

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní**

**Czech Technical University
Faculty of Mechanical Engineering**

Jméno a příjmení autora:
Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D

Habilitační přednáška:

**Vznik trhlin za tepla u vytvrditelných hliníkových slitin při
konvenčním svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře**

**Hot cracking phenomenon of arc welded precipitation hardened
Al alloys**

Summary:

The lecture focuses on arc welding of precipitation hardened Al alloys, mainly weldability and occurring problems. One of the main problems for welded Al alloys is creation of hot cracks (solidification cracks). Hot cracking phenomenon is introduced, countermeasures and applicable weldability tests are explained, e.g. Houldcroft fishbone test. Results of research of hot cracking sensitivity of Al alloys of 6xxx and 7xxx series are presented. The influence of recommended welding filler wires on hot cracking sensitivity is explained.

Souhrn:

Přednáška pojednává o možnostech svařování vytvrditelných hliníkových slitin pomocí konvenčních metod svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách, včetně popisu svařitelnosti a problémů, které nastávají při tavném svařování hliníkových slitin. Největším problémem při svařování hliníkových slitin je vznik trhlin za tepla, který je podrobně rozebrán. Jsou zde popsány technologické zkoušky svařitelnosti, které dokumentují vliv jednotlivých faktorů na citlivost svarového kovu k praskavosti. V přednášce je představen výzkum svařitelnosti vytvrditelných hliníkových slitin typu 6xxx a 7xxx a je ukázána souvislost s vlivem různých typů komerčně dostupných přídavných materiálů na praskavost.

Klíčová slova:

Svařitelnost, vytvrditelné hliníkové slitiny, technologické zkoušky, Houldcroftova zkouška, trhliny za tepla

Keywords:

Weldability, Precipitation hardening Al alloys, Technological tests, Houldcroft test, Hot cracks

Obsah:

1. Úvod	1
1.1 <i>Vlastnosti hliníku a jeho slitin</i>	1
2. Bližší zaměření a cíl habilitační přednášky	2
3. Metody svařování hliníku a jeho slitin	3
3.1 <i>Metody svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách</i>	3
3.2 <i>Ochranné atmosféry pro svařování</i>	5
3.2.1. <i>Druhy ochranných atmosfér a jejich účinky</i>	5
4. Popis základních materiálů	8
5. Rozdělení a volba přídavných materiálů pro svařování Al a jeho slitin	10
5.1 <i>Volba přídavného materiálu</i>	10
5.2 <i>Specifikace použitých přídavných materiálů</i>	12
6. Problémy při svařování hliníku	13
6.1 <i>Praskavost svarových spojů</i>	17
6.1.1. <i>Trhliny za tepla</i>	17
6.1.2. <i>Trhliny za studena</i>	20
6.1.3. <i>Korozní praskání pod napětím</i>	21
7. Technologické zkoušky svařitelnosti	21
7.1 <i>Typy zkoušek pro plechy malých tloušťek</i>	22
7.2 <i>EN zkoušky praskavosti kovových materiálů</i>	24
8. Experimentální ověření svařitelnosti vybraných vytvrditelných Al slitin	24
8.1 <i>Podmínky experimentů</i>	25
8.2 <i>Výsledky Houldcroftovy zkoušky svařitelnosti</i>	25
9. Závěr	30
10. Použitá literatura	32
11. Publikované výsledky autora	34
12. CV autora	36

1. Úvod

Hliník (Al) je unikátní, poměrně mladý materiál, jehož výroba trvale vykazuje větší roční přírůstky, než je běžné u ostatních kovů. Jeho vlastnosti umožňují aplikaci téměř ve všech oblastech lidské činnosti [01]. Dalšími důvody použití jsou nejen relativně přijatelná cena, ale např. i jeho možnost recyklace. Roční spotřeba hliníku je odhadována na 130 miliónů tun; na jednoho obyvatele Evropy asi 17kg. Nejvýznamnější oblasti výskytu rud jsou Oceánie a Amerika.

Největším spotřebitelem hliníku a jeho slitin je oblast dopravního průmyslu (ať už se jedná o letecký, automobilový průmysl nebo výrobu kolejových vozidel, lodí a kosmonautiku) [10, 11, K1]. Politicko-environmentální požadavky na nové dopravní prostředky jsou směřovány především na lepší využití paliva (snížení jeho spotřeby) a snížení celkových škodlivých emisí produkovaných především automobilovou dopravou.

1.1 Vlastnosti hliníku a jeho slitin

Ve strojírenství patří hliník k nejhodněji využívaným neželezným kovům. Má bílou až stříbrolesklou barvu a velmi malou měrnou hmotnost (2640 až $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ – podle stupně tváření). Al má dále vysokou elektrickou ($38 \text{ m}/\Omega\cdot\text{mm}^2$) a tepelnou vodivost ($235 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$) s poměrně vysokou hodnotou měrného tepla ($890 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$). Jeho modul pružnosti činí jen 72000 MPa .

Důležitou vlastností Al je jeho odolnost proti korozi, kterou zabezpečuje tenká vrstva oxidu hlinitého (Al_2O_3) na povrchu. Ta vzniká „na vzduchu“ při reakci Al s kyslíkem, má tloušťku pouze několik setin mikrometrů [01].

Vlastnosti Al, zejména pevnost a elektrická vodivost silně závisí na jeho čistotě. V praxi se obvykle používá Al s vyšší pevností, které je docíleno tvářením za studena (válcováním, tažením, lisováním). Nečistoty (Fe, Si a Cu, zejména fáze Al_3Fe) vznikají většinou při výrobě a obvykle nepříznivě ovlivňují mechanické vlastnosti a svařitelnost. Náchylnost k tvorbě trhlin se snižuje přidáním množství křemíku (do $0,25 \%$) v poměru s železem Fe/Si do $0,5$.

Teplota tavení čistého Al je $658 \text{ }^\circ\text{C}$. Ve srovnání s jinými technickými kovy jsou mechanické vlastnosti hliníku nízké (pevnost v tahu cca 70 MPa), proto se ve strojírenství a pro konstrukční účely používá čistý Al zřídka. Mechanické vlastnosti však lze zvýšit legováním nebo mikrolegováním, případně tepelným zpracováním. Jako mikrolegovací příměsi se používají Be nebo B. Jako legovací příměsi se používají zejména Cu, Mg, Si, Zn, které zlepšují mechanické vlastnosti, ovšem vždy na úkor chemické stálosti.

Nejčastěji používané rozdělení slitin Al je podle způsobu zpracování: na slitiny *tvářené* a *slévárenské*. Tvářené slitiny lze dále rozdělit dle způsobu tepelného zpracování, na slitiny *vytvrditelné* a *nevytvrditelné*.

Slitiny Al mají velmi výhodnou kombinaci vlastností fyzikálních (např. teplotní a elektrická vodivost), mechanických (pevnostní a plastické – např. pevnost v tahu od 70 do 700 MPa.), chemických (např. odolnost proti korozi) a technologických vlastností (např. dobrá svařitelnost, tvařitelnost za tepla i za studena). Na rozdíl od většiny druhů oceli se hliník a jeho slitiny ani při nízkých teplotách neporušují křehkým lomem (vrubová houževnatost se příliš nemění), místo toho se jejich pevnost naopak zvyšuje [01 - 05].

V normách je dnes uváděno přes 120 druhů slitin Al, proto nelze očekávat dramatický vývoj nových slitin v této oblasti. Zdá se, že hlavní směry vývoje slitin budou orientovány na slitiny legované na bázi Al-Cu-Li, Al-Mg-Li, Al-Li-X pro speciální použití v letectví a především v kosmické technice. Z „klasických“ slitin Al se předpokládá v nejbližší budoucnosti upřednostnění vývoje slitin Al-Mg-Si a Al-Mg a vývoj modifikovaných slitin legovaných např. scandiem apod. Průmyslové užití roste v oblastech leteckého a kosmického průmyslu (až 80% hmotnosti některých civilních letadel), stavby lodí, kolejových vozidel, karoserií osobních automobilů (až 40% hmotnosti při roční spotřebě asi 2 mil. tun), konstrukce budov i např. obytných zařízení na těžebních plošinách. Nezanedbatelné je užití Al a jeho slitin v chemickém a potravinářském průmyslu (obaly, plechovky apod.) [02].

2. Blíže zaměření a cíl habilitační přednášky

Hliník a jeho slitiny se díky vysoké hodnotě spalného tepla velmi často používají ke svařování, což však při využití konvenčních metod svařování přináší komplikace, jimž bude dále věnována pozornost.

Hliníkové konstrukční materiály lze dle svařitelnosti rozdělit na materiály:

- a) vhodné ke svařování – technický hliník, slitiny Al-Mn, Al-Mg a Al-Si,
- b) obtížné svařitelné – slitiny Al-Cu-Mg (skupina 2xxx podle ČSN EN 573-3), Al-Mg-Si (sk. 6xxx) a Al-Zn-Mg (sk. 7xxx).

Je to jeden z hlavních důvodů, proč na Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní, ČVUT v Praze započal výzkum svařitelnosti tvářených vytvrditelných hliníkových slitin (což jsou typy slitiny obsažené pod „bodem b“ u výše uvedeného rozdělení).

Z hlediska velkého obsahu Cu, která zhoršuje svařitelnost Al slitin, je první zmíněná skupina slitin pro účely svařování nejméně vhodná. Proto je

dále věnována pozornost slitinám, které se v praxi pro svařování běžně používají, tj. skupiny slitin 6xxx a 7xxx.

Cílem habilitační přednášky je představit možnosti svařování vytvrditelných hliníkových slitin a posouzení jejich svařitelnosti s ohledem na vznik trhlin za tepla, včetně posouzení vlivu přídavných materiálů.

Na Ústavu strojírenské technologie (ÚST) byl výzkum v oblasti svařitelnosti vytvrditelných hliníkových slitin orientován především na materiály menších tlouštěk [08].

3. Metody svařování hliníku a jeho slitin

Nejvýznamnější technologií spojování je v dnešní době především svařování, kde lze použít jak metody tavného, tak i tlakového svařování. S rozvojem používání Al slitin, roste i potřeba jejich spojování a provádění oprav pomocí různých metod svařování. Middeldorf v [09] uvádí, že v současnosti Al a jeho slitiny ve výzkumu svařitelnosti představují největší část financovaných výzkumných prací.

Výslednou kvalitu svarů ovlivňuje v mnohem větší míře nejen postup, ale i metoda svařování. Většinu komerčně vyráběných slitin Al je možné svařovat (obtížná svařitelnost je především u skupiny vytvrditelných slitin 2xxx s velkým obsahem Cu – AlCu, AlCuMg apod.). V průmyslové praxi v dnešní době dominuje použití svařování elektrickým obloukem v inertních atmosférách [10-12]. Dále lze použít i ruční obloukové svařování obalenou elektrodou, které však nezaručuje dokonalou ochranu oblasti svarového spoje před oxidací [13-20]. V letecké výrobě zatím dominuje především svařování odporové (bodové a švové) [21], které vykazuje velmi dobré pevnosti spojů při aplikaci statického namáhání. Není však vhodné v podmínkách dynamického zatěžování. V současnosti se hodně rozšiřuje i metoda svařování třením s promíšením (FSW – Friction Stir Welding) [22] a relativně malý podíl tvoří svařování svazkem elektronů a laserem [23].

3.1 Metody svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách

Rozeznávají se v podstatě dva druhy metod svařování el. obloukem v ochranné atmosféře, podle typu použité elektrody. Svařovat lze buď holou (kovovou) elektrodou, která se působením elektrického oblouku odtavuje – tzv. *tavící se* elektroda. Většinou jsou vyráběny ve formě drátů různých průměrů, jež jsou navinuty na cívky a plynule dodávány do svarové lázně. Tím se z nich stává nejen iniciátor elektrického oblouku, ale současně i přídavný materiál (tzv. „svařovací dráty“). Odtavování elektrody probíhá

velmi rovnoměrně a rychle, proto se musí k jejímu podávání do svaru použít motoricky ovládaný kladkový podavač.

Obr. č. 1 – Podíl výzkumu jednotlivých metod svařování [09]

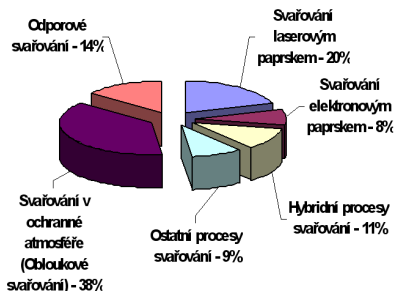
Uvedená metoda svařování se podle ČSN EN ISO 4063 označuje číselným kódem 131 a často se k označení používá i zkratka MIG (Metal Inert Gas), případně podle ASME norem, zkratka GMAW.

V poslední době se stále více prosazuje tzv. pulsní MIG svařování, které je vhodné pro svařování v montážních polohách a v případech, kdy je kladen důraz na estetické provedení svarové housenky. Konstantní stejnosměrný proud je při této metodě nahrazen sérií pulsů s definovanou střední hodnotou proudu [27].

Druhá metoda svařování v ochranných atmosférách využívá tzv. *netavící se* elektrodu, která slouží „pouze“ k vytvoření elektrického oblouku. Přídavný materiál (PM) buď nemusí být použit (pro malé tloušťky) nebo je nutné ho do tavné svarové lázně dodávat jiným způsobem (externě). Materiály pro tento typ elektrod musí mít vysokou elektrickou vodivost, emisivitu a vysoký bod tavení. Vhodným materiálem je např. wolfram (používá se čistý wolfram, nebo s příměsí 1-4 % oxidů prvků ze skupiny aktinoidů a lanthanoidů - např. La, Ce, Zr, dříve také často Th) – viz [28].

Metoda se podle ČSN EN ISO 4063 označuje číselným kódem 141 a často se k označení používá i zkratka TIG (Tungsten Inert Gas) nebo WIG (Wolfram Inert Gas), případně podle ASME norem, zkratka GTAW. Popis obou metod je uveden v řadě dostupných publikací např. v [14-26, 29-31].

Oba způsoby svařování v ochranných atmosférách vyžadují použití plynové ochrany proti působení okolní vzdušné atmosféry. Vliv způsobu svařování a materiálu lze optimalizovat použitím vhodných ochranných plynů nebo jejich směsí s různými vlastnostmi [K8, K15]. Ochranné plyny (viz kapitola č. 3.2), které ochraňují tavnou svarovou lázeň, musí mít takové chemické vlastnosti, aby netvořily žádné sloučeniny a nereagovaly s použitými materiály. Tento požadavek je možné splnit pouze při použití plynů, které nevstupují do chemických reakcí ve svarové lázni – jsou to tzv. *inertní* plyny.



3.2 Ochranné atmosféry pro svařování

Svařování v ochranných atmosférách má proti jiným technologiím tyto výhody: vysoká produktivita práce, možnost svařovat ve všech polohách, umožnění snadné automatizace a robotizace svařovacího procesu, široký výběr PM a ochranných plynů, velký sortiment vyráběných svařovacích zařízení, zlepšena hygiena prostředí.

Základním úkolem ochranných atmosfér, je ochrana svarové tavné lázně a zabránění kontaminace elektrody, el. oblouku, okolí vznikajícího svaru a případně i kořene svaru před nežádoucími účinky okolní vzdušné atmosféry (na vlastnosti svaru mají ze vzdušných plynů největší vliv kyslík, dusík a vodík). Přítomnost „vzduchu“ způsobuje u Al a jeho slitin zejména oxidaci, jeho naplynění a tím i pórovitost svaru (nejvýznamněji působí vodík) a propal prvků, což výrazně zhoršuje mechanické vlastnosti svarových spojů.

Další neméně významnou úlohou ochranných plynů je však i ovlivňování procesů při zapalování (ionizace prostředí), udržování stability elektrického oblouku a podpora přenosu svarového kovu obloukem (u metody MIG).

Ochranné plyny výrazně ovlivňují metalurgické děje při tvoření kapky tekutého kovu na konci tavící se elektrody a významně přispívají k přenosu tepelné energie do svaru. Ochranná atmosféra má tedy vliv i na tekutost a smáčivost svarové tavné lázně, vlastnosti svarového kovu, velikost odtavovacího výkonu, tvar a rozměry svarové housenky a velikost průvaru. Dále ovlivňuje množství rozstříku a rychlost svařování [32-35].

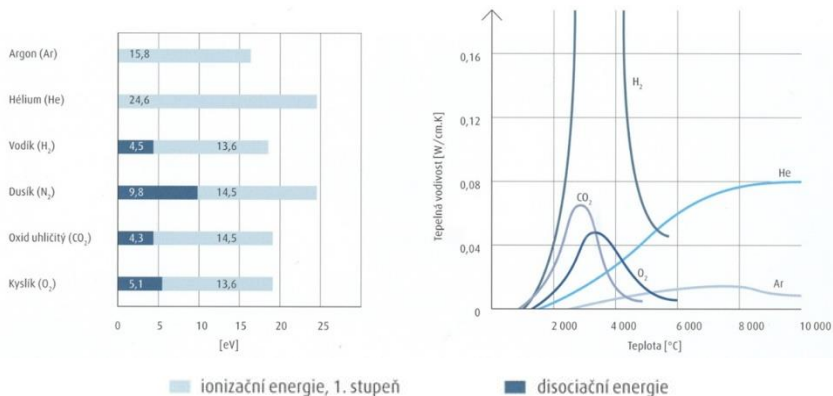
3.2.1. Druhy ochranných atmosfér a jejich účinky

Podle normy ČSN EN ISO 14 175 (*Svařovací materiály - Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*) se rozeznávají jednotlivé základní skupiny ochranných atmosfér (podle jejich chemické aktivity). Základním inertním plynem pro svařování Al je argon (doporučuje se jeho minimální čistota 99,9 % Ar - tj. 3.0). Prakticky se ale používají čistoty 4.6 a 4.8. Důležitější než podíl nečistot je druh nečistot: škodlivá je především vlhkost a přítomnost kyslíku. U větších tlouštěk se používají směsi s heliem.

Argon

Argon (chemická značka - Ar) je jednoatomový vzácný plyn, bezbarvý, bez chuti a zápachu. Vyrábí se destilací zkapalněného vzduchu. Ar má malou tepelnou vodivost ($17 \cdot 10^{-3} \text{ W/m.K}$) a relativně nízký ionizační potenciál (15,8 eV). Z těchto důvodů se elektrický oblouk v Ar dobře zapaluje, má vysokou stabilitu i při relativně velké délce oblouku a umožňuje vysokou proudovou zatížitelnost. Dobrá schopnost ionizace zaručuje při vhodném zapojení a typu

proudu účinně využívat čistící efekt elektrického oblouku, což je důležité právě pro svařování hliníku a jeho slitin. Ar má díky těmto vlastnostem dominantní postavení mezi ochrannými plyny (a často se používá i pro výrobu směsných plynů, kde obvykle tvoří hlavní složku). Hustota Ar je $1,784 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (je tedy asi 1,4x těžší než vzduch), a to přispívá k efektivnosti a velmi dobré schopnosti plynové ochrany [36].



Obr. č. 2 – Vlastnosti ochranných atmosfér pro svařování [38]

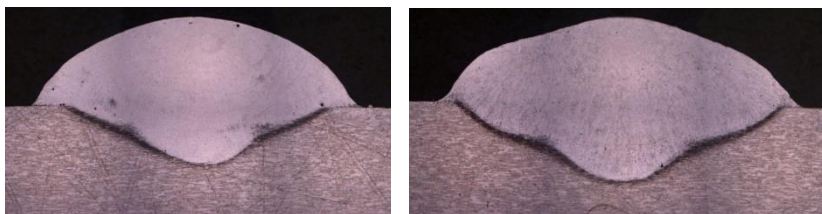
Helium

Helium (chemická značka – He) je také jednoatomový inertní plyn, bez barvy a zápachu. Ve vzduchu je He obsaženo ve velmi malém množství, proto se obvykle vyrábí separací z některých druhů zemního plynu, kde se He vyskytuje v množství kolem 1%.

He je velmi lehký plyn s hustotou $0,178 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (asi 7x lehčí než vzduch a asi 10x lehčí než Ar), což snižuje efektivitu plynové ochrany, proto se vyžaduje pro dokonalou ochranu svarové lázně větší průtok. Dále má He vyšší tepelnou vodivost ($0,1513 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) než Ar (viz obr. č. 2). Ionizační potenciál je však vyšší ($24,6 \text{ eV}$), a proto i napětí na oblouku musí být vyšší než při použití Ar a proto se oblouk hůře zapaluje a je nestabilní při větší délce než oblouk hořící v Ar. Tepelný výkon je však velmi vysoký.

Pro horší ionizační vlastnosti se nepoužívá v takové míře jako samostatný plyn pro ruční a poloautomatické procesy svařování, ale spíše ve směsích s argonem. He je vhodné pro mechanizované způsoby svařování (ovšem jeho cena je vzhledem ke způsobu výroby vyšší než u Ar). Díky vysoké tepelné vodivosti je přenos tepla v oblouku velmi vysoký a proto se směsí s He

používají pro svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí větších tloušťek, především Al, Cu a jejich slitin. Dochází k lepšímu natavení (smáčivosti), zvětšuje se závar a mění se průřez svar. housenky (obr. 3) [37].



Obr. 3 – Vliv působení Ar a He na tvar svaru
(vlevo – 100% Ar, vpravo Ar+70%He) [K8]

Pro vytvoření kvalitních svarů je nutné používat inertní typy plynů a vhodný průtok i pro kořenovou ochranu svarových spojů.

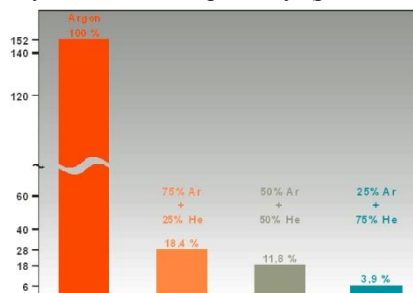
Směsné plyny

Jednokomponentní ochranné plyny při svařování nezaručují vždy požadovaný stabilní svařovací proces a pravidelný přenos kovu v elektrickém oblouku. Proto se v dnešní době často nahrazují směsí dvou nebo více plyných složek. Nejpoužívanější směs pro svařování hliníku a jeho slitin je inertní směs: Ar + He, kdy je do argonu přidáváno helium z důvodů zvýšení tepelného výkonu. Tyto směsi se používají zejména pro svařování větších tloušťek (v poměrech: 70% Ar + 30% He nebo 50%+50%), případně v případech, kdy je potřeba snížit náchylnost na vznik porozity (především při MIG svařování – obr. 4).

Obr. č. 4 – Vliv plynů na redukci pórů při svařování Al [38]

Dále je možné nahradit standardní směsí Ar+He argonem s mikropříměsí N₂, při zachování všech vlastností standardních směsí. Mikropříměs je obecně menší než 0,5 %.

Tepelná vodivost, entalpie nebo elektrická vodivost a ionizační potenciál nemají vliv na chování el. oblouku. Vlastnosti přidaných plynů se posuzují



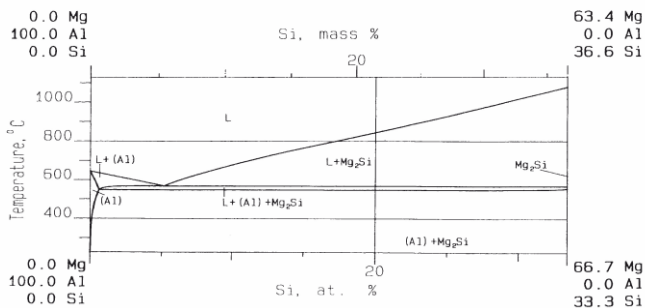
z hlediska interakce mezi plynnou složkou a roztaveným materiálem. Vliv malého množství dusíku při svařování Al a jeho slitin má pozitivní vliv na: zvětšení průvaru v porovnání s čistým Ar, zvětšení stability oblouku, zlepšení vzhledu svarové housenky.

4. Popis základních materiálů

Jako *základní materiály* (ZM) pro následný popis svařitelnosti a ověřovací experimenty byly použity vybrané slitiny ze skupin 6xxx a 7xxx.

Vytvrditelné slitiny hliníku typu 6xxx [K6]

Slitiny Al s Mg a Si jsou komplexní slitiny, ve kterých bývá vždy i malé množství Mn, Fe, popř. Cu. (Již malé množství Mn – přibližně do 0,3 % - zvyšuje mírně pevnost slitiny, jeho vyšší obsah působí však spíše naopak. Mn dále příznivě působí na zjemnění zrna, a to tím výrazněji, čím je jeho obsah vyšší). Obsah Mg se obvykle pohybuje od 0,4 do 1,2 (až 1,5) hm. % a Si od 0,4 do 1,2 hm. %. Cu je přísadou, která velmi výrazně zvyšuje pevnost, ale u slitin typu Al-Mg-Si je obsah Cu velmi nízký. Fe v rozsahu 0,1 – 0,5 hm. % je pokládáno za nečistotu. Mírně zvyšuje pevnost, zjemňuje zrna a snižuje rekrystalizační teplotu [02]. Mg a Si, tvoří v binárním systému sloučeninu Mg_2Si (která se skládá z 63,41 % Mg a z 36,56 % Si), což umožňuje sledovat příslušnou oblast ternárního diagramu na kvazibinárním řezu (viz obr. č. 5).



Obr. č. 5 – Kvazibinární řez systémem Al-Mg-Si od Al k Mg_2Si [02]

Z obr. 5 je zřejmá změna rozpustnosti fáze Mg_2Si v tuhém roztoku, a tedy možnost vytvrzování vznikem precipitátů GP a β' , které tvoří přechod k fázi Mg_2Si .

Z uvedené skupiny ZM byla použita slitina AlMg1Si1Mn, která se často označuje jako Avial. Označení podle ČSN EN 573-3 je **EN AW-6082** – ve stavu T6 (po vytvrzení) a podle TN CEN ISO/TR 15608 spadá do skupiny 23.1. Jedná se o vytvrditelnou slitinu, jejíž použití je vhodné zejména na mechanicky středně namáhané konstrukce. Často se používá pro výrobu letadel, automobilů či kolejových vozidel. Nachází však uplatnění i v potravinářském průmyslu díky své chemické stálosti.

Vytvrditelné slitiny hliníku typu 7xxx

Al slitiny skupiny Al-Zn-Mg-Cu jsou perspektivní pro průmyslové použití. Vyznačují se nejvyšší rozpustností legujících prvků Zn a Mg při vysokých teplotách (Zn 82,8%; Mg 17,2%). Zpevňujícími složkami jsou Mg a Zn nacházející se v tuhém roztoku Al. Přesycený tuhý roztok je dosti stabilní, takže i při malých rychlostech ochlazení zůstává přesycen a přirozeně se vytvrzuje po 30 dnech. Celý proces je možné urychlit umělým stárnutím. Přirozené stárnutí se s však výhodou využívá u svařovaných konstrukcí po svaření, kdy není nutné tepelné zpracování [40].

Precipitačně zpevněné slitiny se doporučuje svařovat s limitovaným tepelným příkonem a například místo jedné vrstvy svaru použít vícevrstvé svařování, i tak se požaduje teplota mezi jednotlivými vrstvami max. 65 °C. Výběr přídavných materiálů by měl vést k tomu, aby se po svařování dosáhlo složení svarového kovu, které by umožnilo precipitační vytvrzení [41].

Al slitinám obsahující Zn a Mg hrozí během svařování nebezpečí snížení jejich obsahu vypařováním. Oba prvky mají, za stejných tlakových podmínek, nejnižší teplotu tavení a varu ze všech komponent obsažených v Al slitinách. V porovnání s ostatními prvky (Cu, Si, Fe, Ti) dochází při tavení těchto prvků již k varu Zn a Mg. Nabízí se možnost vzniku pórů z par Zn a Mg, důležitou podmínkou je, aby vzniklý tlak plynů ve svarové lázni byl vyšší než vnější tlak. Z teorie vyplývá, že při obsahu do 6 % nebudou mít páry těchto prvků vliv na vznik pórů ve svarovém spoji. Nicméně může docházet k vypařování a varu prvků z přehřátých povrchových vrstev svar. lázně. Pokud se udrží obsah Zn a zvýší se teplota svar. lázně na 1 200÷1 300 °C, pak tlak par Zn bude vyšší než tlak okolí nad svar. lázní [42].

Z druhé skupiny, byla pro experiment vybrána, jako ZM slitina: **AlZn5Mg3Cu** (EN AW 7022) – sk. svařitelnosti 23.2. Jedná se opět o vytvrditelnou slitinu, používanou především pro: plechy, pásy, desky tvářené za tepla a za studena, tyče, trubky, profily. Desky z tohoto materiálu se díky přesné výrobě vyznačují rovnoměrnými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, materiál na výrobu forem na plasty, pěnové a gumové materiály,

prototypové formy. Dále je vhodná v širokém strojírenství, pro základové desky střížných nástrojů, pro stavbu jednoúčelových strojů apod.[01, 39]. Vybrané slitiny mají typické chemické složení a mechanické vlastnosti uvedeny v tab. 1 a 2.

Tab. 1 – Směrné chemické složení v % hlavních legujících prvků ZM [39].

Slitina	Mg	Si	Mn	Fe	Zn	Cu	Cr	(Ti+Zr)
1	0,6 - 1,2	0,7 - 1,3	0,4 - 1,0	< 0,5	< 0,2	< 0,1	< 0,25	0,8
2	2,6 - 3,7	0,5	0,1 - 0,4	< 0,5	4,3 - 5,2	0,5 - 1,0	< 0,3	0,2

Pozn.1: Slitina 1 = EN AW-6082 T6 [Al Mg1Si1Mn], 2 = EN AW 7022 T651 [AlZn5Mg3Cu],
 Pozn.2: Tepelné zpracování T6= vytvrzení (rozpuštěcí žhání a umělé stárnutí), T651 = po rozpouštěcím žhání, uvolnění vnitřního pnutí vypnutím řízenou velikostí trvalé deformace (0,5 – 3% pro plechy, 1,5 – 3% pro desky, 1 – 3% pro tyče, 1 – 5% pro výkovky a válcovaný kruh) a umělé stárnutí.

Tab. 2 – Základní mechanické vlastnosti vybraných slitin ZM [39].

Slitina	Pevnost v tahu [N.mm ⁻¹]		Mez kluzu [N.mm ⁻¹]		Tažnost A ₅₀ (%)		Tvrдость [HB]	Modul pružnosti v tahu [N.mm ⁻¹]
	Zaručená	Typická	zaručená	Typická	zaručená	typická	typická	
1	295	350	240	305	8	11	105	69000
2	450	550	370	490	8	10	165	71 000

5. Rozdělení a volba přídavných materiálů pro svařování Al a jeho slitin

PM pro svařování Al a jeho slitin metodou MIG (a pro automatizované svařování TIG) se dodávají ve formě drátů o průměru 0,6 – 2,4 mm (nejpoužívanější průměry jsou 1,2 mm pro poloautomatické svařování a 1,6 mm pro automatové svařování) navinutých na cívkách (standardně o hmotnosti 7 kg), případně dodávaných z velkokapacitních zásobníků (až na 450 kg). Dráty mají speciální povrchovou úpravu zvyšující tvrdost povrchu. Tím je zajištěno spolehlivé podávání pomocí kladek. Vysoké požadavky jsou kladeny na přesné dodržení hodnoty průměru drátu, aby byl drát spolehlivě napájen po celé délce napájecího průvlaku.

5.1 Volba přídavného materiálu

Správná volba PM vedoucí k optimální svařitelnosti, závisí na několika faktorech, které spolu navzájem souvisí: obvykle se při svařování volí PM dle srovnatelného chemického složení se ZM, někdy jsou však rozhodující především požadované mechanické vlastnosti spoje (jak v tepelně ovlivněné oblasti - TOO, tak ve svarovém kovu - SK) a na základě toho je někdy vhodnější zvolit chemicky odlišný PM, který má však odpovídající pevnost

apod. Mnohdy se musí počítat i s následnými úpravami svarových spojů resp. celé konstrukce (např. povrchové úpravy eloxováním a dekorativní úpravy povrchu). Z provozního hlediska je často důležitá i konečná korozní odolnost spoje. Konečná volba v praxi závisí tedy hlavně na druhu použití konečného výrobku, jeho pracovním provozu a v dnešní době stále důležitější roli hraje i ekonomické vyhodnocení těchto faktorů. V tab. 3 je uveden systém rozdělení PM do skupin podle normy ČSN EN 1011-4 (*Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 4: Obloukové svařování hliníku a slitin hliníku*).

PM skupiny 4 (Al-Si) oxidují anodickou oxidací nebo vystavením působení okolní atmosféry, což se projeví tmavě šedou barvou. Intenzita zřednutí se zvyšuje se zvyšujícím se obsahem Si. Proto nejsou PM v barevném souladu se ZM. V případě, že dobrá korozní odolnost a barevný soulad jsou důležitými faktory, má být obsah Mg v PM stejný jako v ZM.

V případě, že důležitými faktory jsou mez kluzu a mez pevnosti SK, je nutné použít PM s obsahem Mg min. 4,5 až 5 %. Přísady Cr a Zr snižují prostřednictvím zpevnění zrn sklon SK k trhlinám. Ti (obsažený v PM sk. 1) zpevňuje zrno a tím snižuje náchylnost SK k praskání.

Při svařování ZM obsahujících $\geq 2\%$ Mg, PM typu AlSi5 nebo AlSi10 (nebo při svařování ZM obsahujících $\geq 2\%$ Si, PM typu AlMg5) se může na hranici natavení vytvořit větší množství precipitátů Mg_2Si , a to může způsobit zkřehnutí spoje. Tyto kombinace se proto nedoporučují pro dynamicky nebo rázově namáhané konstrukce.

Tab. č. 3 – Rozdělení přídatných materiálů do skupin dle ČSN EN 1011-4

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

Pozn.: typová čísla (označení jednotlivých skupin) souhlasí s první číslicí v označení slitiny dle ČSN EN 573 (z této normy vychází i označení slitin PM)

Tab. 4 uvádí doporučení pro volbu PM (převzaté z ČSN EN 1011-4) pro svarové spoje podobných a odlišných ZM, při pracovních teplotách do +50 °C. (Uvedené ZM zahrnují tvářené a lité slitiny podle ČSN EN 573, ČSN EN 1780 a ČSN EN 1706).

Pro porovnání vlivu PM byly proto použity nejpoužívanější, komerčně vyráběné PM fy. ESAB Vamberk, člen konsorcia s.r.o., vhodné pro vytvrditelné slitiny Al skupiny 6xxx a 7xxx: AlSi5 (OK Autrod 4043), AlMg5Cr (OK Autrod 5356) a AlMg4,5MnZr (OK Autrod 5087) [K9, K12, K16].

Tab. č. 4 – Doporučení pro volbu přidavného materiálu [02]

Základní kov	Al	AlMn	AlMn < 1% ^a	AlMg 3%	AlMg 5% ^b	AlMgSi ^c	AlZnMg	AlSiCu < 1% ^{a-1}	AlSiMg ^d	AlSiCu ^{e-1}	AlCu ^e	Základní materiál
Al	4 1 4											Al
AlMn	4 nebo 5 1 4	3 nebo 4 3										AlMn
AlMn < 1% ^a	4 nebo 5 1 4	4 4 4	4 4 4									AlMn < 1% ^a
AlMg 3%	4 nebo 5 5 ^f 4 nebo 5	5 5 ^g nebo 3 4	5 5 ^g 4	5 5 ^g 4	5 5 5							AlMg 3%
AlMg 5% ^b	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5							AlMg 5% ^b
AlMgSi ^c	4 nebo 5 5 5	4 nebo 5 5 5	4 nebo 5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 nebo 4 5 4						AlMgSi ^c
AlZnMg	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5					AlZnMg
AlSiCu < 1% ^{a-1}	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4		AlSiCu < 1% ^{a-1}
AlSiMg ^d	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4		AlSiMg ^d
AlSiCu ^{e-1}	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	AlSiCu ^{e-1}
AlCu ^e	Ni ^h	Ni ^h	Ni ^h	Ni ^h	Ni ^h	4 4	4 4	4 4	4 4	4 4	4 4	AlCu ^e
Základní materiál	Al	AlMn	AlMg < 1%	AlMg 3%	AlMg 5%	AlMgSi	AlZnMg	AlSiCu < 1%	AlSiMg	AlSiCu	AlCu	

(Pozn. jednotlivá čísla v každém z okének znamenají typová čísla skupin dle tabulky č. 4 pro volbu PM)
Přičemž první řádek udává PM s optimálními mech. vlastnostmi, druhý řádek PM s optimální korozní odolností a třetí řádek PM s optimální svařitelností.

5.2 Specifikace použitých přidavných materiálů [43]

PM typu *AlSi5* (obchodní označení je OK Autrod 4043 pro MIG svařování a OK Tigrod 4043 pro ruční TIG svařování a je v souladu s normou ČSN EN ISO 18273) je jedním z nejvíce používaných drátů pro svařování Al slitin. Přídavek Si umožňuje lepší tavitelnost. SK není náchylný ke tvorbě trhlin a povrch svaru je lesklý a bez větších nerovností. Tento PM má největší tekutost, při které se dobře formuje svarová housenka, ale mechanické vlastnosti SK jsou nižší oproti dále uvedeným PM. PM je vhodný pro svařování slitin do 7% Si, pro nespecifikované Al slitiny a pro heterogenní spoje různě legovaných Al slitin. Dále i pro pájení a svařování plamenem s

tavidlem. Tepelně se výsledný SK nezpracovává a nedoporučuje se pro svařence s potřebou povrchové úpravy (eloxování).

PM *AlMg5Cr* (OK Autrod 5356, OK Tigrod 5356) se používá pro svařování Al slitin s obsahem Mg do 5 % a také pro svařování slitin odolných proti mořské vodě. Jedná se o nejpoužívanější typ PM s vysokou pevností SK ve smyku. ZM typu 5xxx s obsahem Mg větším než 3 % svařované tímto PM mohou být při pracovních teplotách vyšších než 65° C náchylné ke koroznímu praskání. SK se tepelně nezpracovává.

PM typu *AlMg4,5MnZr* (OK Autrod 5087, OK Tigrod 5087) je vhodný pro svařování Al slitin s obsahem Mg do 5 % a slitin s požadavkem na vyšší pevnost (tam kde původně používaný drát typu AlMg5 poskytoval nižší pevnost). PM je vhodný pro svarové spoje komplikovaných konstrukcí s nepříznivým pnutím. Legování Zr zlepšuje odolnost proti trhlinám za tepla při tuhnutí svarového kovu a zjemňuje jeho strukturu.

Tab. 5 - Směrné chemické složení v % a zákl. mech. vlastnosti PM [43]

PM	Si	Mg	Zn	Mn	Fe	Ostatní	Al	R _m [N·mm ⁻²]	R _{p0,2} [N·mm ⁻²]	A ₅₀ [%]
1	5,0	0	≤0,1	≤0,05	≤0,6	0	zbytek	165	55	18
2	0,25	5,0	≤0,1	≤0,2	≤0,4	Cr 0,13	zbytek	265	120	26
3	≤0,25	4,7	0,2	0,8	0,15	Zr 0,15	zbytek	280	130	30

Pozn.: 1 = AlSi5 (OK Autrod 4043), 2 = AlMg5Cr (OK Autrod 5356), 3 = AlMg4,5MnZr (OK Autrod 5087)

Při svařování uvedenými PM doporučují výrobci obvykle přehřev (150 až 200 °C) a dodržení interpass teploty (150 °C) – pro experimentální zkoušky na ÚST byly použity tloušťky 3 mm, kde dodržení těchto podmínek není bezprostředně nutné.

6. Problémy při svařování hliníku

Pro svařování jsou díky jemnozrnější struktuře obecně výhodnější tvářené slitiny, u kterých však může vlivem svařování docházet k výrazné degradaci mechanických vlastností (především u slitin vytvrdivelných).

Svařitelnost Al a jeho slitin je ovlivněna několika podstatnými činiteli, díky kterým vyžaduje Al odlišný přístup ke svařování ve srovnání s ocelmi. Nejdůležitější činitelé ovlivňující svařitelnost Al slitin, které mají největší vliv na kvalitu svarových spojů, jsou [7, 14, K15, K10, K11]:

Velká afinita Al ke kyslíku, která má za následek tvorbu oxidické vrstvy Al₂O₃. Tloušťka oxidické vrstvy je asi 0,01 μm. Účinkem vyšší teploty a vlhkosti však může vrstva na vzduchu dosáhnout tloušťky 0,03 až 0,1 μm.

Oxidická vrstva vytváří sice ochranu materiálu před další oxidací, má však vlastnosti, které negativně ovlivňují svařitelnost. Je to především vysoká teplotní stabilita (teplota tavení Al_2O_3 je 2054 °C) vzhledem k ZM (teplota tavení čistého hliníku je 658 °C) a nerozpustnost v roztaveném kovu, což znamená, že při svařování je tato vrstva prakticky netavitelná a musí být ze svarového spoje před i během svařování odstraněna.

Al_2O_3 je elektricky nevodivý, proto znemožňuje nastavení správných svařovacích parametrů při obloukovém svařování, pokud není odstraněn. Má rovněž větší měrnou hmotnost než ZM, proto případné zbytky oxidu mohou při svařování propadat do svarové lázně. Tak vznikají oxidické vměstky ve SK, které mohou zvyšovat náchylnost svarového spoje ke vzniku trhlin, které jsou dle ČSN EN ISO 10042 (*Svařování – Svarové spoje hliníku a jeho slitin zhotovené obloukovým svařováním – Určování stupňů jakosti*) ve všech stupních jakosti vždy nepřijatelnou vadou. Oxidická vrstva je silně hygroskopická, proto může při svařování docházet vlivem zadržované vlhkosti k nadměrné porezitě svarů.

Odstranění oxidické vrstvy před svařováním se provádí mechanickým (nejčastěji kartáčováním pomocí korozivzdorných ocelových kartáčů, případně přímo při obrábění svarových ploch apod.) nebo chemickým způsobem (nejčastěji mořením), ovšem ihned po odstranění vzniká na povrchu Al okamžitě nová vrstva už při pokojové teplotě. Proto je nutné pro zajištění dobrého metalurgického spojení svařovaných materiálů vrstvu odstraňovat i v průběhu svařování. Během svařování se oxidická vrstva odstraňuje také buď chemicky (pomocí tavidel) nebo přímým účinkem elektrického oblouku v ochranném plynu Ar (tzv. čistící účinek el. oblouku).

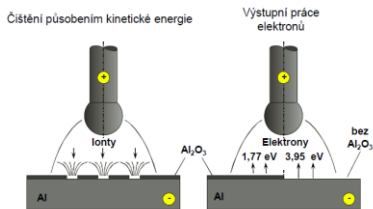
Fyzikální podstata čistícího účinku ještě není uspokojivě vysvětlena, bývá obvykle popisována 2 hypotézami, které spolu úzce souvisí [45] – viz obr. 6:

a) Teorie katodové skvrny

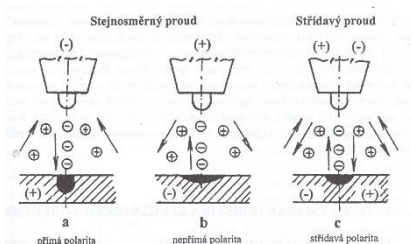
Elektrický oblouk „hoří“ přednostně v místě s minimálním napětím. Na ZM se vytvoří katodová skvrna, která se pohybuje do míst s minimálním emisním napětím. Vrstva pokrytá oxidy má nižší emisní napětí (1,77eV), nežli ZM (3,95eV), proto katodová skvrna vyhledává místa pokrytá oxidy. Když katodová skvrna (s teplotou cca 2500 – 3000 °C) přejde na místo pokryté oxidy, začne je vysoce přehřívat, až se vypaří, následně zkondenzují na okraji vzniklého svaru. Katodová skvrna se pohybuje po oxidech ve směru svařování. Když se místo, kde byl oxid, vyčistí, stoupne emisní napětí a katodová skvrna se přemístí na jiné místo pokryté oxidy [45].

b) Teorie kladných iontů

Při využití stejnosměrného proudu se zapojením s nepřímou polaritou (svařovací elektroda zapojena na „+“ pól svařovacího zdroje) je proud kladných iontů urychlován směrem ke svarové lázni, kde kladné ionty bombardují povrch, a rozrušují oxidy, protože hmotnost kladných iontů je 1840x větší než hmotnost záporných elektronů, mířících opačným směrem. Dynamickým účinkem proudu iontů dochází ke stažení oxidů k okraji svarové lázně, jde o určitou formu „otryskávání povrchu“.



Obr. č. 6 – Schématické znázornění hypotéz čistícího účinku elektrického oblouku



Obr. č. 7 – Možné způsoby zapojení el. oblouku při TIG svařování a jeho vliv na čistící účinek el. oblouku

Nejlépe čistící účinek funguje při stejnosměrném proudu se zapojením na nepřímou polaritu, nicméně z praktických důvodů lze tento způsob použít pouze u metody MIG. U metody TIG je při tomto způsobu přehřívána wolframová elektroda a nedosahuje se dostatečného průvaru (obr. 7), proto se pro TIG svařování používá AC – střídavý svařovací proud [K17].

Další vlastnost, která způsobuje potíže při zhotovování bezpórovitého svaru je **velká rozpustnost plynů v Al** – při pohlcování plynů hliníkem, dochází k absorpci, difúzi a rozpouštění plynů na povrchu i uvnitř tekutého, popř. tuhého kovu. Z plynů má největší vliv na tvorbu pórů v Al a jeho slitinách vodík (H₂), který je v Al rozpustný. Rozpustnost H₂ klesá s rostoucím obsahem nečistot, zvyšuje se s rostoucí teplotou, viz obr. 8.

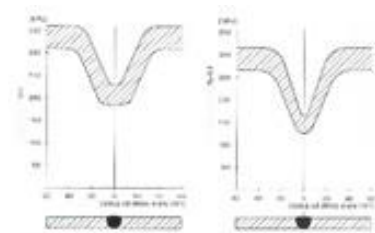
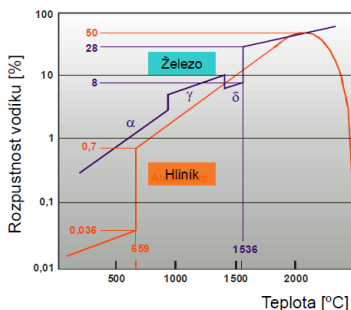
Přímý účinek H₂ na vznik vad se projevuje zejména ve SK. Při krystalizaci SK klesá prudce rozpustnost H₂ v Al, přičemž nedojde k úplnému vyloučení H₂ ze SK. Al svary rychle krystalizují a část H₂ ve fázi krystalizace proto zůstává ve svaru a k jeho vyloučení dojde až pod teplotou solidu. V pevném plastickém svaru pak vyvolá vylučující se H₂ vznik nežádoucích pórů a bublin.

Snížit nepříznivé působení H_2 lze: minimalizováním zdrojů H_2 před svařováním, zkrácením času přímého tavení svarového kovu a zabráněním přehřátí svarového kovu, použitím vhodné plynové, struskové nebo tavidlové ochrany svarové lázně.

Obr. č. 8 – Závislost rozpustnosti H_2 v Al v závislosti na teplotě (a porovnání s rozpustností v Fe)[38]

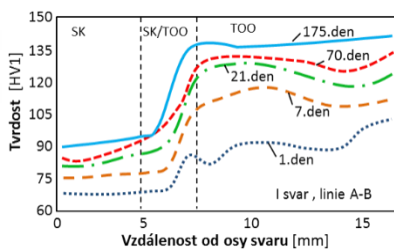
Obecně při svařování vytvrditelných Al slitin nastává ještě další, velmi závažný problém, kdy v tepelně ovlivněné oblasti dochází při svařování k rozpouštění vytvrzující fáze, a tím **k výraznému poklesu hodnot mechanických vlastností** a snížení odolnosti proti korozi.

Vytvrditelné slitiny Al jsou velmi citlivé na ohřev. Tyto materiály svařované ve vytvrzeném stavu, vykazují v celém svarovém spoji výrazný pokles pevnosti velmi často až na úroveň pevnosti žíháného materiálu. Při svařování je ZM ohřát až na teplotu tavení. V celé TOO ohřáté nad teplotu 200 °C probíhají dále precipitační děje a podle výšky teploty se mění pevnost a tvrdost svařovaného materiálu. V TOO v pásmu přehřátí je pevnost a tvrdost nejmenší – odpovídá pevnosti a tvrdosti žíháného ZM (obr. 9).



Obr. č. 9 - Změna pevnosti (R_m a R_e) po svařování tupého svarového spoje u vytvrditelné slitiny typu 6xxx (Al-Mg-Si) [14] - vlevo

Obr. č. 10 – Změna mechanických vlastností u slitiny typu Al-Zn-Mg-Cu v závislosti na čase po svařování [K13] - vpravo



Výsledný pokles pevnosti je závislý na době působení tepoty nad 200° C. Jediné efektivní řešení tohoto problému je např. u slitin Al-Cu-Mg (2xxx)

opětovné tepelné zpracování svařené součásti. U přirozeně stárnoucích Al slitin typu Al-Zn-Mg (7xxx) dojde k „samovytvrzení“ a do cca 90 dnů k návratu pevnosti na původní hodnoty (obr. 10). Podle zkušeností z praxe i výzkumu, však např. u slitin typu Al-Mg-Si (6xxx) nevede dodatečné tepelné zpracování k výraznému zlepšení mechanických vlastností a proto se z ekonomických důvodů nedoporučuje aplikovat [K5, K6, K14, K17]. Toto je jeden z největších problémů při svařování těchto slitin. Proto je třeba nalézt parametry a tepelný režim svařování, který povede k co nejmenší degradaci mechanických vlastností.

6.1 Praskavost svarových spojů

Velkým problémem při svařování Al slitin je i **velký koeficient teplotní délkové roztažnosti** Al, který způsobuje velké deformace a napětí, které mohou být i příčinou vzniku trhlin při svařování. Tento jev je při svařování jedním z nejnepříznivějších. Navíc čistý Al má vysokou tepelnou vodivost, a proto je i teplotní pole při svařování mimořádně široké.

Celistvost svarového spoje je jednou ze základních podmínek jeho kvality. Proto je potřeba znát činitele, které podmiňují vznik trhlin. Náchylnost Al slitin k tvorbě trhlin je jedním z kritérií při hodnocení jejich svařitelnosti (viz kapitola č. 7). Může docházet ke vzniku dvou druhů trhlin, které se označují podle charakteru jejich vzniku jako tzv. *trhliny za tepla* vznikající v procesu krystalizace a *trhliny za studena* vznikající v tuhém stavu. Trhliny za tepla jsou charakteristické pro SK a zónu částečného natavení, trhliny za studena vznikají obvykle v TOO při chladnutí [45].

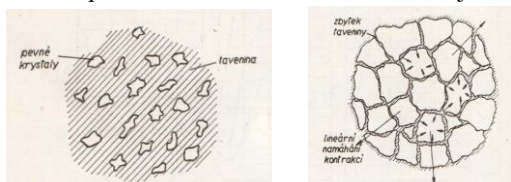
Nejčastějším typem trhlin jsou „trhliny za tepla“ vznikající ve SK (interkrystalické solidifikační trhliny) a někdy i v TOO (likvační praskání). Při svařování vytvrzených slitin Al (obvykle u vysokolegovaných slitin typu AlCuMg a AlZnMg) se může objevit i praskání při nižších teplotách v oblasti svarového spoje (transkrystalické trhliny „za studena“ v TOO). Některé slitiny jsou navíc náchylné na korozní praskání pod napětím. Proto i s tímto faktorem se musí počítat při návrhu ZM a PM.

Na základě poznatků, které uvádí odborná literatura [např. 16, 19, 41], lze předpokládat, že tvorba trhlin za tepla i za studena bude především záviset na: chemickém složení svařované slitiny, množství přivedeného tepla do svaru, rychlosti chladnutí.

6.1.1. Trhliny za tepla

Možnost vzniku trhlin je u Al dána objemovou změnou v průběhu krystalizace. Koeficient objemové roztažnosti na rozhraní tuhé a tekuté fáze

se snižující teplotou rychle mění, což vyvolává vznik tahových napětí. Pokud je interval krystalizace velký a zahrnuje v sobě kritickou teplotu změny roztažnosti, není schopen SK odolávat smršťení a vznikají trhliny.



Obr. č. 11 – Tuhnutí slitiny s malým (vlevo) a velkým (vpravo) intervalem tuhnutí [46]

Při tuhnutí se vznikající zrna rozpínají do okolní taveniny. Oblasti mezi zrny vyplňuje tavenina s nižším bodem tuhnutí. Když je taveniny dostatek, deformační napětí se koncentrují v zrnech, která se smršťují a rozšiřují mezizrnné prostory. Protože tyto prostory vyplňuje tavenina s nižší teplotou tuhnutí, trhliny nevznikají. Když je taveniny s nižším bodem tavení málo, při smršťování zrn tavenina nevyplní rozšiřující se mezizrnné prostory, a proto vznikají na hranicích zrn trhliny. Na tvorbu trhlin jsou náchylnější slitiny s větším intervalem tuhnutí [46] – viz obr. 11.

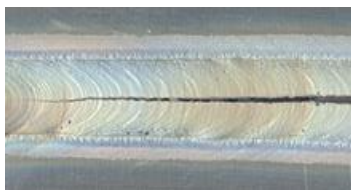
Typy trhlin za tepla

Solidifikační interkrystalické trhliny vznikají ve SK v průběhu tuhnutí, jako důsledek vysokého napětí na fázovém rozhraní. Definice těchto krystalizačních trhlin dle ČSN EN ISO 17641-1 zní: „jsou to trhliny za tepla, které se tvoří během tuhnutí z tekuté fáze svarových kovů“. Al má v porovnání s ocelí 2x vyšší tepelnou roztažnost, proto tuhnoucí svarová lázeň vyvolává velká napětí. Solidifikační trhliny se obvykle šíří od osy svaru, tedy z místa, které tuhne jako poslední. Proto se doporučuje svařovat s malým tepelným příkonem do svaru, s co nejmenším počtem housenek a nevytvářet velkou tavnou lázeň. Pro slitiny typu 6xxx a 7xxx je tento typ trhlin typický. Další možností, jak zabránit solidifikačním trhlinám je elektromagnetické míchání svarové lázně v průběhu svařování [16].

V TOO vznikají trhliny nejčastěji v důsledku vzniku eutektik s nízkým bodem tavení na hranicích zrn a napětí, které vznikají při chladnutí svarového spoje. V těsné blízkosti svarové lázně je svařovaný materiál namáhaný tlakem vyvolaným expanzí teplého kovu svarové lázně a tahem při jeho smršťování. Proto vznikají v této oblasti v nízkotavitelných vrtvách na hranicích zrn trhliny [17].

Likvační interkrystalické trhliny vznikají ve vysokoohřátém podhousenkovém pásmu TOO, nebo ve SK při vícevrstvě svařování. Kombinace elasto-plastického napětí v průběhu tuhnutí svarové lázně je příčinou vzniku těchto trhlín [47-48].

Dalším typem trhlín za tepla vznikajících ve SK těsně pod teplotou solidu jsou tzv. *polygonizační trhliny*. Tyto trhliny se nejčastěji vyskytují ve slitinách s ostře ohraničenou strukturou, přičemž se šíří v mezikrystalových (mezizrných) prostorech. V mnohých případech jsou pokračováním trhlín, které vznikají těsně nad teplotou solidu. Dle výše zmíněné normy jsou to trhliny, které se tvoří během svařování v důsledku poklesu houževnatosti za vyšších teplot. Podobně jako likvační trhliny se i tyto mohou vyskytovat v TOO základního materiálu nebo u vícehousenkových svarů.



Obr. č. 12 - Krystalizační trhlina



Obr. č. 13 - Trhlina za tepla (koncový kráter)

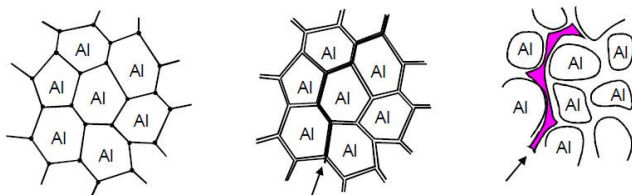
Faktory ovlivňující vznik trhlín za tepla

Vznik trhlín je rovněž ovlivněn způsobem krystalizace a segregací. Náchylnost ke vzniku trhlín za tepla je ovlivňována typem a především množstvím eutektické fáze. V případě, že objem tekuté eutektické fáze v závěrečné fázi krystalizace je dostatečný na vyplnění prostoru mezi vznikajícími dendrity nejsou splněny podmínky pro vznik krystalizačních trhlín. Na úplné potlačení krystalizačních trhlín je potřebný objem eutektické fáze v rozmezí 15 – 25%, podle typu slitiny a podmínek svařování. Potřebné množství eutektika ve svarovém kovu lze zajistit použitím vhodného PM. Slitiny s větším množstvím přísad jsou ke vzniku trhlín náchylnější. - což lze omezit použitím PM s vyšším obsahem legujícího prvku [16].

Pro každou skupinu slitin Al je stanovena kritická hodnota legujícího prvku, pro kterou je náchylnost na vznik trhlín za tepla největší (obr. 15) [16].

Obecně se např. uvádí, že sklon k trhlinám u vytvrditelných slitin se snižuje použitím PM se zvýšeným obsahem Si nebo Mg. Nejčastěji se používají svařovací dráty AlSi5. Rovněž PM AlMg5 s přísadou 0,1 až 0,25 % Cr působí příznivě na snížení sklonu k trhlinám. Na jednom svařovaném detailu se však nemají používat kombinace PM a to hlavně u svarů, které se kříží.

Kromě chemického složení SK a ZM (omezení obsahu nečistot typu Cu, Pb, Zn v ZM) může vznik trhlin za tepla ovlivnit i zvolená technologie svařování (vhodné jsou technologie umožňující velkou rychlost svařování – např. metoda MIG), parametry svařování a zejména přehřev. Resp. je vhodné svařování neprovádět při tuhém upnutí svarových spojů.



Obr. č. 14 – Způsoby tuhnutí hliníkových svarů [49]

Vlevo - čistý hliník (bez legujících prvků) – nebezpečí vzniku pórů

Uprostřed - nízký obsah legujících prvků ve slitině – nebezpečí vzniku trhlin

Vpravo - dostatečné množství eutektika na hranicích zrn – nebezpečí vzniku kavit (dutin)

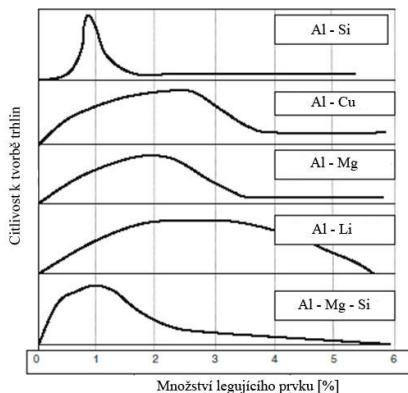
6.1.2. Trhliny za studena

Trhliny vznikající při nízkých teplotách je možné rozdělit do dvou skupin:

- *Středněteplotní trhliny*, vznikající v rozmezí teplot 400 až 200 °C,
- *Nízkoteplotní trhliny*, vznikající v oblasti pod teplotou 200 °C.

Obr. č. 15 – Vliv hlavních legujících prvků na vznik trhlin u jednotlivých typů slitin [16]

Středněteplotní trhliny jsou nejčastěji pokračováním mikrotrhlin vzniklých při vysokých teplotách, nebo jsou důsledkem pórů a křehkých zón na okraji zrn. Nízkoteplotní trhliny mají obvykle původ ve velké tuhosti konstrukce, vrubech, kráterech apod., přičemž jejich vznik závisí na rychlosti ochlazování (čím je rychlost ochlazování větší, tím je ve svarovém spoji více trhlin) [16].



Transkrystalické trhliny za studena se u Al slitin vyskytují zřídka. Tvoří se zejména v TOO vysokolegovaných slitin typu Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Si

(2xxx), Al-Zn-Mg (7xxx) při tuhém upnutí, t.j. v konstrukčních uzlech s malou možností deformace. Trhliny vznikají v podélném směru svaru, pravděpodobně následkem poklesu pevnosti na hranicích zrn.

Správným způsobem svařování, při kterém nastává malé tepelné ovlivnění, je možné trhliny tohoto typu omezit na minimum [17]. Zabránit těmto trhlinám lze nejlépe dodržением poměru Zn:Mg do 3:1 [19], legováním Mg nebo Cu a snížením obsahu Si, Fe a dalších nečistot. Lze jim také zabránit komplexním vícecestupňovým tepelným zpracováním.

6.1.3. Korozní praskání pod napětím

Koroze pod napětím nastává, když jsou splněny tři základní faktory: dostatečně vysoká úroveň napětí (charakterizované při dané velikosti defektů součinitelem intenzity napětí), vliv korozního prostředí a citlivost materiálu ke koroznímu prostředí. Při současném působení koroze a mechanického napětí může být intenzita korozního napadení vyšší než by odpovídalo součtu poškození při jejich izolovaném působení.

7. Technologické zkoušky svařitelnosti

Technologické podmínky a zásady svařování a dalšího zpracování slitin Al obsahuje zejména ČSN EN 1011-4. I přes dodržení vstupních technolog. podmínek mohou však ve svarových spojích vznikat trhliny, což bývá při svařování obecně jeden z největších problémů, protože trhliny jsou dle ČSN EN ISO 10042 ve všech stupních jakosti vždy nepřijatelnou vadou.

Zkoušky svařitelnosti Al slitin se proto nejčastěji zaměřují na zkoušky praskavosti a jsou považovány za kritérium pro hodnocení svařitelnosti.

Zkoušky praskavosti se vykonávají jednak pro zkoušení odolnosti vůči praskání ZM a jednak proto, aby se kvalifikovaly PM vzhledem ke sklonu k trhlinám. Náhylnost na vznik trhlín velmi závisí na podmínkách konkrétní zkoušky a ovlivňuje ho i způsob svařování. Při posuzování náhylnosti na vznik trhlín obecně platí, že je třeba porovnávat výsledky jednotlivých konkrétních zkoušek, protože přesnost výsledků bývá různá [K3].

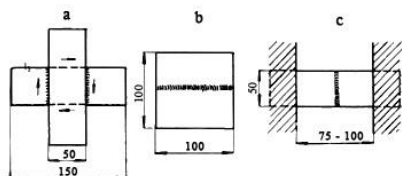
Pro praktické ověření náhylnosti na vznik trhlín existuje velké množství technologických zkoušek. Většina z nich byla vyvinuta pro posuzování citlivosti na praskavost ocelových materiálů, ale celou řadu těchto zkoušek (nebo jejich modifikací) lze použít i na Al a jeho slitiny.

Nejčastěji používané „zkoušky praskavosti“ při svařování aplikovatelné i na Al slitiny, popisuje podrobně např. Hrivňák v [41] nebo Novotný v [17]. Praskání Al slitin se obvykle spojuje s tzv. „křehkostí za horka“. Na její detekci, stejně jako na výběr vhodných PM a parametrů svařování, se

používají specifické technologické zkoušky [41], např. Fisco-test, zkouška na vzorku tvaru rybí kosti (tzv. Houldcroftova zkouška), návarová zkouška, Alcanova disková zkouška, křížová zkouška, T-zkouška, H-zkouška, Y-zkouška, zkouška koutovým svarem s mezerou a zkouška BWRA [51-53].

7.1 Typy zkoušek pro plechy malých tloušťek

Ověření praskavosti tenkých plechů (cca do 3 mm) je možno vykonat „jednoduchými“ zkouškami vyznačenými na obr. 21.



Obr. č. 16 – Zkoušky praskavosti tenkých plechů z Al slitin
A – křížová zkouška, B – zkouška navařováním, C – zkouška při tuhém upnutí [17]

Dále lze použít řadu zkoušek, které budou dále popsány:

Zkouška Lehigh

Zkouška je vhodná pro zjišťování náchylnosti na trhliny za tepla i za studena. Zkouška používá zkušební desku s vytvořenými zářezy stejné délky po obou stranách vzorku. Uprostřed vzorku je obrobena svarová plocha ve formě drážky a návar se provádí jedním průchodem svařovacího hořáku přes tuto drážku. Příčně vytvořené zářezy ve zkušební desce umožní vznik návaru s různými úrovněmi popraskání.

Zkouška kvantitativně porovnává stupeň citlivosti na vznik trhlín ve svaru během ochlazování. Úroveň zadržení trhliny je možno změnit změnou vzdálenosti zářezů. Zadržení je kvantifikované jako $2x$ (kde x je vzdálenost od středu svarové drážky k spodní části zářezů). Po navaření vzorků s různou délkou zářezů lze stanovit "pásmo necitlivosti" úrovně zadržení trhliny jako šířka, která je dostačující pro vznik praskání. Vyhodnocení obvykle probíhá na metalografických výbrusech příčných řezů návarem [18].

Houldcroftova zkouška

Zkouška na praskavost za tepla s proměnnou tuhostí vzorku podle obr. 17. Tvar zkušební vzorku byl odvozen ze zkoušky Lehigh a podle jeho tvaru se zkouška často označuje jako „Fishbone test“ (zkouška typu „rybí kost“). Hodí se pro zkoušení samotného ZM menších tloušťek (zejména pro tloušťky 2-3 mm) svařovaných metodou TIG nebo MIG. Na zkušebním tělese

se před svařováním zhotoví 6 až 9 zářezů kolmo k délce svaru. Směr svařování je vyznačen šipkou.

Obr. č. 17 – Tvar zkušební vzorku pro Houldcroftovu zkoušku

Při zkoušce se vytváří návarová housenka (na tenkém plechu s plným průvarem) - obvykle se používá metoda TIG.

Svařitelnost může být

posuzována jak pro ZM (bez použití PM u TIG svařování), nebo může být zkoumán vliv jednotlivých PM. Proto byl tento typ zkoušky také zvolen pro ověřovací experimenty v rámci výzkumných prací, zabývajících se svařitelností Al slitin, prováděných na ÚST [K16, K4].

Vzorek pro zkoušku dle Houldcrofta může mít mnoho modifikací. U této zkoušky je však podstatné, že se mění délka zářezů, které jsou pravidelně rozmístěny po celé délce vzorku. Zářezy se postupně zvětšují, čímž se zmenšuje tuhost vzorku a naopak se zvětšuje schopnost materiálu zastavit šířící se trhlinu, která byla vyvolána tepelným účinkem elektrického oblouku při provádění rovnoměrného jednovrstvého návaru.

Geometrické rozměry vzorku, vzdálenost mezi zářezy, stejně jako hloubka a především šířka zářezů jsou závislé na tloušťce zkušebního plechu a také na způsobu svařování (resp. navařování). Orientačně jsou uvedeny v tab. 6 rozměry doporučené prof. Hrivňákem, uvedené v [41].

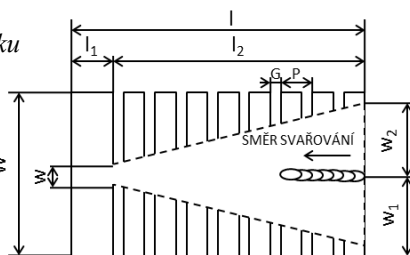
Tab. č. 6 – Geometrické rozměry Houldcroftovy zkoušky [41]

Metoda svařování	W	w1	w2	w	L	l1	l2	P	G	t
TIG	44,6	22,3	19	6,4	76	6	70	8,5	1	2
MIG	140	70	60	20	240	20	220	23	3	6

Pozn.: značení rozměrů vychází z obr. 17

Zkouška má rozličné modifikace (např. Matsuda a kol. [53]) a je citlivá na celkové provaření plechu – jakmile není celá tloušťka plechu provařena (zejména na začátku svařování), zk. vykazuje velký rozptyl a méně trhlin.

Vyhodnocení zkoušky spočívá ve stanovení *parametru praskavosti*, který označujeme v matematickém vztahu jako „A“. Zjišťujeme délku trhliny do místa, kde se její šíření zastaví (obr. 18). Tímto parametrem je vyjádřen

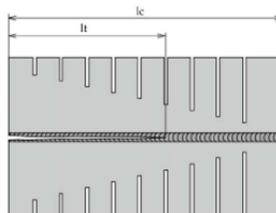


poměr délky vytvořené trhliny k celkové délce návaru. Délka trhliny se zjišťuje vizuální kontrolou, může však být doplněna kapilární zkouškou.

$$A = \frac{l_t}{l_c} \cdot 100 [\%] \quad (7.1)$$

A – parametr praskavosti, l_t – délka trhliny
 l_c – celková délka svaru

Obr. č. 18 - Vyhodnocení Houldcroftovy zkoušky [K13]



7.2 EN zkoušky praskavosti kovových materiálů

Pro trhliny za tepla, které se u Al a jeho slitin vyskytují častěji, byla vydána norma ČSN EN ISO 17 641 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušky praskavosti za horka pro svařované součásti – Metody obloukového svařování*. Tato norma je rozdělena na 3 části: 1. Část – Všeobecný popis, 2. Část – Zkoušky s vlastní tuhostí¹, 3. Část – Zkoušky s vynucenou tuhostí². Tyto normy popisují přípravu zkušebních vzorků, postup zkoušky a jejich vyhodnocení.

Uvedené normy jsou platné obecně pro všechny kovové materiály, ale většina zkoušek svařitelnosti je orientována především na ocelové materiály. Proto pro následující experimentální ověření svařitelnosti vybraných vytvrditelných slitin Al (pro malé tloušťky ZM) byly použity pouze vybrané zkoušky vhodné pro Al slitiny.

8. Experimentální ověření svařitelnosti vytvrditelných Al slitin

Pro ověření svařitelnosti ZM byla nejprve použita zkouška praskavosti svaru na T-spoji (podle doporučení ČSN EN ISO 17 641), provedená metodou MIG svařování [K4]. Zkouška je však vhodná především pro větší tloušťky materiálu. Po provedení této zkoušky lze konstatovat, že ani na jednom vzorku nebyly objeveny žádné trhliny, takže lze použít všechny zkoušené PM. Výsledky této normované zkoušky byly proto hodnoceny jako velmi mírné (všechny PM vyhověly) bez bližšího určení jejich vlivu na vznik trhlín za tepla, což se zdá jako nedostatečné pro účely posouzení svařitelnosti

¹ zkoušky, kde zatěžování vzorku je výsledkem zbytkového napětí v průběhu a po svařování součásti s vlastní tuhostí

² zkoušky, u nichž jsou napětí ve vzorku výsledkem zkušebního postupu a kde je vzorek zatěžován vnější silou

ZM a případné vhodnosti PM. Proto byla provedena další z možných zkoušek svařitelnosti – Houldcroftova zkouška a to oběma dostupnými metodami svařování – TIG a MIG, na vzorcích o tloušťce 3 mm.

8.1 Podmínky experimentů

Experimenty byly provedeny v mezifakultní Laboratoři výuky svařečských technologií na ČVUT v Praze [63, 64]. Pro experiment, vzhledem k dobré možnosti opakovatelnosti nastavení jednotlivých parametrů, bylo použito robotizované svařovací pracoviště, které je součástí laboratoře. Pro tuhé upnutí při výrobě vzorků byly zhotoveny speciální přípravky, které jsou ukázány na obr. 19.

Obr. č. 19 – Robotické pracoviště se svařovacími přípravky pro zkoušku podle Houldcrofta (vlevo) a pro zkoušku na T-spoji (vpravo)



Hlavní podmínkou pro nastavení svařovacích parametrů zkoušky bylo najít takové hodnoty (proud, napětí a rychlosti), aby byl zajištěn plný průvar v celé délce vzorku, proto bylo použito náběhových desek. Jako ochranný plyn byl použit Ar 4.6. Navařovalo se v poloze vodorovné shora PA (podle ČSN EN ISO 6947). Při optimalizaci zkušebních parametrů nešlo pouze o dosažení plného průvaru, ale zároveň bylo nutno volit dostatečně vysoké parametry, při kterých se začne šířit trhlina (ihned za hořákem). Pokud jsou tyto parametry příliš nízké, nedojde k průvaru a nevznikne ani trhlina. Naopak při příliš vysokých parametrech, může docházet k propadnutí svarové lázně a protavení vzorku (stejně trhlina může pak být po celé délce vzorku) [K7].

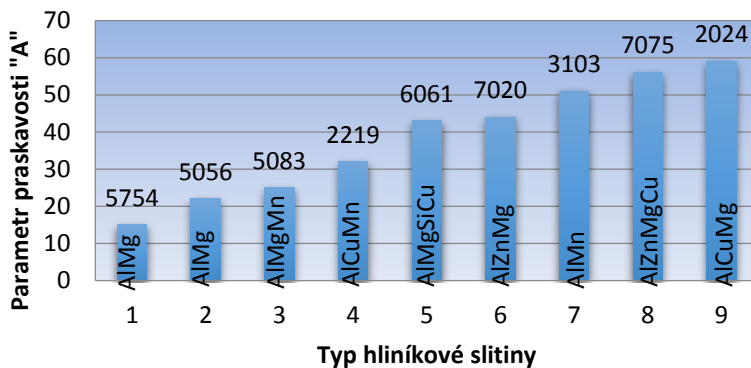
Vzhledem k použití robotizovaného pracoviště (TIG svařování bylo realizováno s použitím automatického podávání studeného PM) byly pro experimentální vzorky vytvořené metodou MIG i TIG svařování použité stejné PM ve formě drátů o průměrech 1,2 mm.

8.2. Výsledky Houldcroftovy zkoušky svařitelnosti

Na obr. 20 jsou ukázány výsledky Houldcroftovy zkoušky svařitelnosti prováděných na devíti Al slitinách, návary provedených metodou TIG. Tyto

výsledky jsou převzaty z výzkumu EAA (European Aluminium Association, tj. Evropská hliníková asociace) [49].

Je zde vidět, že z použitých slitin mají nejmenší citlivost na vznik trhlin slitiny typu Al-Mg (vzorky 1 až 3, tj. slitiny EN AW 5754, 5056 a 5083) – jsou tedy nejvhodnější pro účely svařování – parametr praskavosti má hodnotu do 25 %. Nicméně jedná se o nevytvrditelné Al slitiny.



Obr. č. 20 – Výsledky Houldcroftovy zkoušky pro různé Al slitiny [49]

V zobrazeném výčtu je uveden ještě jeden typ nevytvrditelné slitiny typu Al-Mn (vzorek 7, tj slitina EN AW 3103, A = 51 %), která se však pro svařování v podstatě nepoužívá.

Zajímavé je zmapovat situaci v oblasti svařitelnosti vytvrditelných Al slitin. Zde naopak největší citlivost na praskání vykazují slitiny s většími obsahy Cu a Zn (vzorky 6 a 8, tj. slitiny EN AW 7020 a 7075), kde střední obsah zmíněných prvků je 0,2 vs. 1,6 % Cu, resp. 4,5 vs. 5,5% Zn - parametr praskavosti se u těchto slitin pohybuje nad 35 %. Nicméně slitina EN AW 7075 (AlZn5,5Mg3Cu) má horší svařitelnost než slitina EN AW 7020 (AlZn4,5Mg1), která má nižší obsahy zmíněných prvků.

Sledované slitiny typu 6xxx a 7xxx vykazují všechny zhoršenou svařitelnost s parametrem praskavosti A nad 35 %, proto je vhodné snížit možnost vzniku trhlin za tepla, správným technologickým postupem svařování, příp. správnou volbou PM apod.

V rámci prováděných prací na ÚST byl tento výzkum doplněn o stejný typ zkoušky svařitelnosti na dalších vybraných vytvrditelných Al slitinách – viz kapitola č. 4. Pro vlastní svařování vzorků byly použity různé typy

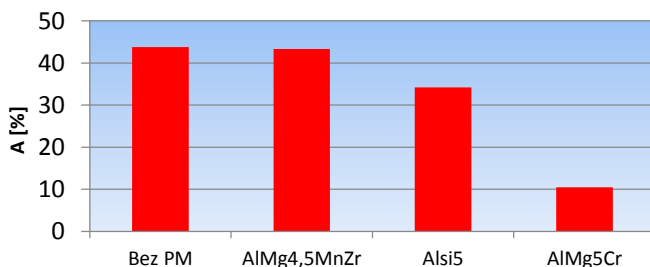
komerčně dostupných PM (AlSi5, AlMg5Cr, AlMg4,5MnZr – viz kapitola č. 5.2) [K9, K12, K16] a tudíž je možné posoudit i vliv PM na vznik trhlin za tepla, což rozšiřuje poznatky dosažených zmíněným výzkumem evropské hliníkové asociace, případně dalšími výzkumníky, např. Matsudou v [54, 55].

Pro vlastní provedení zkoušky bylo nejprve zvoleno robotické svařování metodou MIG, které však bylo náročné na správné nastavení parametrů zkoušky a nedávalo dostatečnou opakovatelnost výsledků. Proto pro relevantnost výsledků byla použita metoda robotického TIG svařování.

Jako svařovací zdroj pro TIG svařování bylo použito zařízení Migatronic PI 320 AC/DC s patentovaným systémem D.O.C.® pro efektivní odbourávání oxidické vrstvy na povrchu během svařování.

Slitiny typu 6xxx

Výsledky zkoušek svařitelnosti pro slitinu EN AW 6082 T6 [AlSi1MgMn] za použití různých PM (AlSi5; AlMg5Cr; AlMg4,5MnZr) byly vyhodnoceny: porovnáním délky vzniklých trhlin a výpočtem stanoven parametr praskavosti A. Na základě výsledků byl vytvořen graf na obr. 21 a vyhodnocena svařitelnost ZM a vliv PM.



*Obr. č. 21 –
Závislost
parametru
praskavosti
na použitém
typu
přídavného
materiálu
[K7]*

Délka trhlin byla měřena jak z lící strany svaru, tak i ze strany kořene. Délka trhliny byla z obou stran různá, pro vyhodnocení byla použita max. naměřená hodnota. Doplnující kapilární zkouška byla provedena metodou barevné indikace.

Uvedený ZM vykazuje sklon k trhlinám $A = 43,8$ % [K7]. Obecně se udává, že horní mez pro vyhovující posouzení zkoušky je hodnota parametru $A = 35$ % [58], tzn., že ZM vykazuje poměrně vysokou citlivost na praskání za tepla a je nutno tuto citlivost nějakým způsobem snížit.

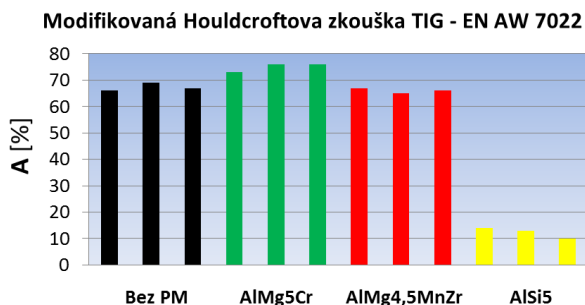
Nejjednodušší a nejpoužívanější způsob zlepšení tohoto stavu je použití PM s větším množstvím Mg a Si (min 5 %), čímž se citlivost na vznik trhlin může snížit (viz obr. 15). Následkem toho jsou tyto slitiny obvykle svařované za pomoci nevytvrditelných PM, s velkým obsahem zmíněných prvků.

Nejlepší výsledky při TIG svařování vykazuje jednoznačně použití PM AlMg5Cr (A = 10,5 %) a jako druhý nejlepší PM se jeví AlSi5 (A = 34,2 %), což je však již hodnota na hranici max. doporučeného parametru praskavosti. Použití PM AlMg4,5MnZr, nemá příliš pozitivní vliv na snížení citlivosti vzniku trhlin za tepla. Citlivost je v tomto případě srovnatelná s výsledky ZM (bez použití PM).

Uvedený experiment potvrdil, že správná volba PM může významným způsobem snížit náchylnost ke vzniku trhlin za tepla.

Slitiny typu 7xxx

Pro další experimenty byla vybrána a porovnána Al slitina EN AW 7022 T651 [AlZn5Mg3Cu], která je z hlediska svařitelnosti relativně málo prozkoumána. Zkoušeny byly opět stejné tři PM. PM typu AlMg4,5MnZr a AlMg5Cr jsou doporučovány praktiky, literaturou i normou ČSN EN 1011-4 pro dobré mechanické vlastnosti svarových spojů [55], PM AlSi5 byl zvolen pro svoji univerzálnost a obecně velmi časté použití pro svařování slitin Al.



Obr. č. 22 - Výsledky Houldcroftovy zkoušky metodou TIG pro slitinu EN AW 7022 [K13]

Samotná Al slitina EN AW 7022 T651 vykazuje značnou náchylnost ke vzniku trhlin, střední hodnota parametru praskavosti dosahuje A = 67 %. Použitím PM AlMg5Cr bylo dosaženo hodnoty 76 %, což je vyšší v porovnání se samotným ZM. PM AlMg4,5MnZr dává sklon ke vzniku trhlin prakticky totožný jako bez použití PM. Rozdílných výsledků bylo dosaženo s PM typu AlSi5, kdy bylo dosaženo středních hodnot parametru praskavosti A = 12 % [K9, K13]. Výsledné hodnoty experimentu pro jednotlivé přídavné materiály lze pozorovat na obr. 22. Z uvedených

výsledků se jeví jako optimální řešení použití PM typu AlSi5, kde návarový kov vykazuje zřejmě vyšší plasticitu a nevznikají křehké fáze doprovázející šíření trhlin. Pro ověření vzniklých fází a případné změny struktury byl použit chemický rozbor a rentgenová difrakce.

Výsledky experimentu dokazují problematicčnost svařitelnosti Al slitin skupiny Al-Zn-Mg-Cu. Při experimentu bylo zapotřebí vyvolat extrémní podmínky, kdy dojde ke vzniku trhliny, při běžném svařování však nemusí tyto podmínky nastat. Problematickým jevem při běžném svařování se stává zejména vznik kráterových trhlin. Tento problém lze řešit nastavením parametrů pro ukončení svařování (snížení hodnoty proudu, výdrž svařování na místě apod.) a použitím náběhových i výběhových desek.

Optickou mikroskopií byla kontrolována struktura na čele trhliny. Elektronovou mikroskopií byl sledován povrch trhlin a její příčný řez, EDS analýzou pak rozložení jednotlivých prvků. Skenovací elektronovou mikroskopií bylo zjištěno transkrystalické porušení, vyskytující se u trhlin za tepla, kde převažuje tvárné porušení. EDS analýzou bylo ověřeno rozložení prvků, zejména Mg, Zn a Cu. Analýza byla uskutečněna na zařízení TESCAN VEGA 3 LMU – EDS analyzátor na VŠCHT v Praze. Bylo možné předpokládat přítomnost fází Mg se Zn (Zn_2Mg), Mg s Cu (Cu_2Mg), popřípadě Cu se Zn (Cu_5Zn_8). Vzorky byly dále podrobeny rentgenové difrakci, pro bližší určení přítomnosti jednotlivých fází.

Největší rozdíly v chování vykazovaly vzorky s použitými PM AlMg5Cr a AlSi5. Difrakční analýza tedy měla napomoci k objasnění vlivu přidávaných materiálů na parametr praskavosti, jehož hodnoty byly získány zkouškami svařitelnosti. Byly hledány možné vyskytující se fáze v oblasti trhliny, z nichž každá fáze má své fyzikální vlastnosti. Metalografické vzorky byly zkoumány na difraktometru D8 Discover Brüker s CuK-alpha filtrem a detektorem 1 D LynexEye, na pracovišti FJFI ČVUT v Praze [56, 57].

Rentgenová difrakce všech vzorků ukázala zastoupení jednotlivých fází ve velmi malém obsahu. Kontrola intermetalických fází zjistila, u vzorku bez použití PM přítomnost kvazikrystalické fáze $MgAlZn$, tato fáze byla zjištěna i u vzorku s PM AlMg4,5MnZr. Přítomnost fáze je nejpravděpodobnější, ale pro Rietveldovu analýzu jsou dosud neznámé mřížkové parametry.

U vzorku s PM AlMg5Cr, analýzy nepotvrdily přítomnost fází Cu_2Mg , $AlCr_2$, ani rozptýlení volného zinku. Uvedené fáze mají shodný mřížkový parametr, a proto nelze určit, která z nich se v daném vzorku skutečně vyskytuje.

Nejvíce dominující fází u vzorku s AlSi5 je Mg_2Si , která vzniká díky použitému přídavnému materiálu AlSi5, jenž obsahuje 5 % křemíku. Velké

množství křemíku ve svarové lázni vytvoří podmínky vhodné ke vzniku eutektická fáze Mg_2Si . Její vznik je doprovázen snížením náchylnosti k tvorbě trhlin za horka [58, 59]. K podobným výsledkům dochází Tagiev a Vojtěch [59]. Mondolfo [61] poukazuje na přítomnost fáze Mg_2Si již při 0,15 % křemíku ve slitině, pravděpodobnost vzniku fáze $MgZnAl$ a rovnoměrného rozptýlení prvků manganu, chromu, zirkonia popřípadě titanu tak, jak bylo zjištěno zkouškami EDS a XRD ve zkoumaných vzorcích.

9. Závěr

V předloženém textu jsou popsány hlavní zásady a zejména rozdíly při zpracování Al a jeho slitin svařováním. Jsou zde zmíněny hlavní vlastnosti Al, z kterých tyto rozdíly plynou a popsány největší problémy, které při svařování Al slitin vznikají. Vše cíleno zejména na tvářené vytvrditelné slitiny, které jsou díky svým mechanickým vlastnostem ve strojírenství a stavebnictví nejpoužívanější.

Jedním z hlavních problémů při svařování Al a jeho slitin je možný výskyt trhlin ve svarových spojích, zejména tzv. trhlin za tepla. V textu jsou popsány jednotlivé typy trhlin a příčiny jejich vzniku. Zároveň jsou uvedeny i způsoby hodnocení, které vycházejí z technologických zk. svařitelnosti.

Zkoušky svařitelnosti Al slitin se nejčastěji zaměřují právě na zkoušky praskavosti a jsou považovány za kritérium pro hodnocení svařitelnosti Al slitin. Jsou zde prezentovány výsledky technologických zkoušek svařitelnosti podle Houldcrofta, které byly převzaty z odborné literatury. Tyto výsledky byly doplněny o výsledky vlastního výzkumu pro vybrané slitiny skupin 6xxx a 7xxx: EN AW 6082 T6 [AlMg1Si1Mn] a EN AW 7022 T651 [AlZn5Mg3Cu] metodou TIG, v kombinaci s PM: EN AW 5087 [AlMg4,5MnZr], EN AW 5356 [AlMg5Cr] a EN AW 4043 [AlSi5]. Byla sledována náchylnost ke vzniku trhlin pomocí parametru praskavosti [K3].

- a) Zkouška svařitelnosti při použití metody MIG nevedla k uspokojivým výsledkům. Metoda MIG nevykazuje vysokou citlivost zkoušky, proto pro doplnění předchozích výsledků a porovnání nových slitin bylo využito Houldcroftovy zk. pomocí TIG metody svařování [62, K17].
- b) Metoda TIG umožňuje zjistit náchylnost ke vzniku trhlin samotného ZM, bez použití PM. Pro EN AW 6082 T6 bylo dosaženo střední hodnoty parametru praskavosti $A = 43,8 \%$ (což se blíží hodnotě pro slitinu EN AW 6061, uváděné evropskou hliníkovou asociací). Pro slitinu EN AW 7022 T651 bylo dosaženo hodnoty $A = 67 \%$. Hraniční hodnota pro

materiál nemající sklon ke vzniku trhlin je maximálně 35 % – všechny slitiny tak lze hodnotit jako „obtížně svařitelné“, což také koresponduje s předpoklady [K2, K13].

- c) Dále byl zkoušen vliv různých typů přídavných materiálů na vznik trhlin za tepla, což je největším přínosem prováděných výzkumných prací:

EN AW 6082 T6 - dosažené výsledky zkoušek svařitelnosti v kombinaci s PM jsou následující: použitím přídavného materiálu AlMg5Cr A=10,5 %, AlSi A=34,2 %, AlMg4,5MnZr A= 42% [K2].

EN AW 7022 T651 – s použitím PM AlMg5Cr A=76 %, AlMg4,5MnZr A=66 %. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo s PM AlSi5, kdy střední parametr praskavosti dosáhl hodnoty A=12 % [K13].

Největšího rozptylu hodnot bylo dosaženo při svařování Al slitiny EN AW 7022 T651 s PM AlSi5 a AlMg5Cr. Uvedené kombinaci materiálů byla věnována zvláštní pozornost v podobě dalších analýz pomocí optické a elektronové mikroskopie, EDS a difrakční analýzy lomové plochy. Kontrola intermetalických fází zjistila, u vzorku bez použití PM, přítomnost kvazikrystalické fáze MgAlZn. Tato fáze má zásadní vliv na mechanické vlastnosti (pevnost v tahu, tvrdost, tažnost atd.), nesnižuje však náchylnost ke vzniku trhlin. U vzorků s použitým PM AlSi5 je vznik eutektické fáze Mg₂Si doprovázen snížením náchylnosti k tvorbě trhlin za tepla [K8].

Bylo tedy potvrzeno, že volba PM může velmi výrazně ovlivnit náchylnost Al slitin na tvorbu trhlin za tepla a je tedy nutné této problematice věnovat velkou pozornost. Nicméně z celkového pohledu hrají velkou roli i požadavky na mechanické vlastnosti svarového spoje, výskyt poretity, případně korozní odolnost nebo použitelnost pro následné povrchové úpravy. Tyto požadavky mohou být často v rozporu s optimální volbou PM podle náchylnosti na vznik trhlin [K16].

10. Použitá literatura

- [01] Davis, J. R.: *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International, 1993. 784 s. ISBN 0-87170-496-X
- [02] Michna, Š.; Lukáč, I.; Očenášek, V. a kolektiv: *Encyklopedie hliníku*, Prešov: Adin, 2005, 722 s. ISBN 80-89041-88-4.
- [03] Kolektiv autorů: *Příručka o hliníku*, SNTL, Praha, 1969
- [04] Chvojka, J.: *Neželezné kovy a jejich slitiny*, SNTL, Praha, 1971
- [05] Kaufman J.G.: *Properties of Aluminium Alloys : Tensile, Creep and Fatigue Data at High and Low Temperatures*, AA and ASM International
- [06] Kolář, V.: *Svařování hliníkových slitin*, Technik, 11, 2003
- [07] Beneš, L., Kysilka, O.: *Problematika vzniku a eliminace defektů při svařování slitin hliníku v konstrukci kolejových vozidel*, XXVII.DST – sborník přednášek, DT Pardubice, 2005
- [08] Kolařík, L.; Dunovský, J.; Válová, M. *Činnost skupiny svařování na Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní, ČVUT v Praze*. In: Sborník příspěvků - Technologické fórum 2010. Praha: ČVUT, 2010, ISBN 978-80-01-04586-2.
- [09] Middeldorf, K., Herold, H., Hofe, von D. : *Trends in joining – Value added by welding*, IIW International conference, Prague, 2005
- [10] Jeffus, L.: *Welding principles and applications*. 6th edition. místo neznámé : Delmar Cengage Learning, 2007. 960 s. ISBN 1418052752.
- [11] Howard B., Helzer C a S. *Modern Welding Technology*. 6th edition. U.S.A., Ohio : Published PRENTICE - HALL, 2004. ISBN 978-0131130296.
- [12] Kuncipál, J. a kolektiv. *Teorie svařování*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1986, 272 s.
- [13] Zmydlený, T., Mohyla, P.: *Technologické problémy při svařování hliníkových slitin*, XXVII.DST – sborník přednášek, DT Pardubice, 2005
- [14] Alusuisse Swchweizerische Aluminium AG : *Schutzgasschweissen TIG und MIG von Aluminium Werkstoffen*, Zurich, 1991
- [15] Mandal, N.R.: *Aluminum Welding*, ASM International, Ohio, 2002
- [16] Mathers, G.: *The Welding of Aluminium and its Alloys*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2002
- [17] Novotný, J.; Holásek, J.; Matejec, M.: *Zváranie a rezanie hliníka*. 2. vydanie, Bratislava: ALFA, 1975, 480 s.
- [18] Olson D.L. : *ASM Handbook, Volume 6, Welding, Brazing, and Soldering*, 2000
- [19] Kou, S. : *Welding Metallurgy*, Wiley Interscience, 2003
- [20] Országh, V. : *Zváranie neželezných kovov*, Weldtech, Bratislava, 1995
- [21] AWS, *Recommended practices for Spot Welding Aluminium and Aluminium Alloys*, Miami, 1953
- [22] Mishra , R.S., Mahoney, M.W. : *Friction Stir Welding and Processing*, ASM International, 2007
- [23] Ready, John,F.: *LIA Handbook of laser Materials Processing*, Laser Institut of America, Magnolia Publishing Inc., 2000
- [24] Országh, P., Országh, V.: *Zváranie MIG/MAG oceli a neželezných kovov*, Polygrafia SAV, Bratislava, 2000
- [25] Weman, K.; Linden, G.: *MIG Welding Guide*, Woodhead Publishing Ltd , Cambridge, UK, 2006
- [26] Kolář, V. : *Svařování hliníkových slitin metodou MIG*, DSSM, č.4, 1999, str. 30
- [27] Kolář, V.: Pulzní svařování Al a jeho slitin, Interní materiály – Siemens KV s.r.o.

- [28] Pantůček, M.: *Wolframové elektrody Migatronic*, Svět svaru, 2006, č. 2, s. 8, ISSN 1214-4983
- [29] Országh, P., Országh, V.: *Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov*, Polygrafia SAV, Bratislava, 1998
- [30] Kolář, V.: *Svařování hliníkových slitin metodou TIG – použití stejnosměrného i střídavého proudu*, DSSM, č. 6, 2001, str.24
- [31] Minnick, William H. *Gas Tungsten Arc Welding Handbook*. Tinley Park : Goodheart-Willcox Publisher, 2006. ISBN 9781590705810.
- [32] Zmydlený, T: *Ochranné atmosféry pro svařování hliníku ?*, Svět svaru 1, Ostrava, 2007
- [33] Roubíček, M.: *Ochranné atmosféry pro svařování ušlechtilých konstrukčních materiálů*, Technika a trh 5, 2005
- [34] Haas, B., Kopriva, J. : *Svařování hliníku a jeho slitin pod ochranným plynem*, Welding '96 Mezinárodní svářečský kongres, Česká svářečská společnost, Brno, 1996
- [35] Janata, M.: *Technické plyny a způsoby jejich dodávek*, Seminář pro pracovníky ve svařování. DOM-ZO 13, Praha, 2005
- [36] Rohan, P. a kolektiv: Argon, Česká asociace technických plynů, Praha, 2011,
- [37] Schlögl, M. a kolektiv: Helium, Česká asociace technických plynů, Praha, 2010
- [38] Kopriva, J. *Plyny pro svařování: Linde Gas*. Praha, 2011. Podklady pro kurz IWE/IWT. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [39] Kaufman J.G. : *Properties of Aluminium Alloys : Tensile, Creep and Fatigue Data at High and Low Temperatures*, AA and ASM International
- [40] Totten, G., MacKenzie, S.: *Handbook of aluminum physical metallurgy and processes*. 1. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2003, xi, 1296 s. ISBN 08-247-0494-0.
- [41] Hrivňák, I.: *Zváranie a zvariteľnosť materiálův*. Bratislava : STU, 2009. 486 s. ISBN 97-88022731-67- 6.
- [42] Yu, J., Li, X.: *Modelling of the precipitated phases and properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys*. Journal of phase equilibria and diffusion, č. 32, 4/2011, ASM International, DOI: 10.1007/s11669-011-9911-0
- [43] Esab: *Přídavné svařovací materiály OK Autrod 4043* [online]. 2009 [cit. 2013-07-05]. Dostupné z: <http://products.esab.com/Templates/T041.asp?id=131552>
- [44] Prudký, J., Dubenský, R., Dunovský, J. a kol.: *Teorie a metodika svařování*, Praha: ČVUT, 1981, 143 s.
- [45] Zmydlený, T.: *Trhliny při svařování hliníkových slitin řady 6000 a 7000*, SDSM 3/2004, Praha, 2004, 31-33
- [46] Faltus, F. *Příručka svařování I, II, III*. Vydání první. Praha: SNTL, 1955.
- [47] Steenbergen, E.J. – Thornton, H.R.: *A Quantitative Determination of the Conditions for Hot Cracking During Welding for Aluminium Alloys*, Welding Journal, 2/ 1970
- [48] Geoffroy, N., Vittecoq, E., Birr, A., de Mestral, F., Martin, J.-M.: *Fatigue behaviour of an arc welded Al-Si-Mg Alloy*, Scripta Materialia 57, 2007, 349–352
- [49] Krüger, U. *Talal Lecture 4202: Weldability*. European Aluminium Association, 1994 [Online] [Citace: 19. 6. 2011.] Dostupné z WWW: <http://www.scribd.com/doc/21294420/TALAT-Lecture-4202-Weldability>
- [50] Matsuda, F. et al. *Assessment of Solidification Cracking Test for Aluminium Alloys*. Doc. IIW-IX-964-76
- [51] Torre, D. van der. *Comparison of Cracking Tests Used for Aluminium Alloys*. Doc. IIW-IX-859-73

- [52] Marya, S.K.; Kim, J.I. *Theoretical Simulation of Heat Cycles in Aluminium Based Alloys*. Doc. IIW-IX-1372-85
- [53] Matsuda, F. et al., Assessment of solidification cracking test for aluminium alloy welds, 1982, *Transactions of JWRI*, 11, č. 1, s. 67-77.
- [54] Matsuda, F. et al. The VDR Cracking test, *Trans. of JWRI*, 8, 1979
- [55] Matsuda, F. – Nakata, K. – Harada, S.: Moving Characteristics of Weld Edges during Solidification in Relation to Solidification Cracking in GTA Weld of Aluminium Alloy Thin Sheet. JWRI, Welding research Institute of Osaka University, Japan, 1980
- [56] Podrez-Radziszewska, M. *Weldability problems of the technical AW 7020 alloy*. Manufacturing technology XI, 11/2011, 2011, ISSN 1213-2489. Dostupné z: http://journal.strojirenskatechnologie.cz/templates/obalky_casopis/XI_2011.
- [57] Vratislav, S., Ganev, N., Pala, Z.: *Difrakční metody – okno do světa material*, [online] citovano [20.1.2014] Dostupné z: <http://jaderka.fffi.cvut.cz/clanek/799-difrak%C4%8Dn%C3%AD-metody-%E2%80%93-okno-do-materi%C3%A1lu>
- [58] Karlík, M.: *Úvod do transmisní elektronové mikroskopie*, Praha: ČVUT, FJFI, 2011, 322s., ISBN 978-80-01-047293
- [59] Vojtěch, D., Tagiev, E.: *Možnost zlepšení slévarenských vlastností vysoce pevných slitin AlZnMgCu*. Metal 2003, Ostrava: TANGER, spol.s r.o, 2003, p. 1504-1510. ISBN 978-80-87294-29-1
- [60] International Institut of Welding: *The Physiscs of Welding*, Pergamon Press, Oxford, England 1984, 297s. ISBN: 0-08-030554-7
- [61] Mondolfo, L. F.: *Aluminum alloys: Structure and Properties*, London: Butterworth, 1976, ISBN 0-40870680-5
- [62] Kovanda, K., Doležal, J.: *Modification of the Houldcroft test for TIG welding of Al alloys*, Technological Forum 2013. Praha: ČVUT FS, Ústav strojírenské technologie, 2013, s. 160-155. ISBN 978-80-87583-06-7.
- [63] Kovanda, K. *Treshciny obrzazuyushciesya pri svarke vysokoprochnych aluminievych splavov Al-Zn-Mg-Cu*. STČ 2013, ČVUT v Praze, Praha, s. 5, ISBN 978-80-01-05232-7.
- [64] Kolařík, L. *Laboratoř výuky svářečských technologií na ČVUT v Praze. In: Svařování, dělení, spojování materiálů*. 2009, roč. X, č. 1, s. 22-23. ISSN 1212-4044.

11. Publikované výsledky autora

- [K1] Bělský, P., Kolařík, L., Válová: Innovative welding technologies for joining Al alloy 6082-T6, *Letecký magazín* 6, 2008
- [K2] Kolařík, L., Kovanda, K., Vondrouš, P., Dunovský, J.: *Houldcroft weldability test of aluminium alloy EN AW 6082 T6*, *Scientia Agriculturae Bohemica* [online]. 2012, vol. 43, no. 1, p. 14-21.
- [K3] Kolařík, L., Vondrouš, P., Kovanda, K., Válová, M., Dunovský, J.: Weldability test of precipitation hardenable aluminium alloy EN AW 6082 T6. *Modern Machinery (MM) Science Journal*. 2011, s. 242-247. DOI: ISSN 1803-1269.
- [K4] Kolařík, L., Kovanda, K., Válová, M., Vondrouš, P., Dunovský, J.: *Hot Cracking T-joint Weldability Test of Precipitation Hardenable Al Alloys*, *Annals of DAAAM* for 2011 and Proceedings. Vienna: DAAAM International, 2011, p. 633-644. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-901509-83-4.

- [K5] Kolařík, L.; Dunovský, J.; Válová, M.; Růžička, D. *Mechanical Properties of Weld Joints of Al Alloy EN AW 6005 after TIG Welding*. In: ERIN 2008. Bratislava: Slovak University of Technology, 2008, p. II-17. ISBN 978-80-227-2849-2.
- [K6] Kolařík, L.; Dunovský, J.; Válová, M.; Filipec, R. *Mechanical properties of weld joints of Al alloy EN AW 6082 after MIG welding*. In: MITECH 08 Proceedings international scientific conference \Material science and Manufacturing
- [K7] Kolařík, L.; Kovanda, K.; Válová, M.; Dunovský, J. *Robotické svařování vytvrditelných hliníkových slitin pomocí metody GTAW*. In: *Zváranie- Svařování*. 2010, roč. 59, č. 11-12, s. 256-263. ISSN 0044-5525.
- [K8] Kovanda, K., Kolařík, L., Válová, M., Koprřiva, J.: *Vliv ochranných plynů při GMAW svařování hliníkové slitiny EN AW 7022*, Strojírenská technologie. 2011, roč. XVI, č. 4, s. 25-32. ISSN 1211-4162.
- [K9] Kolařík, L., Kovanda, K., Válová, M., Dunovský, J.: *Posouzení vlivu přídavného materiálu na pórovitost svarových spojů při MIG svařování vytvrditelných hliníkových slitin typu AlMgSi*, Strojírenská technologie. 2011, roč. XVI, č. 1, s. 54-60. ISSN 1211-4162.
- [K10] Kolařík, L.; Kovanda, K. *Svařitelnost hliníkových slitin - I*. In: *MM Průmyslové spektrum*. 2011, roč. 2011, č. 4, s.18-19. ISSN 1212-2572.
- [K11] Kolařík, L. *Svařování hliníkových slitin*. In: *Technický týdeník*. 2010, roč. 2010, č. 13/2010, s. 36. ISSN 0040-1064.
- [K12] Kolařík, L., Dunovský, J., Válová, M., Berka, J., Kovanda, K.: *Vliv přídavného materiálu při MIG svařování vytvrditelných hliníkových slitin, XXIX*. DST 2009. Praha: ČSVTS, 2009, s. 183-190. ISBN 978-80-02-02138-4.
- [K13] Kovanda, K., Kolařík, L., Zubal, V., Beneš, L.: *Svařitelnost hliníkových slitin typu Al-Zn-Mg*, Technická konference 2013, Hrotovice: TESYDO, s.r.o., 2013, s. 151-157. ISBN 978-80-87102-08-4.
- [K14] Janovec, J.; Kolařík, L.; Válová, M.; Filipec, R.; Dunovský, J. *Změna struktury svarových spojů slitin hliníku typu EN AW 6082 po několikanásobném tepelném ovlivnění svařovacím cyklem*. In: *Přínos metalografie pro řešení výrobních problémů*. Praha: ČVUT v Praze - FS, 2008, s. 250-256. ISBN 978-80-01-04039-3.
- [K15] Kolařík, L., Kolaříková, M., Kovanda, K., Vondrouš, P.: *Svařování hliníku v ochranných atmosférách*, MM Průmyslové Spektrum, 2013, roč. 2013, č. 4, s.13-15 ISSN 1212-2572.
- [K16] Kolařík, L., Kovanda, K., Válová, M., Dunovský, J.: *Vliv přídavného materiálu na svařitelnost vytvrditelné hliníkové slitiny EN AW 6082 T6*, Technologické Fórum 2011. Praha: ČVUT FS, ÚST, 2011, s. 117-125. ISBN 978-80-01-04853-5.
- [K17] Kovanda, K., Kolařík, L.: *Vliv speciálních funkcí moderních svařovacích zdrojů na čistící účinek elektrického oblouku*, Sborník příspěvků konference Technologické fórum 2010. Praha: ČVUT FS, ÚST 2010. ISBN 978-80-01-04586-2.
- A další ...

Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

Narozen 6.4. 1978, ženatý, 2 děti

Kontakt: telefon: 224352619, mobil: 607778504,

e-mail: ladislav.kolarik@fs.cvut.cz



Dosažené vzdělání:

2012 – titul Ph.D. – Fakulta strojní, ČVUT v Praze, 2002 – titul strojní Ing. – FS, ČVUT v Praze, 1996 – Střední průmyslová škola strojnická Nové Město nad Metují, Od 2006 – odborná kvalifikace „Mezinárodní svařečský inženýr“ IWE, Od 2004 – Certifikát VT2, PT2, MT2 dle ČSN EN 473 (EN ISO 9712) MS

Zaměstnání:

2002 až dosud: Asistent resp. odborný asistent na ČVUT v Praze, FS, Ústav strojírenské technologie - zaměřeni na „svařování“ (od roku 2009 – vedoucí sk. svařování, od roku 2014 až dosud: Vedoucí Ústavu strojírenské technologie); 2014 až dosud: Manager CTN (centra technické normalizace) na ÚST; 2013 až dosud: Zástupce vedoucího zkušební organizace č. 12 – Československý Lloyd s.r.o.; 2008 – 2015: Vedoucí svařečské školy ČVUT v Praze, FS, Ú12133 (č. 102/13), 2003 až dosud: Externí spolupráce s VŠUP, 2005: Externí spolupráce s AV ČR – Ústav radiotechniky a elektroniky, Od 2013 - Odborný externí expert pro oblast svařování – Český institut pro akreditaci, o.p.s. (od roku 2015 jako „odborný posuzovatel“).

Odborné zaměření:

Konvenční a speciální metody svařování, Svařitelnost materiálů, Nedestruktivní a destruktivní kontrola svarových spojů, Řízení jakosti ve svařování, Numerické simulace svarových spojů a tepelného zpracování.

Pedagogická praxe:

Výuka v předmětech (Bc) Základy technologie I, Technologie I, Technologie svařování, Svařování, pájení a lepení, Projekt odlitku, výkovku, výlisku a svařence, Materiály a technologie II – Průmyslový design (Ing.) Teorie a metodika svařování, Teorie spojování a dělení materiálů, Speciální metody svařování, Automatizace výrobních procesů, Přípravky a nástroje, Projektování výroby polotovarů, Pájení a lepení, Svařované konstrukce, (Ph.D.) Svařitelnost materiálů a metalurgie svařování, Automatizace procesu svařování, Teorie svařování, Speciální metody svařování. Lektor odborných kurzů pro vyšší svařečský personál. Vedoucí 20 obhájených bakalářských a 27 diplomových prací a školitel specialista 2 obhájených doktorských prací.

Publikační a vědecká činnost:

Autor či spoluautor více než 120 odborných prací (stav k listopadu 2015) prezentovaných na tuzemských či mezinárodních konferencích nebo v odborném tisku (z toho 1 kapitola v samostatné monografii, 2 články v časopisech s impakt faktorem + další 2 přijaty k publikování, 15 článků v mezinárodních recenzovaných časopisech). 17 citací v citačních databázích (Scopus, WoS) bez autocitací, h-index: 3.

Vedl nebo se podílel na řešení více než 15 investičních, inovačních i VaV projektů z dotačních prostředků GAČR, TAČR, MŠMT (FRVŠ, centralizované projekty, IP, SGS) apod.