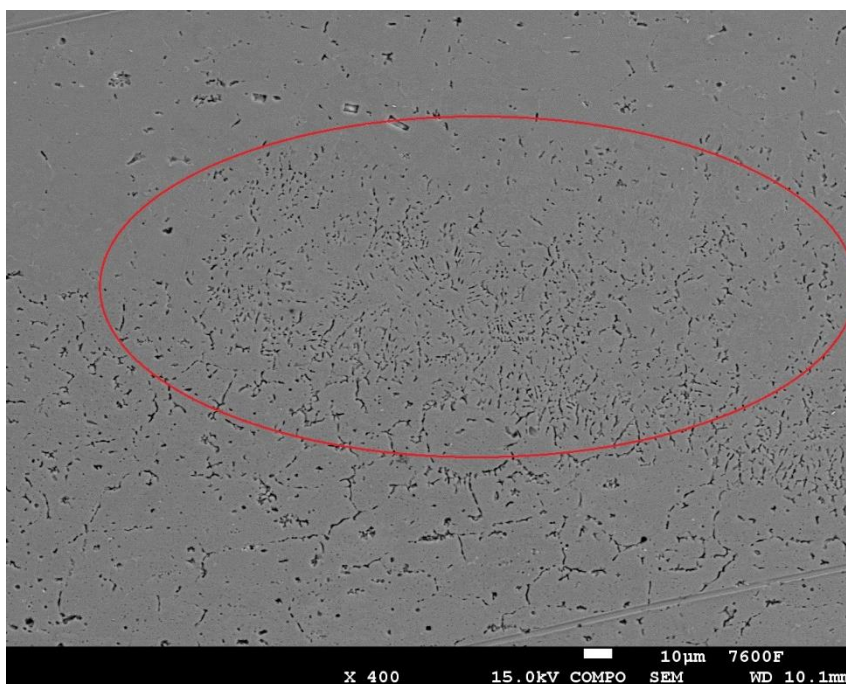
**Svar č. 47**

Obrázek 26.: Svar č. 47, SEM, Přechod z rozhraní plechů do difuzního spoje

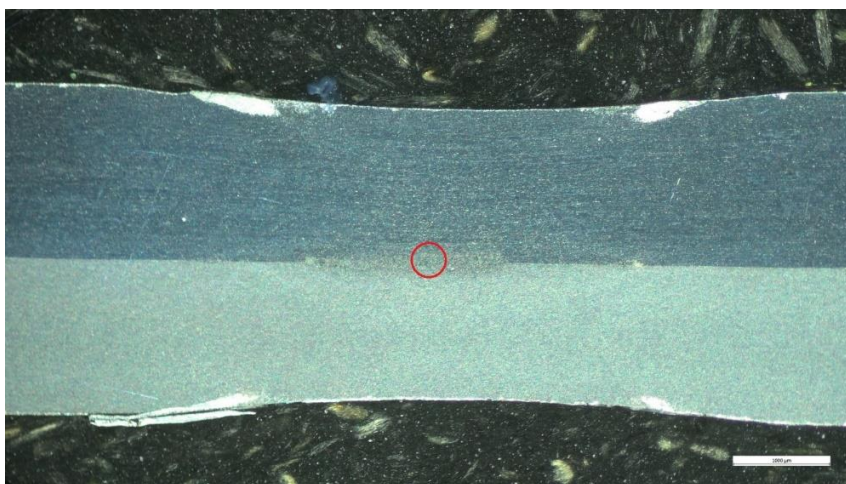


Obrázek 27.: Zkoumaná oblast svaru č.47 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 26)

Na tomto snímku (Obrázek 26) je znázorněn přechod z rozhraní dvou svařovaných plechů do difuzního spoje. Lze tak usuzovat na základě zaniklého rozhraní svařovaných plechů, ovšem s minimální (téměř žádnou) tepelně ovlivněnou oblastí, jež je pro tento charakter spojení ukazatelem.



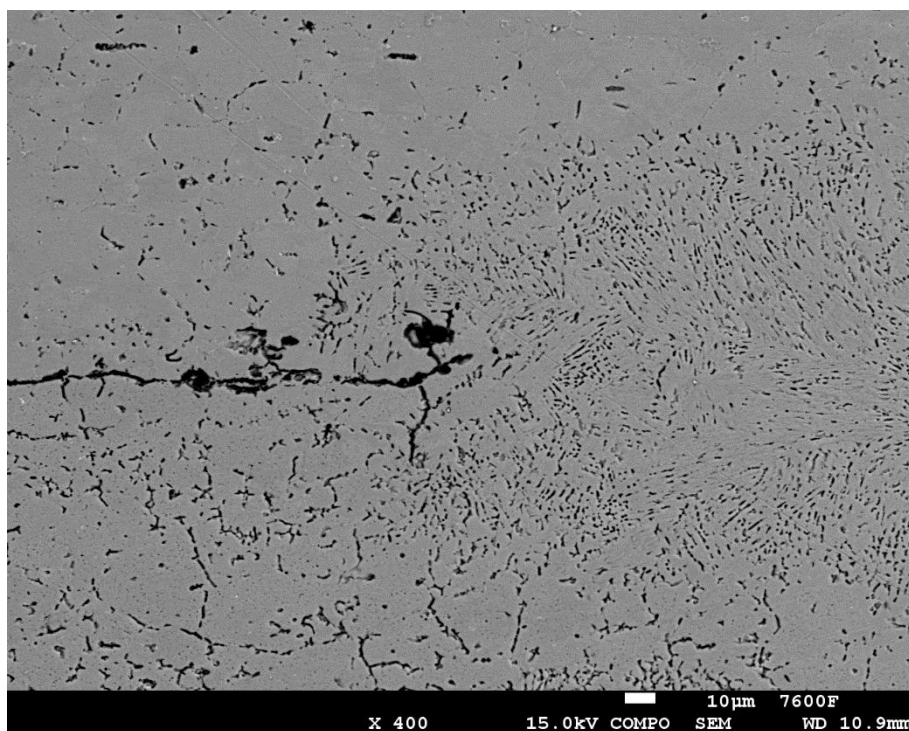
Obrázek 28.: Svar č. 47, SEM, svarová čočka s ohraničenou licí strukturou



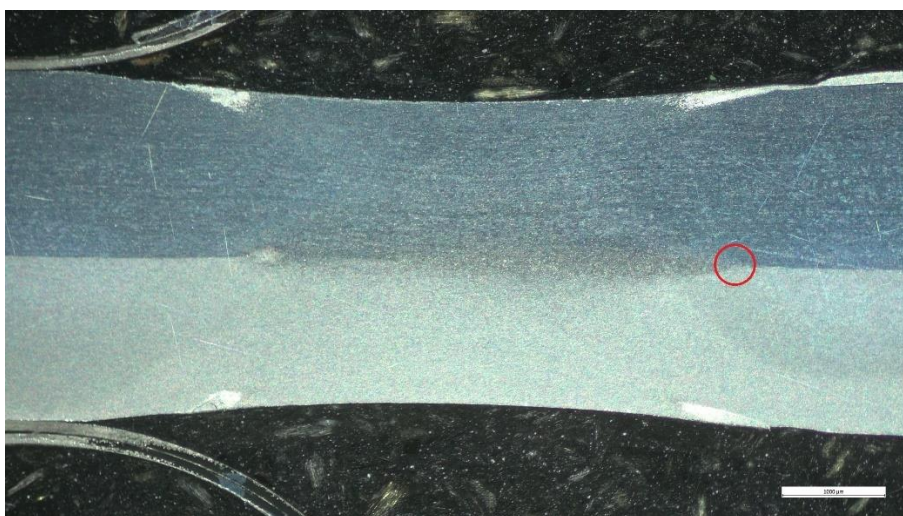
Obrázek 29.: Zkoumaná oblast svaru č. 47 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 28)

Ve svarové čočke je vidět jemnozrná struktura dendritických zrn, které plynule přecházejí do základního materiálu na horním svařovaném plechu. TOO má ve spodním plechu hrubá zrna.

## Svar č. 46

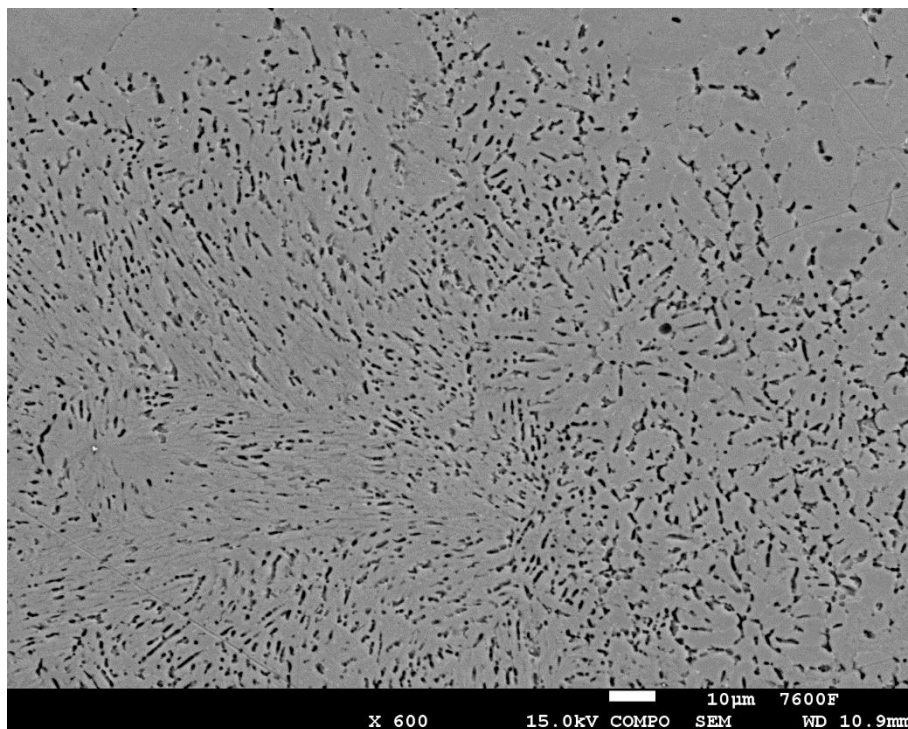


Obrázek 30.: Svar č. 46, SEM, přechod rozhraní svařovaných plechů do svarové čochky



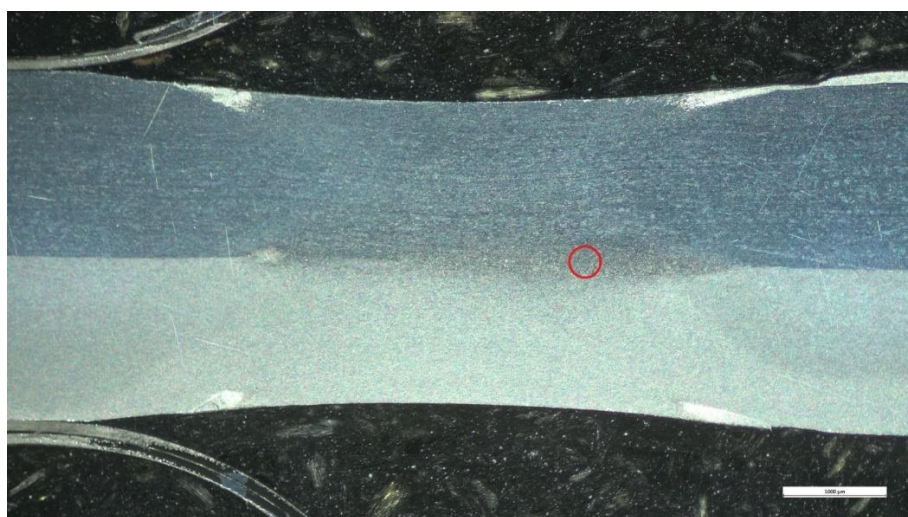
Obrázek 31.: Zkoumaná oblast svaru č. 46 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 30)

Na přechodu z rozhraní plechů do svarové čochky jsou zde viditelné póry, které jsou pravděpodobně tvořeny výpary z mastnoty na povrchu svařovaných plechů. Přechod do svarové čochky je přerušovaný a jsou zde viditelné náhodně spojené části. Teplotně ovlivněná oblast je i v této přerušované oblasti. Patrně zde mastnoty z povrchu zabránily vzniku dostatečného přechodového odporu a v kombinaci nízkého tlaku v této krajní oblasti svarové čochky nedošlo k dostatečnému prohřátí. V oblasti již dobře provařeného svařeného kovu je viditelná jemnozrná struktura.



Obrázek 32.: Svar č. 46, SEM, střed svarové čičky

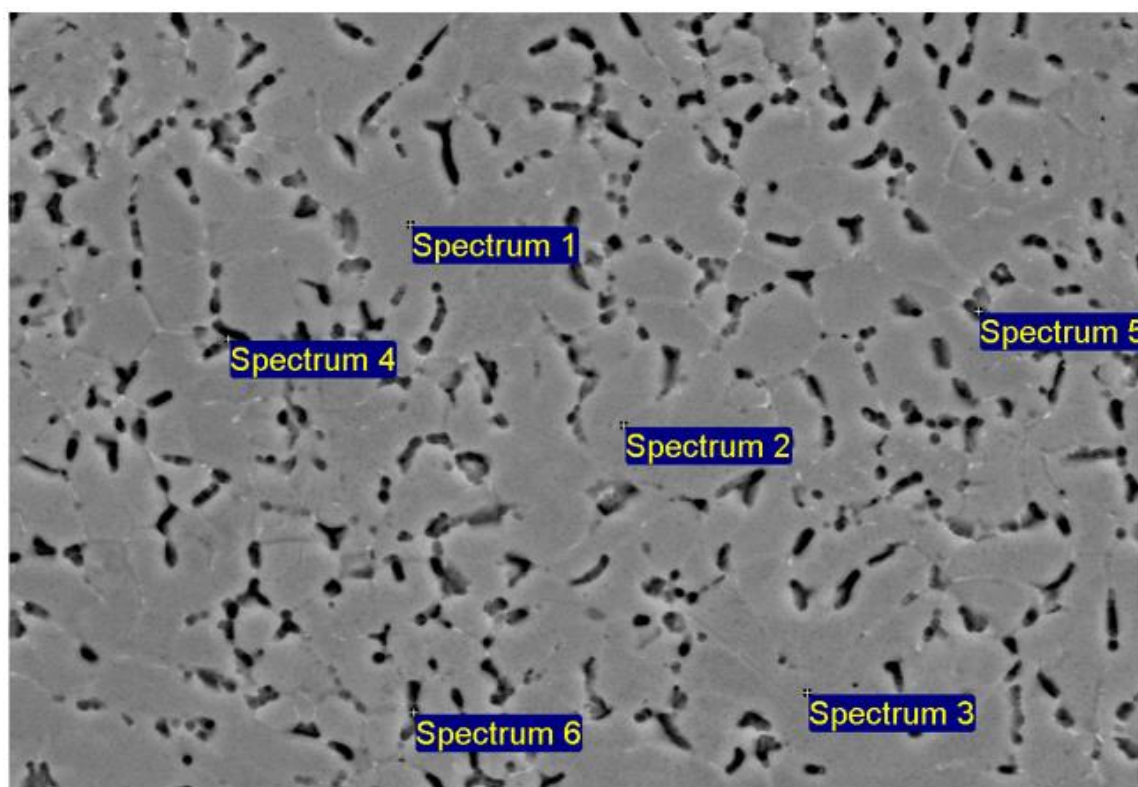
Struktura s vhodnými dendrity bez pórů a vad.



Obrázek 33.: Zkoumaná oblast svaru č. 46 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 32)

**Bodová spektrální analýza svaru č. 46**

Spektrální analýza umožňuje získání informací o složení materiálu (jeho chemickém složení). Skenovací elektronový mikroskop získává tyto informace ze zpětně odražených elektronů a vyhodnocuje intenzitu jejich záření. Každý prvek má tuto intenzitu záření unikátní. Může být bodová, liniová, nebo plošná.



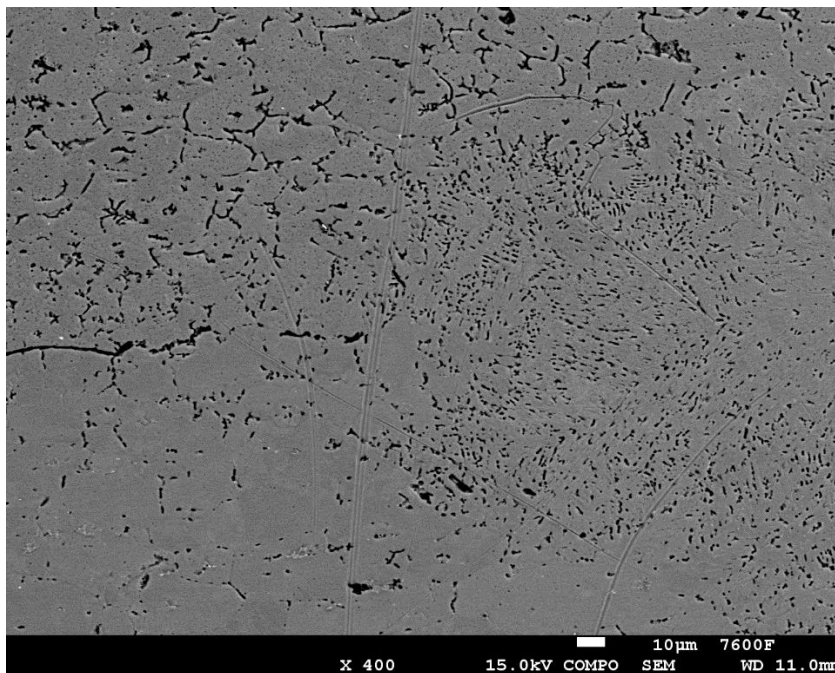
Obrázek 34.: Bodová spektrální analýza prvků svaru č. 46 ze středu svarové čočky

Tabulka 8.: Bodová spektrální analýza svaru č. 46 v atomových procentech

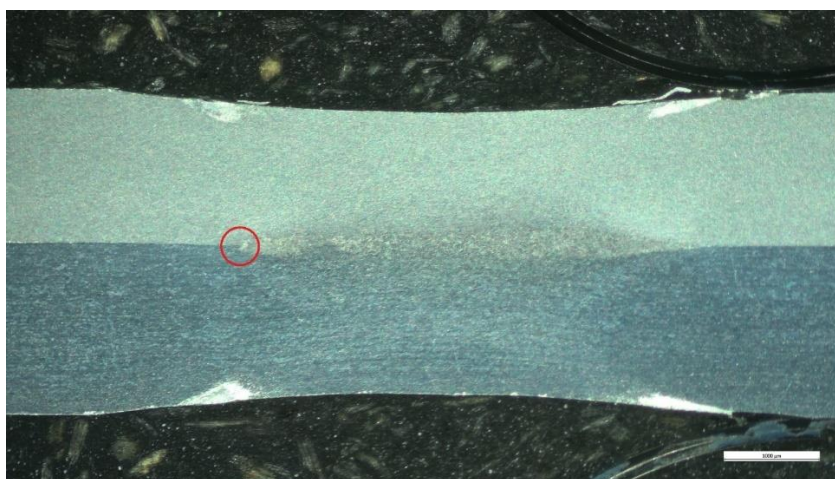
Spektrum	Mg	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Cu
Spektrum 1	0,52	98,93	0,55	-	-	-	-
Spektrum 2	1,04	97,05	1,44	-	0,13	0,33	-
Spektrum 3	0,49	99,03	0,42	0,06	-	-	-
Spektrum 4	0,81	92,89	4,97	-	0,11	0,49	0,72
Spektrum 5	0,67	93,05	5,37	-	-	0,30	0,6
Spektrum 6	-	98,00	1,45	-	0,18	-	0,37

Matrice (spektrum 1, 2 a 3) je tvořena největším podílem hliníku, ovšem u spektra 2 je zde přibližně o 2 % menší podíl. Je zde pravděpodobně zanalyzována i vytvrzující fáze, která oproti spektru 1 a 3 přibližně trojnásobně zvyšuje podíl křemíku a objevil se zde stejně jako u spekter zaměřených na dendrity i mangan a železo. U spektra 3 je zde nízké množství chromu. Vytvrzující fáze (spektrum 4, 5 a 6) obsahují mimo hliník především mangan, železo a měď. Spektrem 6 byla pravděpodobně zanalyzována část matrice, protože je zde oproti spektru 4 a 5 zvýšený podíl hliníku přibližně o 5 %. Navíc zde nebyl detekován hořčík jako ve všech ostatních spektrech.

## Svar č. 49

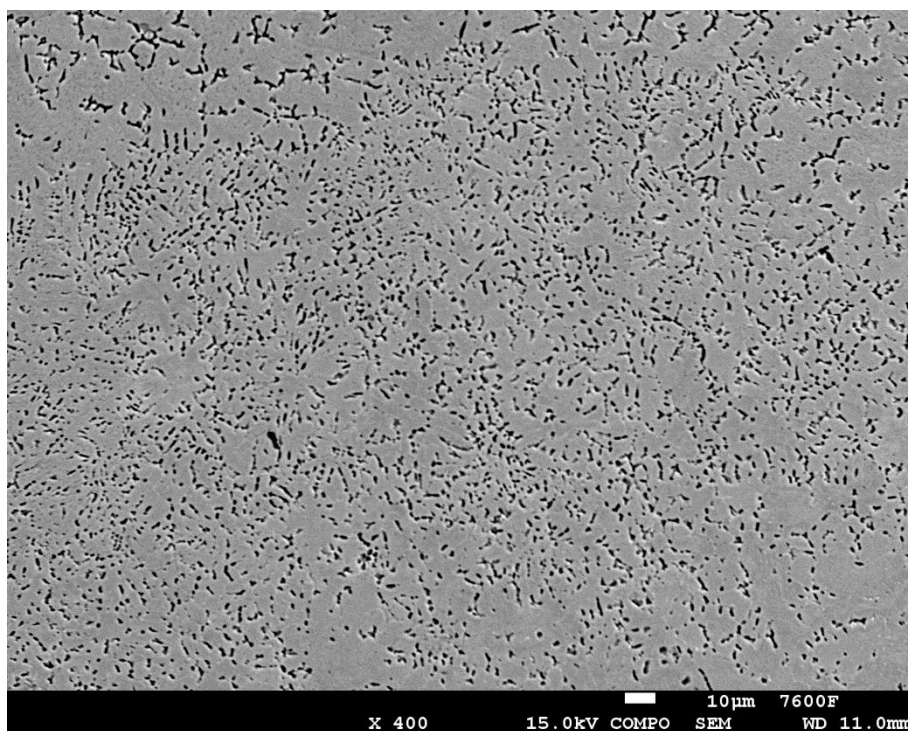


Obrázek 35.: Svar č. 49, SEM, přechod rozhraní plechů do svarové čocky



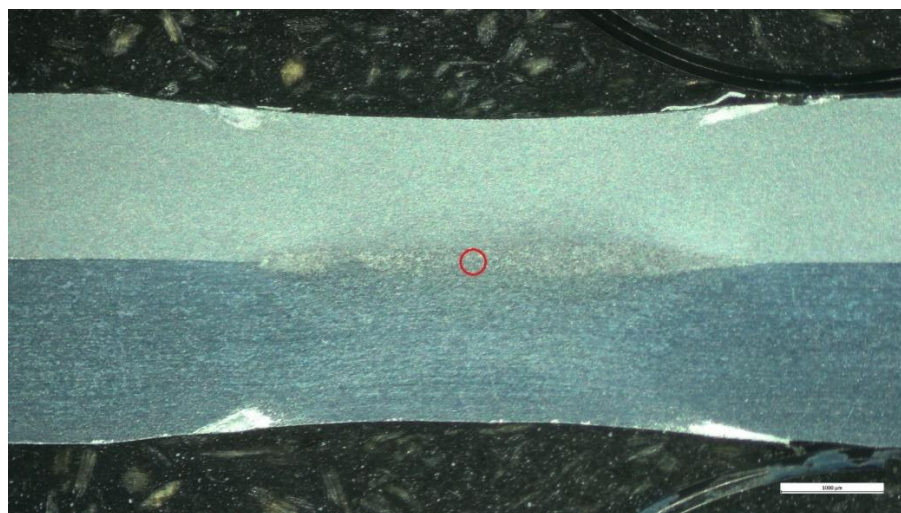
Obrázek 36.: Zkoumaná oblast svaru č. 49 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 35)

Zde je stejně jako u svaru č. 46 přerušovaný přechod do svarové čocky s tepelně ovlivněnou oblastí.



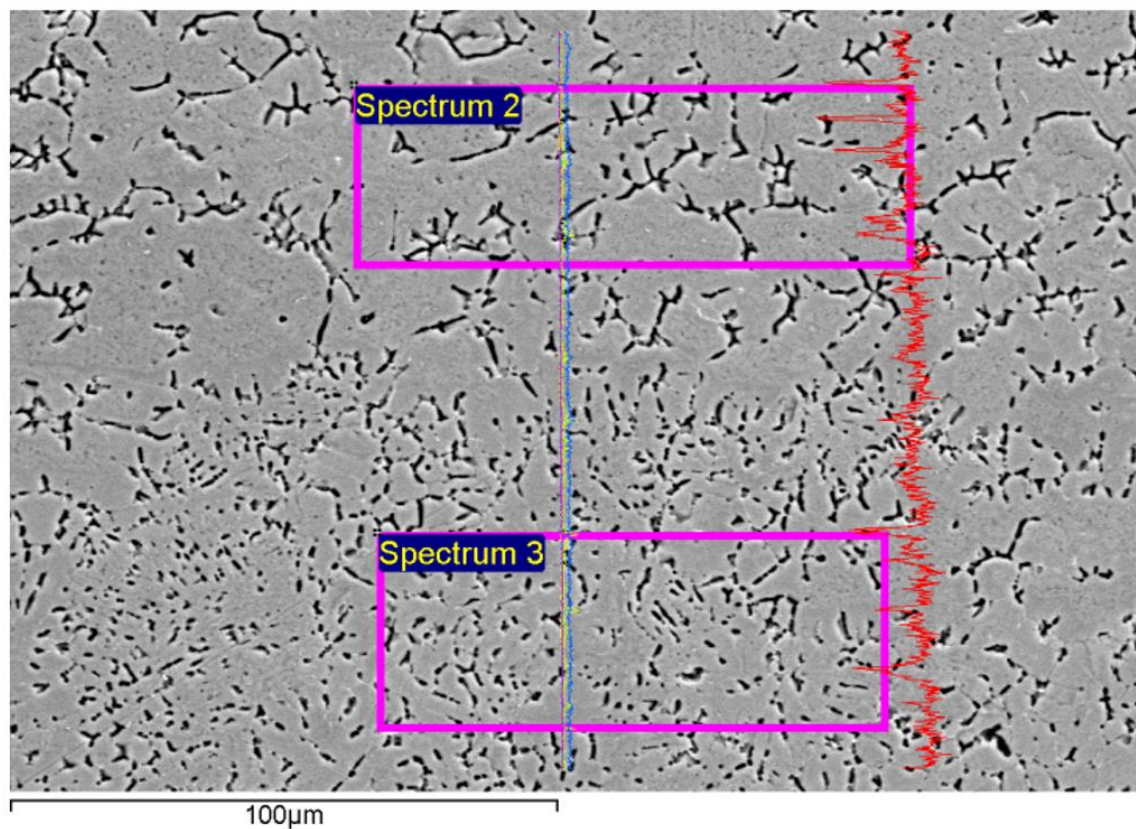
Obrázek 37.: Svar č. 49, SEM, střed svarové čičky

Licí struktura bez vměstků, trhlin, či jiných vad.

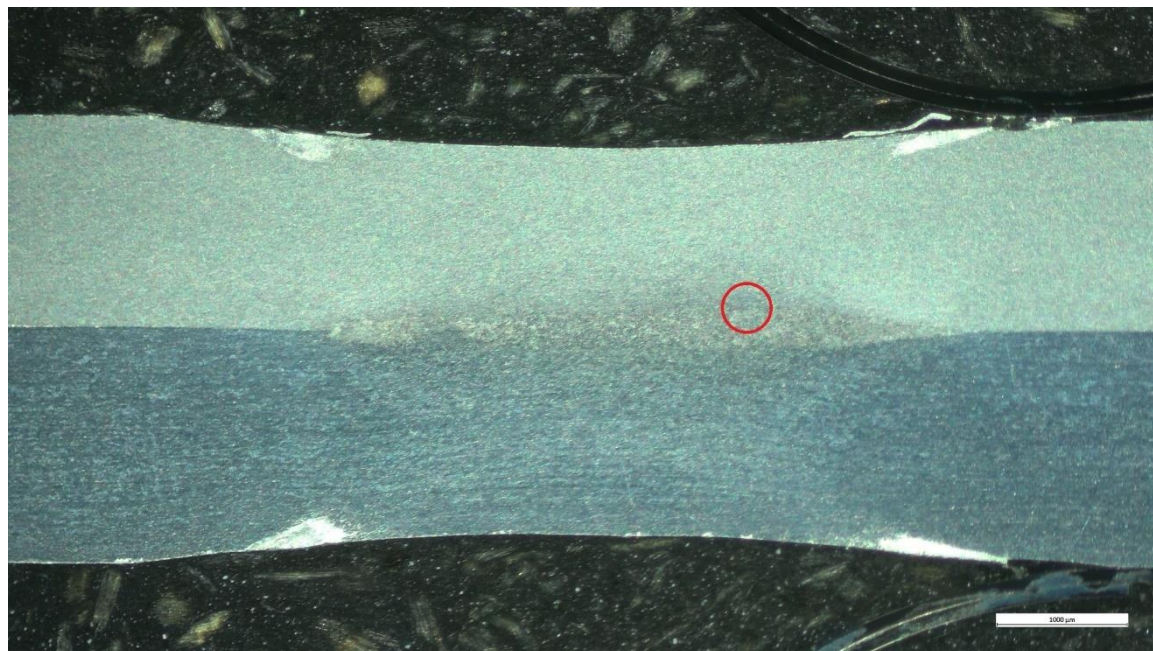


Obrázek 38.: Zkoumaná oblast svaru č. 49 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 37)



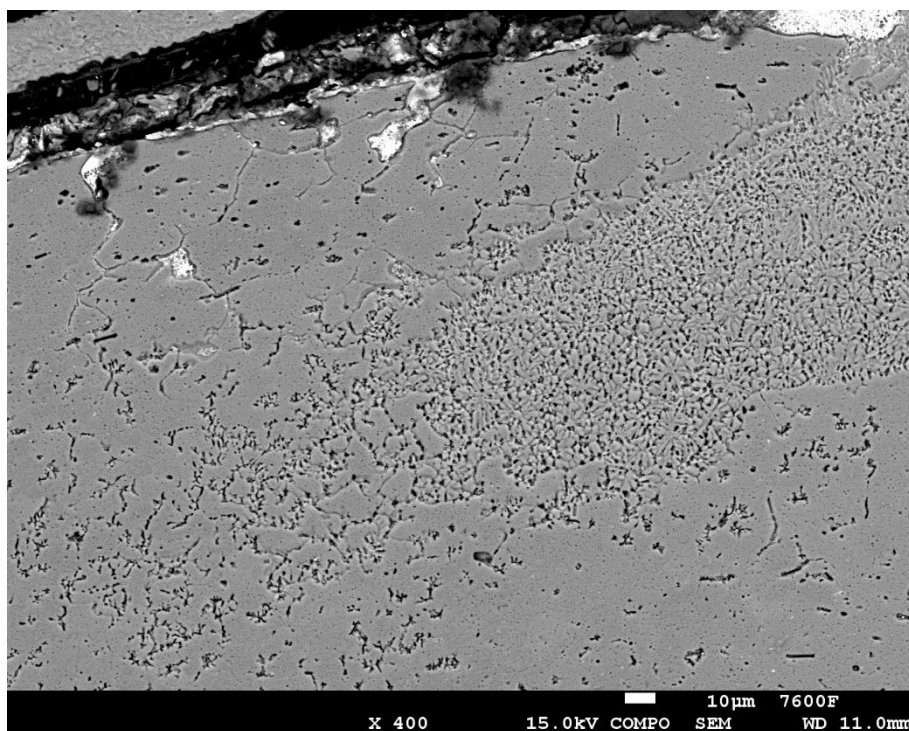


Obrázek 39.: Spektrální analýza svaru č. 49 v TOO a svarové čičce (fialová - Fe, modrá - Mn, zelená - Mg, žlutá - Si, červená - Al)

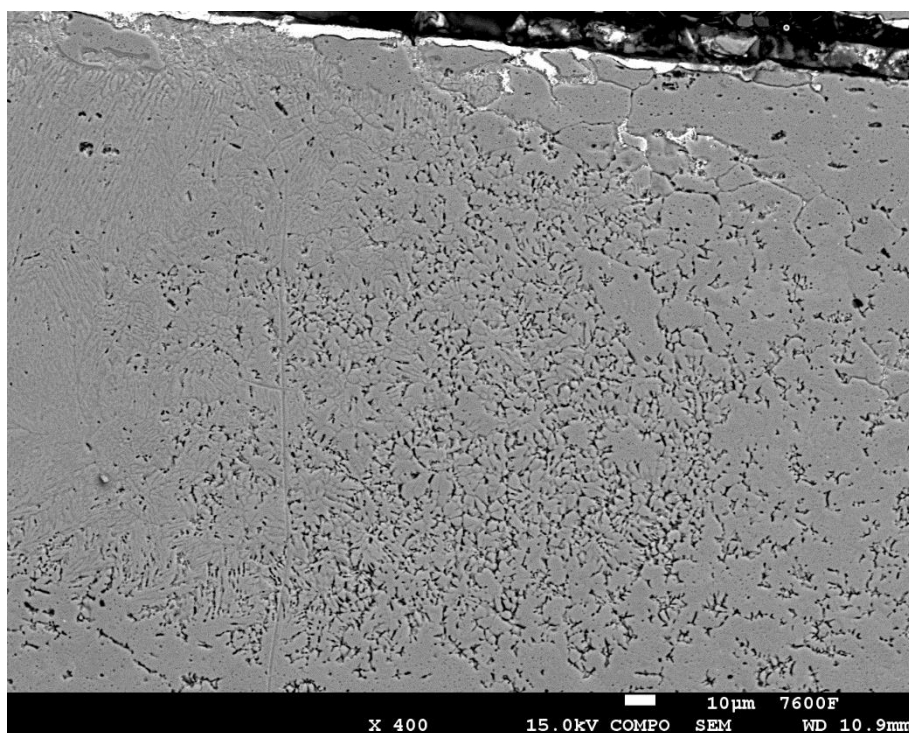


Obrázek 40.: Zkoumaná oblast svaru č. 49 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 39)

V tepelně ovlivněné oblasti (spektrum 2) je vidět úbytek obsahu hliníku na úkor hořčíku, křemíku a dále železa. V lící struktuře (spektrum 3) je průběh téměř stejný.



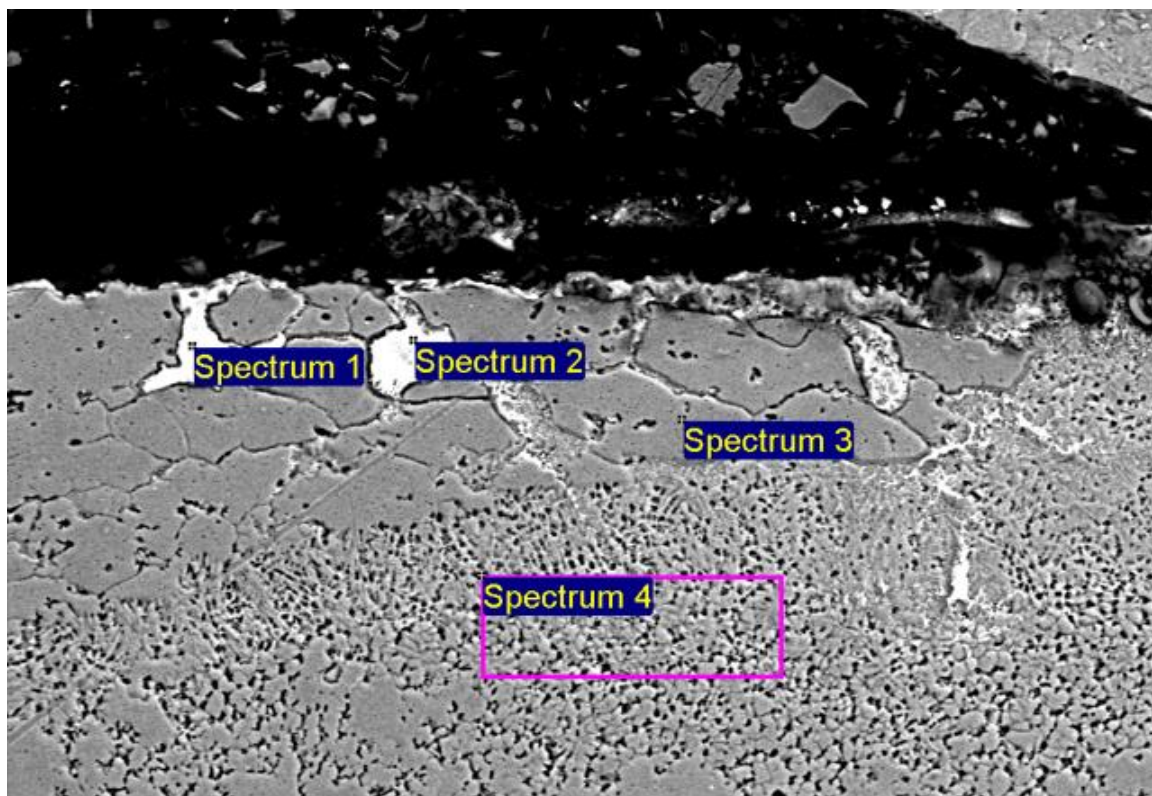
Obrázek 41.: Svar č. 49, SEM, oblast zkrěnutí vlivem tekutého kovu 1



Obrázek 42.: Svar č. 49, SEM, Oblast zkrěnutí vlivem tekutého kovu 2

V oblasti zkřehnutí vlivem tekutého kovu je rozdíl od ocelových plechů, které jsou zinkovány. Absence zinku eliminuje jeho možnost pronikání do základního materiálu. Ovšem je zde znatelné teplotní zatížení vzhledem k lící struktuře. V tomto místě byl materiál nataven a došlo k zatečení bílých fází z povrchu dovnitř. Příčinou může být tvar elektrodové čepičky.

**Svar č. 47 – spektrální analýza povrchu svařovaných plechů**

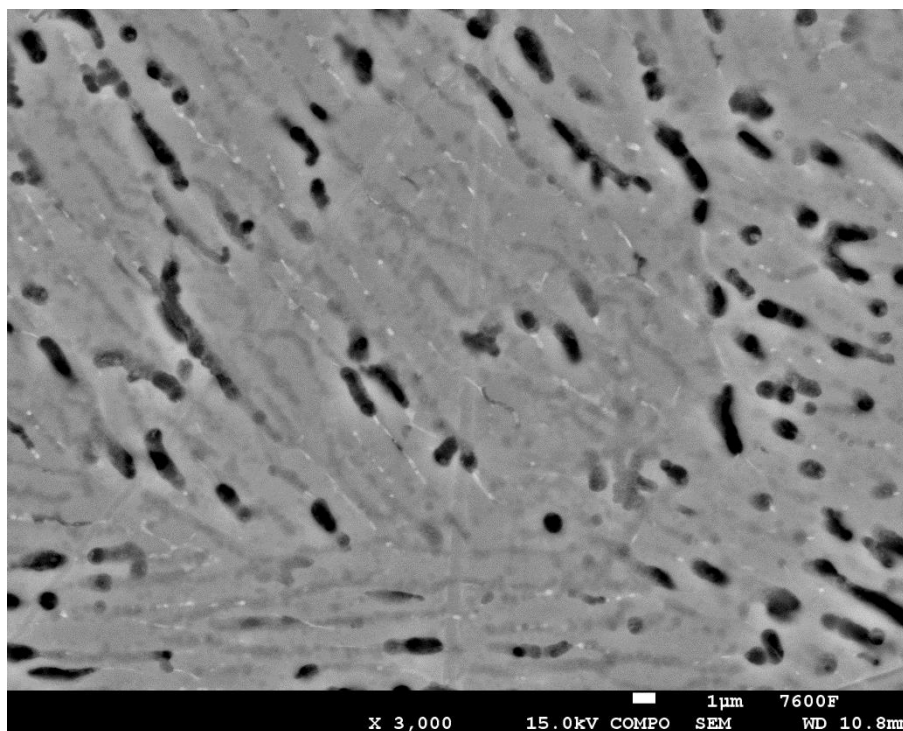


Obrázek 43.: Spektrum sv. č. 47 oblasti zkřehnutí vlivem tekutého kovu a povrchu svařovaných plechů

Tabulka 9.: Výsledky spektra sv. č. 47 a oblasti zkřehnutí vlivem tekutého kovu a povrchu svařovaného materiálu v atomových procentech

	Mg	Al	Si	Cr	Fe	Cu	Zr
Spektrum 1	0,69	67,25	4,41	0,10	0,25	27,30	
Spektrum 2	0,84	65,85	6,28	0,10	0,24	26,66	0,03
Spektrum 3	0,78	98,28	0,73	0,04	0,10	0,05	0,02
Spektrum 4	0,69	95,69	1,73	0,06	0,18	1,63	0,01

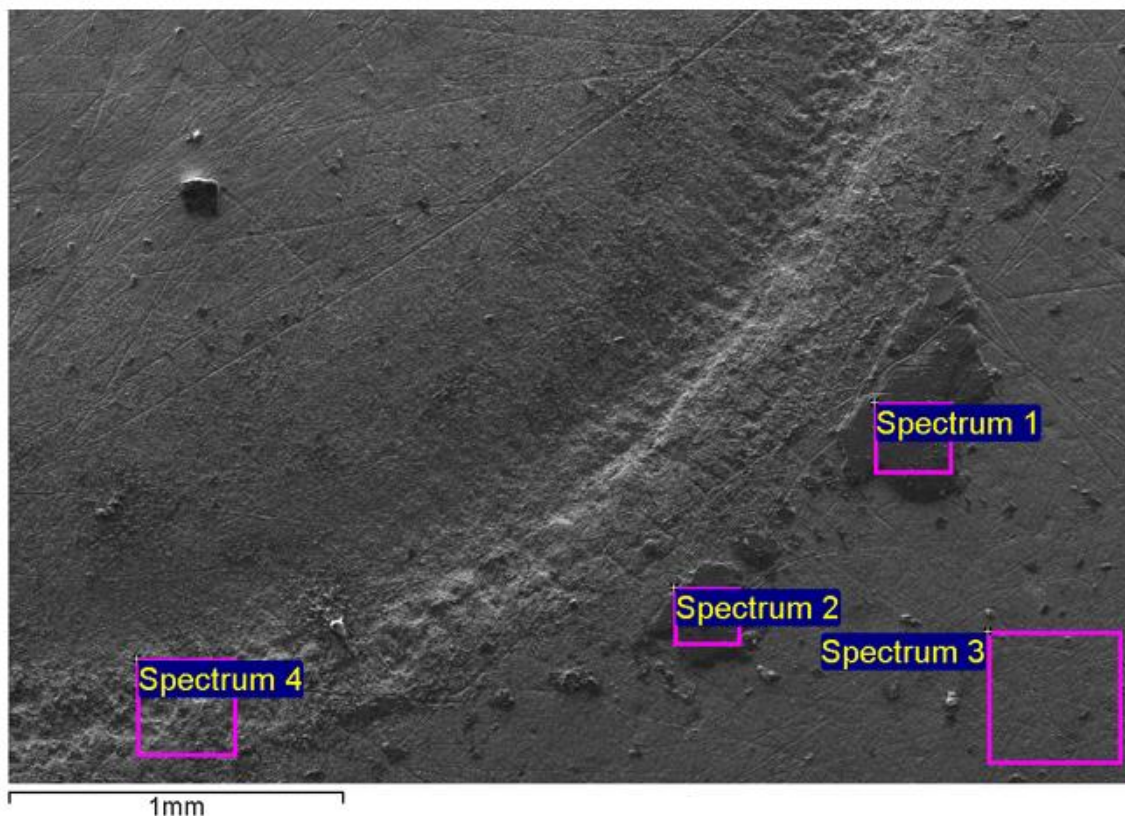
Spektrum 1 a 2 potvrdilo velký obsah mědi, která na povrchu ulpěla. Spektrum 3 je hrubozrnná struktura o chemickém složení základního materiálu navíc s velmi nízkým obsahem zirkonu. Spektrum 4 ohraničuje oblast zkřehnutí vlivem tekutého kovu, kde je zvýšený obsah mědi.



Obrázek 44.: Matrice svarové čocky s větším zvětšením

### 3.10.1. Opotřebení elektrodoých čepiček

Plošné spektrální analýze byly podrobeny i elektrodové čepičky po 18 svařech.



Obrázek 45.: Spektrální analýza kontaktní plochy elektrody

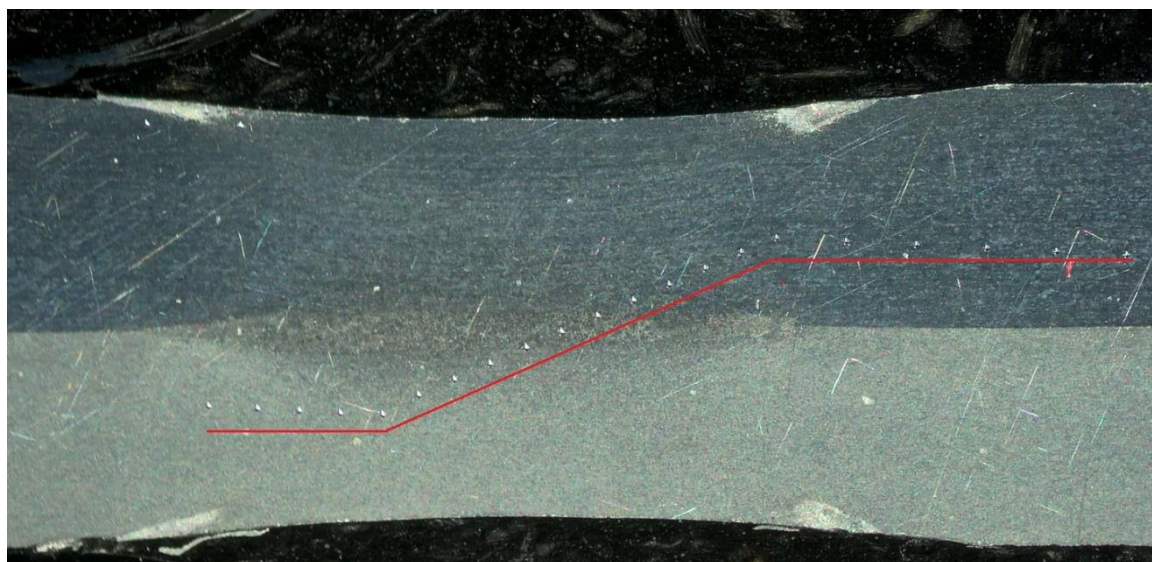
Tabulka 10.: Spektrální analýza elektrodové čepičky v atomových procentech

	Mg	Al	Si	Cr	Cu	Zr
Spektrum 1	0,73	96,68	1,45	0,04	1,08	0,02
Spektrum 2	0,71	96,31	1,23	0,03	1,75	0,03
Spektrum 3	0,01	0,93	0,40	2,04	96,42	0,2
Spektrum 4	0,91	51,29	1,00	1,85	44,83	0,12

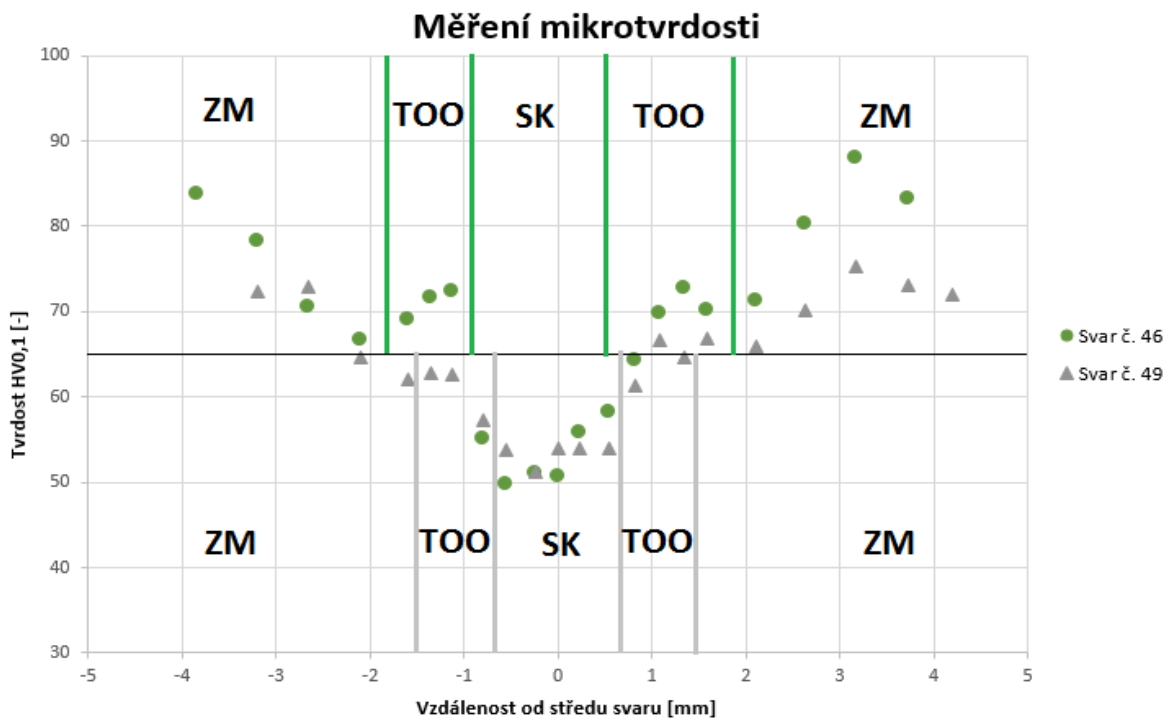
Spektrum 1 a 2 označují rozstříky vzniklé během svařování. Spektrum 3 zahrnuje především elektrodovou čepičku a dle obsahu hliníku v tomto spektru i jemné rozstříkové částice. Spektrum 4 zachycuje difuzí velmi zasaženou oblast, je zde velké množství hliníku – tvoří zde největší podíl. Jeho přítomnost snižuje přenos svařovacího proudu do svařovaného materiálu.

### 3.11. Měření mikrotvrdomosti

Měření probíhalo dle metodiky Vickerse. Byl použit mikrotvrdoměr firmy Buehler – IndentaMet. Do měřeného svařence se vtlačuje čtyřboký jehlan s nastavitelnou zátěží. Pro naše měření bylo využito zatížení 100 gramů po dobu deseti sekund. Z úhlopříček, které po sobě v materiálu čtyřboký jehlan zanechá se vypočítá výsledná tvrdost svařence. Principem je vytvoření přímky v základním materiálu mimo ovlivněnou část. Tato přímka může být vodorovná, nebo svislá, dle možnosti měřeného dílu. Podmínkou je dodržení vzdálenosti mezi jednotlivými vtlačky. Tato vzdálenost by měla být 2,5 násobek délky úhlopříčky vtlačného jehlanu. Mikrotvrdomost byla měřena u svařených vzorků č. 45, 46, 47 a 49.



Obrázek 46.: Měření mikrotvrdomosti sv. č. 49



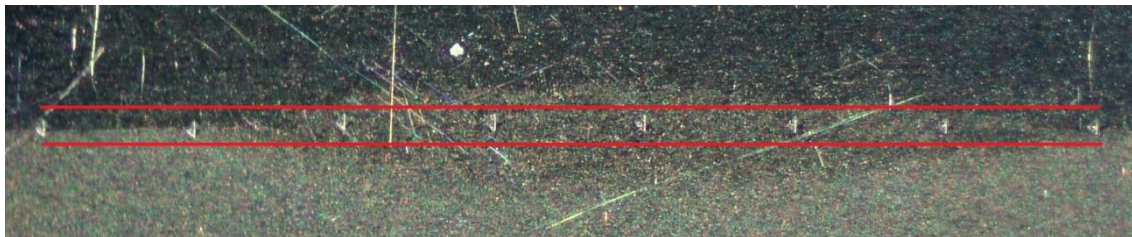
Graf 2.: Měření tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od středu svaru

Všechny 4 vzorky měly podobný průběh tvrdostí, proto jsou v grafickém znázornění uvedeny jen dva pro lepší orientaci a přehled. Hodnoty tvrdostí se vždy skokově měnily, při přechodu ze základního materiálu do tepelně ovlivněné oblasti se měnila tvrdost u svaru č. 46 o přibližně 17 HVO,1, u svaru č. 49 je zde poměrně lineární snižování směrem ze základního materiálu do tepelně ovlivněné oblasti o 10 HVO,1. Poté opět klesá tvrdost směrem z tepelně ovlivněné oblasti do svarové čočky. U svaru č. 46 došlo ke snížení tvrdosti o přibližně 15 HVO,1, u svaru č. 49 o 10 HVO,1. Tvrdosti výrazně ovlivňuje, kudy vyjde linie, po které se pohybujeme vpíchy napříč svarovou čočkou.

Tabulka 11.: Krajní hodnoty tvrdosti svařenců

	Hodnota	Svar č.
Maximální tvrdost svaru [HV]	67,5	45
Minimální tvrdost svaru [HV]	50,7	46
Maximální tvrdost ZM [HV]	88,8	45

Pro lepší představu, jak tvrdý je spoj na rozhraní plechů ve svaru bylo vyhotoveno následné měření mikrotvrdosti na svaru č. 48. Směr vtlačků byl zvolen rovnoběžně s rozhraním svařovaných plechů.



Obrázek 47.: Měření mikrotvrdosti na rozhraní plechů (sv. č. 48)

V následující tabulce (Tabulka 12) je uvedeno měření tvrdosti z předchozího obrázku (Obrázek 47) v pořadí zleva doprava.

Tabulka 12.: Tvrdost na rozmezí dvou svařených plechů (hodnoty v HV0,1)

Vtlaček	1	2	3	4	5	6	7	8
Tvrdost	61,4	56,5	56,1	58,1	64,8	62,8	69,2	57,8

Tvrdosti na rozhraní se zvětšují směrem ze středu svarové čocky.

Následně bylo provedeno měření v oblasti zkřehnutí vlivem tekutého kovu. Dvě vtlačení byly provedeny uvnitř a následně dvě na hraně přechodu této oblasti a oblasti základního materiálu. Uvnitř oblasti zkřehnutí vlivem tekutého kovu byla hodnota tvrdosti 60,5 a 55,2, zatímco na pomezí 69,4 a 68,4 HV0,1. Oblast zkřehnutí vlivem tekutého kovu tedy může oslabovat svařenec při velkém mechanickém zatěžování.



## 4. Diskuze a závěr

Provedené experimenty ukazují, že tato metoda by mohla být vhodná pro svařování hliníkových slitin, pokud by byla provedena další optimalizace parametrů. U svarů nedochází k vnitřním vadám, jako jsou trhliny, či póry. Teplotně ovlivněná oblast je poměrně vysoká – sahá až k povrchu. Mechanizovaná stříhová zkouška ukazuje, že i při základních parametrech svařování spoje vykazují většinou (9 z 12 svařenců) vyšší hodnoty stříhového napětí, než je smluvní mez kluzu svářeného materiálu, přičemž pouze dva nesplňují podmínku průměru svarové čochky bodového spoje, ovšem pouze v maximální odchylce 0,06 mm, což může být způsobené chybou měření svarové čochky. Zkouška ultrazvuku vykazovala pórovitost u dvou svarů, nebo studený (případně difuzní) spoj. Tento výsledek byl vyhodnocen pomocí světelné mikroskopie. Světelná mikroskopie ukázala přítomnost difuzních (nebo studených) spojů. A také příčiny odezev u zkoušky ultrazvukem. Na stranách svarových spojů byla rozhraní svaru přerušována a byly zde póry, které nejspíš byly vytvořeny vypařovanými mastnotami v kombinaci s nedostatečným tlakem na těchto krajích svarů. U světelné mikroskopie byla zaznamenána oblast křehkosti vlivem tekutého kovu a byly prozkoumány její možné příčiny. Tato problematika byla následně podrobně popsána v samostatné kapitole. Příčinou se jeví nevhodné zaoblení elektrodové čepičky, jejíž radius je pravděpodobně příliš nízký. Proto zde může docházet k nadměrnému zvýšení proudové hustoty, jež není elektrodová čepička schopna efektivně přenést místem kontaktu se svařovaným dílem a mimo tento kontakt se vytváří elektrický oblouk. Tento oblouk pravděpodobně vytváří tyto oblasti. Dále je možnost, že elektrody již začínaly být na okrajích opotřebené a nebyla zde již přítomna čistá měď. Tyto možnosti ubírají potenciálu efektivity svařovacích parametrů a charakteristiky stroje na vytvoření kvalitního svarového spoje. Skenovací elektronová mikroskopie znázorňuje lící strukturu v oblasti svarové čochky. Měření tvrdosti svarových spojů prokazuje výrazné snižování tvrdosti směrem ze základního materiálu ke svarové čochce. Pokles tvrdosti je v čochce svaru oproti základnímu materiálu až o 35 HV<sub>0,1</sub>. Snižování tvrdosti však má za příčinu zvýšení tažnosti. Takže tento jev může být prospěšným pro zvážení úmyslu využití v například automobilovém průmyslu. Nakonec bylo nahlédnuto na použité elektrodové čepičky a jejich známky opotřebenosti. Hliník ve velké míře na elektrodových čepičkách ulpívá, takže by bylo nutné při využití v průmyslu zvýšit frekvence jejich ořezování – očištění.

Shrnutím této práce lze usoudit, že kondenzátorové svařování může být vhodné pro svařování hliníkových slitin. Jeho výhodou je rychlost svařovacího procesu oproti používaným metodám. Dále již zmíněná téměř nulová náchylnost na pórovitost a praskliny ve svarové čočce, nebo teplotně ovlivněné oblasti. Pro pokračovatele v tomto výzkumu bych doporučoval další optimalizaci svařovacích parametrů ve smyslu zvýšení pulzu svařovacího proudu, snížení prodlevy sepnutí druhého – silnějšího kondenzátoru a tím snížit čas svařování. Zároveň by byla snížena tvorba difuzních (nebo studených) spojů. Poté zvolení mírnějšího radiusu elektrodových čepiček pro potlačení jevu křehkosti vlivem tekutého kovu, nebo jiného tvaru.

## Bibliografie

1. **P., Němeček.** Karoserie a rámy motorových vozidel. [Online] 2010. [Citace: 06. 02 2023.] <https://docplayer.cz/4714154-Karoserie-a-ramy-motorovych-vozidel.html>.
2. **Ing. Dana Macháčová, Pavel Macháč.** Stavba karoserií a skříní [online]. [Online] 2012. [Citace: 06. 02 2023.] [http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U27\\_Stavba\\_karoserii\\_a\\_skriini.pdf](http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U27_Stavba_karoserii_a_skriini.pdf).
3. **Rastočná, Pavlína.** Optimalizace procesu nakupování dílů pro automobilové karoserie. [Online] 2015. [Citace: 06. 02 2023.] <https://theses.cz/id/hgyef2/17136538>.
4. **František, Vlk.** *Karosérie motorových vozidel: ergonomika, biomechanika, struktura, pasivní bezpečnost, kolize, materiály.* Brno : 1. vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství, 2000. ISBN 8023852779.
5. **Fit for 55: why te EU is toughening CO2 emission standards for cars and vans.** [Online] 2022. [Citace: 06. 02 2023.] <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-emissions-cars-and-vans/>.
6. **GALAN, J., SAMEK, L., VERLEYSSEN,P., K. VERBEKEN and Y. HOUBAERT.** Advanced High Strength Steels for Automotive Idustry. [Online] 2012. [Citace: 07. 02 2023.] ISSN: 0034-8570.
7. **Šimková, Vendula.** Vývoj použití materiálů v automobilovém průmyslu. *docplayer.cz.* [Online] 2016. [Citace: 22. 02 2023.] <https://docplayer.cz/9186887-Vyvoj-pouziti-materialu-v-automobilovem-prumyslu.html>.
8. **Audi A8: aluminum and steel - Aluminium Guide.** Aluminium Guide - ПОНИМАНИЕ АЛЮМИНИЯ - Научно. Технически. Популярно. [Online] 2013. [Citace: 07. 02 2023.] <https://aluminium-guide.com/en/alyuminievjy-audi-a8/>.
9. **Die Karosserie: Intelligent Materialmix - Mercedes-Benz Group Media.** 302 Found [online]. Copyright © 2023 Mercedes [cit. 22.02.2023]. Dostupné z: <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Die-Karosserie-Intelligent-Materialmix>. [Online]
10. **About Jaguar | Lehká hliníková konstrukce | Jaguar CZ.** [online]. Copyright © JAGUAR LAND ROVER LIMITED 2023 [cit. 22.02.2023]. Dostupné z: <https://www.jaguar.cz/about-jaguar/reliability/aluminium.html>. [Online]
11. **Types and applications of aluminum alloys for vehicles - Aluminum Automobile Technology.** Aluminum Automobile Technology [online]. Copyright © [cit. 06.03.2023]. Dostupné z: [https://uacj-automobile.com/types\\_and\\_applications.html](https://uacj-automobile.com/types_and_applications.html). [Online]
12. **Piomalli, Dario.** *Weldability of a cold forming AA5754 using laser, capacitor discharge and resistance technologies.* Torino : Politecnico di Torino, 2022.
13. **Davis, Joseph R.** *Aluminum and Aluminum Alloys (Asm Speciality Handbook).* místo neznámé : ASM International, 1993. ISBN-10: 087170496X.
14. **Luijendijk, T.** *Welding of dissimilar aluminium alloys.* [Volume 103, Issue 1] Delft : Journal of Materials Processing Technology, 2000. ISSN: 0924-0136.
15. **A review on resistance spot welding of aluminum alloys.** S. M. Manladan, F. Yusol, S. Ramesh, M. Fadzil, Z. Luo, S. Ao. 90:605-634, [Online] : Springer - Verlag London, 2016. DOI 10.1007/s00170-016-9225-9.

16. Investigation on Transient Thermal Responses « Health Science Journals. Health Science Journals [online]. [Citace: 2023.03.14] Dostupné z: <https://healthjournals.wordpress.com/2016/08/19/investigation-on-transient-thermal-responses/>. [Online]
17. S. Selvi, A. Vishvaksenan, E. Rajasekar. *Cold metal transfer (CMT) technology - An overview*. : Defence technology 14, 2018. 28-44.
18. American Welding Society (AWS). *Welding Handbook*. Danvers : autor neznámý. ISBN: 978-0-87171-053-6.
19. Kolařík, L.: Prezentace svařování elektrickým odporem, [Online] ČVUT – FS – Ústav strojírenské technologie, Praha, 2010 [cit. 2023.03.06] URL: [u12133.fsid.cvut.cz](http://u12133.fsid.cvut.cz). [Online]
20. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. [Online] Ostrava: ZEROSS, 2001. [citace 2023.03.06] ISBN 80-85771-81-0.
21. *Přehled svařování*. : [online]. Copyright © [cit. 29.04.2023]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT\\_01\\_Prehled\\_svarovani\\_T08.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf).
22. SCHWARTZ, D. S., J. H. DEVLETIAN, S. J. CHEN, J. GOULD. *Capacitor Discharge and Flash Welding of Sic-Reinforced High Temperature Al Alloy*. Doi: 10.1557/proc-314-163.
23. PMS, DALEX. *PRŮMYSLOVÉ SVAŘOVACÍ ODPOROVÉ LISY*. Wissen : DALEX Schewissmaschinen GmbH & Co. KG.
24. KOAL, Johannes, Martin BAUMGARTEN, Stefan HEILMANN, Jörg ZSCHETZSCHE, Uwe FÜSSEL. *Performing an Indirect Coupled Numerical Simulation for Capacitor Discharge Welding of Aluminium Components*. doi: 10.3390/pr8111330.
25. Musil M., Moravec J. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování. výukové materiály pro kurzy Mezinárodní svářečský inženýr IWE*. Česká Třebová : Mezinárodní svářečský technolog IWT, 2017. ISBN 978-80-906720-0-0.
26. Jan, Matoušek. *Nedestruktivní kontrola bodových svarů v automobilovém průmyslu*. Praha : Advanced Technology Group s.r.o., 2016.
27. Volkswagen. *Flacherzeugnisse aus Aluminium für die Kaltumformung. Konzernnorm VW 50067. 12* : Volkswagen, 2021. 53337.
28. KAPKON GmbH. *CD machine combi pulse*. KAPKON. [Online] 2020. [Citace: 08. 05 2023.] <https://www.kapkon.de/en/cd-machine-combi-pulse/>.
29. WorldAutoSteel. *Ahssinsights.org. AHSS Application Guidelines*. [Online] 2020. [Citace: 03. 05 2023.] <https://ahssinsights.org/joining/resistance-welding-processes/resistance-spot-welding/rsw-modelling-and-performance/welding-simulation-for-ahss-lme-during-resistance-spot-welding/>.
30. *Liquid metal embrittlement in resistance spot welding hot tensile tests of surface-refined TWIP steels*. J. Barthelmie, A. Schram, V. Wesling. Clausthal University of Technology, Germany : IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 118, 2016. doi: 10.1088/1757-899X/118/1/012002.

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Nároky kladené na karoserii [3].....	14
Obrázek 2.: Vývoj použití materiálů v automobilovém průmyslu [7].....	17
Obrázek 3.: autobus Scania Omnicity s hliníkovým skeletem [7].....	17
Obrázek 4: Zobrazení využití hliníkových dílů a procentuální znázornění jejich zpracování (AUDI A8 D2) [8] .....	18
Obrázek 5.: Vliv legujících prvků na vznik trhlin za horka [16] .....	22
Obrázek 6.: Znázornění pulzního (a) a kontinuálního (b) laserového svařování [16].....	23
Obrázek 7.: Znázornění průběhu při CMT svařování [17] .....	24
Obrázek 8.: Třecí svařování promíšením [18] .....	25
Obrázek 9.: Odporů při odporovém svařování [19].....	26
Obrázek 10.: Závislost tlaku na teplotě při odporovém svařování [12].....	27
Obrázek 11.: Porovnání závislosti svařovacího proudu na čase svařování kondenzátorového stroje, středofrekvenčního a 50ti Hz stroje [23] .....	28
Obrázek 12.: Detail povrchu svařovaných plechů [12] .....	29
Obrázek 13.: Elektrodová čepička FA16 využitá pro experiment [27].....	33
Obrázek 14.: Dalex – PrimKo 04, kondenzátorový svařovací stroj [28] .....	34
Obrázek 15.: Křivka průběhu optimálních parametrů svaru č. 32 .....	37
Obrázek 16.: Svar č. 24 s náznakem tavení svarové čočky .....	38
Obrázek 17.: Svar č. 32 s vytrženou svarovou čočkou.....	38
Obrázek 18.: Schématické zobrazení přeplátování vzorků .....	39
Obrázek 19.: Oblast křehkosti tekutého kovu u svařence č. 49 .....	43
Obrázek 20.: Ukázka snímku ze skenovací elektronové mikroskopie v oblasti zkřehnutí vlivem tekutého kovu (vlevo) a simulace koncentrací napětí v oblasti zkřehnutí vlivem tekutého kovu při zatěžování (vpravo) (Viz článek v odkazované literatuře) [29] .....	43
Obrázek 21.: Čepička s kulovou plochou (vlevo) a mírně zaoblenou, v dosedací ploše rovnou (vpravo) [30].....	44
Obrázek 22.: Svar č. 46 - světelná mikroskopie .....	45
Obrázek 23.: Svar č. 47 - světelná mikroskopie .....	46
Obrázek 24.: Svar č. 49 - světelná mikroskopie .....	47
Obrázek 25.: Svar č. 47, SEM, Základní materiál AL091.....	48
Obrázek 26.: Svar č. 47, SEM, Přechod z rozhraní plechů do difuzního spoje .....	49
Obrázek 27.: Zkoumaná oblast svaru č.47 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 26).....	49
Obrázek 28.: Svar č. 47, SEM, svarová čočka s ohraničenou licí strukturou .....	50
Obrázek 29.: Zkoumaná oblast svaru č. 47 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 28).....	50
Obrázek 30.: Svar č. 46, SEM, přechod rozhraní svařovaných plechů do svarové čočky .....	51
Obrázek 31.: Zkoumaná oblast svaru č. 46 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 30).....	51
Obrázek 32.: Svar č. 46, SEM, střed svarové čočky .....	52
Obrázek 33.: Zkoumaná oblast svaru č. 46 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 32).....	52
Obrázek 34.: Bodová spektrální analýza prvků svaru č. 46 ze středu svarové čočky .....	53
Obrázek 35.: Svar č. 49, SEM, přechod rozhraní plechů do svarové čočky.....	55

Obrázek 36.: Zkoumaná oblast svaru č. 49 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 35).....	55
Obrázek 37.: Svar č. 49, SEM, střed svarové čočky .....	56
Obrázek 38.: Zkoumaná oblast svaru č. 49 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 37).....	56
Obrázek 39.: Spektrální analýza svaru č. 49 v TOO a svarové čočce (fialová - Fe, modrá - Mn, zelená - Mg, žlutá - Si, červená - Al) .....	57
Obrázek 40.: Zkoumaná oblast svaru č. 49 ve skenovacím elektronovém mikroskopu (Obrázek 39).....	57
Obrázek 41.: Svar č. 49, SEM, oblast zkřehnutí vlivem tekutého kovu 1.....	58
Obrázek 42.: Svar č. 49, SEM, Oblast zkřehnutí vlivem tekutého kovu 2 .....	58
Obrázek 43.: Spektrum sv. č. 47 oblasti zkřehnutí vlivem tekutého kovu a povrchu svařovaných plechů .....	59
Obrázek 44.: Matrice svarové čočky s větším zvětšením .....	60
Obrázek 45.: Spektrální analýza kontaktní plochy elektrody.....	61
Obrázek 46.: Měření mikrotvrdosti sv. č. 49.....	62
Obrázek 47.: Měření mikrotvrdosti na rozhraní plechů (sv. č. 48).....	64

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Hliníkové slitiny a jejich využití v automobilovém průmyslu [11] .....	20
Tabulka 2.: Chemické složení slitiny AL091 v % zastoupení [27].....	33
Tabulka 3.: Mechanické vlastnosti slitiny AL091 [27].....	33
Tabulka 4.: Svařovací parametry kondenzátorového odporového svařování slitiny AL091.....	35
Tabulka 5.: Výsledky mechanizované stříhové zkoušky .....	40
Tabulka 6.: Výsledky ultrazvukové zkoušky .....	41
Tabulka 7.: Výsledné rozměry svarových čoček .....	47
Tabulka 8.: Bodová spektrální analýza svaru č. 46 v atomových procentech.....	54
Tabulka 9.: Výsledky spektra sv. č. 47 a oblasti zkřehnutí vlivem tekutého kovu a povrchu svařovaného materiálu v atomových procentech.....	59
Tabulka 10.: Spektrální analýza elektrodové čepičky v atomových procentech.....	61
Tabulka 11.: Krajiní hodnoty tvrdosti svařenců .....	63
Tabulka 12.: Tvrdost na rozmezí dvou svařených plechů (hodnoty v HV0,1).....	64

## Seznam grafů

Graf 1.: Mechanizovaná stříhová zkouška svaru č. 44.....	41
Graf 2.: Měření tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od středu svaru.....	63