



**Analýza jakosti „Cold Metal Transfer“ svarů**  
Diplomová práce

*Vedoucí práce:*  
Ing. et Ing. Petr Dostál, Ph.D.

*Vypracoval:*  
Bc. Vojtěch Polák

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem práci na téma **Analýza jakosti „Cold Metal Transfer“ svarů** vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnici o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne.....

.....  
podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. et Ing. Petru Dostálovi, Ph.D. za cenné rady, odborné a metodické vedení při zpracování práce.

Upřímně děkuji panu Ing. Jiřímu Votavovi, Ph.D. a doc. Ing. Josefu Filípkovi, CSc. za obětovaný čas, pomoc, věcné připomínky a rady v průběhu zpracování experimentální části práce.

Poděkování patří společnosti European Data Project s. r. o. za zprostředkování CMT svarových spojů k materiálové analýze.

Děkuji rovněž své sestře Mgr. Ludmile Polákové a bratrovi Ing. Josefu Polákovi za jazykové korektury a kontrolu anglického překladu anotace.

## **ANOTACE**

Diplomová práce je zaměřena na celkový výzkum kvality heterogenních spojů hliníkové slitiny s ocelovým materiálem CMT procesem svařování. Teoretická část se zabývá problematikou principu a popisu svařovacího systému technologie, která umožňuje spojovat různorodé materiály elektrickým obloukem. Pozornost je věnována dalším režimům jako CMT Advanced, CMT Pulse a CMT Advanced Pulse, které více zdokonalují inovativní proces. K těmto modifikacím patří výkonná tandemová metoda CMT Twin, využívající dva elektrické oblouky v různých kombinacích. Hlavním záměrem experimentu je posuzování kvality vytvořených CMT spojů. Jednotlivé testy jsou provedeny za účelem vyhodnocení korozní odolnosti v agresivním prostředí solné mlhy. Testování následně pokračuje zjišťováním mechanických vlastností destruktivní tahovou zkouškou pro určení pevnosti v tahu. Součástí hodnocení kvality je metalografická analýza včetně stanovení prvkového složení v oblasti svaru.

### **Klíčová slova**

CMT proces, svařování, vzorek, metalografie, koroze, pevnost v tahu

## **ANNOTATION**

This diploma thesis is focused on overall research of the quality of joining steel and aluminum alloy using the CMT welding process. The theoretical part describes the principle and the technology of the welding system that allows joining dissimilar materials by an electric arc. Attention is also given to other modes such as CMT Advanced, CMT Pulse and CMT Advanced Pulse, which further improve the innovative process. These modifications include an efficient tandem method CMT Twin that uses two electric arcs in various combinations. The main aim of the experiment is assessment of the quality of created CMT joints. Individual tests are conducted to evaluate the corrosion resistance in an aggressive environment (salt fog). The testing subsequently evaluates mechanical properties by a destructive tensile test to determine the tensile strength. Part of the quality assessment is metallographic analysis including determining the elemental composition of the weld.

### **Keywords**

CMT process, welding, sample, metallography, corrosion, tensile strength

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1 CÍL PRÁCE .....</b>	<b>10</b>
<b>2 TECHNOLOGIE CMT („COLD METAL TRANSFER“)</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1 Společnost Fronius od založení po současnost .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Princip CMT procesu spojování .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Svařovací systém .....</b>	<b>13</b>
2.3.1 Jednotlivé komponenty svařovacího systému .....	14
<b>2.4 Hlavní oblasti využití procesu CMT .....</b>	<b>15</b>
2.4.1 Spojování ocelových a hliníkových částí elektrickým obloukem .....	15
2.4.2 Svařování tenkých plechů .....	16
2.4.3 Bezroztříkové MIG-pájení .....	16
<b>2.5 Přenos kovu v elektrickém oblouku .....</b>	<b>17</b>
2.5.1 Zkratový přenos kovu (krátký oblouk).....	17
2.5.2 Přečhodový oblouk (někdy označován jako kapkový).....	17
2.5.3 Oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem.....	17
2.5.4 Impulzní bezzkratový přenos kovu .....	18
2.5.5 Oblouk s rotujícím přenosem kovu .....	18
<b>2.6 Ochranné plyny .....</b>	<b>19</b>
2.6.1 Inertní ochranné plyny.....	19
2.6.2 Aktivní ochranné plyny .....	19
2.6.3 Značení ochranných plynů .....	20
2.6.4 Lahve na ochranné plyny .....	21
<b>2.7 Přídavné materiály .....</b>	<b>21</b>
2.7.1 Svařování hliníku a jeho slitin.....	22
<b>2.8 Svařovací režimy procesu CMT.....</b>	<b>23</b>
2.8.1 CMT Advanced .....	23
2.8.2 CMT Pulse.....	25
2.8.3 CMT Advanced Pulse .....	25
2.8.4 Metoda CMT Pin, CMT Print .....	27
<b>2.9 Metoda CMT Twin.....</b>	<b>29</b>
<b>2.10 Srovnání obloukových technologií a vývoj CMT procesu .....</b>	<b>32</b>

<b>3 EXPERIMENT – HODNOCENÍ KVALITY CMT SPOJŮ .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Příprava vzorků pro metalografickou analýzu .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2 Specifikace a vlastnosti použitých materiálů .....</b>	<b>36</b>
3.2.1 Hliníková slitina jako základní materiál.....	36
3.2.2 Ocelový plech s povrchovou úpravou .....	38
3.2.3 Přídavný materiál pro svařování.....	40
3.2.4 Elektrodotový potenciál kovů.....	41
<b>3.3 Svařování připravených materiálů metodou CMT.....</b>	<b>42</b>
3.3.1 Metalografické hodnocení svařených vzorků.....	45
<b>3.4 Korozní odolnost testovaných CMT spojů.....</b>	<b>47</b>
3.4.1 Příprava svařených vzorků .....	47
<b>3.5 Destruktivní zkouška tahem.....</b>	<b>49</b>
3.5.1 Zkušební zařízení .....	49
3.5.2 Použité vztahy pro vyhodnocení destruktivní zkoušky tahem .....	50
<b>3.6 Vyhodnocení korozní odolnosti a změn mechanických vlastností.....</b>	<b>52</b>
3.6.1 Zkouška tahem základního materiálu AlMg3 .....	52
3.6.2 Zkouška tahem základního materiálu – ocel DX51D + AZ150.....	54
3.6.3 Vlastnosti CMT svarového spoje před korozní zkouškou.....	55
3.6.4 Vlastnosti CMT svarového spoje po 10 dnech v prostředí solné mlhy.....	60
3.6.5 Vlastnosti CMT svarového spoje po 20 dnech v prostředí solné mlhy.....	62
3.6.6 Vlastnosti CMT svarového spoje po 30 dnech v prostředí solné mlhy.....	64
3.6.7 Vlastnosti CMT svarového spoje s povrchovou ochranou organickým nátěrem po 30 dnech v prostředí solné mlhy.....	66
3.6.8 Totální korozní degradace CMT svarového spoje .....	68
3.6.9 Celkové porovnání vypočtených hodnot .....	69
<b>4 DISKUZE VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>71</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>73</b>
<b>POUŽITÁ A DOPORUČENÁ LITERATURA.....</b>	<b>74</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK .....</b>	<b>79</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>82</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>84</b>

## ÚVOD

Svařování je v současnosti jedna z nejdůležitějších strojírenských technologií ve výrobě. Podstatně ovlivňuje jakost řady výrobků a výrobní náklady, a proto má klíčové postavení mezi průmyslovými technologiemi. Zpracovává největší objem kovových materiálů (až 25 %). Velmi významné je svařování i proto, že pro strojírenskou výrobu nejsou nutná investičně náročná zařízení velkých rozměrů, která jsou potřebná pro ostatní klasické výrobní technologie, jako je slévání a tváření kovů. Svařování je průřezový obor, jeho postupy se používají prakticky ve všech oblastech průmyslu a služeb, kde je značná potřeba spojování materiálů, např. výroba dopravních prostředků, zpracování kovů, budování a údržba dopravní a jiné infrastruktury, stavebnictví a podobně.

K hlavním požadavkům při realizaci moderních konstrukčních řešení patří především spojování rozdílných a obtížně spojitelných materiálů; vývoj a aplikace svařovacích procesů pro nové konstrukce a kombinace materiálů; použití kvantifikovaných koncepcí hodnocení houževnatosti materiálů v kombinaci s novými nedestruktivními metodami NDT, které umožní bezporuchový provoz. Svařování zásadně změnilo většinu průmyslové výroby a některá odvětví si bez něho nelze ani představit. Praktické příklady použití nových řešení představuje svařování vysoce pevných plechů ve výrobě automobilů, tlakového potrubí z oceli s požadavkem na vysokou pevnost, spojování oceli s hliníkem, použití třecích svařovacích procesů pro velké průřezy. Svařování také ovlivňuje bezpečnost, provozní spolehlivost a životnost mnoha konstrukcí, zařízení a spotřebních výrobků. Kvalita svarových spojů však nezávisí jen na volbě materiálu a konstrukci, ale zejména na podmínkách, za kterých se tvorba svaru uskutečňuje a také na zkušenostech, schopnostech a morální odpovědnosti svářečských pracovníků. Proto jsou svařování a příbuzné technologie ošetřeny řadou legislativních nařízení a dalších technických norem.

Přestože se svařování zdá být probádanou oblastí, kde už toho příliš vymyslet nelze, neustále dochází k hledání a vývoji nových metod. Pokrok tedy postupuje velice rychle. Potřeba spojování velmi různorodých materiálů s sebou nese vznik nových i modifikaci tradičních metod svařování a pájení. Požadavky na vysokou produktivitu svařování či pájení a zároveň na jakost spojů vyvolávají snahu o omezování vlivu lidského faktoru. Příkladem velkého pokroku v technologii svařování je tzv. CMT proces, který kromě dalších aplikačních oblastí umožňuje spojit ocelový a hliníkový materiál elektrickým obloukem. Tato perspektivní metoda je v diplomové práci podrobně analyzována pro pochopení podstaty a principu včetně hodnocení kvality CMT spojů.

## **1 CÍL PRÁCE**

Primárním cílem diplomové práce na téma: Analýza jakosti „Cold Metal Transfer“ svarů, je kvalitativní analýza svarového spoje různých materiálů při použití moderní technologie svařování CMT. Hlavním účelem je monitoring poklesu mechanické pevnosti svarového spoje vlivem korozní degradace v agresivním prostředí solné mlhy.

Parciálním cílem práce je metalografická analýza zkoušeného materiálu včetně prvkového složení v oblasti svarového spoje.

Dalším záměrem je řízená korozní degradace solnou mlhou a následná analýza korozních produktů na optickém mikroskopu.

Úkolem třetí části experimentu je destruktivní zkouška tahem s konečnou komparací původního a korodovaného vzorku.



## 2 TECHNOLOGIE CMT („COLD METAL TRANSFER“)

Počátky vývoje procesu CMT se objevují v roce 1991. Od této doby se rakouská firma Fronius, kde jedinečná technologie postupně vznikala, zabývá termickým spojováním oceli a hliníku. Dalším mezníkem je rok 1997, kdy bylo vyvinuto zapalování bez rozstříku označované zkratkou SFI (**S**patter **F**ree **I**gnition). Zde bylo poprvé použito v rámci procesu MIG střídavého dopředného a zpětného posuvu drátu, i když zatím pouze ve startovní fázi svařovacího procesu. [31] Začátek vývojové cesty vedoucí přímo k procesu CMT spadá do roku 1999, kdy se objevil požadavek na kontrolované deponování (odkapávání) pájky na dotekový terčik žárovky. V roce 2002 pak již byly známy možnosti i přednosti procesu CMT a započala poslední fáze vývoje směrem k sériové využitelnosti. [36, 34]

### 2.1 Společnost Fronius od založení po současnost

V roce 1945 založili Günter Fronius a jeho manželka rodinný podnik Fronius International GmbH v Pettenbachu. Zakladatel se ve svém podnikání zabýval vývojem nabíjecích systémů akumulátorů a po určité době zaměstnával 15 lidí. V polovině 60. let 20. století začala společnost vyrábět elektroniku a svařovací hořáky. Firmě se dařilo, a tak byla v roce 1972 výroba přestěhována do nově otevřených míst v Thalheimu a nedalekém Welsu. O osm let později předal Günter Fronius vedení podniku svým dětem a od té doby se společnost více zaměřila na expanzi a zahraniční spolupráci. V roce 1993 se novým zaměřením stala solární elektronika. V následujících letech byly otevřeny nové pobočky v Rakousku, v Pettenbachu, kde byla společnost založena, a také v Sattledtu. Proniknutím na americký trh v letech 2002 až 2007 firma získala oporu i mimo Evropu. [10]

V současné době má podnik více než 3300 zaměstnanců po celém světě a zaměřuje se na tři výrobní oblasti:

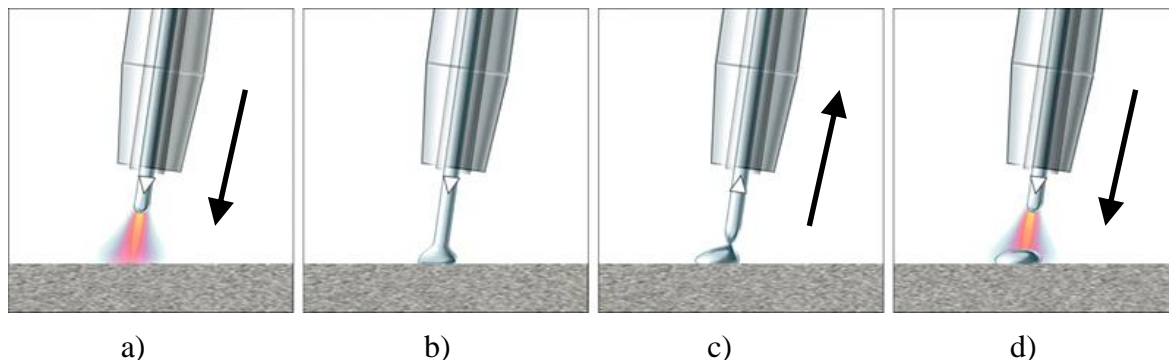
- **svařovací technika,**
- **nabíjecí systémy akumulátorů,**
- **solární elektronika.**

V České republice působí Fronius od roku 1991. O rok později byl otevřen výrobní závod v Českém Krumlově, kde se také nachází sídlo firmy. Zde se vyrábí transformátory pro zařízení Fronius. V Praze vyrůstá nové obchodní centrum pro všechny tři divize.

Díky 20 mezinárodním společnostem, prodejním partnerům a zastoupením ve více než 60 zemích dosahuje společnost podílu exportu ve výši zhruba 92 %. [9]

## 2.2 Princip CMT procesu spojování

CMT je zkratka anglického označení **Cold Metal Transfer** („přenos studeného kovu“). Jedná se v podstatě o proces MIG/MAG, který pracuje, na rozdíl od běžných jiných procesů, s velmi **nízkým přísunem tepla**. Tato technika je založená na využití metody uvolňování kapky využívající střídavého dopředného a zpětného pohybu drátu.



Obr. 1 Pohyb drátu v průběhu CMT procesu [7]

Samotný spojovací proces probíhá v těchto fázích:

1. Během fáze hoření oblouku je přiváděn přídavný materiál do tavné lázně (obr. 1a).
2. Při vnoření přídavného materiálu do tavné lázně zhasne oblouk, svařovací proud prudce poklesne (obr. 1b).
3. Zpětný pohyb drátu podporuje během zkratu uvolnění kapky, zkratový proud je udržován na nízké úrovni (obr. 1c).
4. Směr pohybu drátu se obrátí a proces začne znovu (obr. 1d). [7]

Svařování CMT tavící se elektrodou v ochranné atmosféře kombinuje horkou fázi hoření oblouku, kdy se taví drát i základní materiál se studenou částí procesu, při kterém se po kontaktu nataveného drátu s tavnou lázní snižuje intenzita proudu a drát se vrací zpět do hubice. Tím je podpořeno oddělení kapky bez rozstříku a s nízkou hodnotou vneseného tepla do svaru. Celý proces je digitálně řízený a zpětný pohyb drátu probíhá dnes až 130krát za sekundu. Procesor se zpětnou vazbou udržuje konstantní vzdálenost a rozměr svaru bez ohledu na podmínky svařování. CMT umožňuje zajistit požadavek nízkého tepelného zatížení, dobré přemostitelnosti spáry a co možná nejmenší tepelné deformace zejména při spojování hliníku a ušlechtilých ocelí tak, aby se vyloučily nároky na následné opracování. Požadavky, které klade průmysl na spojovací technologie, jsou stále vyšší, zvláště pak v oboru termického spojování na oblast tenkých plechů (do 2 mm). [25]

## 2.3 Svařovací systém

V principu odpovídá svařovací systém CMT hardwarové sestavě MIG/MAG systému na nejnovější technické úrovni, kde je zavedená velmi rychlá komunikace mezi jeho jednotlivými komponentami. Svařování se provádí výhradně za použití plně digitalizovaných inverterových svařovacích zdrojů s respektováním specifických požadavků.

Pro správnou funkci je důležitý především vysoce dynamický pohyb střídavě vpřed a zpět, který je drátu udělován přímo na svařovacím hořáku střídavým servomotorem. Předpokladem absolutně kontrolovatelného přechodu materiálu je vysoká frekvence pohybu a mimořádná preciznost. Proto je posuv drátu v hořáku navržený pouze na rychlost, nikoli na vysoké tažné síly. Druhý pohyb – kontinuální přísun drátu, je zajištěn silnějším hlavním podavačem. Ten je z principu zatížený setrvačností a nedokázal by směr tak rychle měnit. Pro vyrovnání těchto dvou pohybů slouží vyrovnávací vložka, tzv. absorbér, který je umístěný v hadici pro transport drátu a krátkodobě vyrovnává (absorbuje) rozdíly v délce drátu mezi oběma posuvy. [8]



Obr. 2 Svařovací systém CMT pro automatizované i ruční procesy [7]

Popis obrázku 2: 1 – zdroj svařovacího proudu  
2 – chladič modul  
3 – podavač drátu

4 – vyrovnávací vložka (absorbér)  
5 – svařovací hořák  
6 – kontaktní systém

### **2.3.1 Jednotlivé komponenty svařovacího systému**

Pro digitální svařovací systémy existují vhodná periferní zařízení, jejichž funkce jsou vzájemně sladěny. Umožňují pokrýt celou oblast od ručního svařování až k plně automatizovaným procesům. Toto vybavení začíná u svařovacích hořáků, pokračuje přes hadicová vedení, chladicí moduly až k dokumentaci dat a komunikačním rozhraním. Vybavení rovněž zahrnuje možnost výkonových svařovacích procesů.

#### ***Digitálně řízený zdroj svařovacího proudu MIG/MAG***

Plně digitalizovaný, mikroprocesorem řízený invertorový svařovací zdroj zajišťuje přesnost svařovacího procesu, reprodukovatelnost a vynikající svařovací vlastnosti.

#### ***Chladicí modul***

Robustní chladicí modul je přizpůsoben modulární konstrukci celého svařovacího systému. Zajišťuje optimální chlazení svařovacího hořáku vodou.

#### ***Podavač drátu***

Podavač drátu se čtyřkladkovým pohonem slouží pro nepřetržitý a hladký transport přídatného materiálu z cívky s drátem do svarové lázně.

#### ***Vyrovnávací vložka***

Vyrovnávací vložka odpojuje přední pohon drátu od zadního, a tím přispívá k hladkému vytahování drátu z bowdenu téměř bez vynaložení síly. V určitém časovém úseku dochází k tomu, že se motor v pohonné jednotce hořáku otáčí zpět a motor v podavači vpřed, takže se oba motory otáčejí proti sobě. V tomto případě může drát dosedat na vnější (horní) konturu a při opětovné změně pohybu na vnitřní (spodní) konturu vyrovnávací vložky. [7]



*Obr. 3 Vyrovnávací vložka k oddělení obou posuvů drátu [6]*

### ***Svařovací hořák Robacta Drive CMT***

Integrovaný robotizovaný svařovací hořák vybavený vysoce dynamickým servomotorem AC bez přídatného převodu pohybuje svařovacím drátem dopředu a dozadu až 130krát za sekundu. Zajišťuje konstantní přítlak a přesné podávání drátu.



*Obr. 4 Svařovací hořák Robacta Drive CMT s dynamickým servomotorem [6]*

### ***Kontaktní systém Contec („Contact technology“)***

Dvě pohyblivé poloskořepiny udržují kontaktní plochy a síly mezi kontaktním systémem a svařovacím drátem přesně v definované oblasti. [7] Kontaktní trubice se opotřebovává rovnoměrně, nežádoucí a těžko předvídatelné účinky se minimalizují. Systém Contec je vhodný pro všechny průměry a materiály drátu.

## **2.4 Hlavní oblasti využití procesu CMT**

Pro CMT procesy existují tři hlavní aplikační oblasti:

- spojování oceli a hliníku elektrickým obloukem,
- práce s tenkými plechy (hliník, uhlíková i ušlechtilá ocel),
- bezroztříkové MIG-pájení.

### **2.4.1 Spojování ocelových a hliníkových částí elektrickým obloukem**

Obecně nelze obloukovým svařováním spojovat kovy, jejichž fyzikální vlastnosti, jako je teplota tání, koeficient roztažnosti nebo elektrochemický potenciál, se výrazně liší. Díky svařovací technologii CMT lze spojování oceli s hliníkem provádět pomocí elektrického oblouku. Její princip spočívá v tom, že na straně hliníku jde o svarový spoj, u ocelového plechu o spoj pájený. Předností tohoto způsobu, nazývaného také „**spojování za studena**“, je to, že probíhá při mnohem nižších teplotách než při klasickém svařování, nedochází k deformacím a výsledný spoj není nutné dopracovávat. [34]

Spojení uvedenou metodou lze provést za podmínek, když ocelové plechy jsou pozinkované, hliníkové plechy musí pocházet z materiálových řad AW5xxx nebo 6xxx a jako svařovací, případně pájecí materiál je předepsána slitina AlSi3Mn1. Zinková vrstva na ocelovém plechu působí jako tavidlo a smáčí ocel. Má být co nejtenčí, maximálně 10 µm. Pak je pevnost spoje tak vysoká, že svar při tahových zkouškách vydrží a dojde k přetržení hliníkového plechu.

#### **2.4.2 Svařování tenkých plechů**

V mnoha průmyslových oborech, kde se zpracovávají tenké plechy, má velký význam hmotnost svařovaných dílů. Příkladem může být automobilový průmysl, který se snaží stavět automobily pokud možno lehké, aby byly rychlejší a spotřebovaly méně paliva. Tepelné zatížení se musí udržovat na nízké úrovni speciálně při spojování plechů proto, aby se spojily, nikoliv roztavily. Dosud se při svařování tenkých plechů natupo musela používat na druhé straně obrobku podložka, která bránila propálení svaru. V důsledku toho, že se proces CMT vyznačuje velice nízkým tepelným zatížením, je nyní možné s jeho využitím svařovat natupo hliníkové plechy do tloušťky až 0,4 mm bez použití podložky. Tím odpadají časové nároky i náklady na náročné přípravné i dokončovací práce.

#### **2.4.3 Bezrozstřikové MIG-pájení**

Hlavní předností MIG-pájení pozinkovaných plechů je to, že se taví pouze přídavný, a nikoliv základní materiál. Běžné MIG-pájení je zatížené pouze slabým rozstříkem, avšak určité množství rozstříků se může občas objevit. Kromě známých materiálů je možné téměř bez rozstříku svařovat s využitím odpovídající charakteristiky také hořčák. [34]

#### ***Efektivní metoda CMT Braze+ pro pájení materiálů***

Společnost Fronius ve spolupráci s oddělením technologického vývoje společnosti AUDI AG zdokonalila metodu pájení CMT. Vzhledem k extrémně úzké kónické konstrukci nově vyvinuté plynové hubice vychází ochranný plyn vyšší rychlostí a způsobuje seškracení oblouku, takže je možné pájet rychleji. Pájený šev je přitom mimořádně plochý a čistý. Použití metody CMT Braze+ je vhodné zejména tam, kde záleží na optice švu. Z toho vyplývají jedinečné výhody:

- **vyšší rychlost pájení ( $3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ),**
- **plochý, čistý svar dokonalého vzhledu,**
- **až o 60 % méně ochranného plynu. [12]**

## **2.5 Přenos kovu v elektrickém oblouku**

Přenos kovu v oblouku patří mezi základní charakteristiky metody svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou a závisí především na svařovacích parametrech, tj. proudu a napětí. [3, 22] Významně však tento charakter ovlivňuje složení ochranného plynu, druh přídavného materiálu a technika svařování.

### **2.5.1 Zkratový přenos kovu (krátký oblouk)**

Zkratový přenos se uplatňuje v rozsahu svařovacího proudu od 60 A do 180 A při napětí 14 V až 22 V. Při zkratovém způsobu přenosu dochází k přerušování oblouku zkratem, při kterém se odděluje část kovu elektrody. Nejprve se drát dotkne povrchu svarové lázně a vlivem krátkého spojení začne elektrický proud exponenciálně stoupat. Napětí přitom klesne na minimální hodnotu. V dalším okamžiku je drát ohříván odporovým teplem, které přispívá ke snadnému oddělení kapky při špičkovém proudu 250 A až 300 A. Oddělení kapky při vysoké intenzitě proudu je hlavní příčinou rozstříku kovu při zkratovém přenosu.

Zkratový přenos je používán v oblasti svařování tenkých plechů, kořenových vrstev tupých svarů, překlenutí širších mezer a pro svařování vysokolegovaných ocelí.

### **2.5.2 Přechodový oblouk (někdy označován jako kapkový)**

Tento typ přenosu vzniká při průměrných hodnotách oblouku. Napětí se pohybuje v rozmezí 22 V až 28 V a proud od 190 A do 300 A. Při přenosu se konec elektrody vlivem vysokého proudu nataví do velké kapky. Reakčním tlakem par se kapka vydouvá mimo osu drátu a oblouk putuje po roztaveném konci elektrody, až magnetické síly přeruší můstek. Kapka je vymrštěna do svarové lázně vysokou rychlostí, ale s malou frekvencí (5 až 40 kapek za sekundu).

Lze jej využít pro svařování středních tlouštěk, ale z důvodu hrubé svarové housenky a výraznému rozstříku se nedoporučuje používat.

### **2.5.3 Oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem**

Sprchový přenos je typický pro hodnoty svařovacího proudu od 200 A do 500 A při napětí 28 V až 40 V. Účinkem magnetického pole jsou tvořící se drobné kapky ustříženy a jsou osově urychleny ve vysoké frekvenci 150 Hz až 350 Hz směrem do tavné lázně. Elektrický oblouk nezhasíná a do základního materiálu se přenáší velké množství tepla. Proto je sprchový přenos charakteristický velkou hloubkou závaru, klidným hořením oblouku

a vysokým výkonem navaření, které je vyšší než u zkratového přenosu. Povrch svarové housenky je hladký a čistý s plynulým přechodem do základního materiálu a bez rozstříku.

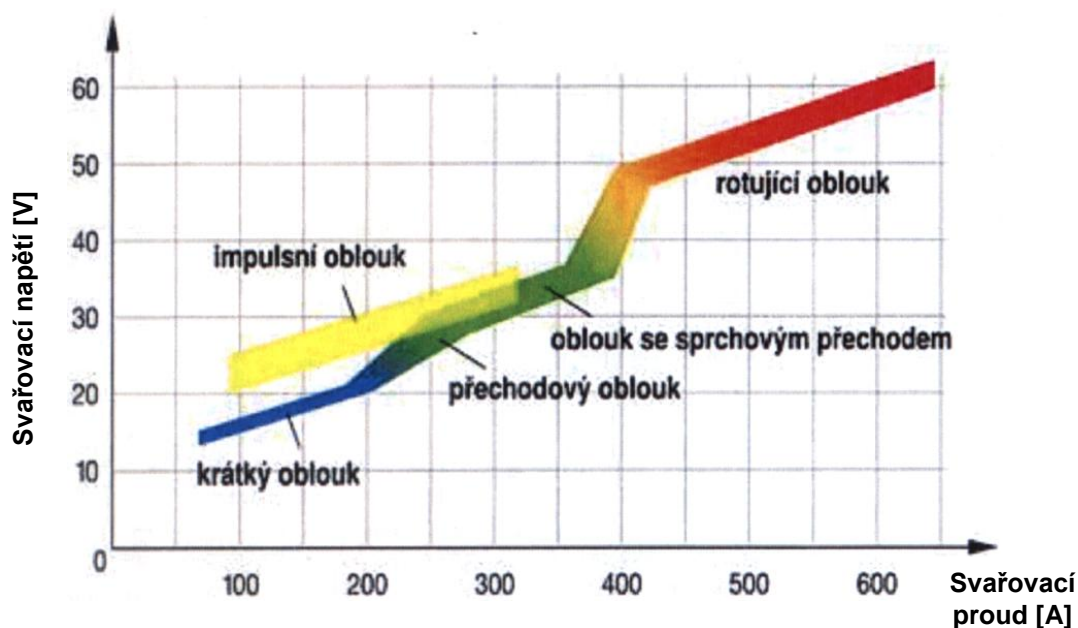
Sprchový přenos je využitelný pro výplňové housenky svarů středních a velkých tlouštěk. Svařování se provádí ve vodorovné poloze a omezeně v polohách.

#### 2.5.4 Impulzní bezzkratový přenos kovu

Parametry svařování impulsním proudem překrývají oblast zkratového i sprchového přenosu. Impulzní forma přenosu kovu obloukem, jehož průběh je řízen elektronickou cestou, má pravidelný cyklus daný frekvencí amplitudy impulzního proudu. Základní proud je nízký, od 20 A do 50 A, jeho funkce je udržení ionizace sloupce oblouku, a tím i vedení proudu. Impulzní proud, který se nastavuje, je tvarově i časově řízený a v konečné fázi jeho amplitudy je zajištěno oddělování kapky přídavného materiálu. V celém průběhu amplitudy impulzního proudu hoří oblouk, který ohřívá svarovou lázeň i přídavný materiál.

#### 2.5.5 Oblouk s rotujícím přenosem kovu

Tento typ přenosu kovu probíhá při vysokých proudech 450 A až 750 A, napětí na oblouku je až 65 V a větší volná délka drátu nad 20 mm. Vlivem vysoké hodnoty intenzity proudu a velké volné délce je drát odporovým teplem přehříván téměř na teplotu tavení. Intenzivním silovým magnetickým polem je konec drátu ve vysoce plastickém stavu roztáčen a odtavující kapky kovu vytváří kuželovou plochu. Rotující oblouk umožňuje velmi dobrý závar do boků svarové plochy a vytváří se hluboký a široký svar s výrazně miskovitým profilem. [3]



Obr. 5 Oblasti přenosu kovu v elektrickém oblouku [23]



## 2.6 Ochranné plyny

Při svařování procesem CMT se používají aktivní a inertní ochranné plyny podobně jako u metody MIG/MAG. Na druhu ochranného plynu závisí hloubka závaru, šířka svaru, povrch svaru, případně nebezpečí vzniku vrubů. Vhodnou volbou ochranného plynu se dosáhne nejen dobrých mechanických vlastností svaru a jeho vhodné metalurgické struktury, ale zvýší se i rychlost svařování a omezí se rozstřík kovu na minimum. [30] To může přinést velký ekonomický efekt.

### 2.6.1 Inertní ochranné plyny

Nejrozšířenějším inertním plynem je argon, další alternativou ochrany oblouku je helium a směsi argonu, helia a případně jiného plynu (kyslík, oxid uhličitý).

**Argon** má dobrou schopnost ionizovat a podporuje klidný a stabilní oblouk. Vytváří široký svar s primárním hlubokým průvarem a sekundárním širokým závarem. Do čistého argonu se přidávají další plyny, a tím se mění tvar závaru. Při svařování lehkých kovů se s výhodou přidává helium, a tak se dosahuje většího závaru a sníží se poréznost svaru.

**Helium** je lehčí než vzduch, proto se musí dbát na to, aby při svařování ve vodorovné poloze shora správně působilo. Z tohoto důvodu je spotřeba plynu při použití helia až třikrát větší. „Heliový oblouk“ je při stejném proudu a délce oblouku teplejší než při použití argonu. Helium je velmi drahý plyn, proto se čistý používá jen při MIG svařování.

Použití **směsi argon-helium** je vhodné při svařování silného hliníku a mědi. Používají se také směsi argonu a helia (přibližně 30 %) s 1 % O<sub>2</sub> nebo 1 % až 3 % CO<sub>2</sub>. A to v případě, že klademe velké požadavky na rychlost svařování a na povrch svarů, zejména u chromniklových ocelí a částečně u ocelí legovaných niklem. [30]

### 2.6.2 Aktivní ochranné plyny

Jako aktivní plyn se používá **oxid uhličitý**. Často jsou používány směsné plyny CO<sub>2</sub> s hlavním podílem argonu a přísady kyslíku. Směsné plyny se používají jen pro svařování ocelí.

Při použití **směsi argon-oxid uhličitý** dochází ve srovnání s čistým argonem k hlubšímu závaru, menší citlivosti ke vzniku pórů a tvoří se více strusky. Jestliže jsou správně zvoleny parametry, lze svařovat zkratovým, sprchovým i impulzním přenosem s malým rozstříkem. Použití Ar/CO<sub>2</sub> směsného plynu je zvláště vhodné pro svařování tenkých plechů. [30]

K aktivním ochranným plynům dále patří **směs argon-kyslík**. Kyslík v oblouku způsobuje sprchový přenos kovu, a to i při nízkém svařovacím proudu. Obsah kyslíku vede k široké, pouze mírně převýšené svarové housence s povrchem ve tvaru jemných šupinek.

Třísložkové směsné plyny **argon-oxid uhličitý-kyslík** jsou vhodné pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Na austenitické chromniklové oceli s korozní odolností lze použít tyto směsné plyny pouze při obsahu CO<sub>2</sub> menším než 5 %. V těchto směsích se spojují výhody Ar/CO<sub>2</sub> a Ar/O<sub>2</sub>. Směsi Ar/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> jsou při zkratovém procesu velmi vhodné pro svařování tenkých plechů a tam, kde je potřeba překlenout větší spáry.

### 2.6.3 Značení ochranných plynů

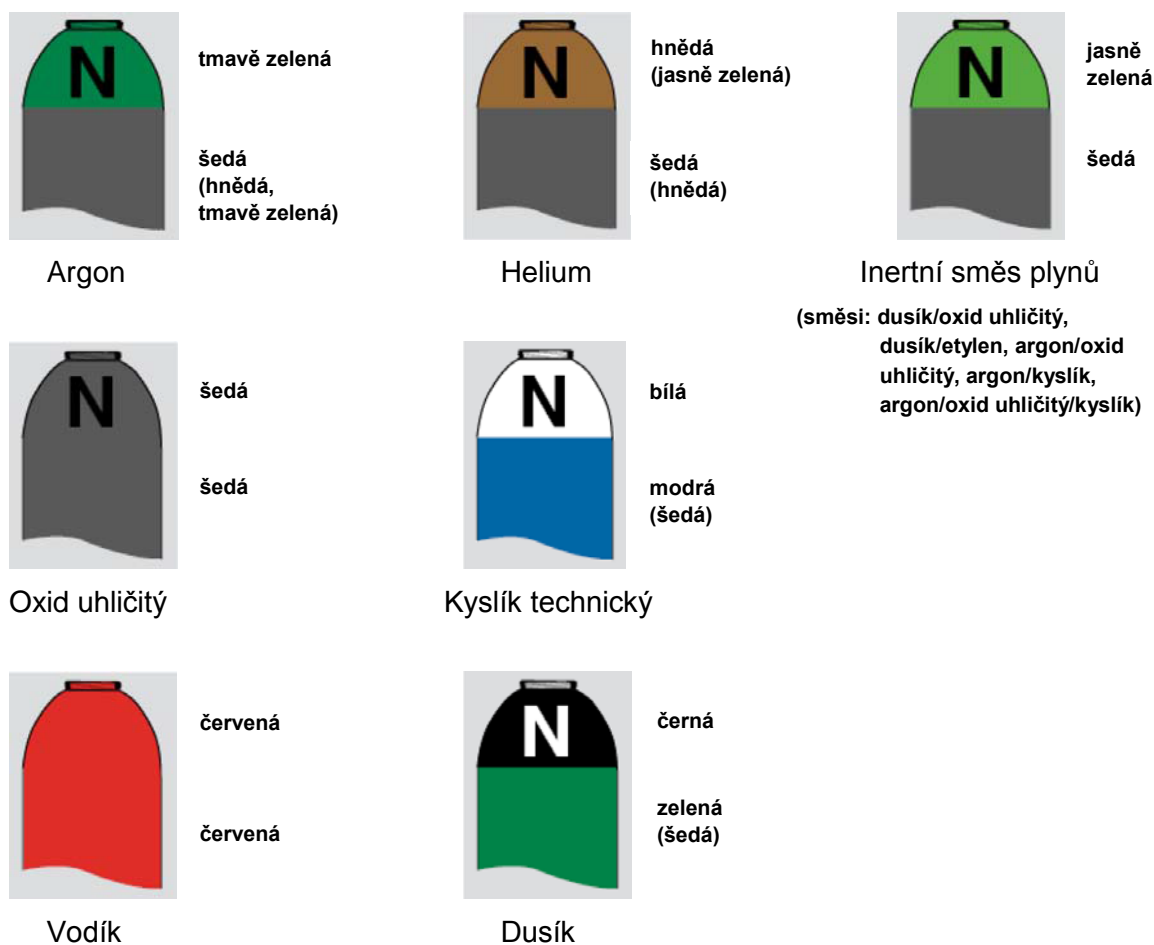
Označování ochranných plynů pro svařování se řídí podle normy ČSN EN ISO 14175. Vlastnosti plynu jsou rozděleny do skupin podle písmen, která mohou být doplněna čísly pro jemnější rozdělení podle procentuálního objemu plynu v dané skupině. [4]

Tab. 1 Rozdělení ochranných plynů dle chemického charakteru [3]

Označení		Prvky v procentuálním objemu						Typické použití	Poznámka
Skupina	Id. číslo	Oxidační		Inertní		Redukční	Nereagující		
		CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	He	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
R	1			zbytek		0 až 15		WIG, PAW (PAC), ochrana kořene svaru	Redukční
	2			zbytek		0 až 35			
I	1			100				MIG, WIG, PAW	Inertní
	2				100				
	3			zbytek	0 až 96				
M1	1	0 až 5		zbytek	0 až 5			MAG	Mírně oxidační
	2	0 až 5		zbytek					
	3		0 až 3	zbytek					
	4	0 až 5	0 až 3	zbytek					
M2	1	0 až 25		zbytek				MAG	Mírně oxidační
	2		3 až 10	zbytek					
	3	0 až 5	3 až 10	zbytek					
	4	0 až 25	0 až 8	zbytek					
M3	1	25 až 50		zbytek				MAG	Vysoce oxidační
	2		10 až 15	zbytek					
	3	5 až 50	8 až 15	zbytek					
C	1	100						MAG	Vysoce oxidační
	2	zbytek	0 až 30						
F	1						100	PAC, ochrana kořene svaru	Nereagující
	2					0 až 50	zbytek		

## 2.6.4 Lahve na ochranné plyny

Způsob barevného označování lahví na plyny odpovídá evropské normě ČSN EN 1089-3. Barevné značení je předepsáno pro horní zaoblenou část lahve. [27] Pokud je normou vyžadováno označení dvěma barvami, je provedeno pruhy na horní zaoblené části. Válcová část lahve může mít barvu libovolnou kromě lahví pro medicínální použití, jejichž válcová část je vždy bílá. Velké písmeno „N“ upozorňuje na barevné značení podle nové normy a je na horní zaoblené části provedeno dvakrát (na protilehlých stranách lahve).



Obr. 6 Barevné značení vybraných průmyslových plynů pro svařování [27]

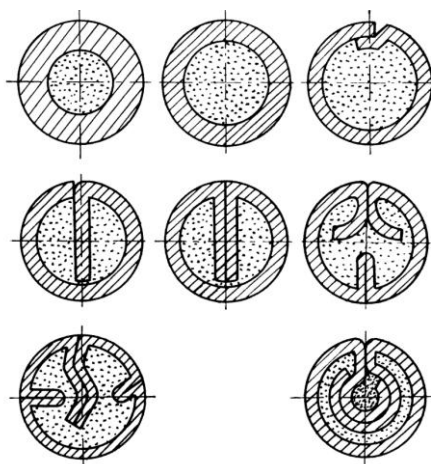
## 2.7 Přídavné materiály

Všechny základní a přídavné materiály známé ze svařování metodou MIG/MAG je možné zpracovávat procesem CMT. Používají se přídavné materiály ve formě plného drátu nebo plněného drátu (trubičkové elektrody) vhodného chemického složení a operativních svařovacích vlastností. Dráty jsou navinuté na drátěných nebo plastových cívkách o běžné hmotnosti 15 kg. Pro robotizovaná pracoviště se dodávají ve svitku baleném v lepenkovém balení hmotnosti až 200 kg.

**Drátové elektrody** plného kruhového průřezu pro svařování ocelí se vyrábí v průměrech 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0 a 2,4 mm. Nejčastěji používané jsou od 0,8 mm do 1,6 mm.

Podle použití se **trubičkové elektrody** dělí na elektrody pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí (s kovovou, rutilovou nebo bazickou náplní) a na elektrody pro svařování vysokolegovaných ocelí (s rutilovou náplní). Vyrábí se v průměrech 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0; 2,4 mm. Plněné dráty se podle způsobu výroby rozdělují do dvou skupin:

- bezešvé plněné dráty – svařované,
- tvarově uzavřené plněné dráty. [25]



*Obr. 7 Rozdělení trubičkových elektrod podle způsobu výroby [25]*

Na trhu je velký výběr přídavných materiálů od různých výrobců. Pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí v ochranné atmosféře aktivním plynem je důležité, aby byl v materiálu drátu přítomen mangan a křemík. Tyto prvky zajišťují dezoxidaci svarové lázně při použití aktivní ochranné atmosféry. Oba prvky se slučují s kyslíkem (buď ze směsného plynu, nebo z rozkladu oxidu uhličitého) a vzniklé lehce tekuté oxidy se dostávají na povrch svaru. Po ochlazení zůstávají jako tzv. „skelná“ struska na svarové housence. [30]

### **2.7.1 Svařování hliníku a jeho slitin**

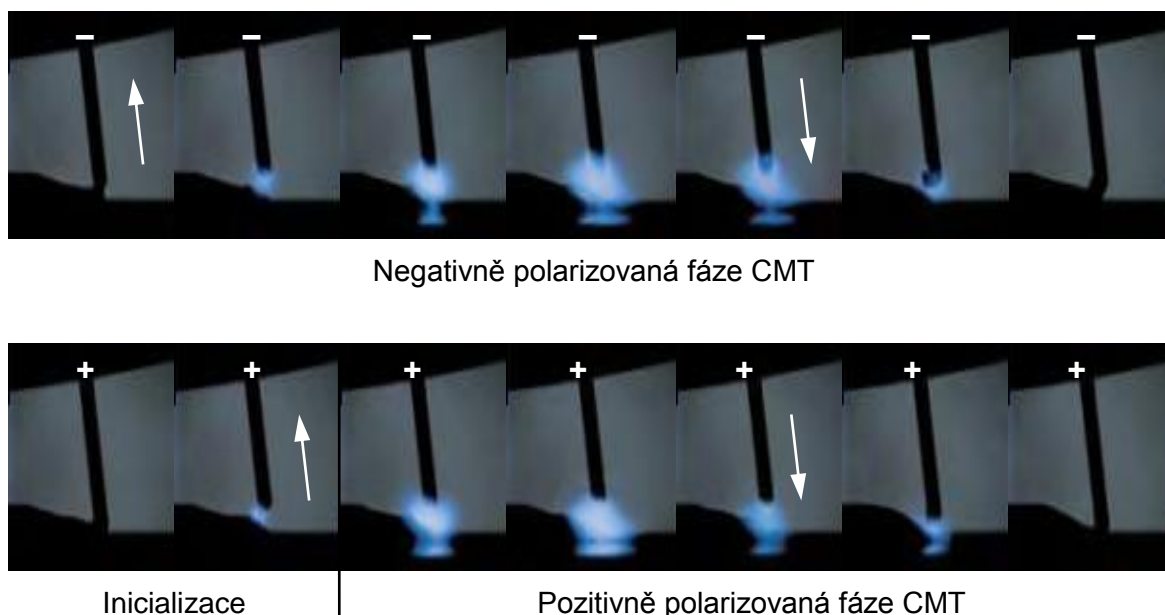
Hliník se svařuje převážně přídavnými materiály stejného nebo obdobného složení. Aby se zabránilo tvorbě trhlin, používají se přídavné materiály typu AlMg nebo AlMgMn i pro vytvrditelné materiály. [29] Přísady AlSi vykazují menší pevnost, mají však velmi příznivé chování při svařování. Kromě toho jsou důležitá i kritéria odolnosti proti korozi a následné povrchové úpravy. Drátové elektrody se používají nejvíce o průměrech 1,2 mm a 1,6 mm.

## 2.8 Svařovací režimy procesu CMT

Firma Fronius ještě více zdokonalila inovativní proces CMT a představila další tři nové režimy: CMT Advanced, CMT Pulse a CMT Advanced Pulse.

### 2.8.1 CMT Advanced

Oproti klasickému procesu nastupuje při CMT Advanced významný efekt, kterým je změna polarity oblouku. Za současného cyklického zatahování drátu po každém oddělení kapičky roztaveného přídavného materiálu na konci drátu se při tomto postupu střídavě mění polarita drátové elektrody z kladné na zápornou a naopak. [5] Změna probíhá vždy ve fázi zkratu, aby bylo usnadněno opětovné zapálení oblouku.

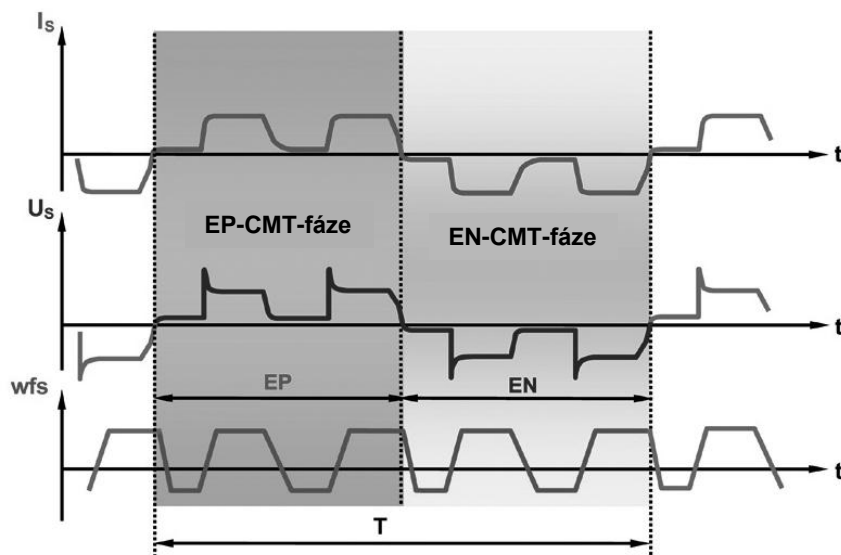


Obr. 8 CMT Advanced – změna mezi negativními a pozitivními cykly [13]

Zásadní přínos CMT Advanced spočívá v tom, že při záporné polaritě nataví širší katodová skvrna konec elektrody. Tím se utvoří větší kapka na konci drátu, která přechází do svarové lázně za poklesu aktuálního proudu a napětí, to znamená bez zvýšeného tepelného příkonu. Přejít do svarové lázně probíhá pouze díky nízkému povrchovému napětí tekuté fáze roztaveného kovu.

Větší kapičky, které utváří na konci drátu záporná polarita, přispívají ke zvýšení odtavného výkonu, což dále příznivě ovlivňuje lepší přemostitelnost svarové mezery, například mezi tenkými plechy bez rizika propálení. Uživatel si může libovolně nastavit počet po sobě jdoucích kladných nebo záporných proudových pulzů a fází podle

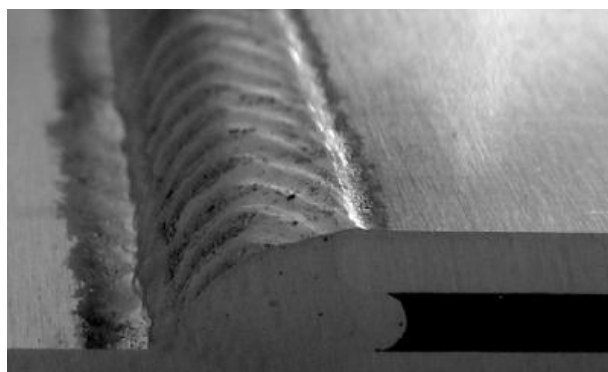
požadavků na každou konkrétní synergickou charakteristiku. Tímto způsobem lze svařovat mimo jiné oceli o vysoké pevnosti s dostatečným výkonem odtavení, ale s nízkým tepelným příkonem. [5]



Obr. 9 Průběh svařovacího proudu ( $I_s$ ), svařovacího napětí ( $U_s$ ) a rychlosti podávání drátu v závislosti na dvou pozitivních a negativních fázích [5]

CMT Advanced rozšiřuje možnost u velmi tenkých plechů provádět svarové i pájené spoje bez nežádoucích rozstříků. Vyšší odtavný výkon umožňuje také zvýšení svařovací rychlosti. Další z hlavních výhod je to, že zvýšení rychlosti svařování u CMT a modifikované CMT Advanced přitom nemá vliv na stabilitu oblouku, což umožňuje významně snížit množství emisí vznikajících při svařování. Výsledkem CMT Advanced procesu je tedy:

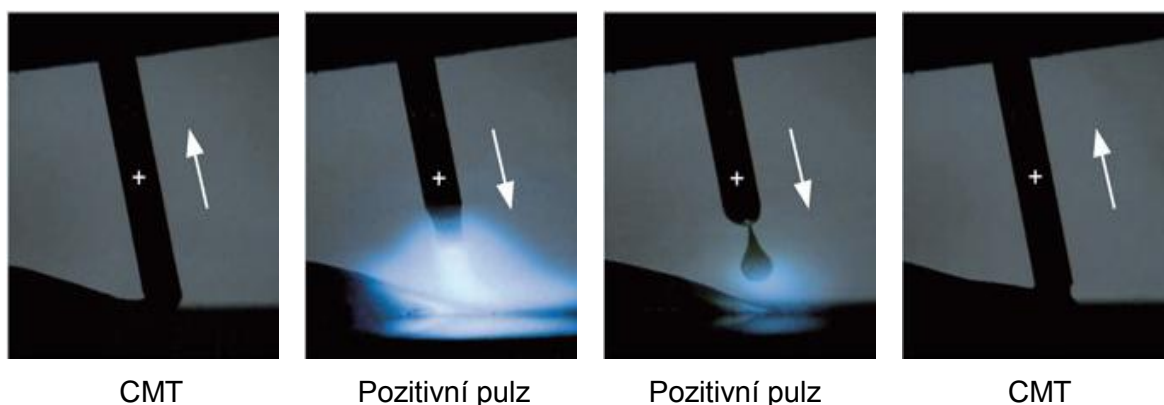
- nízký vnos tepla,
- vyšší přemostitelnost svarových mezer,
- zvýšení odtavného výkonu až o 60 %. [33, 7]



Obr. 10 Překlenutí mezery 2 mm na přeplátovaném spoji mezi dvěma plechy AlMg3 [5]

## 2.8.2 CMT Pulse

Zde se jedná o variaci procesů, tedy o kombinaci CMT s pulzním obloukem. Výhody obou procesů se navzájem spojily. Výsledkem je výkonný pulzní proces se stabilitou oblouku. U tohoto procesu lze ideálně a individuálně sladit dva druhy přechodu materiálu, například jednou zkratový přechod CMT a dvakrát bezdotykový pulzní přechod nebo jednou CMT a třikrát pulz, to záleží na konkrétním použití. Řízení se vždy provádí pomocí CMT. Charakteristickou vlastností procesu je optimalizované chování návaru při současně maximální stabilitě procesu a pro CMT typické cílené vnesení tepla. [15]



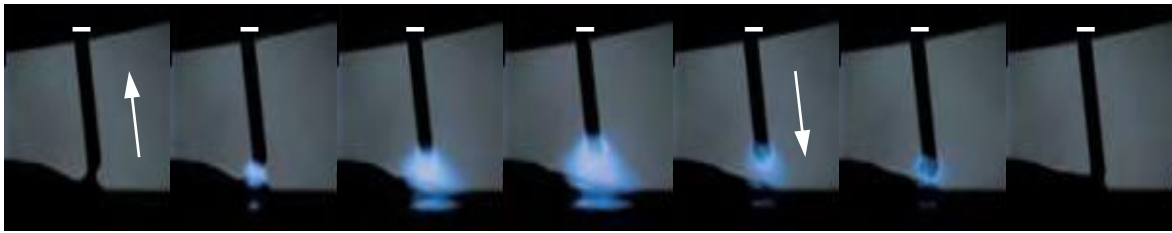
Obr. 11 Kombinace CMT cyklů a pulzních cyklů [14]

Oblasti použití jsou především pro svařování ušlechtilé oceli s hliníkem jak v automatizovaném, tak i v ručním provozu.

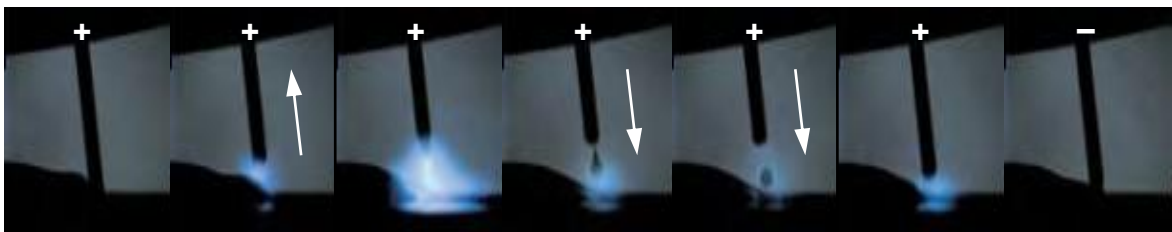
## 2.8.3 CMT Advanced Pulse

Proces CMT Advanced Pulse je založen na kombinaci záporné CMT fáze a kladné impulzní fáze. Ve srovnání s konvenčními procesy odděluje CMT Advanced Pulse proces impulzní oblouk jasně od záporné proudové fáze. Tato varianta procesu se skládá z jedné záporné CMT fáze s reverzním pohybem drátu a fáze impulzního oblouku s kontinuálním pohybem drátu.

Vlivy na odtrhávání kapek ve fázi impulzního oblouku (kladný pól na elektrodě) v důsledku proměnlivé záporné základní proudové fáze při konvenčním procesu odpadají. To proto, že kapka kovu vzniklá v záporné CMT fázi se čistě přenesou při následném zkratu. [5] V okamžiku impulzního oblouku je přenos kovu bezzkratový. Z tohoto důvodu jsou zde potřebné inicializační cykly, aby bylo možné realizovat přechod mezi oběma fázemi procesu.



Negativně polarizovaná fáze CMT



Inicializace

Pozitivně polarizovaná pulzní fáze

Inicializace

*Obr. 12 CMT Advanced Pulse – změna z negativně polarizovaného cyklu CMT na pozitivně polarizovaný pulzní cyklus [13]*

Poměr mezi pozitivním a negativním cyklem procesu je volně volitelný stejně jako u CMT Advanced. Během negativně polarizované fáze CMT je i zde dosahováno vyššího odtavného výkonu při nízkém přínosu tepla. Takto je možné provádět spojování ocelí vysoké pevnosti. [5]



**Pulzní režim svařování**



**CMT Pulse**



**CMT Advanced Pulse**

*Obr. 13 Porovnání různých režimů na překládaném spoji hliníkových plechů [11]*

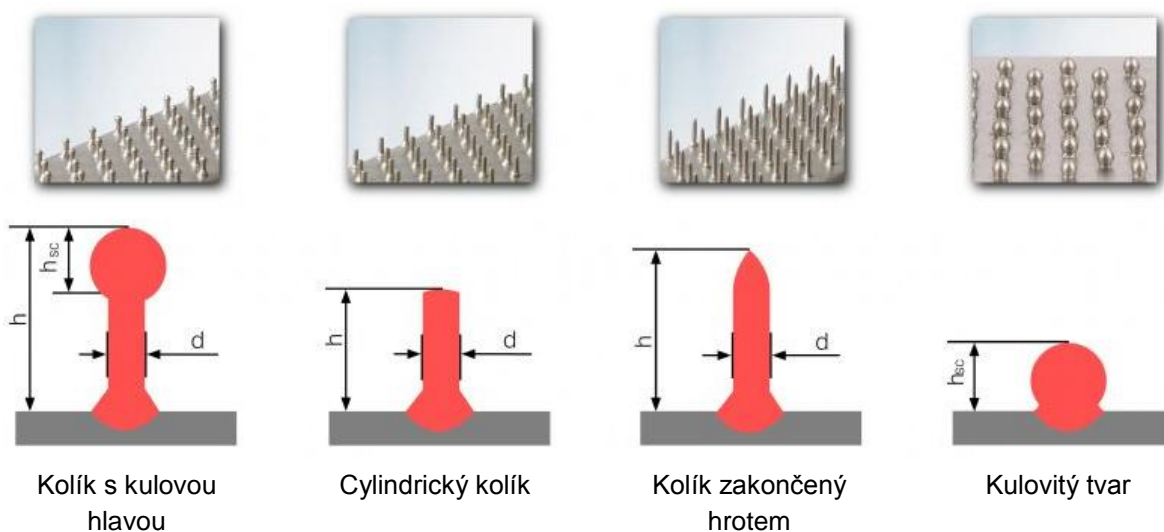


## 2.8.4 Metoda CMT Pin, CMT Print

Metoda pinů je nově vyvinutý proces odvozený od CMT technologie. Její obrovský potenciál se nabízí především v případech, kdy se vzájemně spojují kovové a nekovové materiály.

Pro metodu CMT Pin a CMT Print je velmi důležitý dříve popisovaný systém Contec kontaktní špičky hořáku, který podstatně zlepšuje přenos svařovacího proudu. Dvě pohyblivé poloskořepiny udržují plochy a síly mezi kontaktním systémem a svařovacím drátem v přesně definované oblasti nastavených hodnot po celou dobu životnosti těchto opotřebitelných dílů. Bod dosažení teploty tavení v délce výletu drátu je v konkrétním požadovaném místě. Výsledkem je přesná délka a tvar zakončení pinů. [33]

Pomocí CMT lze zhotovovat piny různých typů s vysokou reprodukovatelností: koule, kolíky s kulovou hlavou, cylindrické kolíky a mnohé další.



Obr. 14 Různé tvary pinové struktury zhotovené metodou CMT [2]

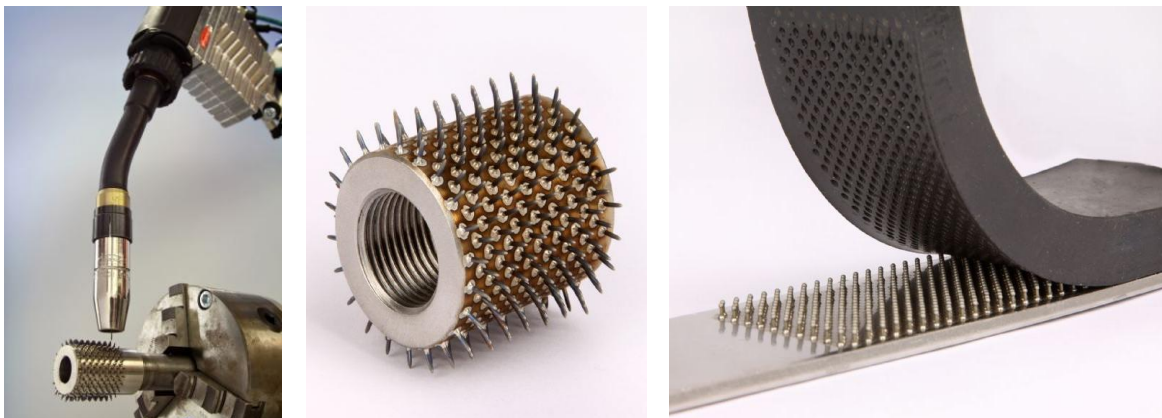
Popis obrázku 14:  $d$  – průměr kolíku

$h$  – výška kolíku

$h_{sc}$  – výška kulové hlavy

Místo obvyklého přerušení zkratu detekovaného zvýšením proudu se u procesu CMT zpětně zatáhne přídavný materiál o definovaný krok. Tento reverzačně pracující posuv drátu, respektive exaktní řízení polohy přídavného materiálu, je předpokladem pro vytváření různých struktur na kovových plochách. Nasazování pinů probíhá automaticky a je možné snadno integrovat do výrobní linky. Postup je již schopný sériového nasazení. Taktovací doba se v současnosti pohybuje kolem čtyř sekund na jeden pin, protože přídavný materiál musí pokaždé vychladnout, aby byly dodrženy definované poměry.

Po nanesení vláknitého materiálu a vytvrzení plastu jsou piny pevně spojené s kompozitem. Stabilní spojení se vyznačuje plastickým deformačním chováním a v důsledku toho i zvýšenou absorpcí energie, což je důležitá vlastnost pro součásti vystavené nárazům. Počet pinů se řídí podle velikosti a druhu zatížení.



*Obr. 15 Ukázky využití metody CMT Pin [2]*

Možnosti využití jsou rozsáhlé: hřídele pohonů s kovovými konci vyztužené uhlíkovými vlákny, kovové panty pro díly z vláknitých materiálů, fixace brzdových obložení na nosné desce, využití jako montážní pomůcky pro finální montáž, nastavování definované mezery mezi jednotlivými součástmi, upevňování kabelových svazků, suché zipy pro plastové díly a podobně.



*Obr. 16 Ukázky využití metody CMT Print [11]*

K hlavním výhodám CMT Pin, CMT Print patří mnohem vyšší pevnost proti samotnému lepení, vysoká bezpečnost spojení i za vyšších teplot, zvýšená odolnost proti olupování, úsporné rozměrové dimenzování díky změně počtu a pozice pinů a v neposlední řadě i jednoduché začlenění do původního výrobního procesu. [33]

## 2.9 Metoda CMT Twin

V roce 2012 Společnost Fronius International poprvé představila široké veřejnosti svoji tandemovou svařovací metodu CMT Twin. Tato metoda je určitým rozšířením již dříve dostupného vysoce výkonného svařování se dvěma dráty TimeTwin. Nové řešení umožňuje použít v jednom systému dva procesy CMT nebo kombinaci procesu CMT a impulzního svařování v ochranné atmosféře. Proto je svařovací systém vybaven dvěma digitálními svařovacími zdroji, které pracují vzájemně zcela nezávisle.

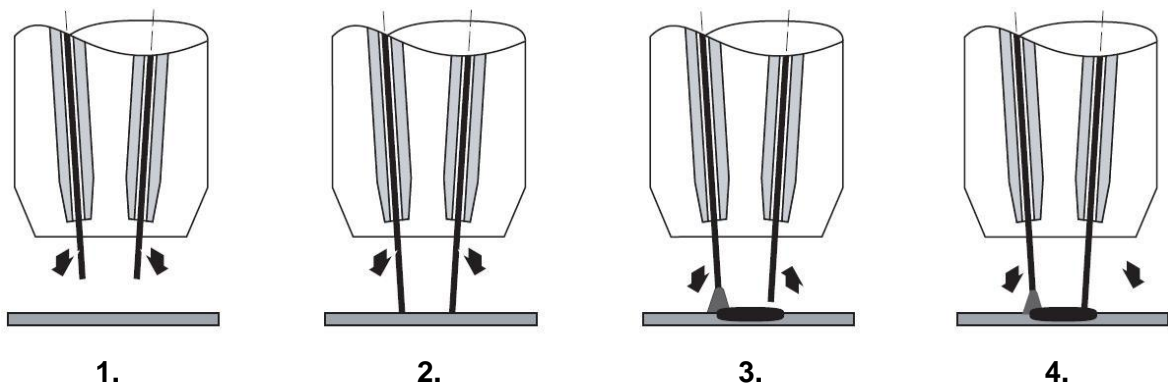
Svařovací procesy je tedy možné individuálně přizpůsobit příslušným aplikačním požadavkům a v rámci fyzikálních hranic zvolit libovolné rychlosti drátů. Vzhledem k velkému rozsahu rychlostí posuvu a flexibilitě při výběru použitého svařovacího postupu, může uživatel přesně řídit přínos tepla a odtavný výkon. Tím je možné dosáhnout optimální rychlosti svařování a kvality svaru téměř v každé svařovací poloze.

Metoda TimeTwin, která je základem procesu CMT Twin, využívá v případě potřeby dva pulzní elektrické oblouky (hlavní a podřízený), které jsou synchronizované se 180° fázovým posuvem. Rozsah rychlosti posuvu má proto poměrně úzce nastavené hranice. TimeTwin je správnou volbou, pokud se jedná o zvyšování rychlosti svařování, respektive odtavného výkonu.

U svarových švů, kde se požaduje velký průřez, však může být problémem příliš vysoký přínos tepla. Pokud je tavná lázeň příliš tekutá, svar se propadne. V takových případech se nasazuje metoda CMT Twin, kde je přínos energie nižší a lze jej přesně nastavit. Proces je stabilnější a téměř nedochází k rozstříkům, protože délka oblouku nezávisí na vlivech povrchu svařovaného materiálu a na rychlosti svařování.

Aktuální požadavky svařovacího úkolu na rychlost svařování, odtavný výkon, přemostitelnost spár určují, která kombinace procesů je pro metodu CMT Twin vhodná. Pro náročné koutové svary se tak nabízí kombinace impulzního procesu (hlavní) a procesu CMT (podřízený). Zatímco hlavní elektroda při vysoké rychlosti drátu zajišťuje žádoucí vysoký závar, podřízená elektroda při nízké rychlosti drátu a minimálním přínosu tepla vyplňuje svar. Díky tomu je možné bezpečně a dokonale provádět koutové svary o velké tloušťce v horizontálně-vertikální poloze (PB).

Aby došlo k dokonalému formování svarového švu již od začátku, podřízená elektroda u metody CMT Twin zahájí svoji činnost teprve tehdy, když je proces hlavní elektrody stabilní. Jakmile je proces hlavní elektrody stabilizován, obdrží podřízená elektroda odpovídající spouštěcí signál. [17]



*Obr. 17 CMT Twin – synchronizovaný start svařování [16]*

Synchronizovaný start svařování probíhá v těchto fázích:

1. Obě drátové elektrody se posouvají vpřed směrem ke svařovanému materiálu.
2. Obě drátové elektrody se dotknou povrchu svařovaného materiálu.
3. Vodicí drátová elektroda zahájí svařovací proces, zatímco vlečná elektroda se zatáhne zpět směrem od svařovaného materiálu a čeká na startovací signál od vodicí elektrody, tzv. zpoždění zapálení.
4. V okamžiku, kdy vlečná drátová elektroda obdrží startovací signál, zahájí svařovací proces. [16]

Na obrázku 18 se vedoucí elektroda nachází v pulzním režimu a podřízená elektroda v režimu CMT vyplňuje tavnou lázeň na požadovaný rozměr. Tento proces se vyznačuje mimo jiné minimálním vzájemným ovlivňováním oblouků a stabilní tavnou lázní.



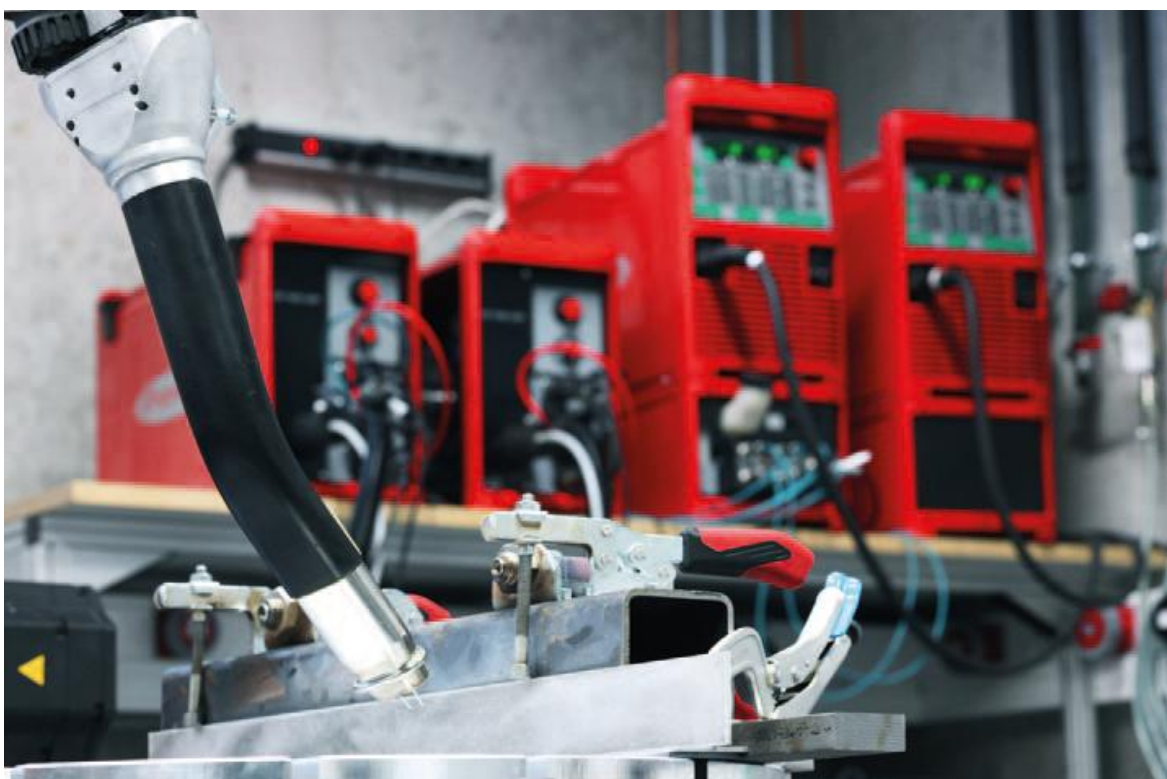
*Obr. 18 Tavná lázeň při CMT Twin procesu svařování [18]*

Metoda CMT Twin dále nabízí obrovské možnosti při svařování v ochranné atmosféře  $\text{CO}_2$  a různě nastavené charakteristiky podle daného použití. Nejen perfektní výsledek s minimálním rozstříkem díky dokonalému uvolnění kapky v procesu CMT, ale i dvakrát tak vysoké rychlosti svařování, resp. dvojnásobné odtavné výkony, vždy podle požadavků. Mimořádně robustní a výkonný svařovací hořák „Twin Compact Pro“ umožňuje dobrý přístup ke svařovaným dílům. [18]

CMT Twin tak kombinuje výhody metod TimeTwin a CMT v jednom systému. Ve srovnání s konvenčními vysoce výkonnými postupy to jsou:

- vysoká kvalita svaru,
- vysoká spolehlivost procesu,
- snížený přínos tepla,
- hlubší závar,
- nízká tvorba rozstříků,
- snadné přemostění mezer,
- vysoká rychlost svařování,
- minimum dokončovacích prací.

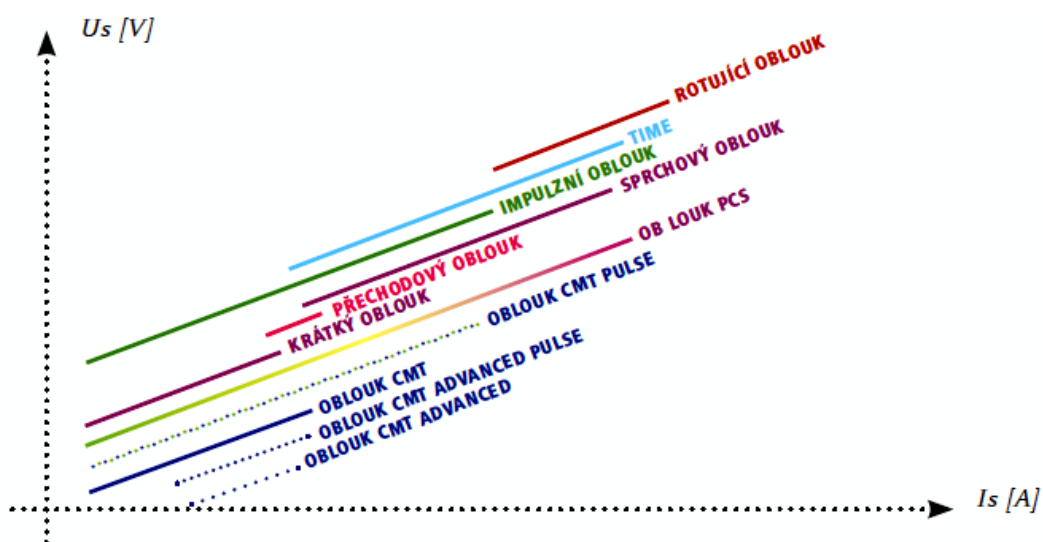
Díky těmto mimořádným vlastnostem je metoda CMT Twin zvláště vhodná pro svařování tenkých plechů vysokou rychlostí a pro polohové svařování s vysokým odtavným výkonem, aniž by přínos tepla překročil optimální hranici. CMT Twin je tak předurčena pro nasazení v automobilovém a dodavatelském průmyslu, pro výrobu lodí, pracovních strojů a pro stavbu elektráren. [17, 20]



*Obr. 19 Dva svařovací zdroje, jeden svařovací hořák a dvě navzájem izolované kontaktní trubice [18]*

## 2.10 Srovnání obloukových technologií a vývoj CMT procesu

Na obr. 20 jsou uvedeny jednotlivé rozsahy obloukových technologií z hlediska svařovacích parametrů. Elektrický oblouk CMT a jeho typy se nachází v oblasti pod zkratovým obloukem, ovšem chování oblouku se zpětným pohybem drátu je zcela odlišné. Pro vyšší výkony svařování jsou v oblasti nad CMT oblouky znázorněny další technologie, se kterými také souvisí zvýšený přínos tepla.



Obr. 20 Elektrický oblouk CMT v porovnání s dalšími typy obloukových technologií [7]

Poznámka k obr. 20: Oblouk **PCS** (**P**ulse-**C**ontrolled-**S**pray Arc) „pulzně řízený sprchový oblouk“ je kombinací impulzního a standardního sprchového oblouku. [19]



Obr. 21 Historie vývoje CMT procesu spojování [11]

### **3 EXPERIMENT – HODNOCENÍ KVALITY CMT SPOJŮ**

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na analýzu svaru provedeného metodou CMT. Jak již bylo zmíněno, výhodou této metody je možnost výroby nerozebíratelného svarového spoje materiálů s obtížnou svařitelností. Z tohoto důvodu byly testy směřovány do oblasti svařování plechů ze slitiny hliníku s ocelovým materiálem chráněným antikorozi ochrannou vrstvou Aluzinc. Jelikož při spojení kovů s rozdílným elektrodočným potenciálem může nastat výskyt mezikrystalické koroze, jsou jednotlivé testy zaměřeny na vyhodnocení korozní odolnosti v prostředí solné mlhy. U svarů byly následně testovány mechanické vlastnosti, zvláště pak zkouška tahem, která byla hodnocena i u základních svařovaných materiálů.

Technologií svařování CMT bylo připraveno několik vzorků, na kterých byly provedeny tyto analýzy:

- Metalografická analýza před a během korozní zkoušky včetně stanovení prvkového složení intermetalických fází v oblasti svaru.
- Korozní zkoušky v prostředí solné mlhy dle ČSN ISO 9227.
- Analýza změny mechanických vlastností (pevnost v tahu).

Pro posuzování kvality v průběhu celého experimentu je nezbytná metalografická analýza, která vyžaduje dodržení určitých kroků. Před zaměřením na problematiku jakosti CMT svarů bude v následující kapitole stručně popsána podstata a pracovní postup metalografie.

#### **3.1 Příprava vzorků pro metalografickou analýzu**

Optickou metalografií je možné chápat jako pozorování metalografických vzorků pomocí optických mikroskopů, a to především klasických světelných nebo speciálních metalografických. Metalografie je důležitá pro zobrazování mikrostruktury a následné analýzy, měření a obecně hodnocení kvality studovaného materiálu či součásti. Slouží například k identifikaci a zjištění poměrného zastoupení metalurgických fází u kovů, měření mikrotvrlosti materiálu atd. Konkrétní analýzy mohou vyžadovat specifický postup přípravy.

Metalografický vzorek je vzorek připravený ke studiu struktury jeho materiálu, která není obvykle pozorovatelná bez předchozí úpravy. K jejímu zviditelnění je nutné provést řadu kroků, které jsou obecně charakterizovány v následujících podkapitolách. [32]

### ***Odběr vzorku***

Vzorky z měkkých a snadno obrobitelných materiálů jsou obvykle odebrány za použití řezání nebo frézování. Tvrdé a těžko obrobitelné materiály se dělí odlamováním nebo rozbrušováním pod chladicí kapalinou nebo pomocí elektrojiskrových řezaček. Při odběru vzorku nesmí dojít k mechanickému ani tepelnému ovlivnění jeho struktury, proto je naprosto nevhodné řezání kyslíko-acetylenovým plamenem nebo elektrickým obloukem.

V laboratoři ústavu techniky a automobilové dopravy Mendelovy univerzity v Brně bylo pro náš odběr vzorku použito stříhání mechanickými nůžkami a řezání na pásové pile.

### ***Příprava vzorku***

Pokud je vzorek příliš malých rozměrů, že by nebylo pohodlné a především bezpečné jej držet při ruční přípravě, přistupuje se k zalévání vzorku za studena nebo jeho zalisování za tepla. Při zalévání za studena se čistý vzorek umístí do formy tak, aby plocha určená k další úpravě a analýze byla v kontaktu se dnem formy (obr. 22).



*Obr. 22 Princip zalévání vzorku za studena (a), ukázka zalévacích forem a vzorků (b) [32]*

Vzorek se zalije připravenou zalévací hmotou, která se nechá ve formě vytvrdit. Formy se vyrábí z různých materiálů: jednorázové hliníkové, skleněné nebo fenolové, pro opakované použití nejčastěji polypropylenové nebo silikonové.

Jako zalévací hmoty se používají tekuté epoxidové, práškové akrylátové nebo polyesterové pryskyřice důkladně promíchané s příslušným tvrdidlem v předepsaném poměru. Doba polymerace závisí na složení zalévací hmoty i jejím objemu. V současné době je na trhu dostupná široká nabídka zalévacích hmot s dobou polymerace od několika minut až po desítky hodin.

Pro naši přípravu metalografických preparátů bylo použito především kovových forem a samopolymerující metylmetakrylátová bazální pryskyřice jako zalévací hmota.



### ***Broušení vzorku***

Broušení vzorků má za cíl minimalizovat povrchové nerovnosti. Lze jej vykonávat ručně nebo mechanizovaně. Mechanizované broušení se provádí na metalografických bruskách a vzorek je při něm přitlačován na brusný papír uchycený na rotujícím vodorovném kotouči brusky. Pro běžné metalografické výbrusy se používají brusné papíry o zrnitosti 220 až 2500. Tato čísla vyjadřují určitý počet zrn na plochu jednoho čtverečního palce. Běžné otáčky vodorovného kotouče jsou  $30 \text{ min}^{-1}$  až  $150 \text{ min}^{-1}$ . Vysoká rychlost pohybu brusného papíru obvykle vyžaduje chlazení vzorku vodou nebo jiným vhodným chladicím médiem, aby nedošlo ke změně jeho struktury a vzniku tzv. Beilbyho vrstvy, což je vzniklá vrstva deformovaného kovu na povrchu vzorku. Popsaný jev je nežádoucí, lze jej odstranit jemným přebroušením a odleptáním deformované vrstvy chemickým činidlem.

### ***Leštění vzorku***

V metalografii se leštění provádí mechanicky nebo elektrolyticky. Princip mechanického leštění je obdobný jako při broušení.

K leštění se obvykle používají  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ , nejčastěji však diamantová brusná pasta. Ta se skládá ze syntetického diamantového prášku přesně tříděného sedimentací na určitou zrnitost (od  $1 \mu\text{m}$  do  $7 \mu\text{m}$ ) a z vhodného pojiva. U leštění používáme také nejprve nejhrubší frakci ( $7 \mu\text{m}$ ) a postupujeme k nejjemnější. Leštění se provádí za sucha, jen při přechodu mezi jednotlivými zrnitostmi brusné pasty vzorek oplachujeme lihem. Jakmile ze vzorku zmizí poslední rýhy, leštění je dokončeno.

### ***Leptání vzorku***

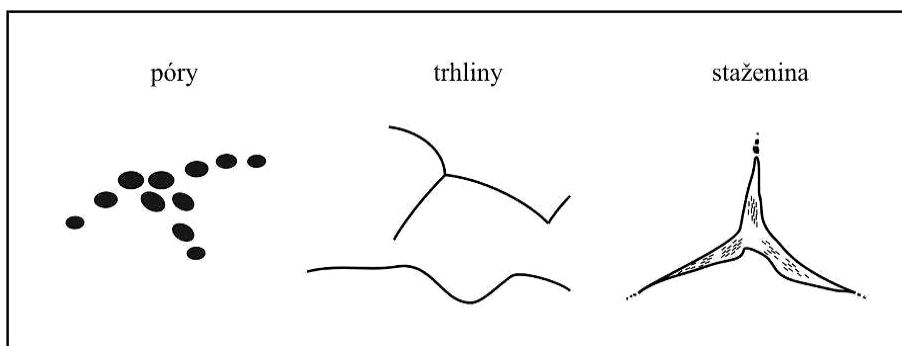
Leptání vzorků slouží k vyvolání jejich mikrostruktury. V závislosti na materiálu výbrusu a konkrétních požadavcích pro následné pozorování je možné aplikovat různé metody leptání vzorků, např. chemické, elektrolytické nebo tepelné leptání. Nejběžnějším způsobem zviditelnění struktury je chemické leptání vyleštěného povrchu. Vhodnými leptadly bývají mimo jiné alkoholické roztoky kyselin.

V našem případě bylo na ocelový materiál použito leptadlo jako 4% roztok kyseliny dusičné v alkoholu, tzv. nital. K dalšímu pozorování struktury slitiny hliníku poté leptadlo na bázi hydroxidu sodného s destilovanou vodou. Principu zviditelňování struktury chemickým leptáním se musí věnovat zvýšená pozornost, protože je to závěrečná fáze, která odkrývá celý výsledek.

### ***Vyhodnocení metalografických vzorků***

Metalografické vzorky lze hodnotit makroskopicky nebo mikroskopicky v neleptaném nebo naleptaném stavu. [32] Při makroskopickém hodnocení jsou vzorky pozorovány ve skutečné velikosti nebo při malém zvětšení. K mikroskopickému pozorování se obvykle používají světelné mikroskopy se zvětšením maximálně 1000krát a laserové konfokální (zvětšení maximálně 10 000krát). Pro vyšší zvětšení je nutné přejít k elektronové mikroskopii. Zde musí vzorek splňovat speciální požadavky a především musí být vodivý.

Metalografické vyhodnocení vzorků bylo prováděno na metalografickém mikroskopu Neophot 21 s použitím softwaru Analysis k odečítání délkových parametrů. Mikroskop umožňoval zvětšit 40krát až 2000krát.



*Obr. 23* Necelistvosti hodnocené na metalografickém výbrusu v neleptaném stavu [32]

## **3.2 Specifikace a vlastnosti použitých materiálů**

Jako základní materiál pro vytvoření CMT spoje byl použit plech ze slitiny hliníku AlMg3 a ocelový plech s povrchovou úpravou hliník – zinek (označení: Ocel DX51D + AZ150). Slitina hliníku s křemíkem byla zvolena jako přídatný materiál ve formě drátu odvíjeného z cívky umístěné v podavači drátu svařovacího zařízení. Bližší specifikace použitých materiálů pro svařování jsou uvedeny dále.

### **3.2.1 Hliníková slitina jako základní materiál**

Slitina AlMg3 (AW-5754 dle ČSN EN 573-3) [41] je materiál středně pevný, velmi dobře odolný korozi, mořské vodě a tropickým podmínkám. Vyznačuje se chemickou odolností a typická je dobrá leštitelnost. Při svařování slitin hliníku dochází k tvorbě oxidické vrstvy  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na povrchu svarové lázně.

Pro náš účel byly připraveny hladké plechy o rozměrech 300 mm × 50 mm a tloušťce 1,5 mm, běžně dostupné v technické praxi.

Tab. 2 Vlastnosti slitiny hliníku AlMg3 (AW-5754) tvářené pro všeobecné účely [21, 41]

Chemické složení [hmotnostní %]										
Mg	Mn	Si	Fe	Ti	Zn	Cu	Cr	ostatní		Al
								jednotlivě	celkem	
2,6 – 3,6	0,50	0,40	0,40	0,15	0,20	0,10	0,30	0,05	0,15	zbytek
Mechanické vlastnosti										
Polotovar	Rozměr t [mm]	Stav	Mez kluzu $R_p$ 0,2 [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Tažnost $A_5$ [%]	Tvrдость HB 2,5/62,5/30	Modul pružnosti E [GPa]			
plech	0,2 – 10,0	měkký	min. 80	190 – 240	min. 18	45 – 60	inf. 65			
Fyzikální vlastnosti										
Hustota $\rho$ [kg · m <sup>-3</sup> ]			Měrná tepelná kapacita $c_p$ [J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]		Teplotní součinitel roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]		Tepelná vodivost $\lambda_t$ [W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]			
2650			905		24 · 10 <sup>-6</sup> (20 – 200 °C)		126 – 167			
Technologické údaje										
Tepelné zpracování		Žihání na měkko			360 °C		1,5 – 6 hodin ochlazovat na vzduchu			
Svařitelnost a pájitelnost		<p>Velmi dobrá, při svařování plamenem (přídavný materiál AlMg3; tavidlo nutné) a všemi běžnými technologiemi (uhlíkovou elektrodou, TIG, MIG, bodové odporové svařování); přídavnými materiály jsou slitiny AlMg3 či AlMg5; dobré svařitelnosti se dosáhne přidáním AlSi5; předeřev 100 – 300 °C závisí na tloušťce výrobku.</p> <p>Měkké pájení zinkovými pájkami jen pomocí ultrazvuku; tvrdé pájení pod tavidlem pájkou AlSi12 s dokonalou smáčivostí.</p>								
Použití										
Na středně namáhané konstrukce, které mají odolávat korozi a případně být dobře lešitelné (vozidla, námořní plavidla, zařízení v chemickém a potravinářském průmyslu, vnější a vnitřní architektura).										



Obr. 24 Metalografický snímek základního materiálu AlMg3

Ve struktuře hodnocené hliníkové slitiny (obr. 24) jsou patrné tmavé oblasti v kovové hmotě. Jedná se o částice vyloučené intermetalické fáze tvořené sloučeninou  $Mg_2Si$ .

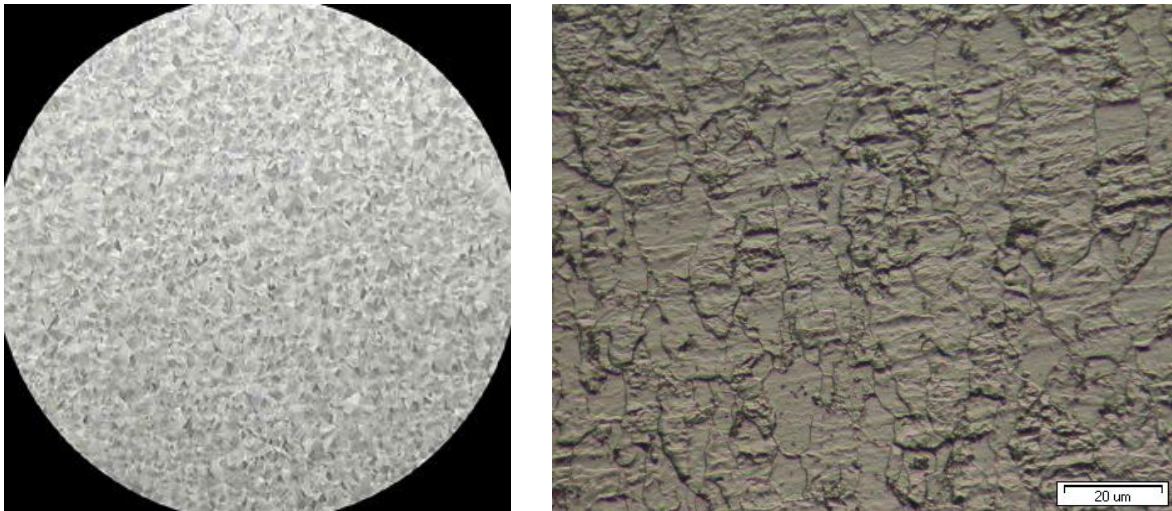
### 3.2.2 Ocelový plech s povrchovou úpravou

Zinkovaný ocelový plech DX51D + AZ150 dle ČSN EN 10346 [40] je klasický konstrukční materiál používaný v technické praxi k ohýbání a profilování. Základem je nízkouhlíková feriticko-perlitická ocel.

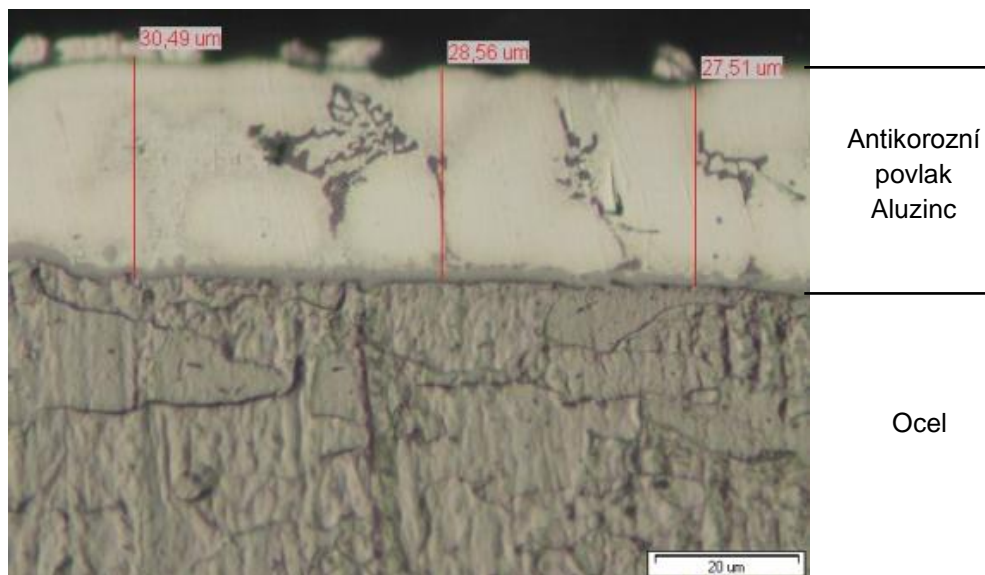
Povrchová ochrana Aluzinc spočívá v kombinaci pasivujících prvků podle chemického složení tavné lázně. Konkrétně se jedná o hliníkovo-zinkové intermetalické sloučeniny s určitým množstvím křemíku. Tloušťka pasivační vrstvy do 30  $\mu m$  je zaručena technologií kontinuálního žárového zinkování. Aluzinc má výjimečnou tepelnou odolnost a schopnost odolávat korozi. Dobře se zpracovává, a proto se používá v mnoha oblastech: stavebnictví (střešní systémy), strojírenství; v chemickém, petrochemickém a energetickém průmyslu.

Tab. 3 Vlastnosti hlubokotažné oceli žárově pokovené DX51D + AZ150 [21, 40]

Chemické složení [hmotnostní %]							
C	Si	Mn	P	S	Ti		
0,18	0,50	1,20	0,12	0,045	0,30		
Mechanické vlastnosti							
Polotovar	Rozměr t [mm]	Stav	Mez kluzu $R_{eL}$ nebo $R_p 0,2$ [MPa] napříč max. <sup>2)</sup>	Mez pevnosti $R_m$ [MPa] napříč max. <sup>2)</sup>	Tažnost $A_{80}$ [%] napříč max. <sup>3)</sup>	Kontrakce Z [%]	Tvrдость HB
plech	–	–	–	500	22	–	–
Fyzikální vlastnosti							
Hustota $\rho$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	7850						
Technologické údaje							
Tvařitelnost	Hlubokotažná ocel						
Povlak <sup>1)</sup>	Druh povlaku <sup>4)</sup> [ $g \cdot m^{-2}$ ]	Tloušťka materiálu t [mm]	Průměr ohýbacího trnu D [mm]				
AZ	150	–	0				
Použití							
Ploché výrobky s ochranným pokovením určené k ohýbání profilů za studena. U výrobku pokoveného slitinou Al-Si (označení AS) je odolnost žáru do teploty 700 °C.							
Poznámky							
<sup>1)</sup> symboly pro druhy povlaků (uvádí se za označením oceli): + AZ (žárově pokovený slitinou hliník-zinek – cca 55 % Al, 1,6 % Si, zbytek Zn) <sup>2)</sup> lze počítat s minimální hodnotou meze kluzu 140 MPa a s min. hodnotou meze pevnosti v tahu 270 MPa <sup>3)</sup> při tloušťkách výrobku $t \leq 0,7$ mm (včetně povlaku) je $A_{80} = \text{min. } 20 \%$ <sup>4)</sup> minimální hmotnost povlaku (oboustranně) – průměr ze 3 vzorků o ploše min. 5000 mm <sup>2</sup>							



Obr. 25 Ocelový plech žárově zinkovaný druhem povlaku Aluzinc



Obr. 26 Řez strukturou zinkového povlaku ocelového plechu

Na obr. 26 je znázorněn příčný řez ocelového plechu a měření tloušťky zinkového povlaku Aluzinc ve třech oblastech. Naměřené hodnoty, včetně vypočtené průměrné hodnoty, byly zjištěny s přesností  $\pm 4 \mu\text{m}$  (tab. 4).

Tab. 4 Hodnoty tloušťky zinkového povlaku z měřených oblastí

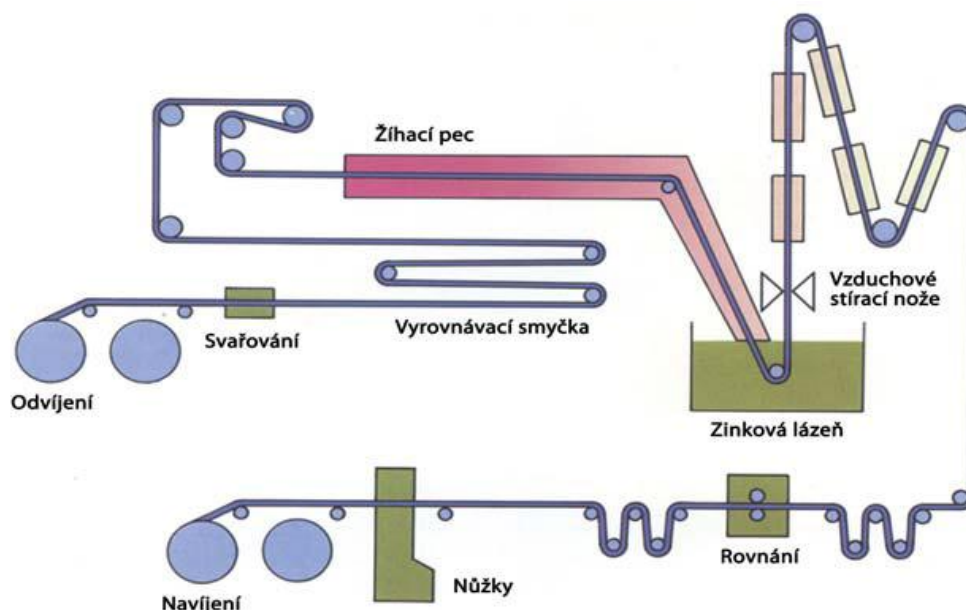
Měřená oblast	Měření č. 1 [ $\mu\text{m}$ ]	Měření č. 2 [ $\mu\text{m}$ ]	Měření č. 3 [ $\mu\text{m}$ ]	Průměrná hodnota [ $\mu\text{m}$ ]
Tloušťka povlaku	30,49	28,56	27,51	<b>28,85</b>

Ke svařování byly z tohoto materiálu použity plechy o rozměrech 300 mm  $\times$  50 mm a tloušťce 1,5 mm stejně jako u hliníkové slitiny AlMg3.

### ***Technologie žárového zinkování ocelového pásu***

Základním materiálem je za studena válcovaný tenký plech ve svitcích, který se v průběhu procesu svařuje do nekonečného pásu (obr. 27). Po odmaštění se pás moří nebo oxiduje. Potom se povrch redukcí při 950 °C zbaví oxidů. Současně probíhá změkčovací žíhání oceli. Povrch oceli je kovově čistý a v ochranné atmosféře vstupuje přímo do zinkovací lázně. Po několika sekundách v zinkovací lázni vystupuje pás kolmo vzhůru a prochází mezi tzv. vzduchovými stíracími noži, které jemným proudem vzduchu nebo páry stírají zinkový povlak na požadovanou tloušťku. Přes ochlazovací sekci, rovnání a úpravu, kde se provádí ochrana proti vzniku bílé rzi, je pás veden k formátovacím nůžkám. Navíjí se na svitky pro expedici nebo pro další povlakování plastem, organickým povlakem nebo k dalšímu tváření.

Ocelový plech se zinkuje buď mikrolegovaným, nízkolegovaným, nebo vysokolegovaným zinkem. Nejběžnější legurou je v tomto případě hliník. Typické obsahy hliníku jsou od 0,2 % – žárově pozinkovaný plech, přes 5 % – Galfan, po 55 % – Aluzinc nebo Galvalume. [1]



*Obr. 27 Kontinuální žárové zinkování tenkého ocelového plechu [1]*

#### **3.2.3 Přídavný materiál pro svařování**

Přídavný materiál byl zvolen ve formě plného drátu ze slitiny hliníku AlSi5 (AW-4043A dle ČSN EN ISO 18273) [42] o průměru 1,2 mm. Tento přídavný materiál je vhodný pro svařování hliníkových slitin typu AlSi, AlMgSi, AlMgSiCu s obsahem křemíku do 7 %. Chemické složení samotného drátu je uvedeno v tab. 5.

Tab. 5 Vlastnosti slitiny hliníku AlSi5 (AW-4043A) tvářené pro všeobecné účely [21, 42]

Chemické složení [hmotnostní %]										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Be	Ti	ostatní		Al
								jednotlivě	celkem	
4,5 – 6,0	0,60	0,30	0,15	0,20	0,10	0,0008	0,15	0,05	0,15	zbytek
Mechanické vlastnosti										
Polotovar	Rozměr d [mm]	Stav	Mez kluzu $R_p$ 0,2 [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Tažnost $A_{50}$ [%]	Tvrdoost HB	Modul pružnosti E [GPa]			
tažený drát	1,2	–	55	110	29	–	71			
Fyzikální vlastnosti										
Hustota $\rho$ [kg · m <sup>-3</sup> ]			Měrná tepelná kapacita $c_p$ [J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]		Teplotní součinitel roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]		Tepelná vodivost $\lambda_t$ [W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]			
2680			965		22 · 10 <sup>-6</sup> (20 – 100 °C)		160			
Technologické údaje										
Tepelné zpracování		Žihání na měkko			350 °C		0,3 hodiny ochlazovat na vzduchu			
Svařitelnost a pájitelnost		Tato slitina se nesvařuje ani nepájí.								
Použití										
Přídavný materiál pro svařování.										

Slitina AlSi5 odolává průmyslovým a přímořským atmosférám bez jiné povrchové ochrany. Není náchylná ke koroznímu praskání. Díky obsahu křemíku disponuje lepší tavitelností při svařování.

### 3.2.4 Elektrodový potenciál kovů

Absolutní hodnotu standardního elektrodového potenciálu experimentálně určit nelze, ale je možné měřit rozdíly potenciálů vytvořené mezi elektrodami z různě ušlechtilých kovů. Například mezi měděnou a zinkovou elektrodou, které jsou ponořené do roztoků svých solí, vznikne rozdíl potenciálů asi 1,1 V, ten už můžeme změřit voltmetrem. Takové spojení se nazývá **galvanický článek** a může být zdrojem elektrického proudu. [35]

Jako standardní elektroda, k níž se vztahují elektrodové potenciály jednotlivých kovů, byla zvolena tzv. Standardní vodíková elektroda. Potenciál standardní vodíkové elektrody se konvenčně při každé teplotě rovná nule.

V tab. 6 jsou uvedené standardní elektrodové potenciály  $E^0$  [V] některých kovů vztažených k vodíkové elektrodě (při teplotě 25 °C).

Tab. 6 Elektrochemická řada napětí některých kovů [35]

Systém	Standardní elektroodový potenciál $E^0$ [V]	Systém	Standardní elektroodový potenciál $E^0$ [V]	Systém	Standardní elektroodový potenciál $E^0$ [V]
Cs <sup>+</sup> / Cs	- 3,08	Al <sup>3+</sup> / Al	- 1,66	Ni <sup>2+</sup> / Ni	- 0,25
Li <sup>+</sup> / Li	- 3,05	Zr <sup>4+</sup> / Zr	- 1,54	Sn <sup>2+</sup> / Sn	- 0,14
K <sup>+</sup> / K	- 2,92	Mn <sup>2+</sup> / Mn	- 1,19	Pb <sup>2+</sup> / Pb	- 0,13
Ba <sup>2+</sup> / Ba	- 2,90	Cr <sup>2+</sup> / Cr	- 0,91	W <sup>3+</sup> / W	- 0,11
Sr <sup>2+</sup> / Sr	- 2,89	Zn <sup>2+</sup> / Zn	- 0,76	H <sup>+</sup> / H <sub>2</sub>	<b>0,00</b>
Ca <sup>2+</sup> / Ca	- 2,87	Cr <sup>3+</sup> / Cr	- 0,74	Cu <sup>2+</sup> / Cu	+ 0,34
Na <sup>+</sup> / Na	- 2,71	Fe <sup>2+</sup> / Fe	- 0,44	Ag <sup>+</sup> / Ag	+ 0,80
La <sup>3+</sup> / La	- 2,52	Cd <sup>2+</sup> / Cd	- 0,40	Hg <sup>2+</sup> / Hg	+ 0,85
Mg <sup>2+</sup> / Mg	- 2,37	Tl <sup>+</sup> / Tl	- 0,34	Pd <sup>2+</sup> / Pd	+ 0,99
Be <sup>2+</sup> / Be	- 1,85	Co <sup>2+</sup> / Co	- 0,28	Au <sup>3+</sup> / Au	+ 1,50

Při spojování různorodých materiálů (hliníková slitina a antikorozi ocel, hliník a pozinkovaná ocel) s rozdílným elektrolytickým potenciálem mohou nastat vhodné podmínky pro vznik galvanické koroze. Méně ušlechtilý kov (hliníková slitina) koroduje mnohem rychleji a nastává celková degradace svarového spoje. Značným problémem jsou rovněž intermetalické fáze vzniklé na přechodu svarového spoje a základního materiálu. Tyto intermetalika dosahují délky několika  $\mu\text{m}$  a jsou značně křehká. Jedná se především o sloučeniny základních prvků hliník (Al), zinek (Zn) a železo (Fe).

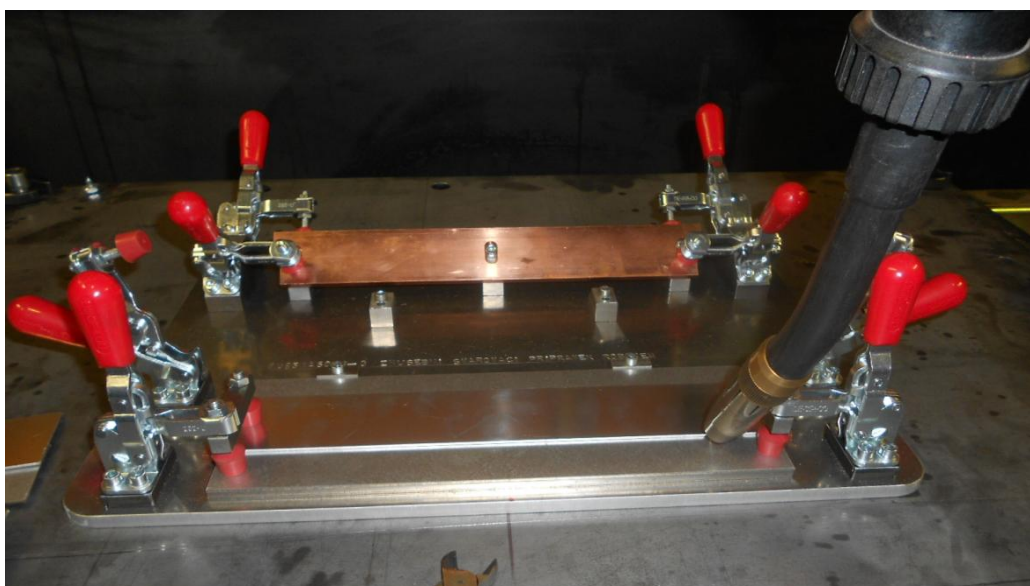
### 3.3 Svařování připravených materiálů metodou CMT

Připravené materiály byly svařeny pomocí robotického svařovacího systému CMT ve výrobním závodě společnosti European Data Project s. r. o. (dále jen EDP) se sídlem v Rousínově u Brna.

Hlavním zaměřením firmy EDP ve spolupráci se sesterskou společností Austrian Gaming Industry GmbH z Rakouska je vývoj a výroba výherních hracích přístrojů jak hernových, tak i kasinových, a tyto výrobky vyváží do celé Evropy a velké části světa. V oblasti kovovýroby se EDP dále zabývá svařováním kovů v ochranné atmosféře MIG, MAG, TIG; laserovým řezáním; zpracováním a tvářením plechů; CNC ohýbáním plechů a dalšími. Kromě zpracování kovových materiálů provádí dřevovýrobu na zakázku a výrobu nábytku.



Postupně bylo svařeno 10 vzorků z připravených materiálů blíže specifikovaných v předchozí kapitole (3.2). Plechy byly vzájemně přesazeny o 20 mm, čímž nám vzniklo přeplátované spojení. Z důvodu automatického svařování robotem bylo nutné použít přípravek pro upevnění plechů na svařovacím stole. To nám umožnilo zajistit materiály proti pohybu a zároveň svařovat stále v jedné poloze i po výměně dalších vzorků. Podrobný přehled svařovacích parametrů vytvořených vzorků je uveden v tab. 7.



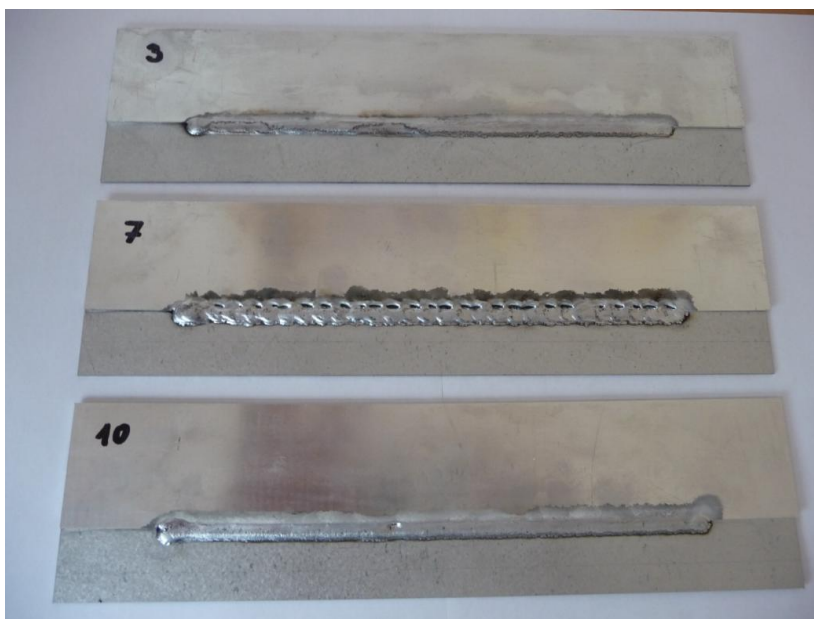
Obr. 28 Přípravek pro uchycení svařovaných materiálů

Tab. 7 Přehled parametrů svařování všech vytvořených vzorků

Vzorek	Rychlost svařovací hubice v $[\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$ <sup>1)</sup>	Režim svařování <sup>2)</sup>	Svařovací proud I [A]	Průtok ochranného plynu Q $[\text{l} \cdot \text{min}^{-1}]$
1	10	CMT	59	10
2	14	CMT	59	16
3	13	CMT	59	16
4	11; 13	CMT	59	16
5	11; 13	CMT	59	16
6	11; 13	CMT	68	16
7	11; 13	Synchropulz	75	16
8	11; 13	CMT	75	16
9	11; 13	Synchropulz	75	16
10	11; 13	CMT	78	16
<b>Poznámky</b>				
<sup>1)</sup> pro vzorky 4 až 10 platí rychlost svařovací hubice: <b>11 mm · s<sup>-1</sup> pro první polovinu délky svaru; 13 mm · s<sup>-1</sup> pro druhou polovinu délky svaru</b>				
<sup>2)</sup> při svařování vzorku 10 bylo nastaveno pro režim CMT kmitání hubice				

Výroba svarových spojů byla provedena v poloze PB svařovací hubice připevněné na robotu a v inertní ochranné atmosféře argonu (100 %). Kromě CMT svařování při frekvenci pohybu drátu 50 Hz až 70 Hz byl nastaven na dva vzorky režim Synchronpulz, což bylo pulzní svařování při určitých parametrech. Průtok ochranného plynu byl volen v rozmezí  $10 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  až  $16 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . Pracovní napětí mezi elektrodou a svařovaným materiálem 11,5 V vycházelo z aktuálně nastaveného svařovacího proudu podle charakteristiky svařovacího zdroje. Korekce délky oblouku 0 %. Systém byl vybaven jednotkou pro dálkové ovládání svařovacích parametrů. Zvolená kritéria měla zásadní vliv na tvar svarové lázně i velikost intermetalických fází ve svaru.

Pro některé vzorky byly nastaveny dvě rychlosti svařovací hubice, jak je uvedeno v tab. 7. Při svařování dochází k přenosu tepla, a tím se mění tvar svarové lázně. Z tohoto důvodu se nepatrně zvýšila rychlost svařovací hubice pro druhou polovinu délky svaru na  $13 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , aby byla zachována stejná šířka lázně po celé její délce.

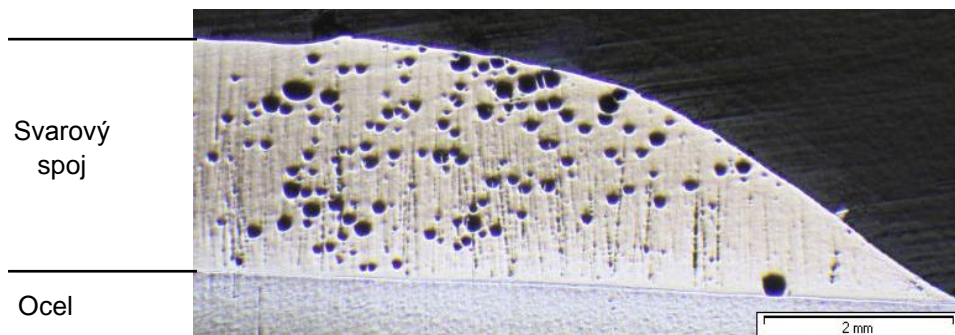


*Obr. 29 Vzorky svarů při odlišných svařovacích parametrech*

Na obr. 29 je ukázka několika vzorků, pro které byly nastaveny různé parametry svařování. Vzorek svaru 3 je vyhovující, spojení materiálů je souvislé bez viditelných vnějších vad. Vzorek 7 uprostřed je vzhledově nevyhovující, zde byl použit režim Synchronpulz, který se zde jeví jako zcela nevhodný. Plech ze slitiny hliníku není souvisle spojen s pozinkovanou ocelí. Dochází k propadu svarové lázně na straně hliníku, svar vykazuje mnoho vnějších vad. Na vzorku 10 je patrný pěkný svar, zde byl zvolen režim CMT s kmitáním svařovací hubice. V první polovině délky svaru došlo k nedokonalému spojení. Jedná se o nepatrnou vadu.

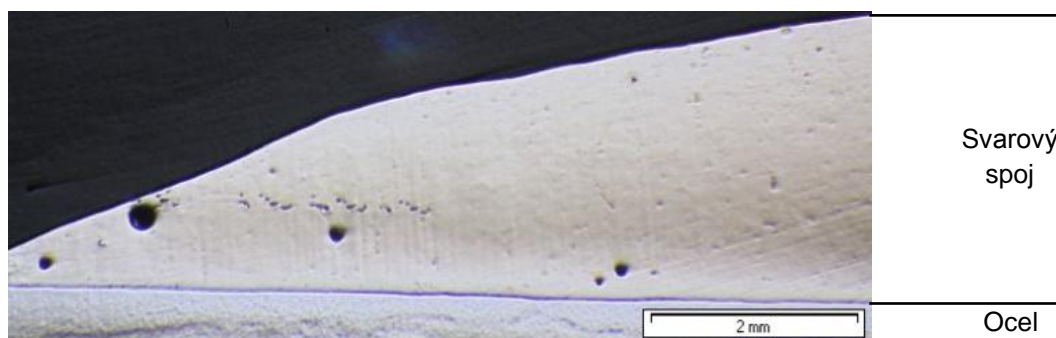
### 3.3.1 Metalografické hodnocení svařených vzorků

Po vizuální kontrole byla provedena metalografická analýza za účelem zjištění vnitřních vad ve svarovém spoji a posouzení vhodnosti k dalšímu testování.



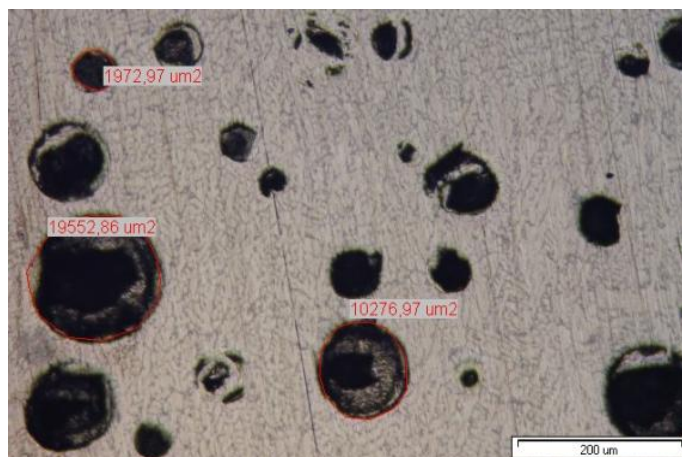
Obr. 30 Řez strukturou vzorku svaru 7 (režim Synchronpulz)

Vzorek svaru, vytvořený při nastaveném pulzním režimu, vykazuje mnoho dutin ve své struktuře (obr. 30).



Obr. 31 Řez strukturou vzorku svaru 3 (režim CMT)

Výskyt dutin u CMT režimu svařování (obr. 31) je pouze ojedinělý. Vytvořený svar je čistý s minimální pórovitostí. Metoda CMT tedy umožňuje eliminovat tyto negativní aspekty.



Obr. 32 Měření plošné velikosti pórů ve struktuře svaru

Tab. 8 Hodnoty plošné velikosti pórů při uvedených režimech svařování

Režim svařování	Plocha pórů dle režimu svařování [ $\mu\text{m}^2$ ]					Směrodatná odchylka s [ $\mu\text{m}^2$ ]	Variační koeficient V [%]
	Měření	Měřená oblast 1	Měřená oblast 2	Měřená oblast 3	Průměrná velikost $\bar{x}$ [ $\mu\text{m}^2$ ]		
Synchronpulz	č. 1	19 552,86	18 934,51	19 115,33	<b>14 937,41</b>	3538,31	23,69
	č. 2	10 276,97	15 362,43	12 323,98			
	č. 3	11 457,63	12 825,15	14 587,81			
CMT	č. 1	1972,97	1735,24	1867,23	<b>1614,55</b>	282,21	17,48
	č. 2	1805,42	1593,72	1358,89			
	č. 3	1494,65	1647,35	1055,47			

**Použité vzorce pro statistické vyhodnocení**

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad [\mu\text{m}^2] \quad (1)$$

$\bar{x}$  – aritmetický průměr naměřených hodnot ploch pórů

$x_i$  – naměřená hodnota plochy pórů [ $\mu\text{m}^2$ ]

$n$  – počet naměřených hodnot

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [\mu\text{m}^2] \quad (2)$$

$s$  – směrodatná odchylka pro výběrový soubor

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

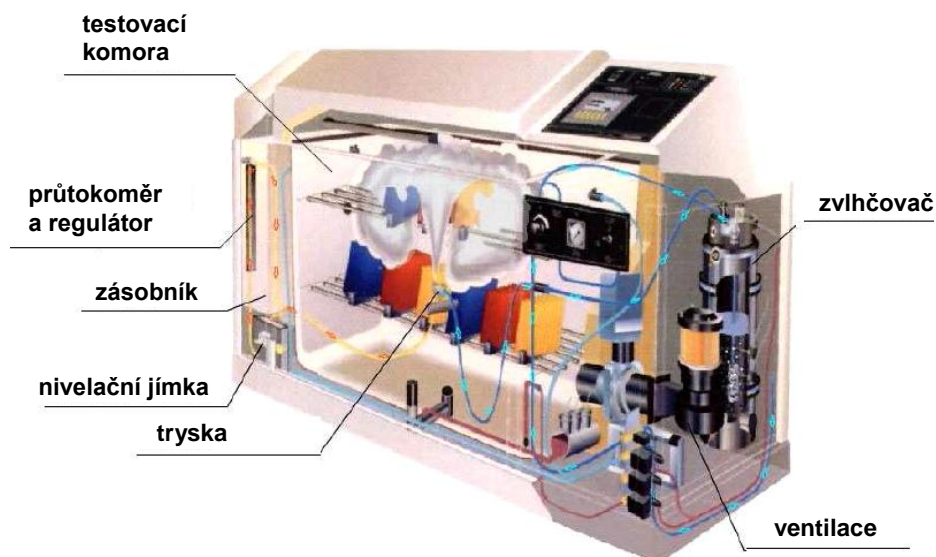
$V$  – variační koeficient

Porovnání svařovacích režimů CMT a Synchronpulz bylo provedeno z hlediska výskytu dutin a jejich plošné velikosti ve svarovém spoji. Průměrná velikost pórů je až 10krát větší při svařování technologií Synchronpulz oproti CMT (tab. 8). Z tohoto důvodu nebylo možné vzorek svaru 7 dále použít. K následnému testování korozní odolnosti a mechanických vlastností byl vybrán vzorek 3 a 10. S drobnými výhradami svarový spoj vyhovuje.

Analýza vnitřní struktury zde potvrzuje již dříve zmíněný fakt, že při svařování dochází k tavení na straně hliníkového profilu, kdežto u pozinkované oceli se jedná o pájený spoj.

### 3.4 Korozní odolnost testovaných CMT spojů

Zkouška korozní odolnosti svarových spojů byla provedena standardní metodou pro zrychlené laboratorní korozní zkoušky dle normy ČSN EN ISO 9227 [43] (*Zkouška solnou mlhou – metoda NSS*). Pro daný experiment byla použita komora Liebisch typ S400M-TR.



Obr. 33 Laboratorní komora Liebisch typu S400M-TR [26]

#### Parametry zkoušky

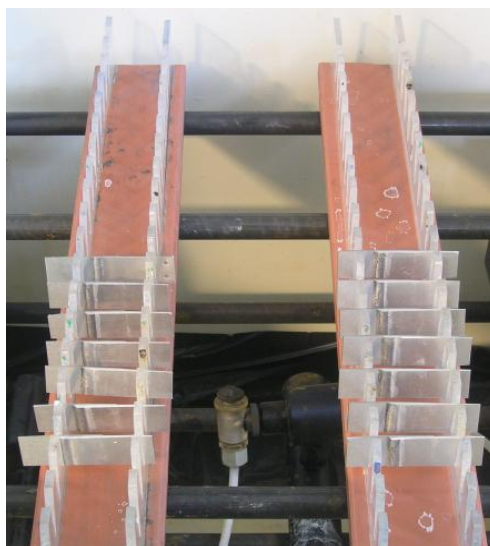
- Teplota v prostředí zkušebních vzorků:  $35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- koncentrace chloridu sodného v rozprašovaném médiu:  $50 \pm 5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ ;
- hodnota pH solného roztoku:  $6,5 - 7,2$ ;
- doba zkoušky v první etapě byla stanovena v intervalech **10, 20 a 30 dnů**.

Na základě každodenního vizuálního pozorování se v závislosti na korozní rychlosti mohou dané intervaly lišit.

#### 3.4.1 Příprava svařených vzorků

Před umístěním do solné komory byly vybrané vzorky svaru rozřezány na malé zkušební o šířce 20 mm pomocí pásové pily ve školní laboratoři ústavu techniky a automobilové dopravy Mendelovy univerzity. Takto bylo připraveno přibližně 20 zkušebních vzorků.

Vzorky v solné mlze byly vystaveny agresivnímu prostředí po dobu přibližně jednoho měsíce. Kontrola probíhala pravidelně a ve stanovených intervalech byly odebírány vždy 3 kusy pro další měření. K vyhodnocení celkové degradace svarového spoje byl jeden vybraný vzorek záměrně ponechán v komoře déle. Vzorky byly umístěny do speciálního stojanu, hodnocení bylo provedeno vizuálně na spádové ploše.



Obr. 34 Umístění vzorků v solné komoře (zkouška solnou mlhou)

### ***Antikorozní ochrana organickým nátěrovým systémem***

Jelikož při svařování nedochází k protavení samotného ocelového základu, ale svarový spoj je tvořen pouze jeho částečným natavením, dochází uvnitř svaru k tvorbě intermetalických fází. Tyto intermetalické fáze se mohou negativně projevovat právě v důsledku snížení celkové antikorozní odolnosti vytvořeného svaru. Z tohoto důvodu byla na 3 připravené vzorky zvolena antikorozní ochrana organickým nátěrovým systémem ZINEX – S 2357.

Jedná se o epoxyesterovou zinkovou barvu na bázi disperze zinkového prachu v roztoku epoxyesterové pryskyřice v organických rozpouštědlech s přidavkem aditiv. Barva se používá jako základní nátěr ocelových předmětů, na které jsou kladeny vysoké požadavky z hlediska protikorozní ochrany. Suchý nátěr chrání ocel elektrochemicky. V tloušťce maximálně 25  $\mu\text{m}$  je možné svařovat elektricky i bodově. Barva je dostupná v šedém odstínu č. 0111 a nanáší se na dobře očištěný a odmaštěný povrch, upravený nejlépe tryskáním, v jedné až dvou vrstvách s intervalem nanášení 2 až 3 hodiny při teplotě 23 °C. Používá se ředidlo S 6003. Doporučený způsob aplikace je štětcem nebo stříkáním, v našem případě byla barva nanášena štětcem.

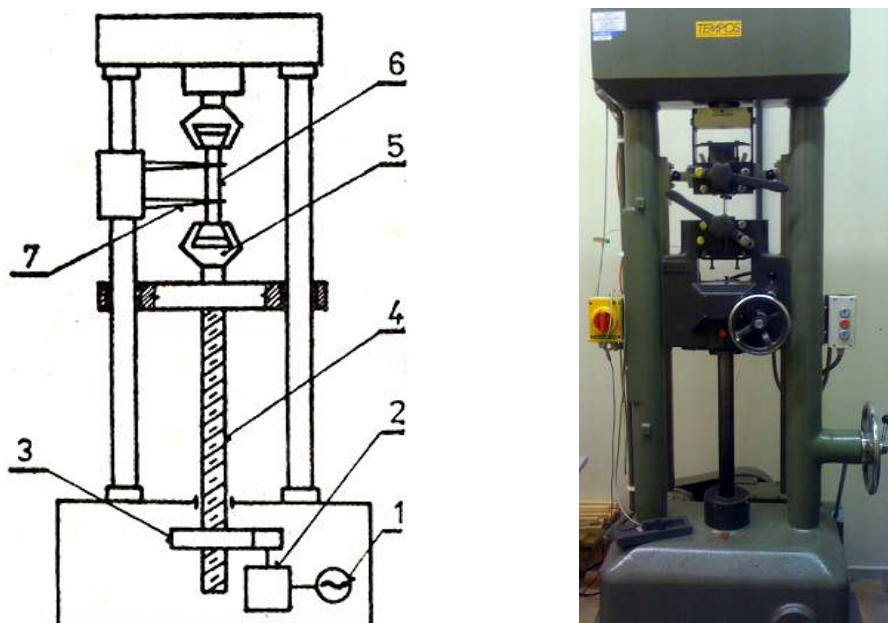
Jako vrchní nátěr, který se doporučuje nanášet po 8 až 24 hodinách, je možné použít všechny běžné druhy nátěrových hmot syntetických, olejových, popřípadě další výrobky s vysokou odolností vůči povětrnostním vlivům. Pozinkované podklady musí být okysličené. Nátěr zinkové barvy o tloušťce 25  $\mu\text{m}$  až 30  $\mu\text{m}$  chrání jemně otryskané předměty za normálních podmínek 6 měsíců. [39] Zkušební vzorky chráněné zinkovou barvou byly ponechány v solné komoře po dobu přibližně 30 dnů.

### 3.5 Destruktivní zkouška tahem

Tahová zkouška dle normy ČSN EN ISO 6892-1 (42 0310) [44, 46] představuje základní zkoušku používanou k ověření pevnostních a plastických vlastností materiálů. Zkouška spočívá v deformaci zkušební tyče jednoosým tahovým zatížením obvykle do přetržení pro stanovení jedné nebo více napět'ových a deformačních charakteristik zavedených v normě. Pokud není stanoveno jinak, zkouší se při okolní teplotě v rozmezí od 10 °C do 35 °C.

#### 3.5.1 Zkušební zařízení

Měření trhací zkoušky bylo provedeno na zkušebním stroji ZDM 5 se snímači propojenými s počítačem. Naměřené hodnoty zatěžující síly  $F$  [N], okamžitého prodloužení  $\Delta L$  [mm] a času  $t$  [s] byly zaznamenávány do textového souboru.



Obr. 35 Mechanický univerzální trhací stroj ZDM 5 (schéma [28] a fotografie)

Popis obrázku 35: 1 – elektromotor	5 – upínací hlava
2 – převodovka	6 – zkušební těleso
3 – ozubené kolo s maticí	7 – snímač prodloužení zkušebního tělesa
4 – pohybový šroub	

Trhací stroj disponuje maximální silou 50 kN. Upínání je možné do rozsahu 700 mm. Zkušební tyč je jedním koncem uchycena v horní upínací hlavě spojené se siloměrným zařízením a druhým koncem pomocí spodní upínací hlavy k pohyblivému střednímu příčníku, který je uváděn do pohybu motorem pomocí trapézového šroubu. Při pohybu středního příčníku dochází k postupnému zatěžování a deformaci zkušební tyče.

### 3.5.2 Použité vztahy pro vyhodnocení destruktivní zkoušky tahem

Průběh zkoušky tahem se zobrazuje prostřednictvím tzv. tahových diagramů. Základní napěťové a deformační charakteristiky materiálu se stanovují podle následujících vztahů.

- **Pevnost v tahu** – je napětí odpovídající maximální zatěžující síle.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

$R_m$  – napětí na mezi pevnosti v tahu

$F_m$  – maximální zatěžující síla [N]

$S_0$  – počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče [ $\text{mm}^2$ ]

- **Mez kluzu** – je definována jako napětí, při kterém se zkoušený materiál začíná plasticky deformovat. Některé materiály (měkká ocel) vykazují výrazné odlišení, tzv. horní mez kluzu ( $R_{eH}$ ), resp. dolní mez kluzu ( $R_{eL}$ ). U vysocepevných materiálů lze naopak pozorovat nevýraznou mez kluzu, kdy zatížení po lineárním průběhu pokračuje parabolickým zpevněním k mezi pevnosti. Proto bylo přijato ustanovení tzv. smluvní meze kluzu ( $R_{pX}$ ). Např. smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  je napětí, které způsobí trvalou deformaci o velikosti 0,2 % z počáteční délky zkušební tyče ( $L_0$ ). [46]

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

$R_e$  – napětí na mezi kluzu v tahu

$F_e$  – zatěžující síla na mezi kluzu v tahu [N]

- **Poměrné prodloužení** – je přírůstek počáteční měřené délky v každém okamžiku během zkoušky vztažený na počáteční měřenou délku zkušební tyče.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \Rightarrow \varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad [-] \quad (6)$$

$\varepsilon$  – poměrné prodloužení

$L_0$  – počáteční délka zkušební tyče [mm]

$L$  – délka zkušební tyče v kterémkoli okamžiku tahové zkoušky [mm]

$\Delta L$  – přírůstek počáteční délky v každém okamžiku během zkoušky [mm]



- **Tažnost** – je trvalé prodloužení měřené délky po přetržení vyjádřené v procentech počáteční měřené délky.

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7)$$

$A$  – tažnost

$L_u$  – délka zkušební tyče naměřená po přetržení [mm]

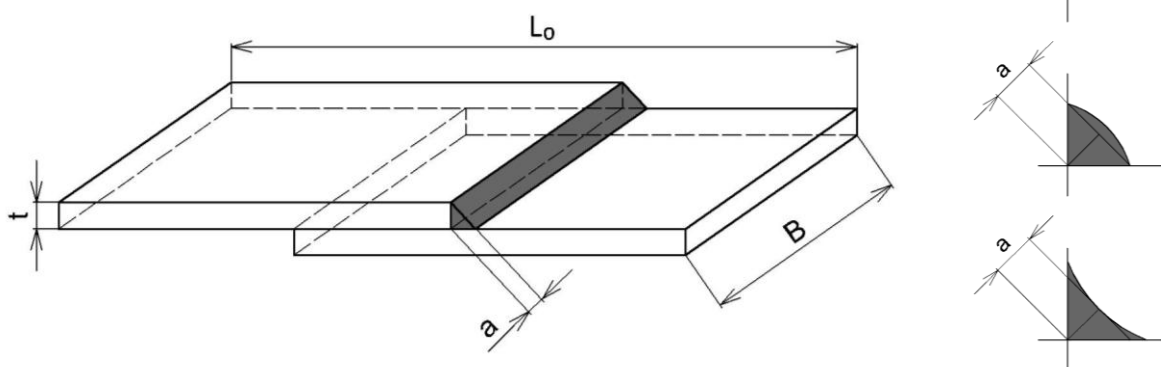
- **Kontrakce** – je největší změna příčného průřezu po přetržení zkušební tyče vyjádřená v procentech počátečního příčného průřezu.

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (8)$$

$Z$  – kontrakce

$S_u$  – plocha příčného průřezu zkušební tyče po přetržení [mm<sup>2</sup>]

- **Výpočtová tloušťka koutového svaru** – je definována jako výška největšího rovnoramenného trojúhelníku vepsaného do průřezu svaru bez závaru. V našem případě byl použit koutový svar na přeplátované spojení. Za nebezpečný (nosný) průřez se považuje obdélník ležící ve středové rovině, který rozděluje profil svaru na dvě stejné části. Rozměry nosného průřezu koutového svaru jsou vymezeny jeho tloušťkou „ $a$ “ a délkou „ $B$ “. [45]



Obr. 36 Definice šířky lomové plochy přeplátovaného spoje (zdroj: autor)

$$a = \sin 45^\circ \cdot t \Rightarrow a = 0,71 \cdot t \quad [\text{mm}] \quad (9)$$

$a$  – výpočtová tloušťka koutového svaru

$t$  – tloušťka základního materiálu (v našem případě plech AlMg3) [mm]

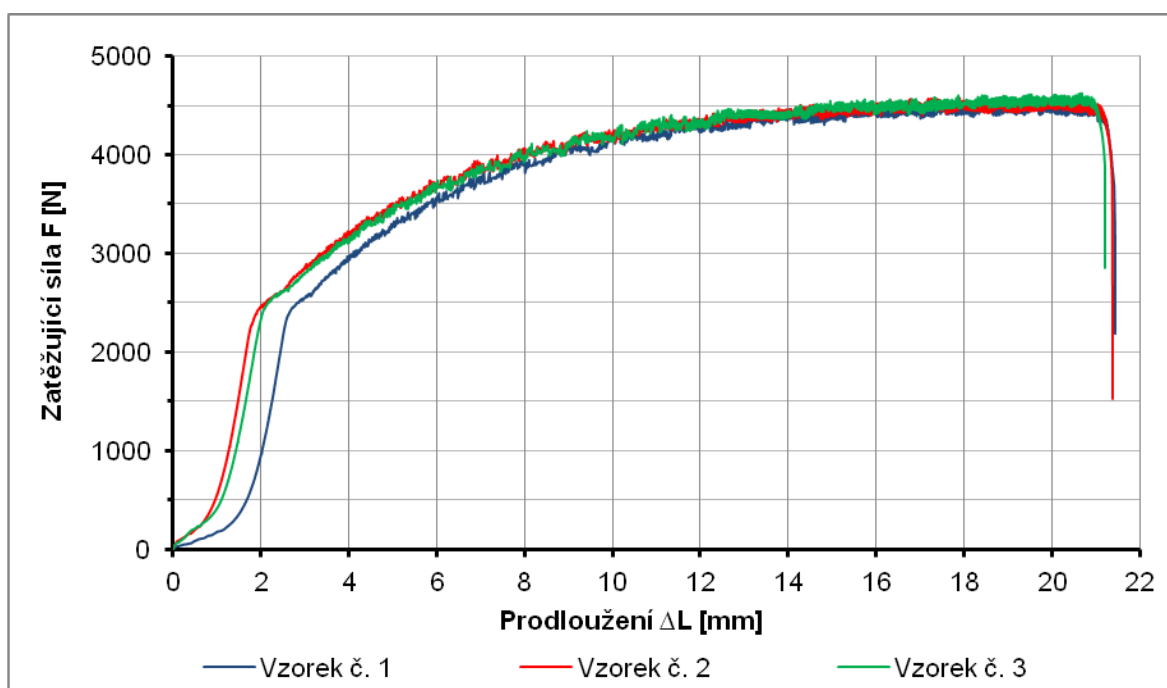
Zkoušení svarových spojů destruktivní zkouškou představuje zvláštní specifiku. Orientace zatížení při zkoušce je většinou kolmá k podélné ose svaru. Vzhledem k heterogenitě svarového spoje je tato zkouška většinou považována za informativní. Ze stejných důvodů se u této zkoušky běžně vyhodnocuje pouze pevnost v tahu  $R_m$ . [24]

### 3.6 Vyhodnocení korozní odolnosti a změn mechanických vlastností

Aby bylo možné porovnávat a hodnotit korozní odolnost, 3 kusy z připravených vzorků svarů byly ihned podrobeny zkoušce tahem bez vystavení agresivnímu prostředí. Na dalších vzorcích byly zjišťovány mechanické vlastnosti po jejich odebrání ze solné komory v daných intervalech. Z hlediska porovnání mechanických vlastností byla tahová zkouška také provedena na vzorcích základních materiálů.

#### 3.6.1 Zkouška tahem základního materiálu AlMg3

Výsledky měření destruktivní zkoušky jednotlivých vzorků budou graficky zobrazeny tahovými diagramy. Naměřené a výsledné vypočtené hodnoty podle uvedených vztahů v kap. 3.5.2 se obvykle zapisují do záznamu o zkoušce tahem. Kromě číselných hodnot je možné uvést do poznámky např. charakter a vzhled lomové plochy, případně další okolnosti, které ovlivnily průběh zkoušky.

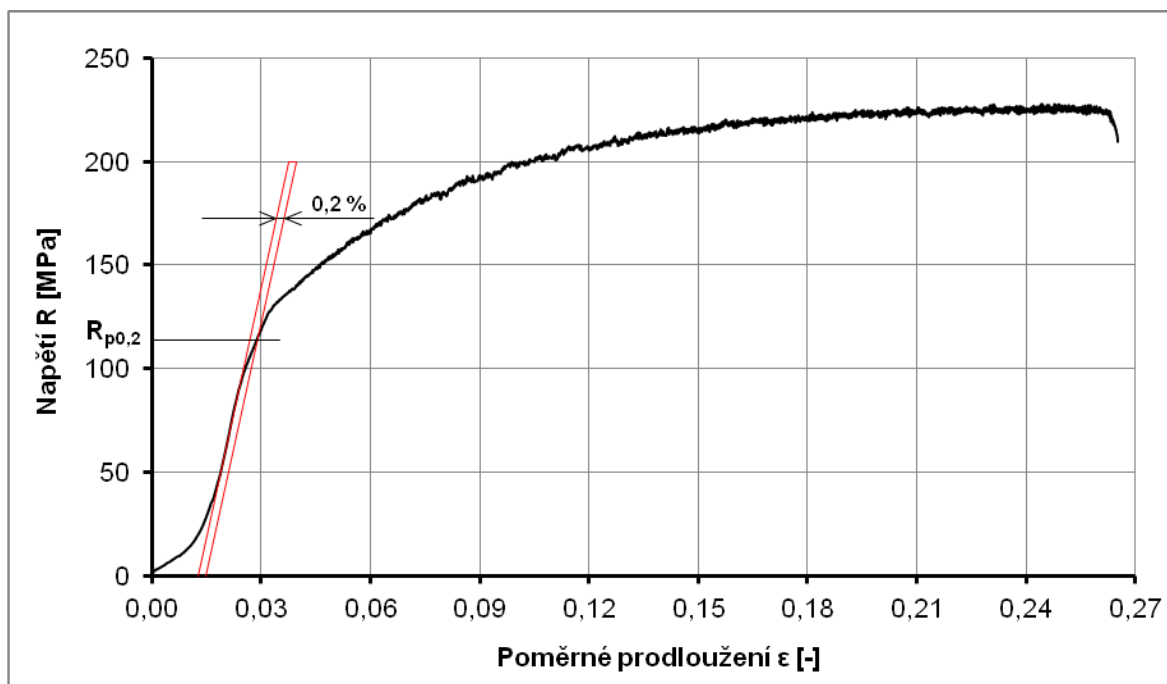


Obr. 37 Pracovní diagram zkoušky tahem slitiny hliníku AlMg3

Tab. 9 Záznam o zkoušce tahem slitiny hliníku AlMg3

Rozměry zkušební vzorku							
Před zkouškou				Po zkoušce			
$L_0$ [mm]	$B_0$ [mm]	$t_0$ [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$L_u$ [mm]	$B_u$ [mm]	$t_u$ [mm]	$S_u$ [mm <sup>2</sup> ]
80,0	20,0	1,0	20,0	101,34	17,90	0,77	13,78
Zatěžující síla				Výsledné hodnoty			
				Napětí		Tažnost	Kontrakce
$F_m$ [N]		$F_{p0,2}$ [N]		$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	Z [%]
4582,90		2493,50		229,15	124,68	26,68	31,12
				$W_f$ [J]			
				79,16			

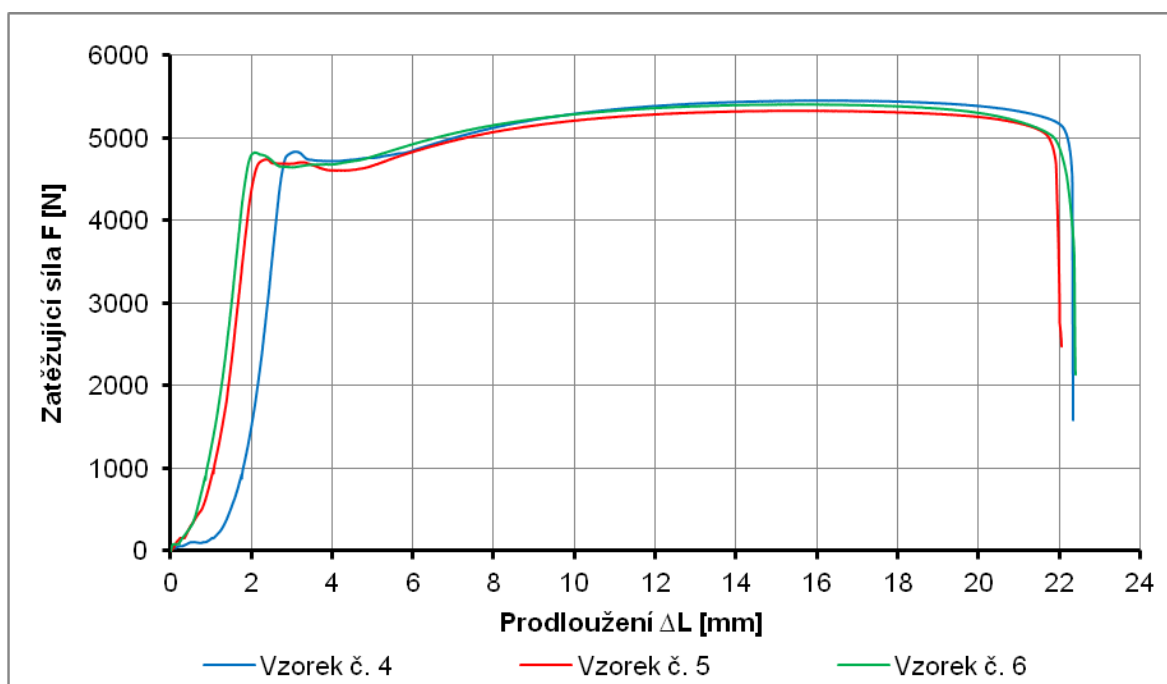
Pracovní diagram zkoušky tahem materiálu AlMg3 (obr. 37) zobrazuje závislost zatěžující síly na přírůstku počáteční délky zkušební vzorku. Jednotlivé křivky byly sestrojeny ze skutečně naměřených hodnot zaznamenaných zkušebním zařízením.



Obr. 38 Smluvní tahový diagram s nevyraznou mezí kluzu slitiny hliníku AlMg3

Z uvedeného tahového diagramu v souřadnicích smluvního napětí  $R$  a poměrného prodloužení  $\epsilon$  (obr. 38) není možné jednoznačně určit mez kluzu. V tomto případě byla sestrojena přímka rovnoběžná s úsekem lineárního průběhu napětí ve vzdálenosti 0,002 na vodorovné ose. V průsečíku rovnoběžné přímky s tahovou křivkou bylo graficky odečteno napětí  $R_{p0,2}$ . Jedná se o tzv. smluvní mez kluzu.

### 3.6.2 Zkouška tahem základního materiálu – ocel DX51D + AZ150



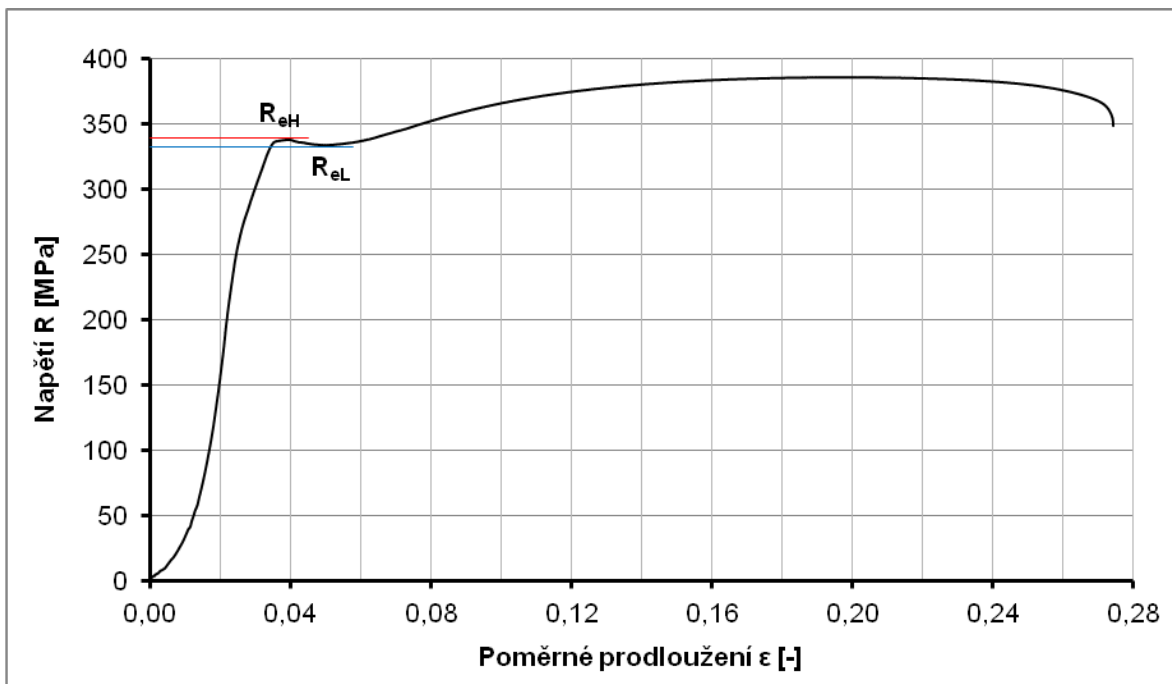
Obr. 39 Pracovní diagram zkoušky tahem oceli DX51D + AZ150

Na zobrazených pracovních diagramech (obr. 37 a 39) je možné pozorovat, že zatěžující síla roste nelineárně z počátku souřadnicové soustavy. Nežádoucí jev byl způsoben počátečním prokluzem zkušební vzorku v upínacích hlavách trhačského stroje.

Při statickém zvyšování trhačí síly v průběhu zkoušky dochází k růstu svírací síly vzorku v upínacích hlavách s protiskluzovým povrchem, avšak zpočátku byla velikost sevření příliš nízká, a proto došlo k nepatrnému prokluzu. Tento problém se objevuje i v následujících pracovních diagramech CMT svarových spojů.

Tab. 10 Záznam o zkoušce tahem oceli DX51D + AZ150

Rozměry zkušební vzorku								
Před zkouškou				Po zkoušce				
$L_0$ [mm]	$B_0$ [mm]	$t_0$ [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$L_u$ [mm]	$B_u$ [mm]	$t_u$ [mm]	$S_u$ [mm <sup>2</sup> ]	
80,0	20,0	0,7	14,0	102,29	16,06	0,57	9,15	
Zatěžující síla				Výsledné hodnoty				
				Napětí			Tažnost	Kontrakce
$F_m$ [N]	$F_{eH}$ [N]	$F_{eL}$ [N]	$R_m$ [MPa]	$R_{eH}$ [MPa]	$R_{eL}$ [MPa]	A [%]	Z [%]	$W_f$ [J]
5394,10	4803,53	4647,53	385,29	343,11	331,97	27,86	34,67	106,41



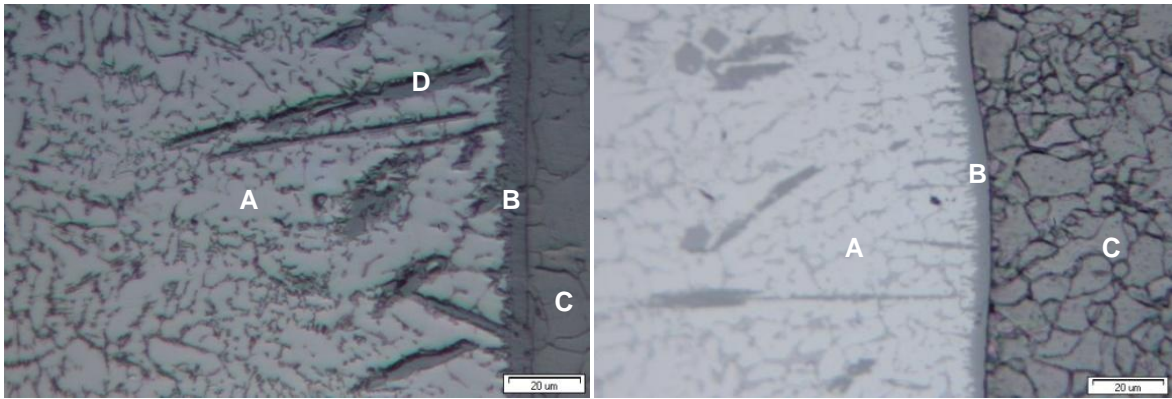
Obr. 40 Smluvní tahový diagram s horní a dolní mezí kluzu oceli DX51D + AZ150

Tahový diagram oceli DX51D + AZ150 v souřadnicích ( $R - \epsilon$ ) zobrazuje naopak výraznou mez kluzu oproti materiálu AlMg3. Z grafické závislosti na obr. 40 byla odečtena tzv. horní mez kluzu  $R_{eH}$  a dolní mez kluzu  $R_{eL}$ . Horní mez kluzu odpovídá nejvyššímu napětí před prvním okamžikem jeho poklesu. Dolní mez kluzu je potom nejnižší napětí při poklesu v průběhu plastického kluzu kovu.

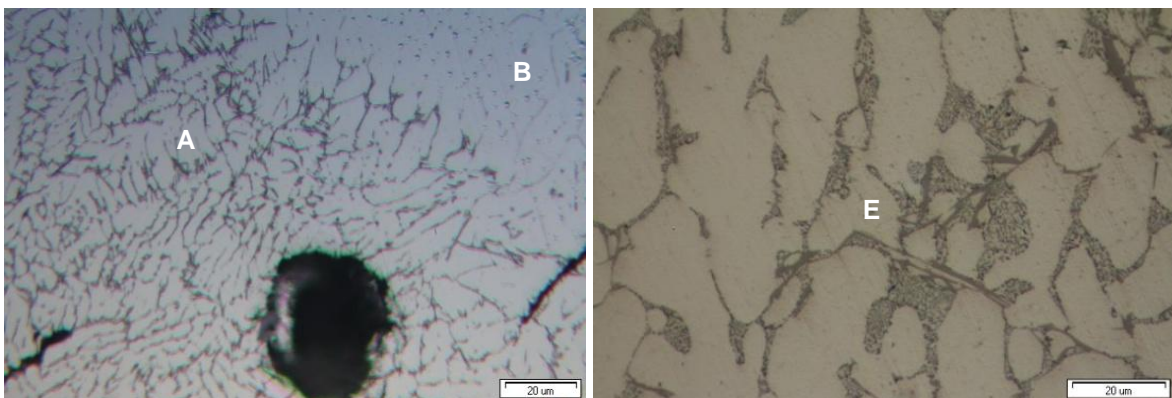
### 3.6.3 Vlastnosti CMT svarového spoje před korozní zkouškou

Struktura svarového spoje a základního materiálu, což je v tomto případě ocel, je ukázána na obr. 41. Dále je zde možné vidět přechodovou vrstvu mezi svarem a ocelovým základem. Tato metalografická analýza byla provedena na vzorcích, které nebyly podrobeny korozní degradaci v agresivním prostředí solné mlhy.

Při svařování dochází k natavení antikorozičního ochranného povlaku Aluzinc. Jak je patrné z uvedené struktury, na ocelovém feritickém základu se vyskytuje kombinace těchto prvků Al a Zn. Hrubé jehlice hliníkových slitin zasahují z přechodové oblasti do samotného svarového kovu. Potenciální korozní odolnost svarových spojů může být rapidně snížena z důvodu značného rozdílu elektrodových napětí při spojení dvou kovů Fe (-0,44 V) a Al (-1,66 V).



Obr. 41 Struktura oblasti svarového spoje a základního materiálu



Obr. 42 Struktura přechodové oblasti a svarového spoje

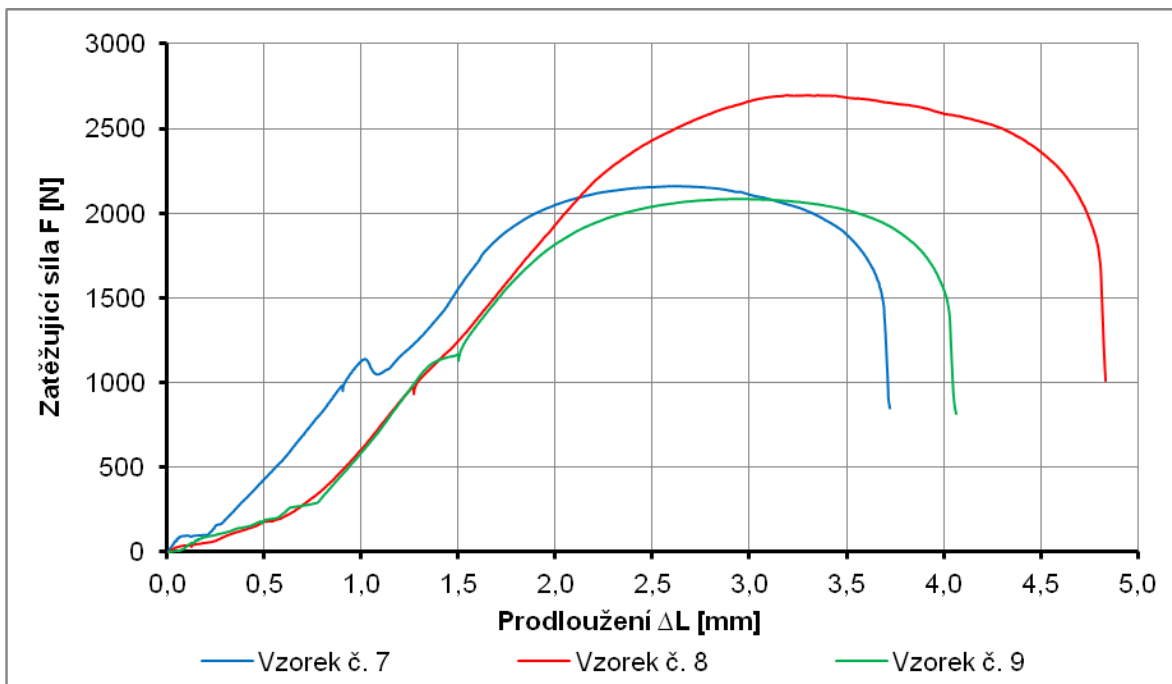
Popis obrázku 41 a 42: A – oblast svarového spoje      D – jehlice hliníkových slitin  
 B – přechodová vrstva      E – čistý svar (hliník  
 C – základní materiál (ocel)      a sloučeniny AlSi)

Přechodová část mezi svarovým kovem a základním materiálem je ovlivněna především rozdílnou dilatací obou materiálů. Tato oblast je značně náchylná k tvorbě pórů, dutin i trhlin. Nehomogenity mohou dosahovat rozměrů větších než 20 µm (obr. 42).

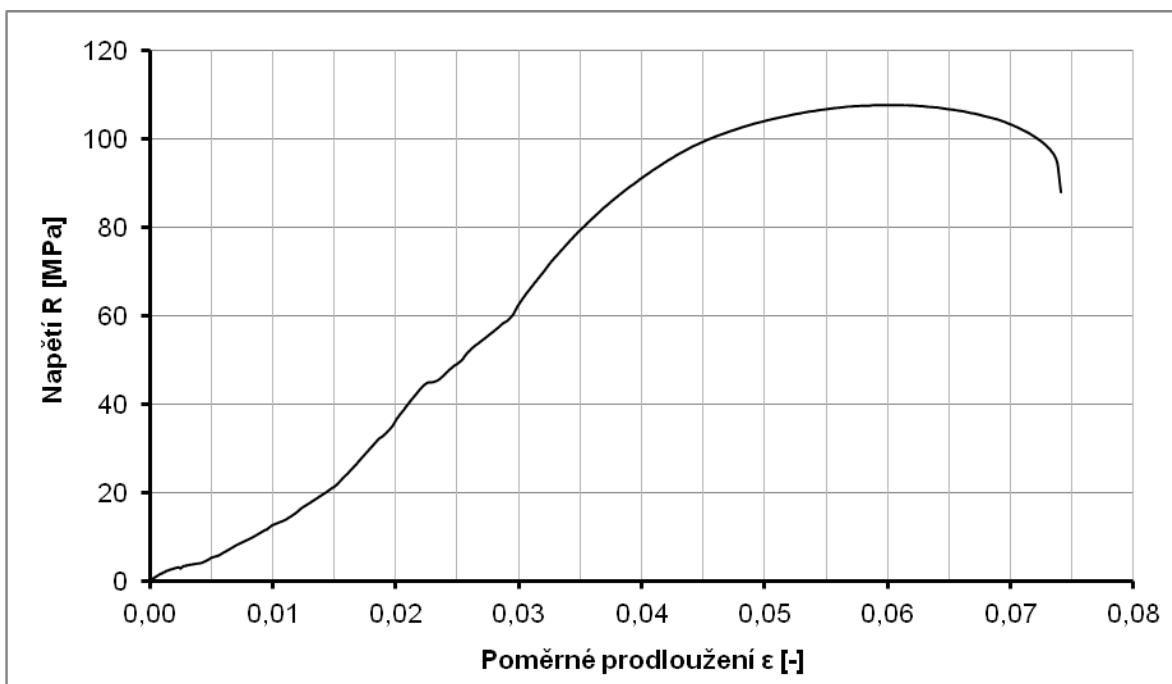


Obr. 43 Přetržený vzorek č. 9 bez korozní degradace

Popis obrázku 43: A – slitina hliníku AlMg3      C – základní materiál (ocel)  
 B – svarový spoj



Obr. 44 Pracovní diagram zkoušky tahem CMT svaru



Obr. 45 Smluvní tahový diagram CMT svaru před korozní zkouškou

Průběh zatěžující síly v diagramu závislosti ( $F - \Delta L$ ) a napětí v souřadnicích ( $R - \epsilon$ ) heterogenního CMT svaru se poněkud odlišuje od tahových diagramů základních materiálů. V tomto případě není možné odečíst mez kluzu. Z uvedených tahových křivek byla vyhodnocena maximální zatěžující síla a po přepočtu pevnost v tahu.

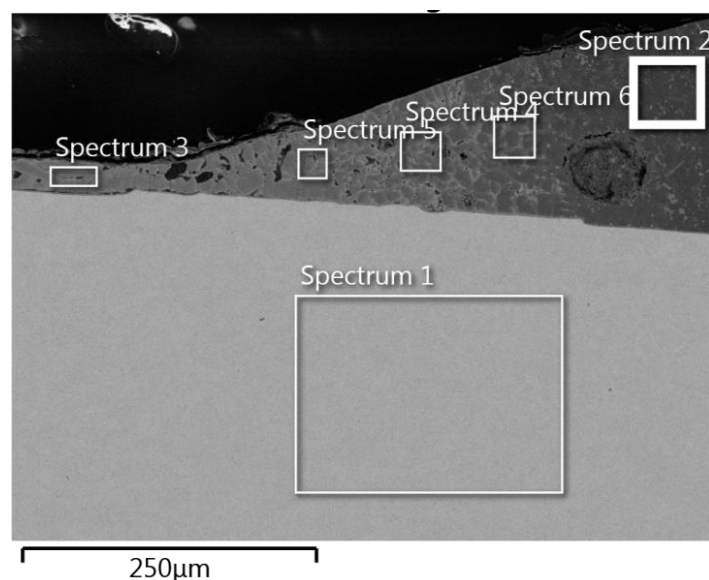
Tab. 11 Záznam o zkoušce tahem CMT svaru

Rozměry zkušební vzorku				
$L_0$ [mm]	$B_0$ [mm]	$t_0$ [mm]	$S_k$ [mm <sup>2</sup> ]	$L_u$ [mm]
50,0	20,0	1,5	21,21	54,21
Maximální zatěžující síla $F_m$ [N]	Výsledné hodnoty			
	Napětí $R_m$ [MPa]		Přetvárná práce $W_f$ [J]	
2313,00	109,04		6,51	

### *Analýza prvkového složení kovového povlaku elektronovou mikroskopií*

K mikroanalýze prvkového složení byl použit elektronový rastrovací mikroskop (zkráceně SEM – Scanning Electron Microscope) VEGA II XMU (od firmy Tescan) ve spojení s energiově disperzním analyzátozem QUANTAX 800. Tato metoda (EDS) na principu detekce charakteristického RTG záření se používá pro analýzu chemického složení vzorků. Je možné zjistit jaké prvky a v jakém množství se nachází ve vzorku.

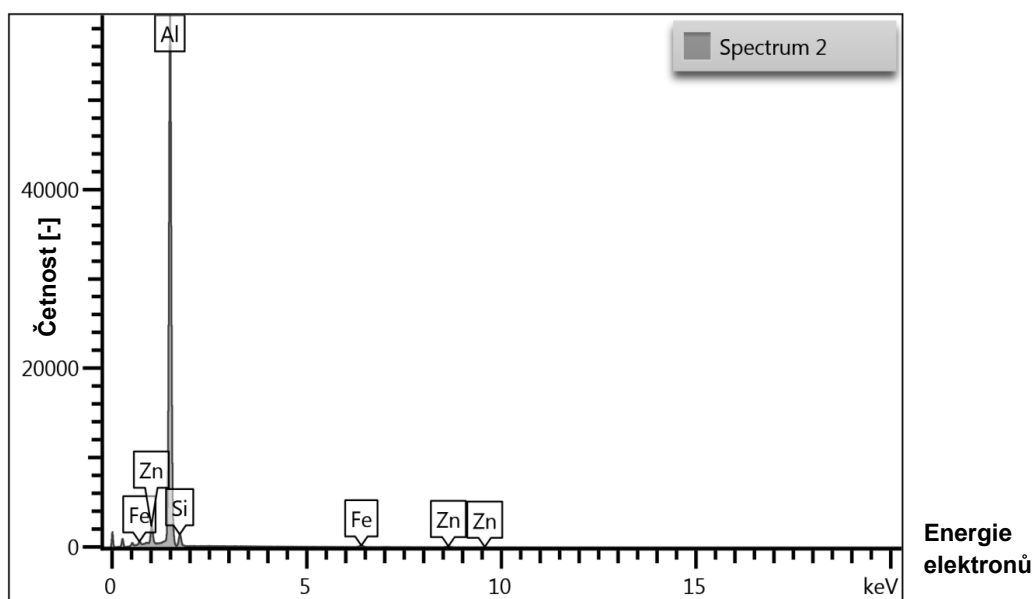
Měření prvkového složení se provádělo ve třech ploškách při přístrojovém zvětšení 100krát. Urychlovací napětí činilo 15 kV. Výsledky chemického složení kovového povlaku v jednotlivých oblastech jsou uvedeny v tab. 12. Jedná se o průměrnou hodnotu ze třech měření.



Obr. 46 Zkoumané oblasti kovového povlaku elektronovým mikroskopem

- Popis obrázku 46: Spectrum 1 – oblast základního materiálu (ocel)  
 Spectrum 2 – oblast svarového spoje  
 Spectrum 3 – oblast povrchové ochrany (Aluzinc)





Obr. 47 Četnost rentgenového signálu ve zkoumané oblasti Spectrum 2

Výstupem EDS analýzy je spektrum četnosti rentgenového signálu v jednotlivých energetických oknech, což jsou píky, které odpovídají jednotlivým prvkům a jejichž výška je úměrná hmotové koncentraci daného prvku ve zkoumaném vzorku (obr. 47). Skutečné hmotnostní množství prvků bylo nutné přepočítat pomocí vyhodnocovacího software.

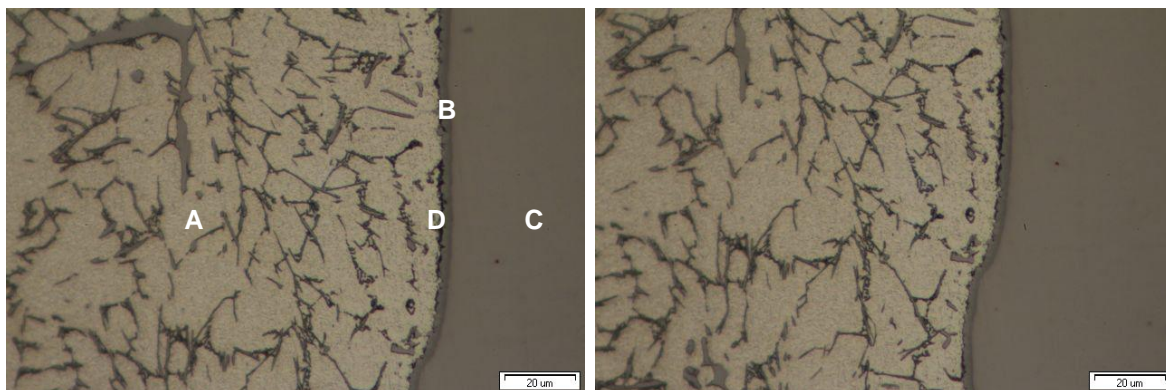
Tab. 12 Chemické složení kovového povlaku v jednotlivých oblastech

Oblast měření	Hmotnostní množství [%]					
	Al	Si	S	Fe	Zn	Celkem
Oblast základního materiálu (ocelový plech) „Spectrum 1“	–	0,16	–	99,84	–	100,00
Oblast svarového spoje „Spectrum 2“	87,93	4,23	–	2,48	5,36	100,00
Oblast povrchové ochrany Aluzinc „Spectrum 3“	62,27	2,60	0,26	0,34	34,53	100,00

Podle výsledků v tab. 12 převažuje ve svarovém spoji hmotnostní množství hliníku (87,93 %). Dále jsou zde obsaženy další prvky jako křemík, železo a zinek. Povrchová ochrana Aluzinc obsahuje 62,27 % hliníku; 2,60 % křemíku; 34,53 % zinku a v malém množství další prvky. Norma předepisuje 55 % Al; 1,6 % Si a zbytek Zn (uvedeno v tab. 3). Je zřejmé, že chemické složení antikorozičního povlaku Aluzinc se od výroby mírně odlišuje.

### 3.6.4 Vlastnosti CMT svarového spoje po 10 dnech v prostředí solné mlhy

Jelikož během korozní zkoušky nenastala zvýšená vizuální degradace svarového spoje, byla zvolena kontrola pomocí metalografických preparátů. Jak je patrné z obr. 48, počáteční fáze degradace svarového spoje nastává v těsné blízkosti základního ocelového materiálu. Primárně jsou napadány zrna ve svaru. Vyšší korozní odolnost se projevuje v oblastech se zvýšeným obsahem křemíku.



Obr. 48 Struktura svarového spoje po desetidenní expozici v solné mlze

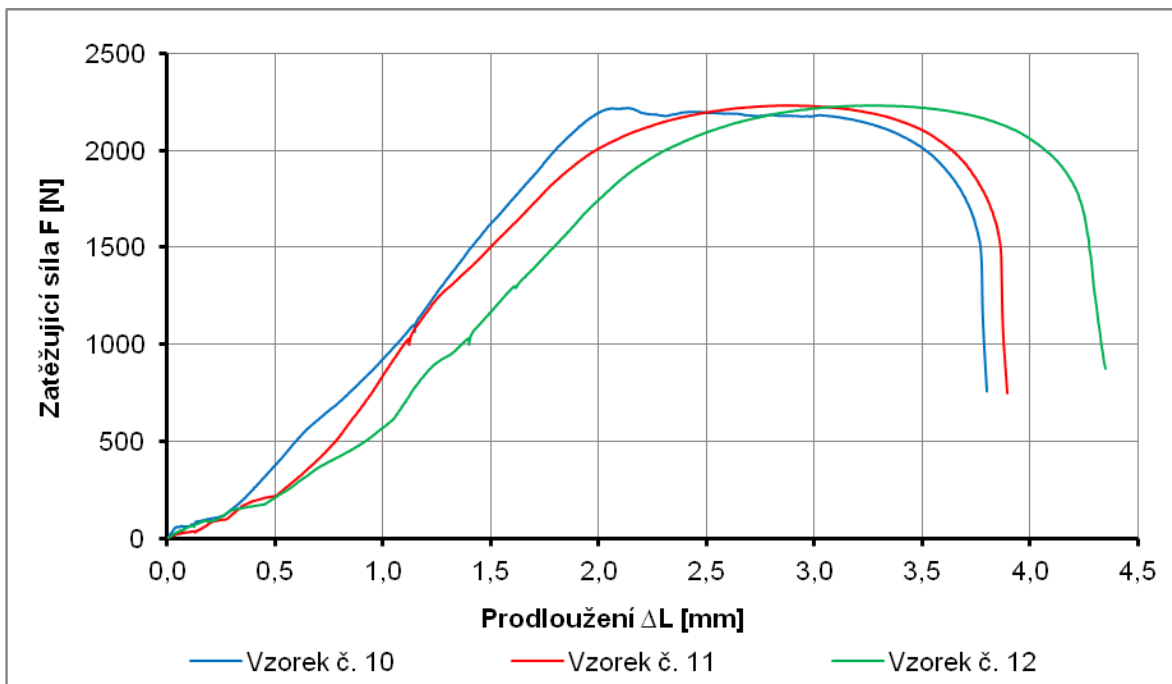
Popis obrázku 48: A – oblast svarového spoje  
B – přechodová vrstva  
C – základní materiál (ocel)  
D – částečné narušení mezi hranicemi zrn

Korozní napadení začíná na rozhraní intermetalických fází Al-Fe v oblasti mezi svarovým kovem a základním ocelovým podkladem.

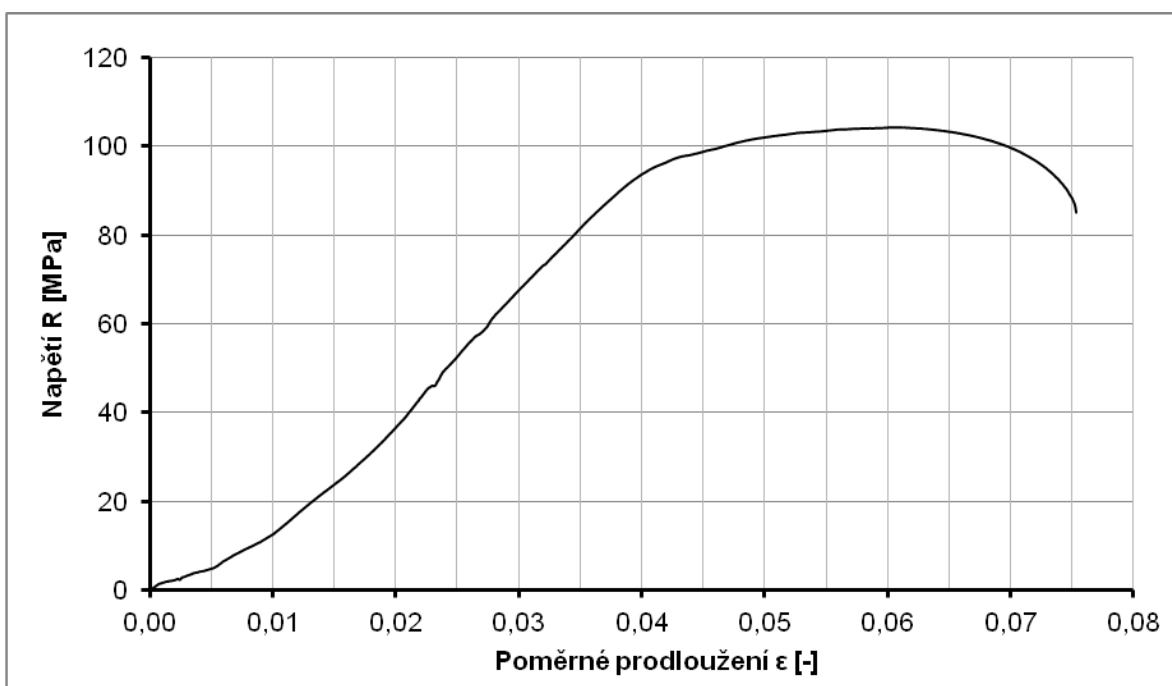


Obr. 49 Přetržený vzorek č. 12

Popis obrázku 49: A – slitina hliníku AlMg3  
B – svarový spoj  
C – základní materiál (ocel)



Obr. 50 Pracovní diagram CMT svaru po 10 dnech v prostředí solné mlhy

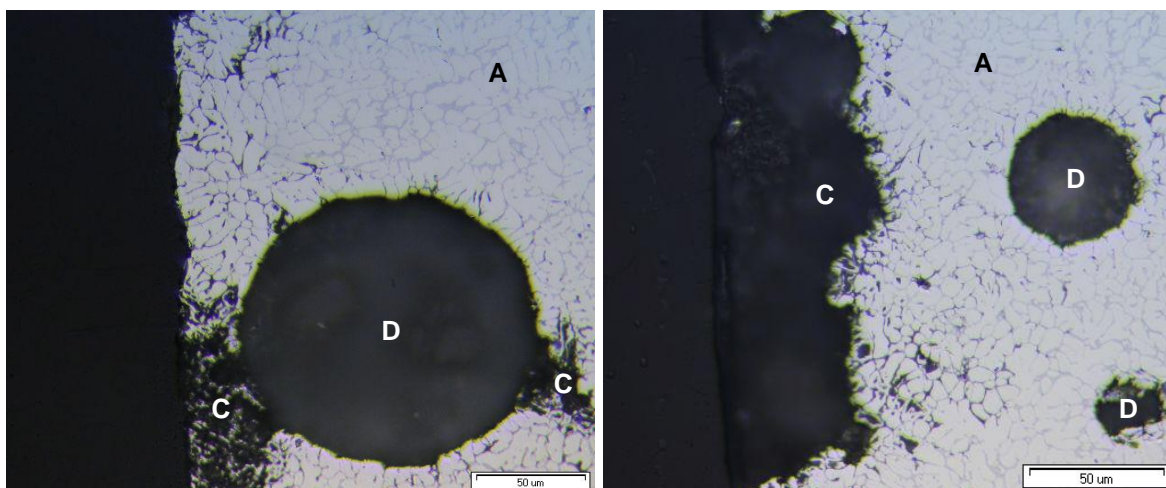


Obr. 51 Smluvní tahový diagram CMT svaru po 10 dnech v prostředí solné mlhy

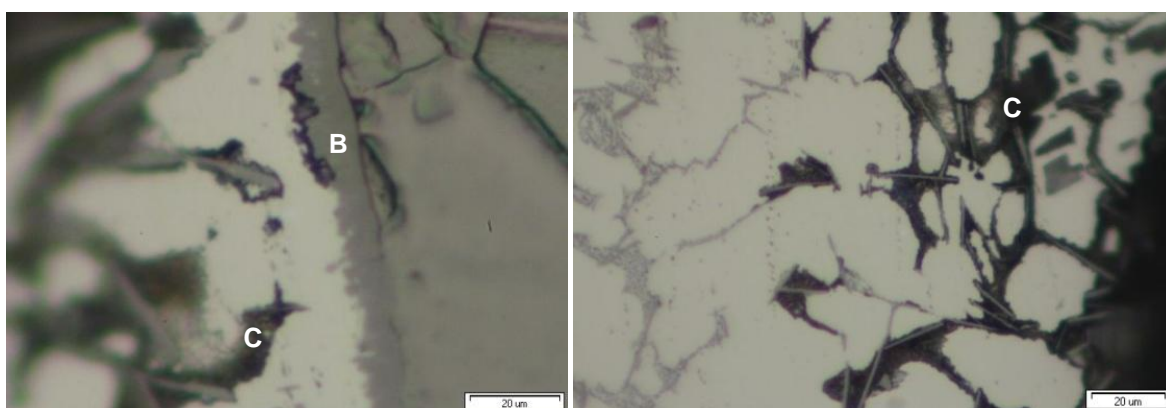
Tab. 13 Záznam o zkoušce tahem CMT svaru po 10 dnech v prostředí solné mlhy

Rozměry zkušebního vzorku				
$L_0$ [mm]	$B_0$ [mm]	$t_0$ [mm]	$S_k$ [mm <sup>2</sup> ]	$L_u$ [mm]
50,0	20,0	1,5	21,21	54,01
Maximální zatěžující síla $F_m$ [N]		Výsledné hodnoty		
		Napětí $R_m$ [MPa]	Přetvárná práce $W_f$ [J]	
2229,03		105,08	5,95	

### 3.6.5 Vlastnosti CMT svarového spoje po 20 dnech v prostředí solné mlhy



Obr. 52 Korozní napadení po hranicích zrn k dutině ve svaru



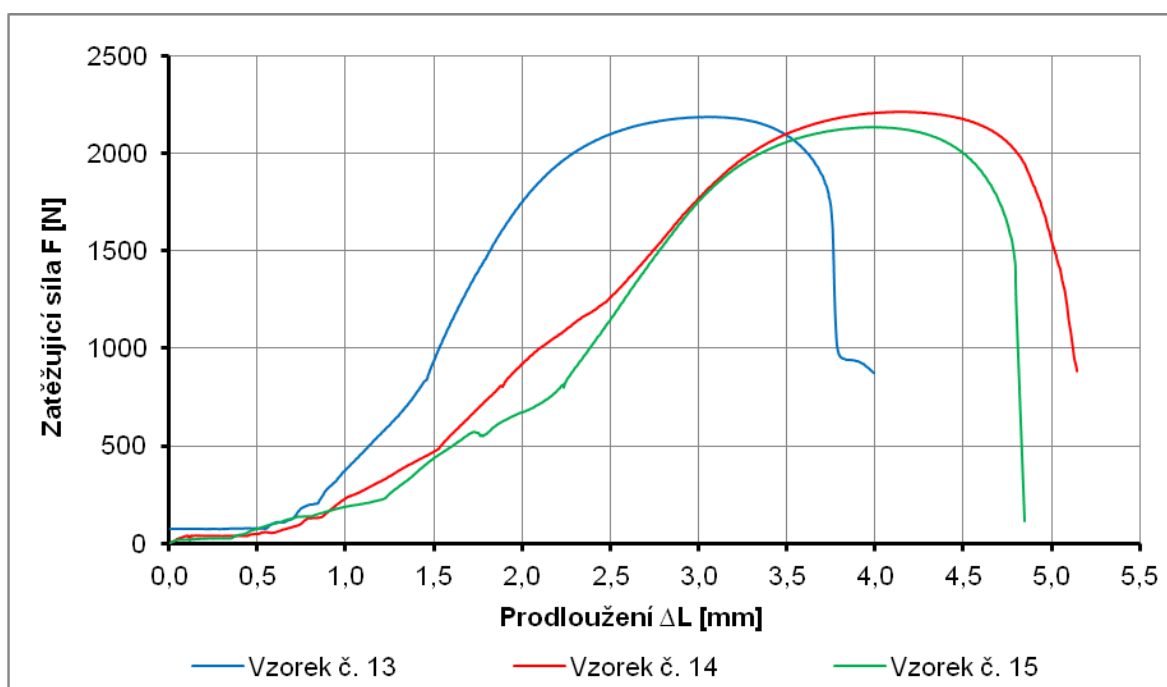
Obr. 53 Průběh koroze po hranicích zrn

Popis obrázku 52 a 53: A – oblast svarového spoje  
 B – přechodová vrstva  
 C – oblast šíření koroze po hranicích zrn  
 D – dutina ve svaru

Po dvacetidenní expozici v agresivním prostředí solné mlhy je korozní napadení poměrně značné. Na obr. 52 je možné vidět šíření koroze po hranicích zrn k dutině, která vznikla při svařování.



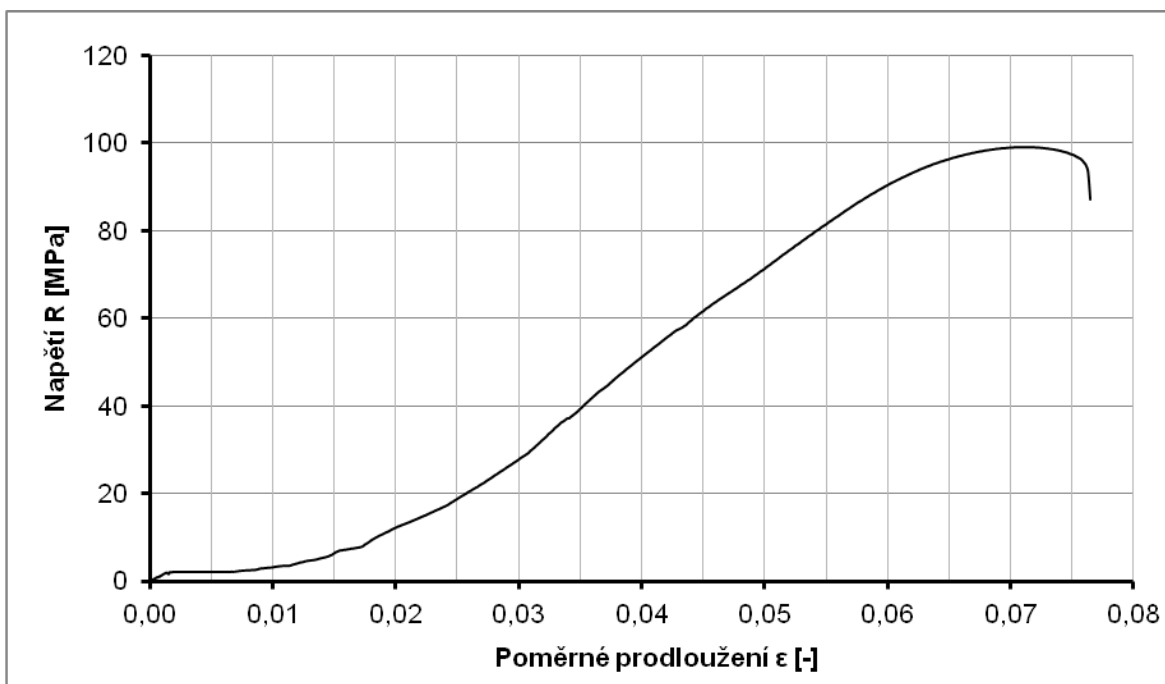
Obr. 54 Přetržený vzorek č. 15



Obr. 55 Pracovní diagram CMT svaru po 20 dnech v prostředí solné mlhy

Tab. 14 Záznam o zkoušce tahem CMT svaru po 20 dnech v prostředí solné mlhy

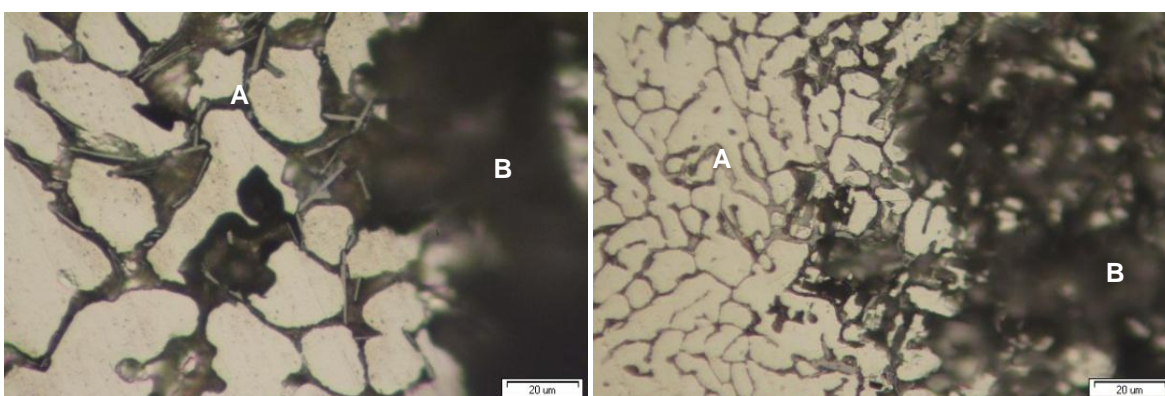
Rozměry zkušebního vzorku				
$L_0$ [mm]	$B_0$ [mm]	$t_0$ [mm]	$S_k$ [mm <sup>2</sup> ]	$L_u$ [mm]
50,0	20,0	1,5	21,21	54,66
Maximální zatěžující síla $F_m$ [N]		Výsledné hodnoty		
		Napětí $R_m$ [MPa]		Přetvárná práce $W_f$ [J]
2179,92		102,76		5,52



Obr. 56 Smluvní tahový diagram CMT svaru po 20 dnech v prostředí solné mlhy

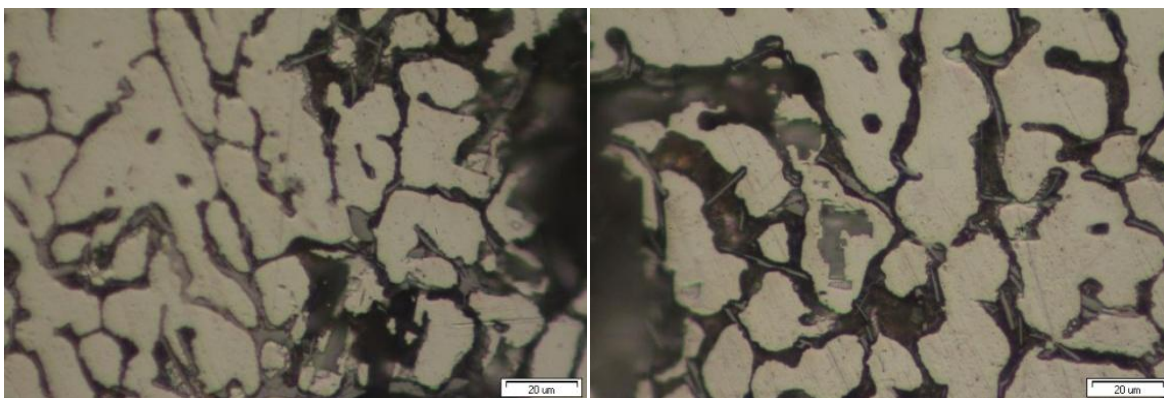
### 3.6.6 Vlastnosti CMT svarového spoje po 30 dnech v prostředí solné mlhy

Jak je patrné z obr. 57 a 58, korozně napadená místa hranic zrn se značně rozšiřují. Ve větší míře se objevují oblasti, které jsou korozi zcela znehodnocené. S postupným zvyšováním korozní degradace klesá velikost síly potřebné na přetržení svarového spoje, a tím pevnost v tahu, což bude v závěrečných kapitolách porovnáno.



Obr. 57 Průběh koroze mezi ocelovým substrátem a svarem

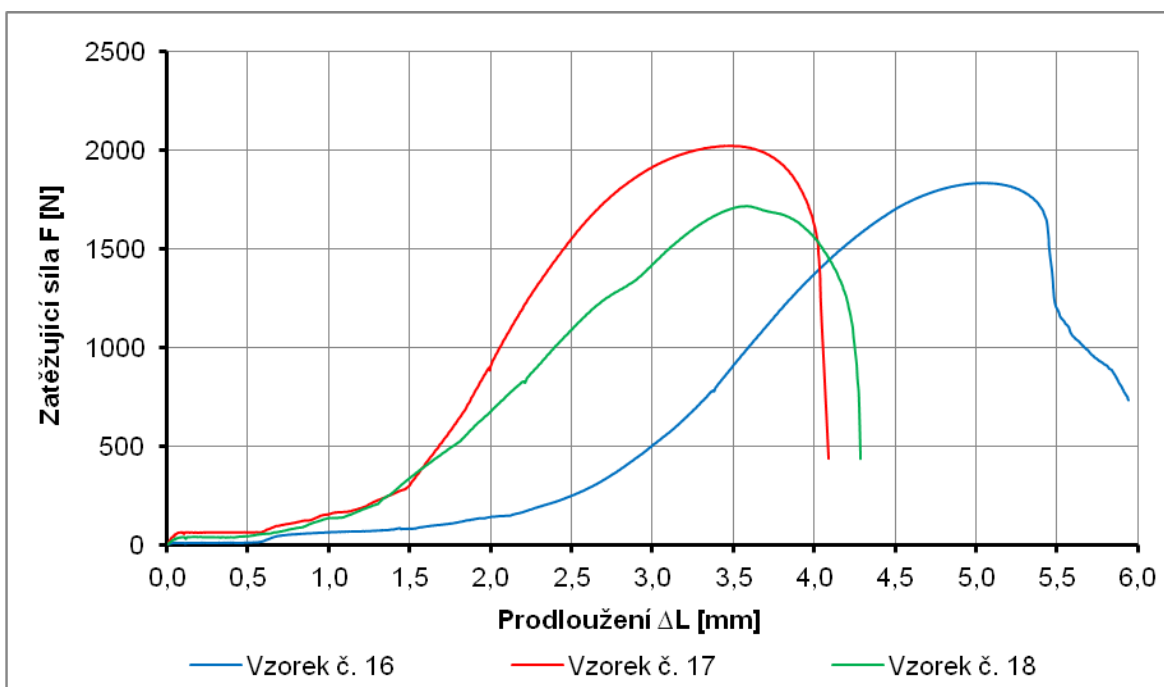
Popis obrázku 57: A – šíření koroze po hranicích zrn  
B – korozně degradované oblasti



Obr. 58 Korozní degradace po hranicích zrn



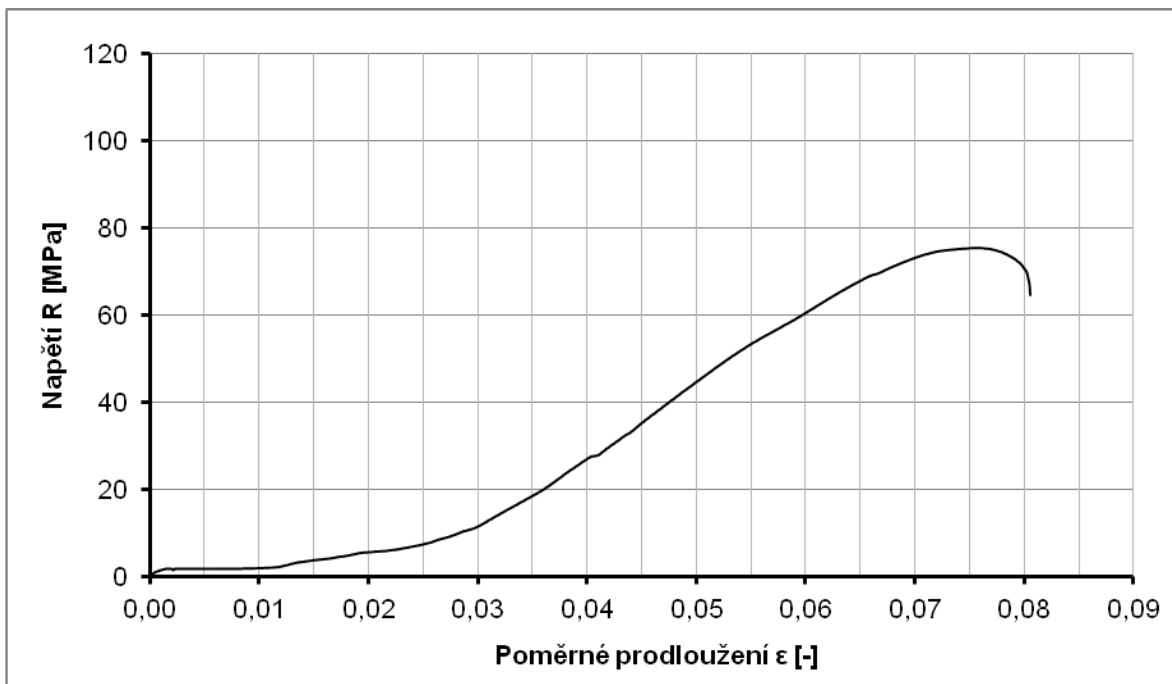
Obr. 59 Přetržený vzorek č. 17



Obr. 60 Pracovní diagram CMT svaru po 30 dnech v prostředí solné mlhy

Tab. 15 Záznam o zkoušce tahem CMT svaru po 30 dnech v prostředí solné mlhy

Rozměry zkušebního vzorku				
$L_0$ [mm]	$B_0$ [mm]	$t_0$ [mm]	$S_k$ [mm <sup>2</sup> ]	$L_u$ [mm]
50,0	20,0	1,5	21,21	54,77
Maximální zatěžující síla $F_m$ [N]		Výsledné hodnoty		
		Napětí $R_m$ [MPa]	Přetvárná práce $W_f$ [J]	
1858,40		87,61	3,93	



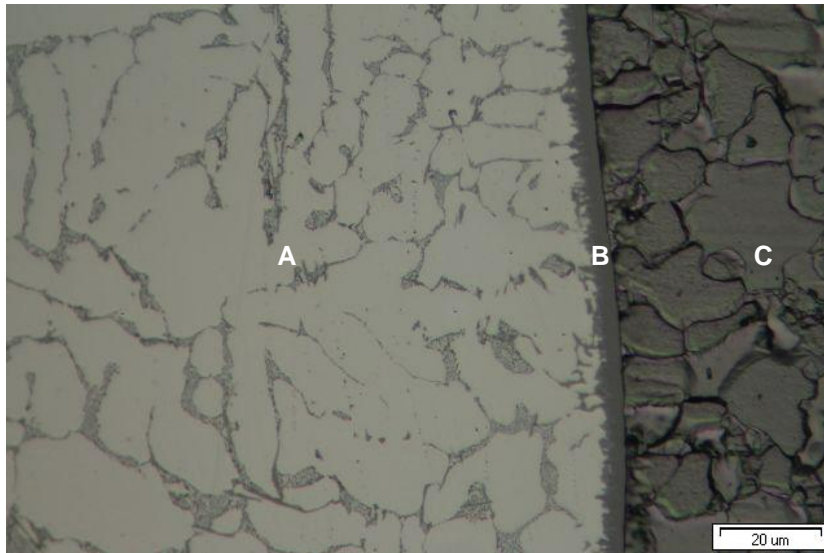
Obr. 61 Smluvní tahový diagram CMT svaru po 30 dnech v prostředí solné mlhy

### 3.6.7 Vlastnosti CMT svarového spoje s povrchovou ochranou organickým nátěrem po 30 dnech v prostředí solné mlhy

Analýza mikrostruktury a destruktivní zkouška tahem byla dále provedena na třech zkušebních vzorcích povrchově chráněných nátěrovým systémem, který byl specifikován v kap. 3.4.1.

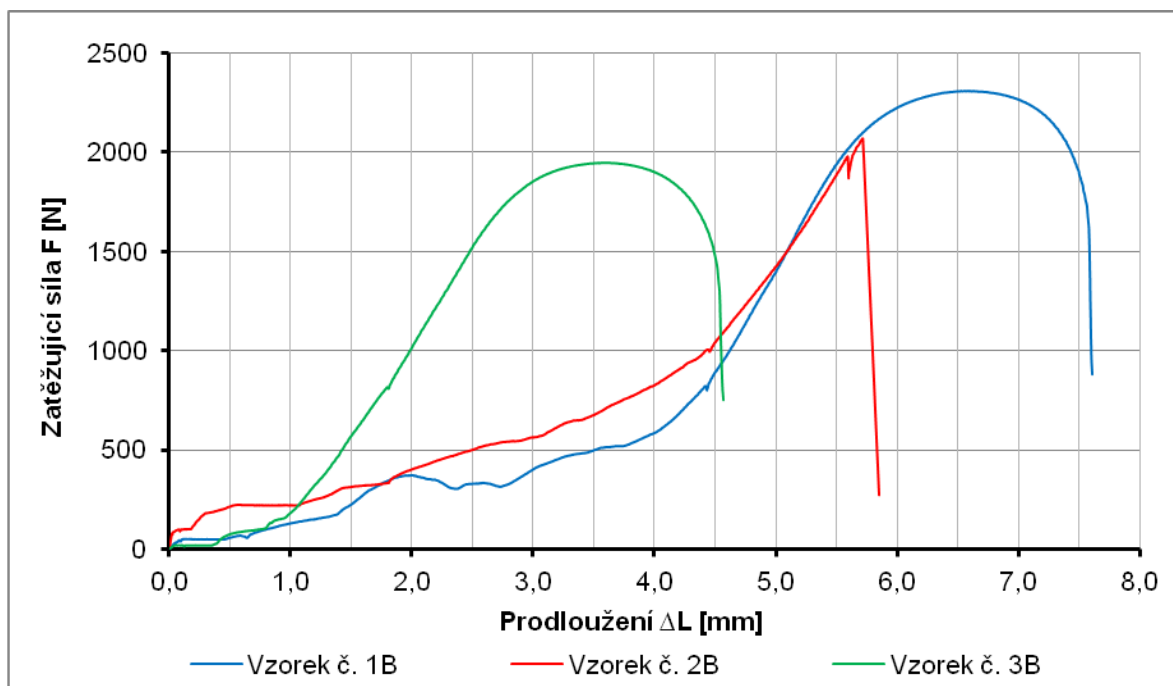
Po třicetidenní expozici v agresivním prostředí solné mlhy nebylo způsobeno korozní napadení svarového spoje. Na obr. 62 je zobrazena neporušená struktura CMT svaru, kdy bylo zabráněno pronikání solanky na povrch a nedošlo tak k degračním procesům po hranicích zrn.





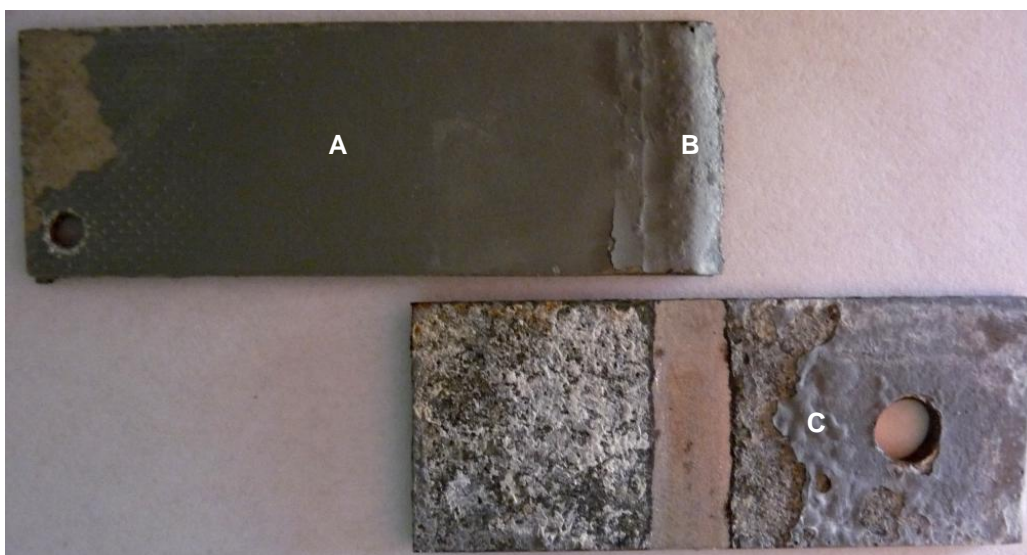
Obr. 62 Neporušená struktura chráněného CMT svaru

Popis obrázku 62: A – oblast svarového spoje  
 B – přechodová vrstva  
 C – základní materiál (ocel)



Obr. 63 Pracovní diagram chráněného CMT svaru po 30 dnech v prostředí solné mlhy

Průběh zatěžující síly zkoušeného vzorku č. 2B se poněkud odlišuje od vzorku č. 1B a 3B. Po dosažení maximální síly došlo k prudkému poklesu. Neobvyklý průběh byl během tahové zkoušky způsoben náhlým odtržením celého svarového spoje od základního ocelového materiálu, jak je ukázáno na obr. 64. K této destrukci došlo pouze v případě vzorku č. 2B.



Obr. 64 Přetržený vzorek č. 2B chráněného CMT svaru

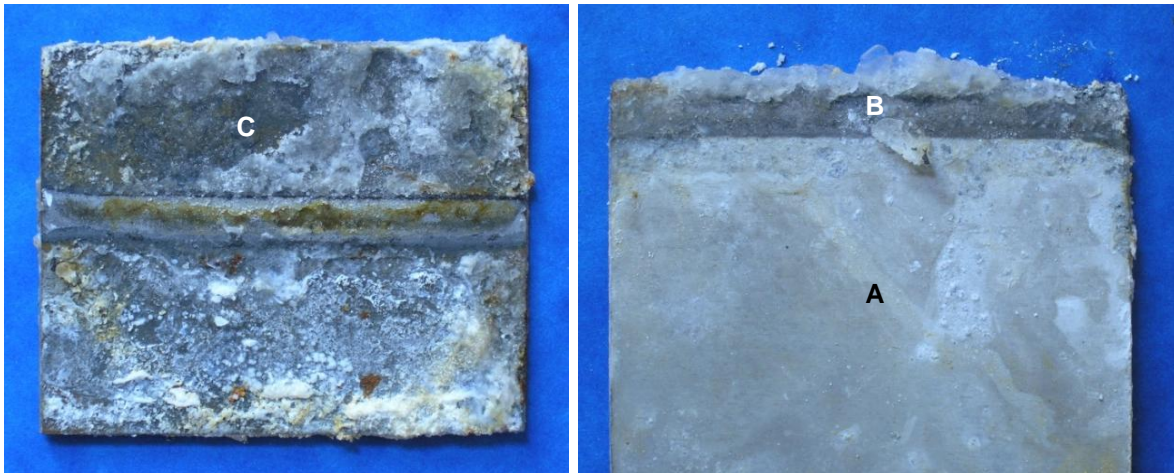
Popis obrázku 64: A – slitina hliníku AlMg3  
 B – svarový spoj  
 C – základní materiál (ocel)

Tab. 16 Záznam o zkoušce tahem chráněného CMT svaru po 30 dnech v solné mlze

Rozměry zkušebního vzorku				
$L_0$ [mm]	$B_0$ [mm]	$t_0$ [mm]	$S_k$ [mm <sup>2</sup> ]	$L_u$ [mm]
50,0	20,0	1,5	21,21	56,01
Maximální zatěžující síla $F_m$ [N]	Výsledné hodnoty			
	Napětí $R_m$ [MPa]		Přetvárná práce $W_f$ [J]	
2109,43	99,44		5,55	

### 3.6.8 Totální korozní degradace CMT svarového spoje

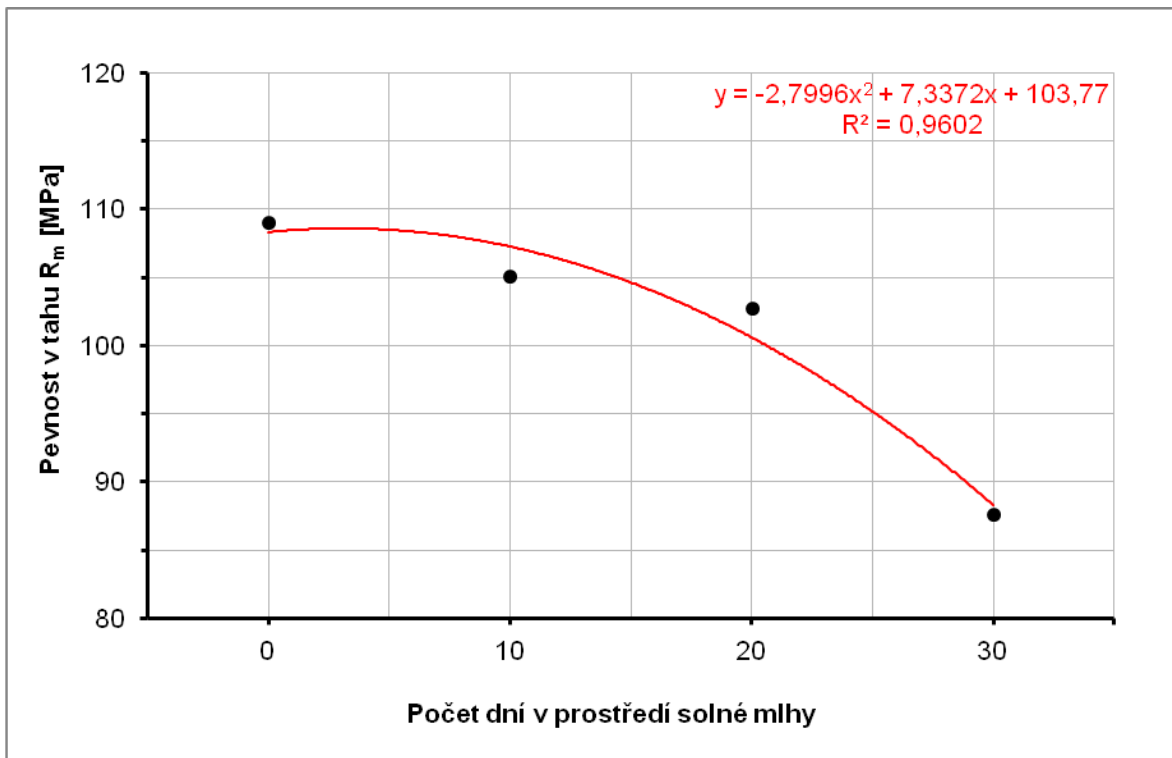
Rozpad vzorku a totální degradace v prostředí solné mlhy nastává po přibližně dvouměsíční expozici. Korozní napadení je tak vysoké, že se spojované plechy uvolní bez vynaložení vnější síly. Svarový spoj se odtrhne od základního ocelového materiálu (obr. 65).



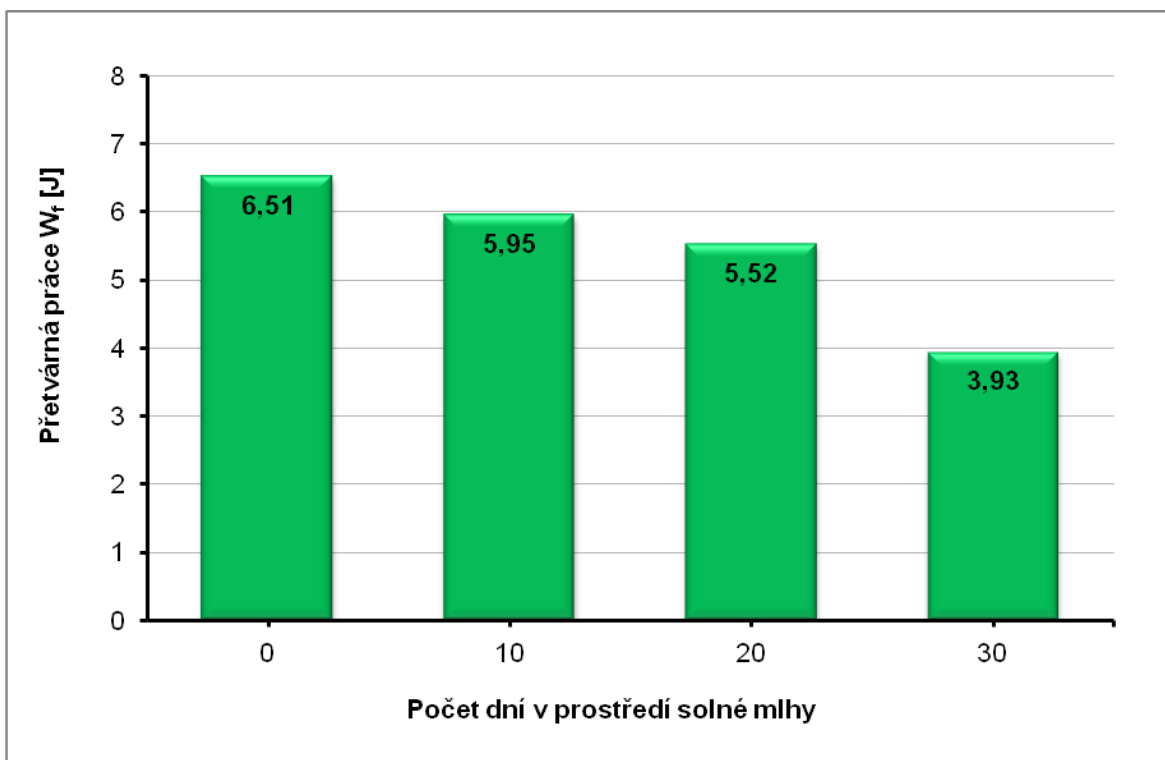
Obr. 65 Rozpad vzorku a totální degradace CMT svarového spoje

Popis obrázku 65: A – slitina hliníku AlMg3  
 B – svarový spoj  
 C – základní materiál (ocel)

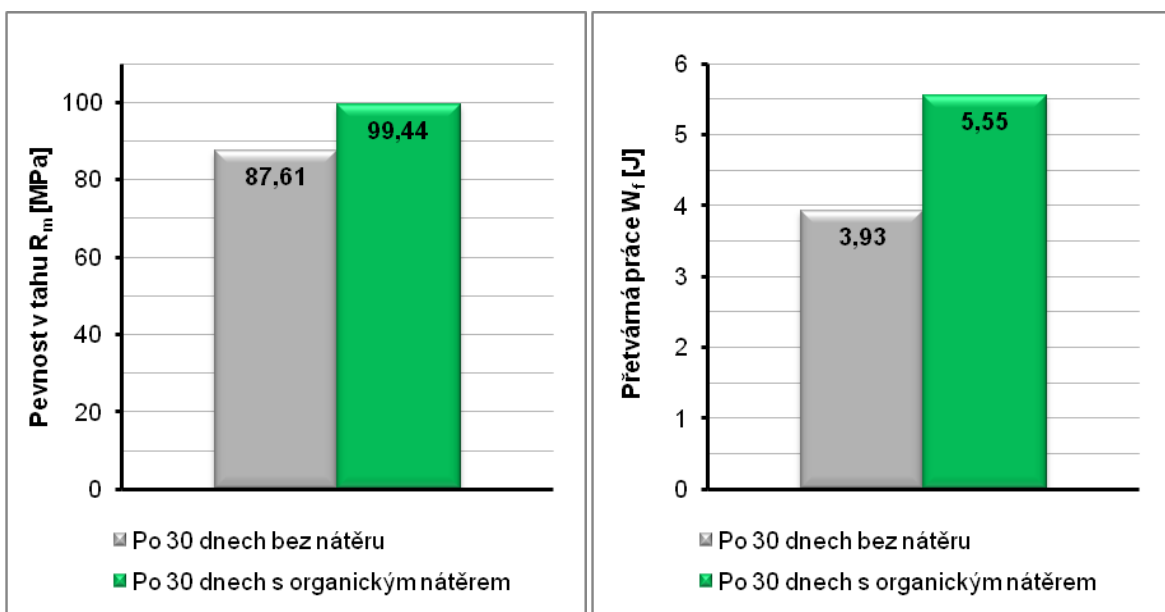
### 3.6.9 Celkové porovnání vypočtených hodnot



Obr. 66 Vyhodnocení poklesu mechanické pevnosti



Obr. 67 Vyhodnocení poklesu přetvárné práce



Obr. 68 Porovnání chráněného a nechráněného CMT svaru po 30 dnech v solné mlze

## 4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V předložené diplomové práci byly veškeré použité výpočty a vyhodnocení naměřených hodnot včetně grafického znázornění provedeny v programu Microsoft Excel 2007.

Tahové diagramy v souřadnicích ( $R - \epsilon$ ) uvedené v kapitole 3.6 jsou považovány za smluvní, protože se vztahují ke klidovému průřezu  $S_0$  (u svarových spojů  $S_k$ ) před zkouškou tahem. Byly sestrojeny z průměrů naměřených hodnot jednotlivých zkušebních vzorků. Vzhledem k rozdílnosti počtu naměřených údajů jsou považovány za orientační pouze pro zobrazení tvaru tahové křivky. Současně s mechanickou pevností byla hodnocena i práce potřebná na přetržení vzorku, která odpovídá velikosti plochy pod křivkou. Výpočet byl proveden samostatně pro každý vzorek zvlášť a výsledné hodnoty následně zprůměrovány. Tato přetvárná práce je úměrná pevnosti a houževnatosti materiálu. K porovnání mechanických vlastností jsou prioritní výsledné veličiny v tabulkách záznamů o zkoušce tahem.

Z uvedených fotografií přetržených vzorků je patrné, že k destrukci došlo v tepelně ovlivněné oblasti těsně za svarovým spojem na straně hliníku. Tuto vlastnost CMT svaru uvádí i společnost Fronius [8]. Vypočtená pevnost v tahu homogenního materiálu AlMg3 dosahuje hodnoty 229 MPa, zatímco u CMT svaru bez korozní degradace 109 MPa. Je možné konstatovat, že rozdíl pevnosti byl způsoben vneseným teplem v průběhu svařovacího procesu.

Vlivem korozní degradace se během 30 dní snížila mechanická pevnost z původních 109 MPa na 88 MPa, jak je patrné z grafické závislosti pevnosti v tahu na počtu dní v prostředí solné mlhy (obr. 66). Největší pokles byl zaznamenán v intervalu 20 dní až 30 dní expozice. Výsledné hodnoty byly proloženy polynomem 2. stupně s koeficientem determinace 0,9602. To znamená, že 96 % dat je vysvětleno parabolou, kterou byla data proložena. Mechanické vlastnosti CMT svaru po 30 dnech v solné mlze ovlivnila povrchová ochrana organickým nátěrem, která zvýšila pevnost o téměř 12 MPa a velikost přetvárné práce o 1,6 J.

Jak plyne z literatury Vargel, 2004 [37] a VŠCHT.cz, 2011 [38], zvýšená koroze se objevuje u kovu se zápornějším potenciálem a ušlechtlejší kov koroduje pomaleji. Podle informací ze spektrálního elektronového mikroskopu bylo zjištěno, že primární korozní napadení Aluzinc vrstvy je způsobeno korozními důlky a body. Ve vnitřní struktuře materiálu je identifikovatelné korozní napadení již po 10 dnech expozice. Tyto analýzy byly provedeny pomocí studie metalografických výbrusů na optickém mikroskopu.

Testy dle normy ČSN EN ISO 9227 jednoznačně prokázaly enormní korozní napadení v podobě galvanické koroze. Pozorované mikrostruktury vykazují mezikrystalickou korozi v přechodové oblasti s pozinkovaným ocelovým materiálem. Z tohoto důvodu dochází k rapidnímu poklesu pevnosti v tahu svarových spojů, který se po přibližně dvouměsíční expozici v korozní komoře projevuje totální ztrátou funkce CMT spoje. Podle provedených korozních zkoušek v prostředí solné mlhy lze konstatovat dobrou korozní odolnost, neboť destrukce samotného svaru v důsledku mezikrystalické koroze nebyla tahovou zkouškou prokázána.

## ZÁVĚR

Práce je zaměřena na celkový monitoring korozních dějů svarových spojů vyrobených metodou CMT. Základním materiálem pro experiment byla zvolena pozinkovaná ocel DX51D + AZ150 a slitina hliníku AlMg3. Svarové spoje, vystavené agresivnímu prostředí solné mlhy, byly před započítáním korozní zkoušky podrobeny analýze kvality testovaných vzorků. Na metalografických preparátech byla sledována pórovitost a natavení se základním materiálem. Metodou EDS bylo stanoveno chemické složení přechodových oblastí svaru. Po ukončení korozního testu následovala destruktivní zkouška tahem.

Provedené metalografické výbrusy prokázaly pórovitost zvláště při svařování metodou Synchropulz. Plošná velikost pórů dosahovala až 10krát větší velikosti než u technologie CMT. Vznik těchto dutin při svařování je způsoben pohlčováním plynů z okolního prostředí. Dochází k absorpci, difúzi a rozpouštění plynů na povrchu i uvnitř svarové lázně. Z tohoto důvodu byly vytvořené vzorky metodou Synchropulz z dalších testů vyřazeny.

Expozice testovaných vzorků v prostředí solné mlhy probíhala v intervalech 10 dní, 20 dní a 30 dní. Jelikož během této expozice nebyly zaznamenány na vzorcích žádné viditelné změny, byly provedeny metalografické výbrusy s vyhodnocením velikosti podkorodovaného svarového kovu. Na základě tahových zkoušek bylo prokázáno celkové 20% snížení pevnosti v tahu svarových spojů.

Potenciál metody CMT spočívá ve svařování tenkých plechů do 2 mm korozivzdorných ocelí. Uplatňuje se také při spojování různorodých materiálů. Jedná se především o hliníkové a pozinkované plechy, kdy antikorozi zinkový povlak slouží jako tavidlo a smáčí ocel. Tloušťka zinkové vrstvy by se měla pohybovat v rozmezí 10  $\mu\text{m}$  až 30  $\mu\text{m}$ , což zaručuje maximální pevnost svarového spoje.

Svařování různorodých materiálů patří mezi dynamicky se rozvíjející obor. Značné využití metody CMT je v automobilovém průmyslu při výrobě karosérií. Koncepce různorodých materiálů ovšem naráží na problematiku galvanické koroze, která se vyskytuje v přechodovém pásmu spojení obou materiálů. Je nutné si uvědomit výše popsaná rizika při spojování dvou kovů s odlišným elektrodovým potenciálem. Jelikož se jedná o korozní změny uvnitř svarového spoje, hrozí nebezpečí celkové destrukce vyrobené součásti bez předchozích viditelných známek korozního napadení.

Pro praktické využití by tento výzkum CMT svarových spojů mohl sloužit ke zlepšení návrhů svařovaných konstrukcí při aplikaci heterogenních materiálů o nízké hmotnosti s maximální pevností s ohledem na výše uvedená rizika korozních dějů uvnitř struktury.

## POUŽITÁ A DOPORUČENÁ LITERATURA

1. AČSZ. *Příručka žárového zinkování*. Vyd. 3. Ostrava: Asociace českých zinkoven, 2009, s. 56.
2. ALGANMETAL. *Fronius TransPuls Synergic 2700 CMT G/W* [online]. 2011 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: <http://www.alganmetal.com.tr/eng/default.asp?sayfa=urundetay&AlbumID=187&Kid=4>
3. AMBROŽ, Oldřich, KANDUS, Bohumil a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Vyd. 1. Ostrava: Zeross, 2001, s. 395. ISBN 80-85771-81-0.
4. DOLEJSKÝ, Tomáš. *Učebnice pro základní kurz svařování tavící se elektrodou: (MIG/MAG svařování)*. Vyd. 2. Ostrava: Zeross, 2013, s. 144.
5. EDER, Thomas. *Na hranici obloukového svařování – technologické a aplikační inovace s CMT Advanced*. *Konstrukce* [online]. 25.11.2010 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/na-hranici-obloukoveho-svarovani-technologicke-a-aplikacni-inovace-s-cmt-advanced/>
6. FELIX, Michal. *Fronius: Česká republika. Cold Metal Transfer (CMT)*. Jihlava, 2007.
7. FRONIUS: Česká republika. *Cold Metal Transfer*. [online]. © 2014 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: [http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-52A97D15-F783FE17/fronius\\_poland/Folder\\_CMT\\_leaflet\\_CS\\_0114\\_aw19\\_low\\_44540\\_snapshot.pdf](http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-52A97D15-F783FE17/fronius_poland/Folder_CMT_leaflet_CS_0114_aw19_low_44540_snapshot.pdf)
8. FRONIUS: Česká republika. *CMT* [online]. © 2006 – 2015 [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: [http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-22781F45-BEC84A36/fronius\\_ceska\\_republika/hs.xsl/29\\_3917.htm#.VTf2q9K8PRY](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-22781F45-BEC84A36/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3917.htm#.VTf2q9K8PRY)
9. FRONIUS: Česká republika. *Fronius v České republice* [online]. © 2006 – 2015 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: [http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-749B456A-8C841A1A/fronius\\_ceska\\_republika/hs.xsl/31\\_5839.htm#.VNuZbOaG-Ww](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-749B456A-8C841A1A/fronius_ceska_republika/hs.xsl/31_5839.htm#.VNuZbOaG-Ww)
10. FRONIUS: Česká republika. *Tisková zpráva: O společnosti Fronius International GmbH* [online]. © 2014 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-80BE2A41>
11. FRONIUS INTERNATIONAL. *Cold Metal Transfer* [CD]. Wels: Fronius International GmbH, 2011.



12. FRONIUS INTERNATIONAL. *Faster brazing with modified CMT process* [online]. 10.01.2014 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-31086968>
13. FRONIUS. Více možností s postupem CMT Advanced. *weld+vision*. Listopad 2009, 23, s. 10-11.
14. FRONIUS INTERNATIONAL. *CMT: Three letters that stand for the stablest weld process anywhere in the world* [online]. © 2006 – 2015 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: [http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-7620BF8C-F9FA885B/fronius\\_international/hs.xsl/79\\_23609\\_ENG\\_HTML.htm#.VTmaA9LtlBc](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-7620BF8C-F9FA885B/fronius_international/hs.xsl/79_23609_ENG_HTML.htm#.VTmaA9LtlBc)
15. FRONIUS. Horký a současně studený svařovací proces dělá kariéru. *weld+vision*. Září 2008, 21, s. 10-11.
16. FRONIUS INTERNATIONAL: CMT Twin operating instructions. *Installation and commissioning*. Wels, 2012.
17. FRONIUS: Česká republika. *Tisková zpráva: CMT Twin pro rychlé svařování při optimálním přínosu energie* [online]. 13.11.2012 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: [http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-DD9B997E-C6504396/fronius\\_international/hs.xsl/79\\_20055\\_ENG\\_HTML.htm?inc=94176.htm#.VTmpLtlBc](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-DD9B997E-C6504396/fronius_international/hs.xsl/79_20055_ENG_HTML.htm?inc=94176.htm#.VTmpLtlBc)
18. FRONIUS. CMT Twin: Nejrychlejší způsob svařování. *weld+vision*. Duben 2012, 27, s. 10-11.
19. FRONIUS. Sprchový oblouk se silnějším výkonem pro oběžná kola XXL. *weld+vision*. Duben 2010, 24, s. 18-19.
20. FRONIUS: Česká republika. *CMT Twin: To nejlepší, co může spojení dvou technologií nabídnout*. [online] © 2012 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: [http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-684ABEF9-83C12B36/fronius\\_ceska\\_republika/hs.xsl/29\\_9714.htm](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-684ABEF9-83C12B36/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_9714.htm)
21. FÜRBERGER, Ivan, Josef STEIDL a Karel MACEK. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty. Kovy, plasty, keramika, kompozity*. Praha: Verlag Dashöfer, 1998 – 2006. Aktualizováno 4krát ročně.
22. GEARY, Don a Rex MILLER. *Welding*. Ed. 2nd. New York: McGraw-Hill, 2011, s. 328. ISBN 978-0-07-176387-5.

23. HLAVATÝ, Ivo. *Teorie a technologie svařování*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011, s. 262. ISBN 978-80-248-2414-7
24. KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 1999, 296 s. Svařování. ISBN 80-85771-63-2.
25. KUBÍČEK, Jaroslav. *Sylabus přednášek: Technologie II – část svařování*. Brno: VUT FSI, 2006, s. 187. videoklipů 36.
26. LIEBISCH. *Salt spray test DIN EN ISO 9227 (old DIN 50021)* [online]. 2010 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: [http://www.liebisch.com/englisch/html/animation\\_tr.htm](http://www.liebisch.com/englisch/html/animation_tr.htm)
27. LINDE GAS. *Nové barevné značení tlakových lahví*. [online]. 2007 [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: [http://www.linde-gas.cz/internet.lg.lg.cze/cs/images/BarevneZnaceniTlakLahvi200779\\_16200.pdf](http://www.linde-gas.cz/internet.lg.lg.cze/cs/images/BarevneZnaceniTlakLahvi200779_16200.pdf)
28. MARTINÁK, Milan. *Kontrola a měření pro 3. ročník středních průmyslových škol strojnických: učebnice pro 3. ročník studijních oborů strojírenská technologie, strojírenská konstrukce, provozuschopnost výrobních zařízení*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, s. 214.
29. MESSER: Česká republika. *Svařování hliníku a jeho slitin*. [online]. 2007 [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: [http://www.messergroup.com/cz/Prospekty/Svarovani\\_a\\_deleni\\_materialu/Svarovani\\_hliniku\\_a\\_jeho\\_slitin.pdf](http://www.messergroup.com/cz/Prospekty/Svarovani_a_deleni_materialu/Svarovani_hliniku_a_jeho_slitin.pdf)
30. MINAŘÍK, Václav. *Obloukové svařování*. Vyd. 3. Praha: Scientia, 2007, s. 241. ISBN 978-80-86960-28-9
31. SUCHÁNEK, Jan a Ladislav KOLAŘÍK. *Quo vadis, svařování?*. *MM Průmyslové spectrum* [online]. 12.02.2014 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/quo-vadis-svarovani.html>
32. ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého, 2012 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
33. TECHMAGAZÍN. *Fronius na mezinárodním strojírenském veletrhu: svařování a energetika*. Zář 2010, 1, s. 46-47.

34. TECHNICKÝ TÝDENÍK. *Nový standard ve svařovací technice Proces CMT (Cold Metal Transfer)*. [online]. 01.01.2006 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer\\_10667.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer_10667.html)
35. TICHÁ, Helena. *Obecná chemie II*. Vyd. 3. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2011, s. 48. ISBN 978-80-7395-394-2.
36. TICHÝ, Jiří. *Nové metody svařování: LASERHYBRID*. *Svarinfo.cz: magazín praktického svařování* [online]. 12.05.2009 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2009050102>
37. VARGEL, Christian. *Corrosion of Aluminium*. London: Elsevier Science, 2004, s. 617, ISBN 0-08-044495-4.
38. VŠCHT. *Korozní inženýrství* [online]. 02.12.2008 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni\\_inzenyrstvi\\_se/index.htm](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/index.htm)
39. ZINEX. *Barva epoxyesterová zinková S 2357*. Katalogový list [online]. 19.05.2014 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: [http://www.bal.cz/media/files/981513dc4f7fffa6f930aaf306139c16/katalogove-listy/kl\\_s2357\\_19.5.2014.pdf](http://www.bal.cz/media/files/981513dc4f7fffa6f930aaf306139c16/katalogove-listy/kl_s2357_19.5.2014.pdf)

## **Použité normy**

40. ČSN EN 10346. *Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky – Technické dodací podmínky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 32 s. Třídící znak 42 0110.
41. ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků. Část 3, Chemické složení a druhy výrobků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 40 s. Třídící znak 42 1401.
42. ČSN EN ISO 18273. *Svařovací materiály – Svařovací dráty a tyče pro svařování hliníku a slitin hliníku – Klasifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005, 12 s. Třídící znak 05 5322.
43. ČSN EN ISO 9227. *Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 24 s. Třídící znak 038132.

44. ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 16 s. Třídící znak 05 1121.

45. ČSN EN ISO 9018. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkouška tahem křížových přeplátovaných spojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005, 12 s. Třídící znak 05 1140.

46. ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem. Část 1, Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 64 s. Třídící znak 42 0310.

ČSN ISO 690. *Informace a dokumentace – Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 40 s. Třídící znak 01 0197.

## SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

### Obrázky

<i>Obr. 1 Pohyb drátu v průběhu CMT procesu .....</i>	<b>12</b>
<i>Obr. 2 Svařovací systém CMT pro automatizované i ruční procesy .....</i>	<b>13</b>
<i>Obr. 3 Vyrovnávací vložka k oddělení obou posuvů drátu.....</i>	<b>14</b>
<i>Obr. 4 Svařovací hořák Robacta Drive CMT s dynamickým servomotorem .....</i>	<b>15</b>
<i>Obr. 5 Oblasti přenosu kovu v elektrickém oblouku .....</i>	<b>18</b>
<i>Obr. 6 Barevné značení vybraných průmyslových plynů pro svařování .....</i>	<b>21</b>
<i>Obr. 7 Rozdělení trubičkových elektrod podle způsobu výroby .....</i>	<b>22</b>
<i>Obr. 8 CMT Advanced – změna mezi negativními a pozitivními cykly .....</i>	<b>23</b>
<i>Obr. 9 Průběh svařovacího proudu, svařovacího napětí a rychlosti podávání drátu.....</i>	<b>24</b>
<i>Obr. 10 Překlenutí mezery 2 mm na přepřátovaném spoji mezi dvěma plechy AlMg3 .....</i>	<b>24</b>
<i>Obr. 11 Kombinace CMT cyklů a pulzních cyklů .....</i>	<b>25</b>
<i>Obr. 12 CMT Advanced Pulse .....</i>	<b>26</b>
<i>Obr. 13 Porovnání různých režimů na přepřátovaném spoji hliníkových plechů .....</i>	<b>26</b>
<i>Obr. 14 Různé tvary pinové struktury zhotovené metodou CMT.....</i>	<b>27</b>
<i>Obr. 15 Ukázky využití metody CMT Pin .....</i>	<b>28</b>
<i>Obr. 16 Ukázky využití metody CMT Print .....</i>	<b>28</b>
<i>Obr. 17 CMT Twin – synchronizovaný start svařování.....</i>	<b>30</b>
<i>Obr. 18 Tavná lázeň při CMT Twin procesu svařování .....</i>	<b>30</b>
<i>Obr. 19 Dva svařovací zdroje, jeden svařovací hořák .....</i>	<b>31</b>
<i>Obr. 20 Elektrický oblouk CMT v porovnání s dalšími typy obloukových technologií .....</i>	<b>32</b>
<i>Obr. 21 Historie vývoje CMT procesu spojování .....</i>	<b>32</b>
<i>Obr. 22 Princip zalévání vzorku za studena, ukázka zalévacích forem a vzorků.....</i>	<b>34</b>
<i>Obr. 23 Necelistvosti hodnocené na metalografickém výbrusu v nelepnaném stavu.....</i>	<b>36</b>
<i>Obr. 24 Metalografický snímek základního materiálu AlMg3 .....</i>	<b>37</b>
<i>Obr. 25 Ocelový plech žárově zinkovaný druhem povlaku Aluzinc .....</i>	<b>39</b>
<i>Obr. 26 Řez strukturou zinkového povlaku ocelového plechu.....</i>	<b>39</b>
<i>Obr. 27 Kontinuální žárové zinkování tenkého ocelového plechu .....</i>	<b>40</b>
<i>Obr. 28 Přípravek pro uchycení svařovaných materiálů .....</i>	<b>43</b>
<i>Obr. 29 Vzorky svarů při odlišných svařovacích parametrech .....</i>	<b>44</b>
<i>Obr. 30 Řez strukturou vzorku svaru 7 (režim Synchronpulz) .....</i>	<b>45</b>
<i>Obr. 31 Řez strukturou vzorku svaru 3 (režim CMT) .....</i>	<b>45</b>
<i>Obr. 32 Měření plošné velikosti pórů ve struktuře svaru .....</i>	<b>45</b>
<i>Obr. 33 Laboratorní komora Liebisch typu S400M-TR .....</i>	<b>47</b>

<i>Obr. 34 Umístění vzorků v solné komoře (zkouška solnou mlhou) .....</i>	<b>48</b>
<i>Obr. 35 Mechanický univerzální trhací stroj ZDM 5 (schéma a fotografie).....</i>	<b>49</b>
<i>Obr. 36 Definice šířky lomové plochy přeplátovaného spoje.....</i>	<b>51</b>
<i>Obr. 37 Pracovní diagram zkoušky tahem slitiny hliníku AlMg3.....</i>	<b>52</b>
<i>Obr. 38 Smluvní tahový diagram s nevýraznou mezí kluzu slitiny hliníku AlMg3 .....</i>	<b>53</b>
<i>Obr. 39 Pracovní diagram zkoušky tahem oceli DX51D + AZ150 .....</i>	<b>54</b>
<i>Obr. 40 Smluvní tahový diagram s horní a dolní mezí kluzu oceli DX51D + AZ150 .....</i>	<b>55</b>
<i>Obr. 41 Struktura oblasti svarového spoje a základního materiálu.....</i>	<b>56</b>
<i>Obr. 42 Struktura přechodové oblasti a svarového spoje .....</i>	<b>56</b>
<i>Obr. 43 Přeřezaný vzorek č. 9 bez korozní degradace.....</i>	<b>56</b>
<i>Obr. 44 Pracovní diagram zkoušky tahem CMT svaru .....</i>	<b>57</b>
<i>Obr. 45 Smluvní tahový diagram CMT svaru před korozní zkouškou .....</i>	<b>57</b>
<i>Obr. 46 Zkoumané oblasti kovového povlaku elektronovým mikroskopem.....</i>	<b>58</b>
<i>Obr. 47 Četnost rentgenového signálu ve zkoumané oblasti Spectrum 2 .....</i>	<b>59</b>
<i>Obr. 48 Struktura svarového spoje po desetidenní expozici v solné mlze.....</i>	<b>60</b>
<i>Obr. 49 Přeřezaný vzorek č. 12 .....</i>	<b>60</b>
<i>Obr. 50 Pracovní diagram CMT svaru po 10 dnech v prostředí solné mlhy .....</i>	<b>61</b>
<i>Obr. 51 Smluvní tahový diagram CMT svaru po 10 dnech v prostředí solné mlhy .....</i>	<b>61</b>
<i>Obr. 52 Korozní napadení po hranicích zrn k dutině ve svaru .....</i>	<b>62</b>
<i>Obr. 53 Průběh koroze po hranicích zrn.....</i>	<b>62</b>
<i>Obr. 54 Přeřezaný vzorek č. 15 .....</i>	<b>63</b>
<i>Obr. 55 Pracovní diagram CMT svaru po 20 dnech v prostředí solné mlhy .....</i>	<b>63</b>
<i>Obr. 56 Smluvní tahový diagram CMT svaru po 20 dnech v prostředí solné mlhy .....</i>	<b>64</b>
<i>Obr. 57 Průběh koroze mezi ocelovým substrátem a svarem.....</i>	<b>64</b>
<i>Obr. 58 Korozní degradace po hranicích zrn .....</i>	<b>65</b>
<i>Obr. 59 Přeřezaný vzorek č. 17 .....</i>	<b>65</b>
<i>Obr. 60 Pracovní diagram CMT svaru po 30 dnech v prostředí solné mlhy .....</i>	<b>65</b>
<i>Obr. 61 Smluvní tahový diagram CMT svaru po 30 dnech v prostředí solné mlhy .....</i>	<b>66</b>
<i>Obr. 62 Neporušená struktura chráněného CMT svaru.....</i>	<b>67</b>
<i>Obr. 63 Pracovní diagram chráněného CMT svaru po 30 dnech v prostředí solné mlhy ..</i>	<b>67</b>
<i>Obr. 64 Přeřezaný vzorek č. 2B chráněného CMT svaru.....</i>	<b>68</b>
<i>Obr. 65 Rozpad vzorku a totální degradace CMT svarového spoje.....</i>	<b>69</b>
<i>Obr. 66 Vyhodnocení poklesu mechanické pevnosti .....</i>	<b>69</b>
<i>Obr. 67 Vyhodnocení poklesu přetvárné práce .....</i>	<b>70</b>
<i>Obr. 68 Porovnání chráněného a nechráněného CMT svaru po 30 dnech v solné mlze ....</i>	<b>70</b>

## **Tabulky**

<i>Tab. 1 Rozdělení ochranných plynů dle chemického charakteru .....</i>	<b>20</b>
<i>Tab. 2 Vlastnosti slitiny hliníku AlMg3 (AW-5754) tvářené pro všeobecné účely .....</i>	<b>37</b>
<i>Tab. 3 Vlastnosti hlubokotažné oceli žárově pokovené DX51D + AZ150 .....</i>	<b>38</b>
<i>Tab. 4 Hodnoty tloušťky zinkového povlaku z měřených oblastí.....</i>	<b>39</b>
<i>Tab. 5 Vlastnosti slitiny hliníku AlSi5 (AW-4043A) tvářené pro všeobecné účely.....</i>	<b>41</b>
<i>Tab. 6 Elektrochemická řada napětí některých kovů .....</i>	<b>42</b>
<i>Tab. 7 Přehled parametrů svařování všech vytvořených vzorků.....</i>	<b>43</b>
<i>Tab. 8 Hodnoty plošné velikosti pórů při uvedených režimech svařování .....</i>	<b>46</b>
<i>Tab. 9 Záznam o zkoušce tahem slitiny hliníku AlMg3 .....</i>	<b>53</b>
<i>Tab. 10 Záznam o zkoušce tahem oceli DX51D + AZ150.....</i>	<b>54</b>
<i>Tab. 11 Záznam o zkoušce tahem CMT svaru .....</i>	<b>58</b>
<i>Tab. 12 Chemické složení kovového povlaku v jednotlivých oblastech.....</i>	<b>59</b>
<i>Tab. 13 Záznam o zkoušce tahem CMT svaru po 10 dnech v prostředí solné mlhy.....</i>	<b>62</b>
<i>Tab. 14 Záznam o zkoušce tahem CMT svaru po 20 dnech v prostředí solné mlhy.....</i>	<b>63</b>
<i>Tab. 15 Záznam o zkoušce tahem CMT svaru po 30 dnech v prostředí solné mlhy.....</i>	<b>66</b>
<i>Tab. 16 Záznam o zkoušce tahem chráněného CMT svaru po 30 dnech v solné mlze .....</i>	<b>68</b>

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Symbols

Symbol	Význam	Jednotka
a	Šířka lomové plochy svaru	[mm]
A	Tažnost	[%]
B	Šířka zkušební vzorku neboli délka lomové plochy	[mm]
B <sub>0</sub>	Počáteční šířka zkušební vzorku před zkouškou	[mm]
B <sub>u</sub>	Šířka zkušební vzorku v místě přetržení	[mm]
c <sub>p</sub>	Měrná tepelná kapacita	[J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]
E	Modul pružnosti v tahu	[GPa]
E <sup>0</sup>	Standardní elektrodový potenciál	[V]
F	Zatěžující síla	[N]
F <sub>m</sub>	Maximální zatěžující síla	[N]
F <sub>e</sub> , F <sub>eH</sub> , F <sub>eL</sub>	Zatěžující síla na mezi kluzu v tahu	[N]
F <sub>p0,2</sub>	Zatěžující síla na smluvní mezi kluzu v tahu	[N]
HB	Tvrдость podle Brinella	[-]
L	Délka zkušební vzorku v kterémkoli okamžiku tahové zkoušky	[mm]
L <sub>0</sub>	Počáteční délka zkušební vzorku	[mm]
ΔL	Přírůstek počáteční délky vzorku během zkoušky	[mm]
L <sub>u</sub>	Délka zkušební vzorku naměřená po přetržení	[mm]
R	Napětí	[MPa]
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R <sub>e</sub> , R <sub>eH</sub> , R <sub>eL</sub>	Mez kluzu výrazná, mez kluzu horní, mez kluzu dolní	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	Smluvní mez kluzu v tahu	[MPa]
s	Směrodatná odchylka pro výběrový soubor	[μm <sup>2</sup> ]
S <sub>0</sub>	Plocha příčného průřezu zkušební vzorku před zkouškou	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>u</sub>	Plocha příčného průřezu zkušební vzorku po přetržení	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>k</sub>	Kritický (nosný) průřez koutového svaru přeplátovaného spojení	[mm <sup>2</sup> ]
t	Tloušťka základního materiálu	[mm]
t <sub>0</sub>	Počáteční tloušťka materiálu zkušební vzorku před zkouškou	[mm]
t <sub>u</sub>	Tloušťka materiálu zkušební vzorku v místě po přetržení	[mm]
V	Variační koeficient	[%]
W <sub>f</sub>	Spotřebovaná energie do lomu zkušební vzorku (přetvárná práce)	[J]
$\bar{x}$	Aritmetický průměr naměřených hodnot ploch pórů	[μm <sup>2</sup> ]
Z	Kontrakce	[%]
α	Teplotní součinitel roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
ε	Poměrné prodloužení	[-]
ρ	Hustota	[kg · m <sup>-3</sup> ]
λ <sub>t</sub>	Tepelná vodivost	[W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]



## Zkratky

CMT	Cold Metal Transfer – přenos studeného kovu, proces spojování krátkým zkratovým obloukem
CNC	Computer Numerical Control – číslicové řízení pomocí počítače
ČSN	Česká státní norma
EDS	Energiově disperzní spektroskopie – umožňuje využití skenovacího elektronového mikroskopu pro prvkovou analýzu zkoumaných preparátů
MAG	Metal Active Gas – obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném aktivním plynu
MIG	Metal Inert Gas – obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném inertním plynu
NDT	Nedestruktivní defektoskopie – testování struktury materiálů bez zásahu do jejich celistvosti
PAC	Plasma Arc Cutting – řezání plazmovým elektrickým obloukem
PAW	Plasma Arc Welding – svařování plazmovým elektrickým obloukem
PB	pracovní poloha svařování šikmo shora dle ČSN EN ISO 6947
PCS	Pulse Controlled Spray – pulzně řízený sprchový elektrický oblouk, kombinace impulzního a standardního sprchového oblouku
SEM	Scanning Electron Microscope – elektronový rastrovací mikroskop
SFI	Spatter Free Ignition – zapalování elektrického oblouku bez rozstříku
Time	T.I.M.E → Transferred Ionized Molten Energy – modifikovaný proces MAG, při kterém je možné zvýšit odtavný výkon díky optimalizaci ochranného plynu a volného konce drátu (Stick-Out)
Time Twin	tandemová metoda, při které je svařovací proces synchronizován mezi dvěma samostatnými zdroji (dvě navzájem izolované elektrody jsou vedeny do jednoho svařovacího hořáku)
WIG (TIG)	Wolfram Inert Gas (Tungsten Inert Gas) – obloukové svařování netavící se elektrodou v ochranném inertním plynu

## **PŘÍLOHY**

Diplomová práce obsahuje přílohy, kde jsou uvedeny naměřené hodnoty destruktivní zkoušky tahem včetně výpočtů a vyhodnocení.

Přiložené CD je označeno názvem: **Analýza jakosti CMT svarů – přílohy práce.**