

Dokument: SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0039-00

# **Svejsning af aluminium**

## **Opsummerende rapport**

SASAK  
Projekt 3 - Svejsning

Steen Ussing

FORCE Instituttet, maj 2001

## Introduktion

Denne rapport opsummerer en række af de erfaringer, som er gjort i projekt SASAK i forbindelse med svejsning. Det er naturligvis ikke muligt at komme ud i alle ”krogene” – hér må der henvises til de rapporter, som er skrevet i delprojektet ”Svejsning” i SASAK, samt til den kommende håndbog.

Den mest anvendte proces til svejsning af aluminium er givetvis MIG, efterfulgt af TIG. I projektet er der gjort en række erkendelser i forbindelse med disse to processer, men der har i øvrigt langt hen ad vejen været tale om øget forståelse og videnopsamling, hvad angår MIG og TIG. For tandem-MIG, som stadig er en relativt ny proces, er anvendelsesområdet og potentialet dog udvidet noget.

De største landvindinger er i øvrigt sket inden for de mindre traditionelle processer, så som plasmavejsning og lasersvejsning, henholdsvis Nd-YAG og CO<sub>2</sub> –lasere. Inden for lasersvejsning har ikke mindst Nd-YAG laseren et potentiale. Forsøg med kombinationen af lasersvejsning og MIG-svejsning har også vist et klart potentiale.

Denne rapport lægger en forholdsmeæssig stor fokus på områder, hvor SASAK har været med til at flytte grænser. De mere ”alment kendte”, generelle aspekter er kun delvist behandlet hér, og er ellers behandlet i enkeltrapperter (så som SASAK-RAP-SV-MIG-0007-01 ”MIG-svejsning af aluminium – afsluttende rapport”, m.fl.) – og de vil indgå i håndbogen.

# INDHOLD

<b>1. VALG AF SVEJSEPROCES</b> .....	<b>4</b>
1.1 OVERSIGT OVER FORDELE OG ULEMPER VED ALTERNATIVE SVEJSEPROCESSER TIL ALUMINIUM.....	4
1.1.1.....	4
1.1.2.....	4
<b>2. VALG AF TILSATSMATERIALE</b> .....	<b>6</b>
2.1 TILSATSMATERIALER I RELATION TIL PROCESSER .....	6
2.1.1 <i>Massiv tråd</i> .....	6
2.1.2 <i>Beklædte elektroder</i> .....	6
2.1.3 <i>Pulverfyldt rørtråd</i> .....	6
2.2 TRÅDDIAMETER.....	7
2.3 ERFARING MED FORSKELLIGE TRÅDDIAMETRE HOS MÆRSK CONTAINER INDUSTRI.....	7
2.4 VALG AF TILSATSMATERIALE LEGERING .....	9
2.5 LEGERINGSELEMENTER OG LEGERINGSTYPER.....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
2.6 STYRKE.....	12
2.7 MODNINGSHÆRDBART SVEJSEGODS.....	13
2.8 TRÅDLEGERINGENS INDFLYDELSE PÅ SVEJSEDATA .....	14
2.9 ERFARINGER HOS MCI MED ALSi5 KONTRA ALMg5 .....	16
2.9.1 <i>AlMg5 hos MCI</i> .....	16
2.9.2 <i>AlSi5 hos MCI</i> .....	16
2.9.3 <i>Konklusion:</i> .....	16
2.10 ALUMINIUMSTRÅDENES OVERFLADE - SHAVING.....	17
<b>3. TANDEM-MIG SVEJSNING</b> .....	<b>18</b>
3.1 TANDEM -MIG SVEJSNING I STØRRE GODSTYKKELSER.....	18
3.2 SIKKERHED FOR EFFEKTIVT SØMTVÆRSNIT VED VARIERENDE SPALTE.....	19
3.3 TANDEMSVEJSNING I MINDRE GODSTYKKELSER.....	21
3.4 EKSEMPEL PÅ ANVENDELSE AF TANDEMSVEJSNING I SMÅ GODSTYKKELSER.....	21
3.5 FREMTIDSUDSIGTER FOR TANDEM -MIG.....	22
<b>4. PLASMASVEJSNING</b> .....	<b>22</b>
4.1 GENNEMFØRTE FORSØG OG INDVUNDNE ERFARINGER MED PLASMASVEJSNING .....	23
4.2 PLASMASVEJSNING AF T-FLOORS HOS MCI?.....	26
4.3 BETRAGTNINGER VEDRØRENDE SVEJSEFIKSTUR .....	27
<b>5. LASERSVEJSNING</b> .....	<b>28</b>
5.1 KONKLUSIONER FRA FORSØG MED CO <sub>2</sub> -LASER .....	28
5.2 SVEJSEFORSØG MED Nd-YAG LASER .....	28

# 1. VALG AF SVEJSEPROCES

## 1.1 Oversigt over fordele og ulemper ved alternative svejseprocesser til aluminium

Proces	Fordele	Ulemper
<b>TIG</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Billigt udstyr</b></li> <li>▪ <b>Billige reservedelspriser</b></li> <li>▪ Meget fleksibel proces, især <b>velegnet til manuel svejsning</b></li> <li>▪ Mange er uddannede indenfor TIG svejsning</li> <li>▪ Mange uddannelsessteder</li> <li>▪ God svejsekvalitet kan udføres</li> <li>▪ Ufølsom over for varierende tolerancer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Dårlig produktivitet</b></li> <li>▪ <b>Typisk mindre velegnet til automatsvejsning</b> på grund af mere usikker tænding end f.eks. plasma, relativt stor følsomhed overfor elektrodeafstand til emnet og slid på wolframelektrode.</li> <li>▪ Store deformationer</li> <li>▪ Forstyrrelser fra højfrekvens</li> </ul>
<b>Plasma</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Høj svejsehastighed</b></li> <li>▪ <b>Velegnet til automat- og robotsvejsning</b></li> <li>▪ <b>Lille forbrug af tilsatsmaterialer</b></li> <li>▪ God svejsekvalitet</li> <li>▪ Visuelt flot, jævn forside og rodside</li> <li>▪ Velegnet til stumpsømme, herunder samlinger af plader</li> <li>▪ Velegnet til svejsning af roterende emner, herunder rør og beholdere</li> <li>▪ Velegnet til udvendige hjørnesømme</li> <li>▪ Små deformationer af emner</li> <li>▪ Driftsikker pga. pilot- og plasmalysbue</li> <li>▪ Få forstyrrelser fra højfrekvens</li> <li>▪ Få gener ved dårlig trådkvalitet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Som hovedregel uegnet til manuel svejsning</b></li> <li>▪ <b>Dyrere udstyr end for TIG-svejsning</b></li> <li>▪ <b>Dyre reservedele til brændere</b></li> <li>▪ Relativt snævre tolerancer for svejsefuger</li> <li>▪ Kræver uddannelse af svejseoperatør</li> <li>▪ p.t. ingen "standard"-uddannelser</li> <li>▪ Begrænset know-how hos leverandører</li> <li>▪ Stor brænder kan være et adkomstmæssigt problem</li> <li>▪ Ikke velegnet til håndsvejsning</li> <li>▪ Start/stop problematik v. keyhole svejsning (slope-up og slope-down af strøm og gasser)</li> <li>▪ Ikke mange referencer</li> </ul>

Proces	Fordele	Ulemper
<b>MIG</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Stor produktivitet</b></li> <li>▪ <b>Mulighed for høj svejsehastighed</b></li> <li>▪ <b>Velegnet til automat- og robotsvejsning</b></li> <li>▪ <b>Velegnet til manuel svejsning</b></li> <li>▪ <b>Billige reservedele</b></li> <li>▪ Velegnet til svejsning af kantsømme</li> <li>▪ Velegnet til meget store godstykkelser</li> <li>▪ Mange uddannelsessteder</li> <li>▪ Tåler store spaltevariationer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Stort forbrug af tilsatsmateriale</b></li> <li>▪ Generelt dårlig svejsekvalitet (porer, start-stop)</li> <li>▪ Risiko for mange produktionsstop pga. dårlig trådtransport</li> <li>▪ Meget følsom over for dårlig tråd kvalitet</li> <li>▪ Generelt dårlig finish i forhold til TIG og plasma</li> <li>▪ Ofte meget avancerede strømkilder</li> <li>▪ Store deformationer</li> </ul>
<b>Friction Stir</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Intet forbrug af tilsatsmateriale</b></li> <li>▪ God svejsekvalitet (ingen porer og revner)</li> <li>▪ Plan rodside "usynlig" efter maling</li> <li>▪ Efterhånden god produktivitet</li> <li>▪ Ingen deformationer</li> <li>▪ Lille varmepåvirkning</li> <li>▪ Gode mekaniske egenskaber</li> <li>▪ Arbejdsmiljø: Ingen svejserøg, UV-lys eller ozon</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Temmelig kostbart produktionsudstyr</b></li> <li>▪ <b>Licensafgifter</b></li> <li>▪ Fortrinsvis begrænset til stumpsømme i plader og profiler</li> <li>▪ Start/stop problematik</li> </ul>
<b>Laser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Høje svejsehastigheder</b></li> <li>▪ Meget små svejsedeformationer</li> <li>▪ Meget smal varmepåvirket zone</li> <li>▪ Automatiseret proces</li> <li>▪ Meget lille tilsatsmaterialeforbrug</li> <li>▪ "Ren" proces, ingen svejserøg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Kostbart udstyr</b></li> <li>▪ Snævre spaltetolerancer</li> <li>▪ Ofte poreproblemer (især Mg-holdige legeringer)</li> <li>▪ Sømoverflader kan udvise et "ru", lidt ujævnt udseende</li> </ul>

## 2. VALG AF TILSATSMATERIALE

### 2.1 Tilsatsmaterialer i relation til processer

#### 2.1.1 Massiv tråd

Ved svejsning af aluminium anvendes næsten udelukkende tilsatsmaterialer i massiv trådform. Disse indgår i de absolut mest anvendte processer, TIG og MIG. Dette står i nogen kontrast til, hvad mange vil være vant til ved svejsning af stål, hvor brugeren står over for valget mellem en bredere række processer og tilsatsmateriale typer.

Massiv tråd på spoler anvendes både til MIG-svejsning og som tilsatsmateriale ved automatiseret TIG-svejsning, plasmavejsning og lasersvejsning.

Til Manuel TIG-svejsning anvendes massiv tråd i stænger, normalt i længder på 900-1000 mm.

I de følgende afsnit vil især forskellige aspekter i forbindelse med massive tråde blive yderligere belyst.

#### 2.1.2 Beklædte elektroder

Den første og mest basale proces, vordende svejsere lærer at kende i forbindelse med svejsning af stål, er lysbuesvejsning med beklædte elektroder. Et meget naturligt og ofte stillet spørgsmål er, hvorvidt der findes beklædte elektroder til aluminium. Der *findes* elektroder med en særlig flusbeklædning, men:

Beklædte elektroder til aluminium må betegnes som en absolut nødløsning, og kan ikke anbefales til almindelige konstruktionsopgaver. Dette skyldes primært, at det er vanskeligt at opnå en tilfredsstillende geometrisk svejse kvalitet.

De beklædte elektroder kan til gengæld have deres (begrænsede) berettigelse i forbindelse med mere eller mindre midlertidige reparationsopgaver, når man er langt fra et værksted – typisk på fiskefartøjer i rum sø.

I rapporten SASAK-RAP-SV-FI-0036 ”Tilsatsmaterialer til svejsning af aluminium” beskrives erfaringerne fra orienterende forsøg med svejsning med beklædte elektroder.

#### 2.1.3 Pulverfyldt rørtråd

Set i lyset af pulverfyldte rørtrådes store fordele og succes ved svejsning af stålkonstruktioner kan det være nærliggende at stille det spørgsmål, som jævnlige høres: Findes der ikke rørtråde til aluminium?”

Svaret kan gøres kort: Pulverfyldte rørtråde findes *ikke* til aluminium.

Der er flere forklaringer på dette. Rørtråde er kendetegnet ved en ydre metalkappe omkring en pulverkerne, som består af lysbuestabiliserende stoffer, slaggedannere og/eller metalpulver (samme materiale som tråden eller legeringselementer). Allerede hér, ved rørtrådenes

udformning og fremstilling, står man overfor to afgørende problemer, som gør rørtråde til aluminium urealistisk med dagens teknologier:

- Den meget tynde kappe ville være meget vanskelig at fremstille, og tråden vanskelig at trække, uden at den går i stykker.
- Skulle det lykkes at fremstille en aluminium rørtråd, ville man herefter stå overfor alvorlige trådfremføringsproblemer på grund af den relativt bløde kappe.

## 2.2 Tråddiameter

Tråde på spoler findes typisk i diametre fra 0,8 til 2,4 mm.

Der findes producenter, som tilbyder at levere dimensioner ned til  $\varnothing 0,6$  mm, men generelt må man være opmærksom på, at trådfremføringen meget nemt kan være et problem i de mindre dimensioner (under  $\varnothing 1,2$  mm). For de blødere tråde såsom AlSi5 kan selv  $\varnothing 1,2$  mm være problematisk, og stille store krav til trådfremføringsudstyr, slangepakker, pistoler og kontaktdyser (se i øvrigt rapport SASAK-RAP-SV-MIG-0028 ”Trådtransporten ved MIG-svejsning af aluminium”).

I den øvre ende findes tråde på op til  $\varnothing 4$  mm, som anvendes til MIG-svejsning med mekaniseret fremføring i store godstykkelser. Svejsepistolen fastgøres til en pulversvejsetraktor, og der anvendes store pulversvejsestrømkilder til at levere den nødvendige svejsestrøm på over 1000 ampere. Dette har man blandt andet gjort i England i nogle år, og på et finsk skibsværft anvendes metoden til sammenføjning af 40 mm aluminiumplader (Y-fuge, svagt lodret-stigende).

De dominerende dimensioner til MIG-svejsning er dog 1,2 og 1,6 mm, som dækker opgaver og godstykkelser, der oftest arbejdes med i aluminium.

## 2.3 Erfaring med forskellige tråddiametre hos Mærsk Container Industri

På MCI har man gennem forsøg i produktionen evalueret de mulige fordele ved at gå op i tråddiameter til  $\varnothing 1,6$  mm i stedet for den normalt anvendte diameter på  $\varnothing 1,2$  mm.

$\varnothing 1,2$  mm tråden svejstes med en svejsehastighed (brænder fremføringshastighed) på 2,4 meter/minut og der svejdes 2 sømme af gangen og med 1 tråd pr. søm.

Sømmen er en ren overlap søm i 11 meters længde hvor begge emner er ekstruderede profiler med en godstykkelse ved svejsømmen på 2 mm. Sømmen er ikke hæftet løbende men holdes på plads af konstruktionen som sådan med hæftninger i enderne og på midten. De 2 x 5,5 meter er således udelukkende holdt sammen via konstruktionen.



*Overlapsøm - Tag*

Idéen var, at det ved at skifte fra en 1,2 mm tråd (der svejstes rimeligt varmt) til en 1,6 mm tråd burde være muligt at svejse lidt koldere ved samme svejsehastighed. Ligeledes ville trådmotorerne kunne forventes at køre langsommere og slidet på dyserne ville dermed blive mindre

En anden mulighed kunne være at svejse med en hurtigere svejsehastighed ved samme heatinput og slid på dyser mv.

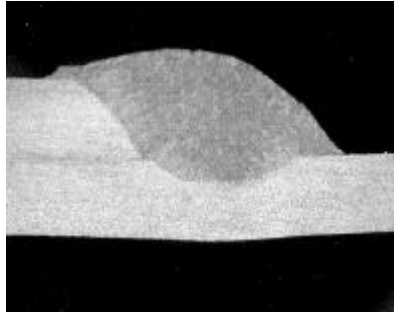
	<i>Trådvalg</i>	<i>Driftart</i>	<i>Energi</i>		<i>Lysbuelængde</i>		<i>Svejsehastighed</i>	
			<i>Øst</i>	<i>Vest</i>	<i>Øst</i>	<i>Vest</i>	<i>[mm/sek]</i>	<i>[mm/min]</i>
	<i>[PLC]</i>	<i>[PLC]</i>						
<b>TAG</b>	1,2 AlMg5	Puls	73,0	72,0	26,5	26,5	40	2.400
	1,6 AlMg5	Puls	60,0	60,0	37,0	40,0	45	2.700
<b>BUND</b>	1,2 AlMg5	Puls	87,0	87,0	35,0	35,0	34	2.040
	1,6 AlMg5	Puls	65,0	65,0	44 - 46	44 - 46	25	1.500

#### *Svejsedata Bokssvejs 1*

Det ses at der ved svejsning med 1,2 mm tråd i taget anvendes ca. 73 % af den maksimale energi og 87 % i bunden. Det er ganske store tal og det bevirker at der ikke er så meget reserve at give af. Trådmotorerne kører hurtigt og dyser slides hurtigere. Ideen med at skifte til 1,6 mm tråd var at man kunne komme længere ned i energi og dermed ikke belaste trådmotorerne og dyser så meget eller alternativt at svejse hurtigere ved samme energiindstilling og dermed koldere pga den større tråddiameter.

Som tallene i tabellen angiver gik man ganske rigtigt ned i energi. Ved tagsvejsningen var det muligt at holde svejsehastigheden, hvor det ved kantsømmen - pga fugens specifikke udseende - var nødvendigt at svejse langsommere, men så med bedre opfyldning til følge.

Herunder ses slib af tagsvejsningen og det ses at svejsningen ligger fint og har godt fat i begge plader.



*Slib af tagsvejsning svejst med 1,6 mm AlMg5*

Det kan konkluderes at skiftet fra  $\varnothing 1,2$  mm til  $\varnothing 1,6$  mm på den valgte produktionslinie hos MCI var en succes, da energiniveauet blev lavere og da svejsehastigheden samtidig kunne øges fra 2,4 til 2,7 m/min. Der blev svejst test emner og disse blev testet ved Force Institutet med et tilfredsstillende resultat. Brudene ved trækprøverne lå i HAZ. Umiddelbart kan det virke voldsomt at anvende en 1,6 mm tråd til svejsning af 2 mm plader i overlap, men det har som sagt vist sig, at det kan lade sig gøre.

Rapport SASAK-RAP-SV-MCI-0030 uddyber erfaringerne med forskellige tråddiametre hos Mærsk Container Industri.

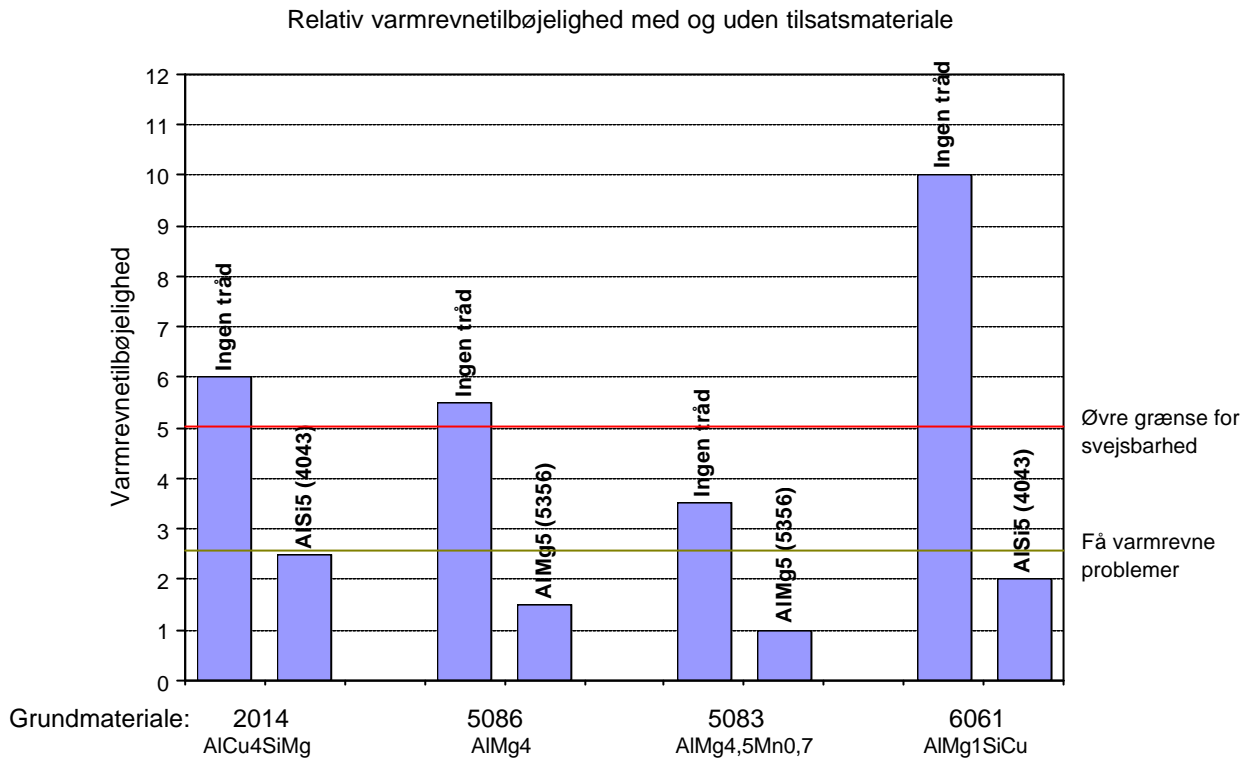
## **2.4 Valg af tilsatsmateriale legering**

Valg af tilsatsmaterialer til aluminium vil være dikteret af forskellige krav til slutproduktet samt muligheden for at det lykkes at gennemføre svejsningen med godt resultat. Følgende kriterier og krav kan opstilles:

- Styrke
- Duktilitet
- Korrosionsbestandighed
- Egnethed til driftstemperaturer over  $65^{\circ}\text{C}$  (dvs. max. 3% Mg)
- Tendens til varmvæner under svejsning
- Farveoverensstemmelse efter anodisering

Sommetider vil det være nødvendigt at anvende et tilsatsmateriale alene for at undgå varmvæner.

Nedenstående figur viser den relative varmvænetilbøjelighed ved svejsning af forskellige legeringer henholdsvis med og uden tilsatsmateriale. 6000-legeringer (AlMgSi) vil have en udpræget tendens til at varmvæne, hvis man forsøger at svejse dem uden tilsatstråd (f.eks. TIG eller plasmavejsning af stumpsømme uden skærping). Som så ofte inden for svejsning er forholdene dog ikke helt sort/hvide. Størkningsforhold og indspændingsforhold spiller også vigtige roller, og i SASAK er der produceret adskillige meter plasmavejste stumpsømme uden tilsatstråd i blandt andet legering 6061 uden en eneste varmvæne.



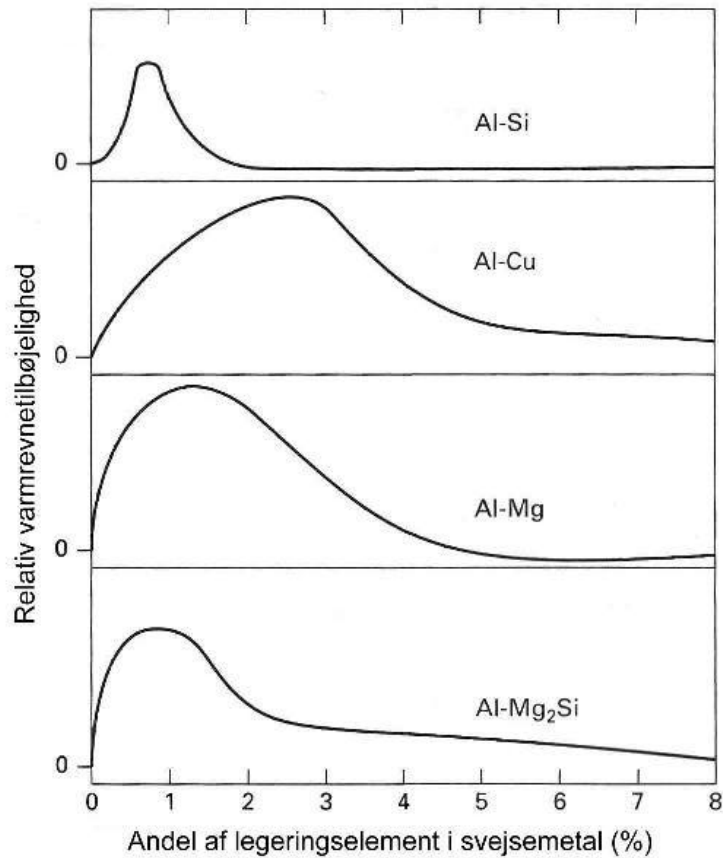
*Relativ varmvnetilbøjelighed ved svejsning af forskellige legeringer med og uden tilsatsmateriale. [2]*

Valg af rette tilsatsmateriale kan godt synes temmeligt indviklet ud fra de ovennævnte kriterier. I praksis behøver livet ikke altid være så kompliceret – en lang række opgaver kan endda klares med enten AlMg5- eller AlSi5-tilsatsmaterialer.

**Bilag A** viser et skema, som er sammenstykket i forbindelse med SASAK. For hver kombination af tilsatsmaterialer gives et all-round "førstevalg". I tilfælde af særlige krav og kriterier, som overskygger alle andre, gives alternativer med bedre egenskaber på enkelte punkter. Normalt vil det betyde, at der gives køb på andre områder. De fleste leverandører af tilsatsmaterialer vil have tilsvarende skemaer, dog normalt noget mere enkle og specifikt orienteret mod leverandørens egne produktbetegnelser og handelsnavne.

## 2.5 Revnetilbøjelighed – legeringselementernes betydning

Ved valg af tilsatsmateriale er varmvnetilbøjeligheden en væsentlig faktor. Nedenstående kurver viser sammenhængen mellem svejsemetallets sammensætning og dets revnetilbøjelighed.



*Relativ varmvnetilbøjelighed som funktion af indholdet af forskellige legeringselementer i svejsemetallet.*

Nedenstående diagram viser varmvnetilbøjeligheden afhængigt af variende indhold af magnesium og silicium. Som det fremgår, ville et tilsatsmateriale af en sammensætning, som svarer til de modningshærdbare 6000-legeringer være særdeles følsomt overfor varmvner. I diagrammet er der indtegnet et eksempel på, hvorledes det kan anvendes til bedømmelse af risikoen for varmvner ved svejsning af 6061, en typisk ekstruderbar legering. Grundmaterialet 6061 ligger i sig selv inden for et område med stor risiko for varmvner, hvis det bliver svejst autogent, dvs. uden tilsatstråd af anden legering. Ved anvendelse af et AlSi5 tilsatsmateriale og en lav opblanding vil risikoen for varmvner minimeres (punktet D).

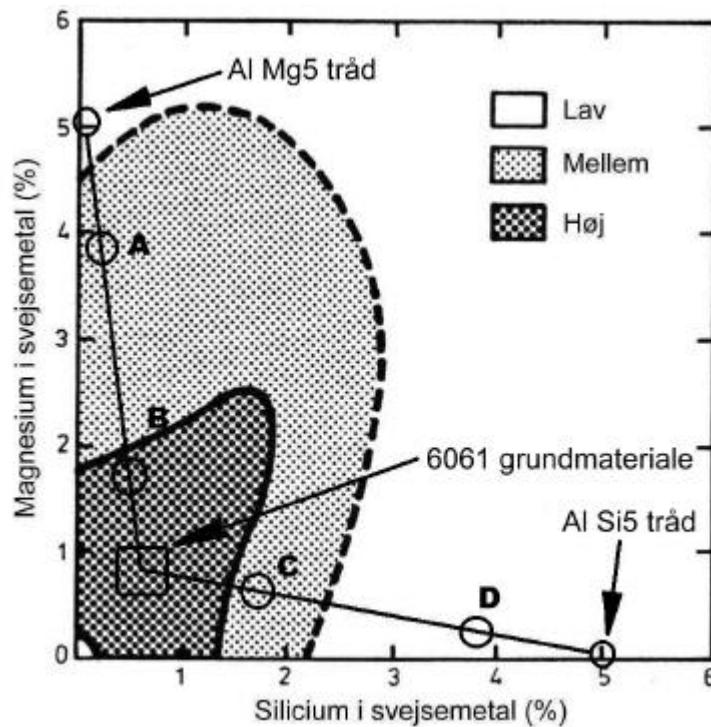


Diagram for bedømmelse af varmvæne-risiko ved svejsning af 6061 med henholdsvis AlMg5 og AlSi5 tråde, med to forskellige opblandingsgrader.

- A) Svejst med AlMg5-tråd, med ca. 25% opblanding af grundmaterialet (kunne være MIG-svejsning)
- B) Svejst med AlMg5, med ca. 75% opblanding af grundmaterialet (kunne være TIG eller plasma med lidt trådtilførsel)
- C) AlSi5 tråd, ca. 75% opblanding (f.eks. TIG eller plasma)
- D) AlSi5 tråd, ca. 25% opblanding (kunne være MIG)

## 2.6 Styrke

I nedenstående tabel gives en oversigt over typiske værdier for den statiske styrke ved henholdsvis træk og forskydningspåvirkning. Værdierne gælder for svejsemetallet alene, uden efterfølgende varmebehandling. De kan give et indtryk af indbyrdes forhold, men der er vel at mærke ikke tale om minimumværdier, så de kan derfor ikke bruges til dimensionering.

Tilsatsmateriale legering		Forskydningsstyrke	Typisk trækstyrke
AWS / Int.Reg.	ISO	MPa	MPa
1100	Al 99.0Cu	52	93
2319	*)	110	258
4043	Al Si5	79	200
5183	Al Mg4,5Mn0,7	128	283
5356	Al Mg5	117	262
5554	Al Mg3Mn	117	230
5556	**)	138	290
5654	***)	83	221

\*) ca. 5,2Cu 0,3Mn 0,15Ti 0,01Va 0,12Zr – til svejsning af 2000-serien, særligt 2219

\*\*) ca. 0,7Mn 5,1Mg 0,12Cr 0,012Ti – udviklet til høj styrke ved kantsømme

\*\*) ca. 3,5Mg 0,25Cr 0,010Ti – til særlige, korrosive forhold

*Typiske styrkeværdier under henholdsvis forskydning og træk, rent svejsemetal, uden efterfølgende varmebehandling. Legering 2319 kan få en vis styrkeforøgelse ved varmmodning, de resterende legeringer er ikke-modningshærdbare.*

## 2.7 Modningshærdbart svejsegods

Som beskrevet tidligere findes der ikke tilsatsmaterialer med samme kemiske sammensætning som de modningshærdbare AlMgSi-legeringer (6000-legeringer), på grund af tendensen til varmrevner. De almindeligt anvendte tilsatsmaterialer er derfor ikke-modningshærdbare, legeret med enten silicium eller magnesium og/eller mangan.

Ved svejsning af 6000-legeringer med en relativt stor opblanding af grundmaterialet kan man opnå en vis styrkeøgning ved en efterfølgende varmmodning, jævnfør nedenstående eksempel, som er baseret på TIG-svejste stumpsømme.

Grundmateriale	Grundmaterialets Mekaniske egenskaber			Svejsesøm før varmebehandling			Svejsesøm efter opløsningsglødning og modning		
	Rm N/mm <sup>2</sup>	R <sub>0,2</sub> N/mm <sup>2</sup>	Forl. %	Rm N/mm <sup>2</sup>	R <sub>0,2</sub> N/mm <sup>2</sup>	Forl. %	Rm N/mm <sup>2</sup>	R <sub>0,2</sub> N/mm <sup>2</sup>	Forl. %
2014-T6	480	410	13	235	195	4	345	-	2
6061-T4	240	145	22	185	125	8	240 *)	-	8 *)
6061-T6	310	275	12	185	125	8	305	275	5
6063-T4	170	150	22	140	70	12	205	-	13

*Typiske mekaniske egenskaber for TIG-svejste stumpsømme før og efter varmebehandling, ved svejsning med AlSi5 tilsatstråd (4043).*

*\*) Kun varmmodnet.*

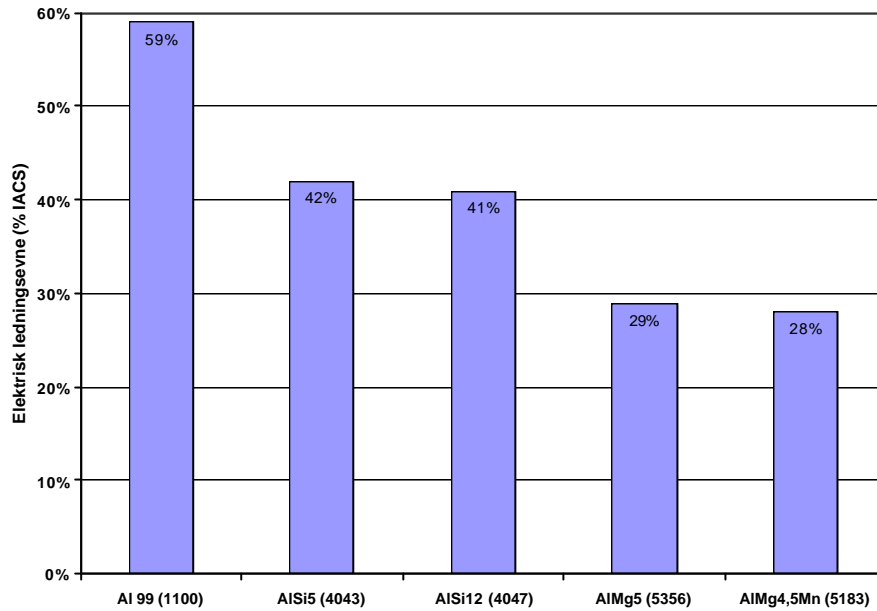
Der findes dog også enkelte tilsatsmaterialelegeringer, som er **modningshærdbare** i sig selv. Disse vil ikke blive behandlet yderligere hér, der henvises til rapport SASAK-RAP-SV-0036 "Tilsatsmaterialer til svejsning i aluminium".

## 2.8 Trådlegeringens indflydelse på svejsedata

Der er mærkbare forskelle i de forskellige aluminiumlegeringers fysiske karakteristikker. I forbindelse med tilsatsmaterialer til MIG-svejsning (og såmænd også de beklædte elektroder) er den elektriske ledningsevne den parameter, som har den største effekt på svejseparametrene. Den elektriske ledningsevne for legeringerne 5356 (AlMg5) og 5183 er kun den halve af legering 1100 (Al 99,0Cu) og 30% lavere end for 4043 (AlSi5), se nedenstående søjlediagram.

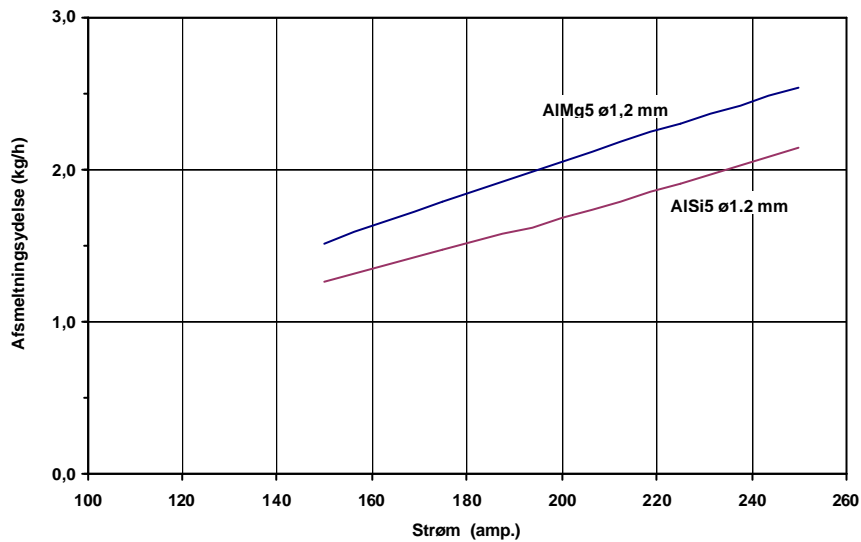
Forskellen i den ohmske opvarmning i den fri trådende udmønter sig i en forskel i afsmeltningssydelse og dermed trådshastighed. Nedenstående søjlediagram illustrerer forskellen mellem to af de almindeligst anvendte tilsatsmaterialer, AlSi5 og AlMg5.

**Elektrisk ledningsevne for almindeligt anvendte tilsatsmaterialer**  
(udtrykt i relation til ren kobber)



*Elektrisk ledningsevne for almindeligt anvendte tilsatsmaterialer, udtrykt i %IACS (International Annealed Copper Standard, som er 100% for udglødet, ren kobber ved 20°C)*

**Afsmeltningssydelse - MIG-svejsning med AlMg- og AlSi- tråde**



*Afsmeltningssydelse ved MIG-svejsning med hhv. AlMg5 og AlSi5 tråde. For samme strøm og spænding giver AlSi5 tråden en ca. 17% lavere trådshastighed, med tilsvarende lavere afsmeltningssydelse.*

## 2.9 Erfaringer hos MCI med AlSi5 kontra AlMg5

### 2.9.1 AlMg5 hos MCI

AlMg5 er som nævnt den standardtråd der anvendes på MCI og er blevet anvendt gennem flere år. Vi har valgt at anvende den samme tråd på alle stationer, da det giver et bedre overblik for de folk der arbejder med svejsning, og da det gør indstilling af svejsedata på svejsemaskiner på de forskellige stationer meget enkel. Et andet, ikke uvæsentligt argument, er at prisen kan holdes nede på et acceptabelt niveau, når der købes større mængder af den samme type svejsetråd. Tråden kan svejdes tilfredsstillende, og er robust over for svejsestilling, materialetykkelse, alder mv.

Svejsetråden anvendes således aktuelt på de 3 stationer der er beskrevet ovenfor. De maksimale svejsehastigheder vi har oplevet med AlMg5 tråden i de tyndere AlMg3 materialer på 1 – 5 mm godstykke. Smeltebadet flyder forholdsvis tykt og er let at styre.

### 2.9.2 AlSi5 hos MCI

MCI har opbygget erfaring med AlSi5 tråden fra gentagne svejseforsøg ved Force og på aluminien. Generelt kan siges at tråden er blød og kræver meget opmærksomhed fra operatøren, både ved håndsvejsning og automat / robotsvejsning. Tråden har tildens til at stoppe og krølle ved trådfremføringshjulene. Det giver mange stop og dermed tabt produktionstid.

Der er endvidere udført svejseforsøg på aluminien i samarbejde med Force Institutet. Ideen var at svejse varmere og dermed hurtigere, at undgå sodsværtning og sprøjt under svejsning.

Efter at have indkørt AlSi5 tråden lå hastighederne på ca. 3,0 m/min ved svejsning med to tråde og på ca. 2,5 m/min ved svejsning med en tråd.

Det kan på baggrund af den udførte indkøring på MCI konkluderes at AlSi5 tråden er blødere, svejser varmere, hvorfor svejsehastigheden skal sættes op for at smeltebadet ikke brænder igennem pladerne. Når hastigheden sættes op bliver svejsningen smallere og usikkerheden dermed større. Derfor skal man udvælge sig en station / svejsning hvor svejseømmen ligger godt spændt sammen og hvor fremføringsenhederne er særdeles præcise. Hvis fremføringsenhederne ikke er præcise vil de fejl der unægtelig opstår blive større / længere end ved lavere hastighed. Reparationsgraden bliver dermed også større.

### 2.9.3 Konklusion:

- AlMg 5 svejsetråd svejdes mere stabilt, og det er forholdsvis nemt at styre smeltebadet. Den maksimale observerede svejsehastighed er ca. 2,5 meter / minut, ved anvendelse af ren argon som beskyttelsesgas.
- AlSi 5 svejsetråd svejdes meget flydende og varmt og der kan være problemer med et for varmt smeltebad. Den maksimale observerede svejsehastighed er ca. 3,0 meter / minut, ved anvendelse af ren argon som beskyttelsesgas.
- 100 % Argon kan anvendes til alle svejsehastigheder. Der er ikke registreret nogle problemer med gasdækning mv. som følge af øget svejsehastighed.

- Forudsætningen for at kunne svejse med en stor fremføringshastighed ved anvendelse af dobbeltråd er en nøjagtig fugetildannelse, god varmeafledning evt. med vandkølet underlagsskinne / backing, og en stabil fremføring.
- Foreløbige resultater tyder på at det er muligt at sammensvejse AlMg 3, 45 mm Ifuge med dobbeltråds svejsning med en svejsehastighed på ca. 3,5 meter / minut.

Der kan læses mere om erfaringerne hos MCI i rapporten SASAK-RAP-SV-MCI-012 "MIG-svejsning med enkeltråds- og dobbeltrådsteknik. Erfaringer hos MCI".

## 2.10 Aluminiumstrådenes overflade - shaving

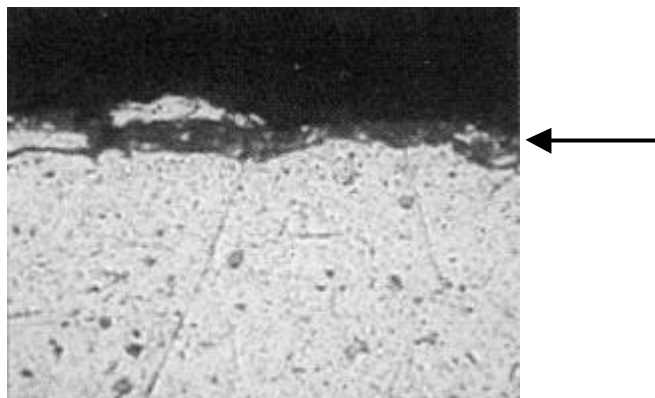
Ved trækningen af aluminiumtråde bliver overfladen beskadiget, og smøremidler fra trækkeprocessen vil infiltrere overfladen. Begge dele går ud over lysbuestabiliteten ved MIG-svejsning, og endnu værre: Kulbrinterne fra smøringen og hydrerede overfladeoxider (AlOH) er potentielle kilder til (mange og store) porer i svejsemetallet.

Ved "shaving"-processen skræbes det yderste lag af mekanisk, som det sidste trin i fabrikationen. Alle aluminiumtilsatsmaterialer er shavede.

I praksis viser det sig, at en et enkelt shaving-trin ikke altid er nok. Enkeltshavede tråde kan stadig give en noget forhøjet tendens til porer, og vil også have en tendens til at svejse mindre stabilt. Derfor tilbyder de fleste fabrikanter dobbeltshavede tråde.

Der findes også tredobbelt shavede tråde, men det kan synes usikkert, hvor meget der egentlig vindes ved den tredje og sidste shaving.

Det er konklusionen i SASAK, at man bør **anvende dobbelt-shavede tråde** af hensyn til processtabilitet og især sikkerhed mod porer.



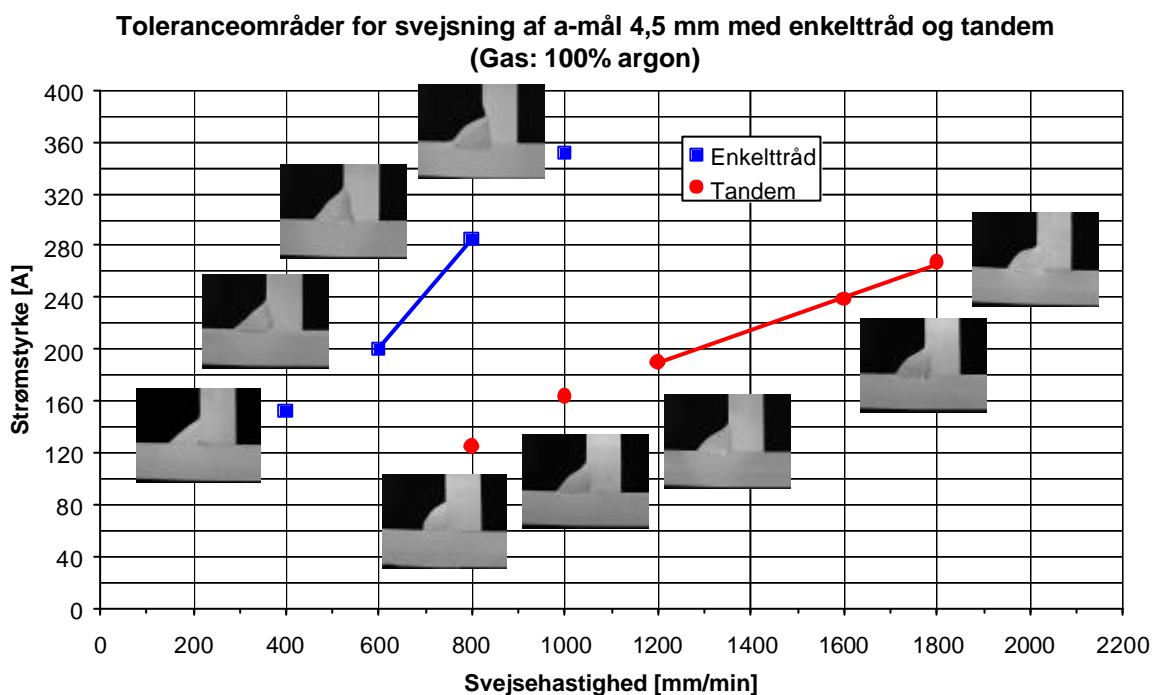
*Mikrofoto af snit ned gennem overfladen på en tråd før shaving (Alcotec)  
Pilen angiver hydrerede overfladeoxider, som i mangel af en shavingproces ville anledning til porer.*

Rapport SASAK-RAP-SV-0036 "Tilsatsmaterialer til svejsning af aluminium" uddyber aspekterne omkring tilsatsmaterialer.

### 3. TANDEM-MIG SVEJSNING

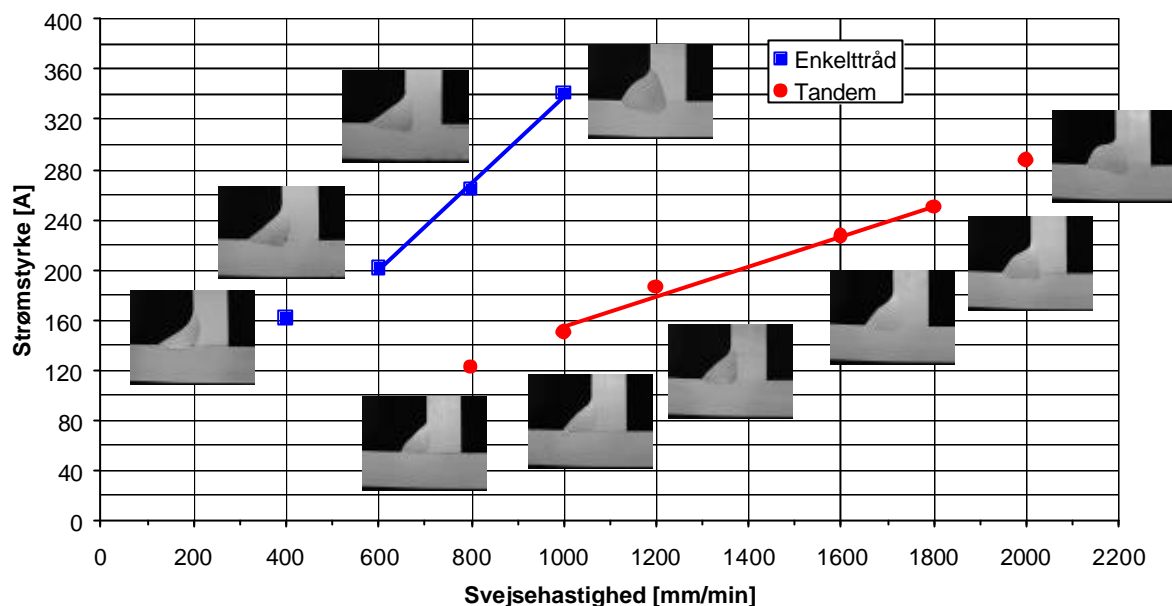
Tandem-MIG har et stort potentiale i forbindelse med mekaniseret svejsning i aluminium. Det blev konstateret, at svejsehastigheden med tandem-MIG typisk kunne forøges med en faktor 2 til 3.

#### 3.1 Tandem-MIG svejsning i større godstykkelser



*Tolerancer for svejsehastighed og strømstyrke ved svejsning med 100% argon med dels traditionel enkeltråds MIG- og dels tandemsvejsning. Der er svejst stående kantsømme med et reelt a-mål på ca. 4,5 mm på 8 mm T-profiler.*

### Tolerancer ved kantsømsvejsning (a-mål 4,5) med enkeltråd og tandem (Gas: 30% argon + 70% helium)



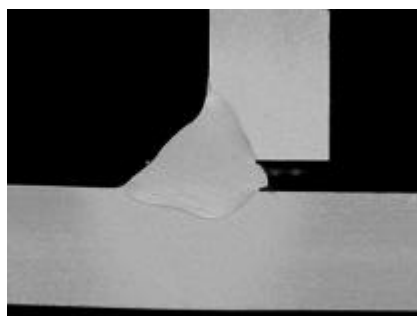
*Tolerancer for svejsehastighed og strømstyrke ved svejsning med 30% argon + 70% helium med dels traditionel enkeltråds MIG- og dels tandemsvejsning. Der er svejst stående kantsømme med et reelt a-mål på ca. 4,5 mm på 8 mm T-profiler.*

### 3.2 Sikkerhed for effektivt sømtværsnit ved varierende spalte.

Med tandemteknikken kunne der svejdes i fugespalter op til ca. 2,0 – 2,5 mm med opnåelse af konstant effektivt a-mål og uden sidekærv.

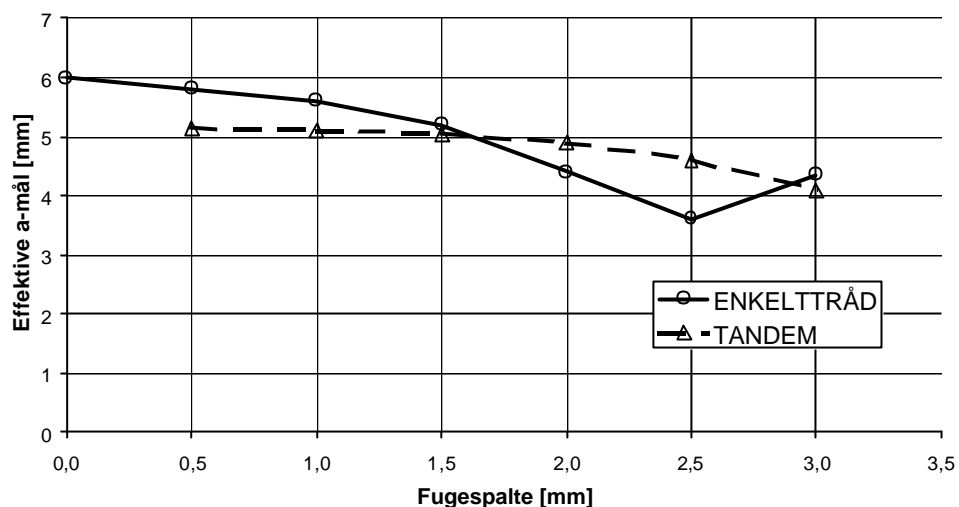
Med almindelig enkeltråd svejsning kunne der kun svejdes i fugespalter op til ca. 1,0 – 1,5 mm med opnåelse af konstant effektivt a-mål og uden sidekærv.

Med tandemteknikken var der således de største muligheder for at opnå et konstant effektivt a-mål ved kantsømsvejsning med varierende fugespalte i forhold til ved almindelig enkeltråd svejsning.



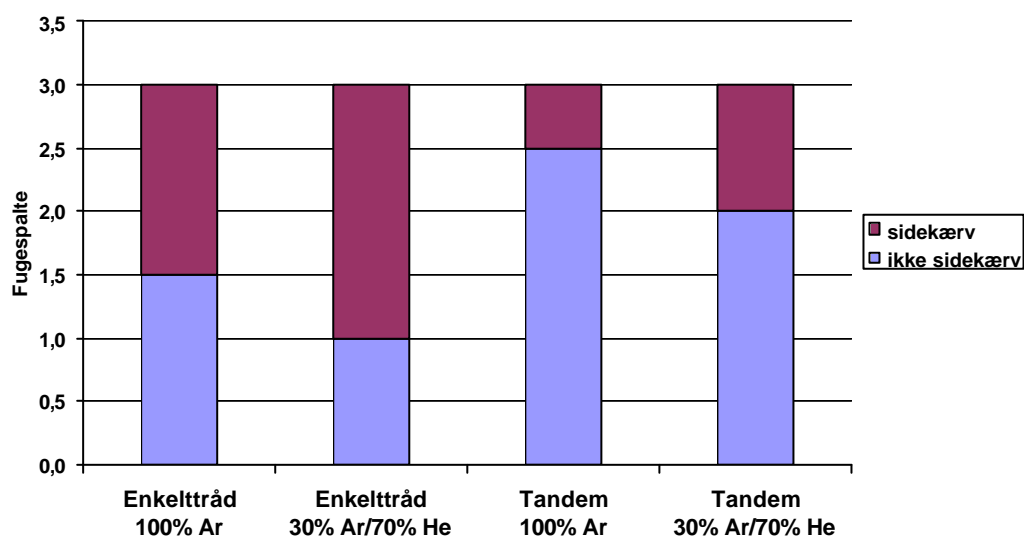
*Eksempel på svejsning af 8 mm plade med tandem-MIG, spalte 2,5 mm*

### Effektive a-mål



Effektive a-mål ved dels enkeltråds og dels tandem MIG-svejsning. (Hver kurve er et gennemsnit af svejsninger med hhv. ren argon og Ar/70 Ar/He – tendenserne var de samme for de to gasser).

### Tendens til sidekærv

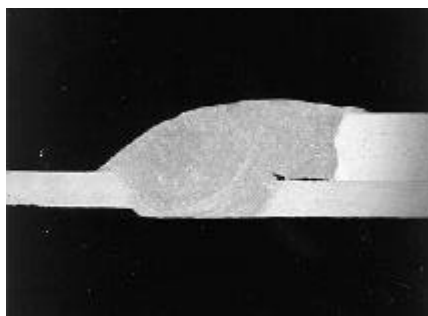


Sidekærv afhængig af fugespalte

De to, ovennævnte forhold - **sikkerhed for tilstrækkeligt sømtværsnit** og **sikkerhed mod sidekærv** - er ikke mindst interessant i forbindelse med **mekaniseret og robotiseret svejsning**, hvor man det er en stor fordel at kunne **fastlåse et sæt svejseparametre**, som kan anvendes uanset spaltevariationer inden for bestemte grænser.

### 3.3 Tandemsvejsning i mindre godstykkelser

Ved tandemsvejsning i tyndere aluminium kan der under gunstige forhold opnås forholdsvis høje svejsehastigheder på op til 2-3 m/min – se nedenstående makrofoto.



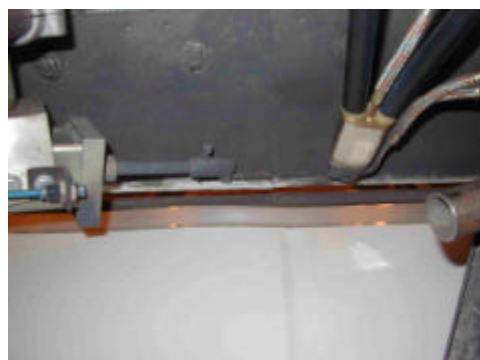
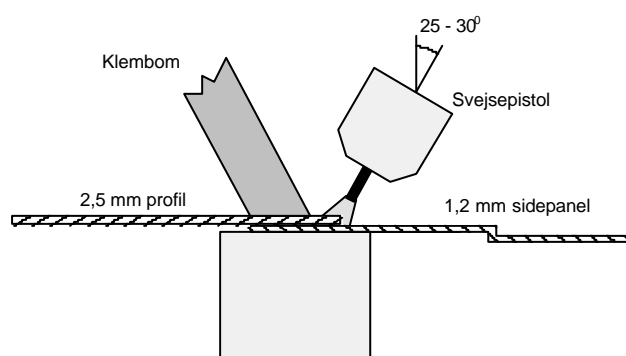
*Tandemsvejsning af 1,2 mm til 0,8 mm tynd aluminiumsplade med ca. 2,5 mm/min*

De vigtigste forudsætninger for at kunne svejse med så høje fremføringshastigheder ved anvendelse af tandemteknikken er en nøjagtig fugetildannelse, god varmeafledning evt. med vandkølet underlagsskinne/-backing og en stabil fremføring. Generelt gælder det, at jo mere processen optimeres i form af højere svejsehastighed, jo større krav stilles der til opstillingen og udstyret.

Gennem svejseforsøg i SASAK-projektet blev det konstateret, at der kan tandemsvejses i aluminium i godstykkelser ned til ca. 1 mm. Ved svejsning i godstykkelser under 1 mm var det svært at undgå udbulinger langs svejsesømmen.

### 3.4 Eksempel på anvendelse af tandemsvejsning i små godstykkelser

På Mærsk Container Industri (MCI) anvendes der tandemsvejsning til svejsning af 11,5 m lange overlapsamlinger i aluminium. Den aktuelle opgave er vist nedenfor.



*Overlapsøm i aluminium svejst med tandemteknikken hos MCI*

Som vist på ovenstående skitse til venstre, anvendes en klembom øverst og en vandkølet underlagsskinne med konstant temperatur på 15°C nederst. Der anvendes AlMg5 tråd og Fronius T.I.M.E. TWIN svejsemaskiner med push-pull. Med tandemteknikken er svejsehastigheden ca. 2,5 m/min.

MCI har erfaret, at der stilles forholdsvis store krav i form af en stabil fremføring af brænderen og en ensartet opstilling, for at opnå en reproducerbar god svejsekvalitet i så høj en svejsehastighed i så tynde aluminiumsplader. Fremføringen består derfor af kraftige og simpelt opbyggede vogne. Den vandkølede underlagsskinne er med til at sikre ensartede svejseforhold hen over hele døgnet. Til at følge fugen over de lange afstande styres tandembrænderen sidevers via en mekanisk føler, der følger fugen ca. 150 mm foran brænderen.

### 3.5 Fremtidsudsigter for tandem-MIG

Tandemsvejsning har på trods af teknikkens korte levetid allerede fundet stor industriel anvendelse i Europa. Teknikken har vist sig at være meget anvendelig til at erstatte almindelig spraybue MIG-svejsning i aluminium og andre materialer, med det formål at minimere svejsetiden.

Især Tyskland har forstået at udnytte den større produktivitet, der opnås med tandemteknikken. Dertil skal det nævnes, at teknikken er udviklet dels i Tyskland og dels i Østrig, hvilket er med til at forklare deres forspring på dette område.

Hvis en virksomhed eksempelvis i forvejen udfører mekaniseret almindelig MIG-svejsning, er det i mange tilfælde kun et spørgsmål om at skifte svejseværket ud med tandemudstyr, hvis man ønsker at fordoble eller tredoble svejsehastigheden.

Det forventes bl.a. derfor, at tandemteknikken vil finde betydelig større industriel anvendelse i fremtiden både i Danmark og i resten af verden.

## 4. PLASMASVEJSNING

Ved samling af aluminium kan plasmavejsning byde på et godt kompromis mellem (stor) produktivitet, god kvalitet og relativt beskedne investeringsomkostninger i forhold til alternative svejseprocesser.

Særligt i mindre godstykkelser kan der opnås betragtelige svejsehastigheder. Således er stumpsømme i **2 mm** aluminium under forsøgene svejst med **op til 4 meter/minut**, og **1 mm** plader kan svejses med hastigheder på op til omkring **8-10 meter/minut**, muligvis endda højere, afhængigt af fikstur og fremføringsenhed. Den øvre grænse synes at ligge i **udstyrets kapacitet** og muligheden for at få brænder og wolfram-elektrode til at holde til de høje varmebelastninger.

I stillingen oven-ned kan I-sømme svejses i godstykkelser på op til 9-10 mm, idet der bør anvendes key-hole teknik i tykkelser over ca. 3 mm. I tykkelser på 8 mm og derover kan plasma key-hole svejsning anvendes i lodret stigende stilling. Ellers må man ty til en Y-skærping, hvor bunden svejses med key-hole.

Anvendelsesområder kan eksempelvis være stumpsømme i pladepaneller (oven-ned), rundsømme i rør og beholderes (side-ind eller lodret-stigende).

Ofte vil et konventionelt A/C TIG-udstyr kunne anvendes, med tilføjelse af en plasmaforsats til strømkilden, et vandkølemodul, en plasmabrænder og en koldtrådsboks.

#### **4.1 Gennemførte forsøg og indvundne erfaringer med plasmavejsning**

På FORCE er der gennemført plasmavejsningsforsøg i pladetykkelser fra 1 til 8,5 mm. Processen har været prøvet på legeringerne 5754 (AlMg3), 5083 (AlMg4,5Mn), 6063 og 6082.

Godstykkelser **1 og 2 mm** er svejst ved ”**melt-in**” teknikken, altså uden key-hole. I **5 mm** godstykkelse blev der i starten anvendt melt-in teknik, indtil det lykkedes at skabe et stabilt key-hole. Melt-in teknikken gav i 5 mm godstykkelse en svejsning, som var 2-3 gange bredere end den, der siden blev opnået ved **key-hole** teknikken.

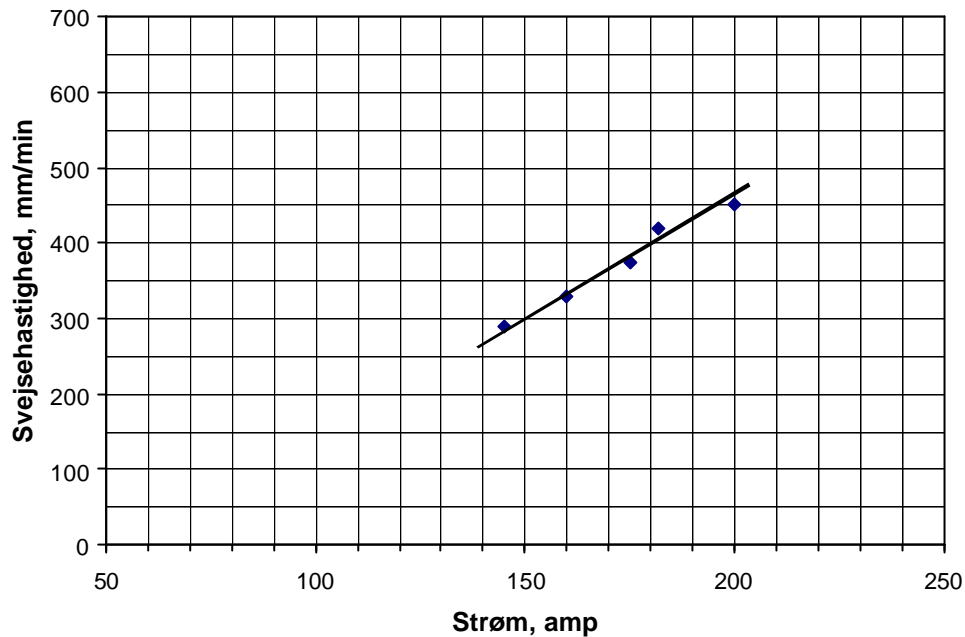
De første forsøg på FORCE viste, at det i 8,5 mm plade var praktisk umuligt at opnå en stabil **key-hole** svejsning oven-ned. Imidlertid lykkedes det i anden runde for Migatronix at flytte denne grænse til **9-10 mm**. Dette lykkedes ved at anvende et særlig assymetrisk strømforløb, med forskellig længde og højde på cyklerne i strømforløbet. Ellers må man i disse lidt større godstykkelser i givet fald svejses helt eller delvist lodret-stigende.

For at opnå et godt resultat har det vist sig nødvendigt at anvende tilsatstråd, som blev tilført foran smeltebadet ved hjælp af en koldtrådsføring. I alle tilfælde blev en AlMg5 tråd  $\varnothing 1,0$  mm anvendt.

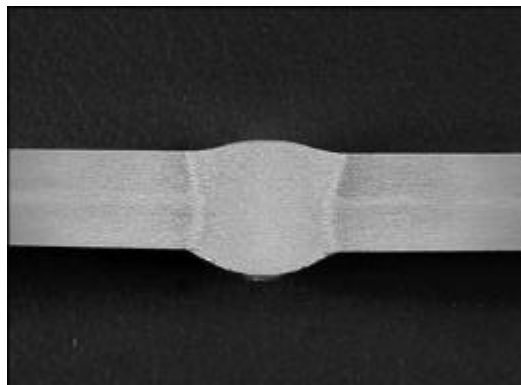
Alle plader blev svejst uden forudgående forberedelse såsom afrensning eller børstning.

De ekstruderede legeringer (6000-serien) blev typisk svejst med lidt højere strøm (ca. 10%) dels for at gennembryde det tykkere oxidlag, dels på grund af disse legeringers noget højere termiske ledningsevne (=hurtigere afkøling).

Plasmasvejsning t = 5 mm 5083 (AlMg4,5Mn)

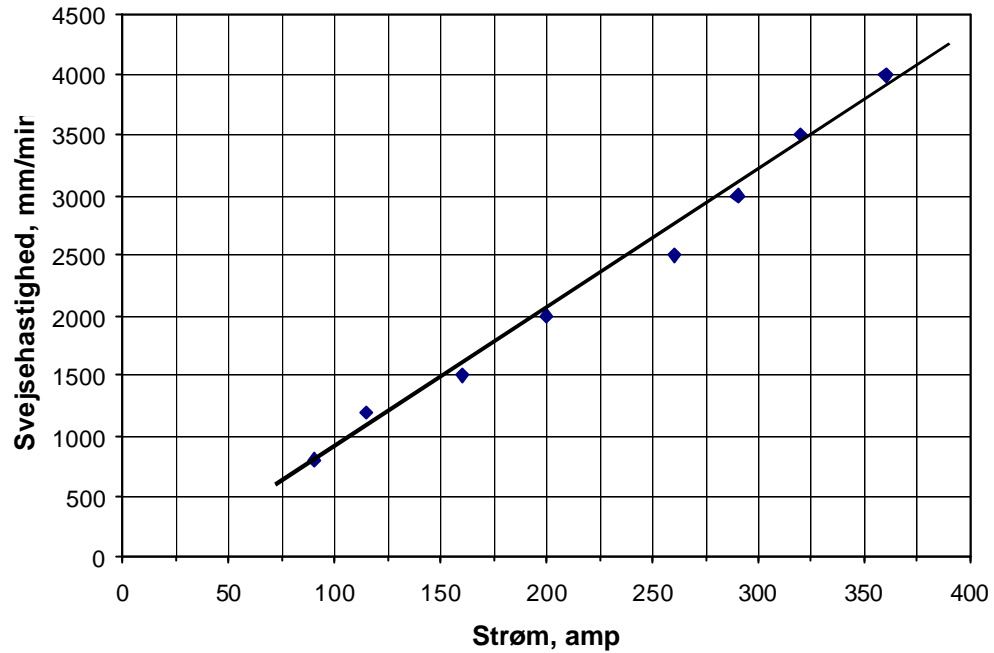


*Svejsehastighed som funktion af strømstyrke for stumpsømme i 2 mm plade.*

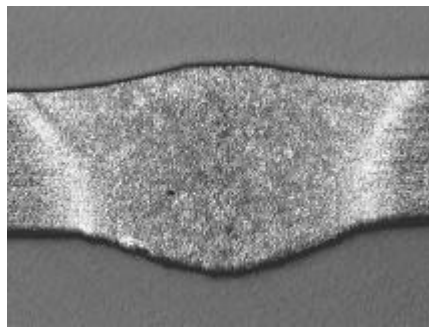


*Tværsnit gennem plasma keyhole-svejsning i legering 5083 (AlMg4,5Mn), t = 5 mm. Svejsehastighed 420 mm/min, strømstyrke 180 amp. Plasmagasflow 2,7 l/min, svejst med  $\phi 3,5$  mm flerhulsdyse i stillingen oven-ned. En røntgenundersøgelse afslørede ingen porer eller andre svejsefejl.*

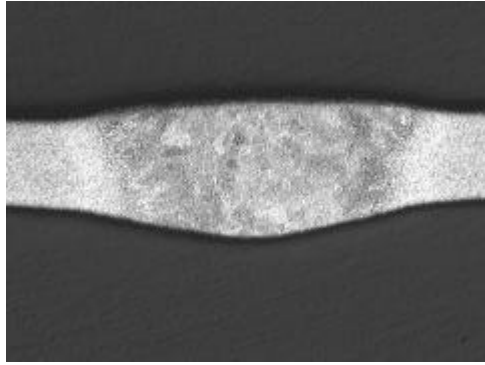
Plasmasvejsning t = 2 mm 5083 (AlMg4,5Mn)



*Svejsehastighed som funktion af strømstyrke for stumpsømme i 2 mm plade.*



*Tværsnit gennem plasma keyhole-svejsning i legering 5754 (AlMg3), t = 2 mm. Svejsehastighed 4000 mm/min, strømstyrke 315 amp. Plasmagasflow 0,5 l/min, svejst med ø3,5 mm flerhulsdyse i stillingen ovenned.*

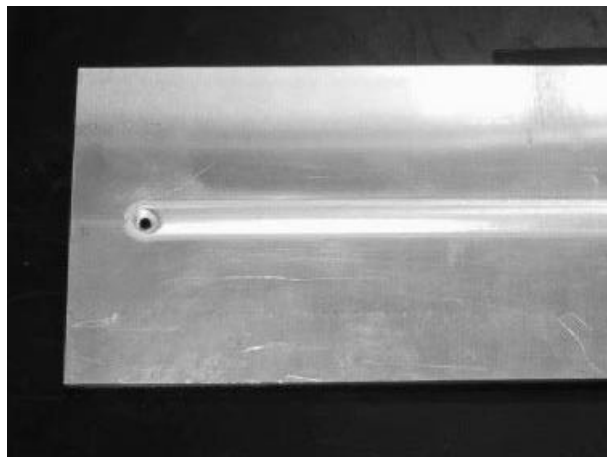


*Tværsnit gennem plasmavejsning i legering 5083 AlMg4,5Mn),  
 $t = 1$  mm.*

*Svejsehastighed 2800 mm/min, strømstyrke 140 amp.*

*Plasmagasflow 0,5 l/min, svejst med flerhulsdyse  $\phi 3,5$  mm i  
stillingen oven-ned.*

*Kommentar: Ved anvendelse af højere hastigheder og mindre  
dysediameter kan svejsesømmen indsnævres noget i forhold til  
hér viste ca. 3 mm.*



*Plasma key-hole svejsning, færdigsvejst i én streng  
hos Migatronic. Materiale: 6063,  $t=8$  mm.*

*Svejsehastighed 200 mm/min.*

## **4.2 Plasmasvejsning af T-floors hos MCI?**

Der er gennemført nogle orienterende forsøg med henblik på eftervisning af mulighederne for plasmavejsning af T-floors hos Mærsk Container Industri. Resultaterne ser lovende ud. I betragtning af, at der er tale om 6000-legeringer (AlMgSi), er det i øvrigt bemærkelsesværdigt, at der ikke har vist sig nogen varmvævneproblemer. Dette skal ses i lyset af, at varmvævnrisikoen ikke kun hænger sammen med legeringssammensætning, men også størkningsforhold og indspændingsgrad.



*Overflade af plasmasvejsning af T-floor – orienterende forsøg udført fra bagsiden. Svejseshastighed 2400 mm/min. Svejsningen fremstår meget ren og jævn, uden sprøjt, så krav til efterbearbejdning er kraftigt reduceret.*

### **4.3 Betragtninger vedrørende svejsefikstur**

Ved plasmasvejsning af aluminium har det vist sig at være umuligt at reproducere en keyholesvejsning med uændrede parametre flere gange i træk. Dette skyldes, at svejsefiksturen akkumulerer varmen fra svejsningen, hvorved en stigende temperatur hurtigt overføres til de næste emner på grund af aluminiums gode varmeledningsevne. Dette bevirker at man skal tilføre mindre og mindre energi for at opnå det samme resultat, hvilket i en produktion vil være fuldstændig umuligt at styre.

Det er derfor en forudsætning for en ensartet svejsekvalitet ved plasmasvejsning med keyhole i aluminium, at fiksturen er kølet med vand, så en fuldstændig ens temperatur overføres til emnerne fra gang til gang.

En anden mulighed kunne være at bruge varmt vand til fiksturen. Dette vil medføre en væsentlig reduktion af tilført energi fra lysbuen, hvilket i større godstykker (5-12 mm.) vil aflaste strømkilde og plasmabrænder, hvorved færre produktionsstop vil være nødvendige.

Der kan læses yderligere om plasmasvejsning af aluminium i rapport [SASAK-RAP-SV-FI-0035](#) "Plasmasvejsning af aluminium", og der kan læses mere om fiksturens indflydelse i rapport [SASAK-RAP-SV-MIG-0034](#) "Kontrol af temperatur på fikstur – effekt på svejseresultat".

## 5. LASERSVEJSNING

### 5.1 Konklusioner fra forsøg med CO<sub>2</sub>-laser

Der blev gennemført forsøg i lidt kraftigere godstykkelser med CO<sub>2</sub>-laser (5-8 mm). Ud fra de gennemførte forsøg kan følgende hovedkonklusioner drages:

- Det er ikke muligt at gennemføre autogen lasersvejsning af 5 eller 8mm 6082 eller 5083 plade med en acceptabel kvalitet til følge.
- Trådtilsætning forbedrer svejsegeometrien samt reducerer poreindholdet markant.
- Ved at anvende trådtilsætning er det muligt at opnå acceptable fuldt penetrerende lasersvejsninger i 5mm 5083 og 6082.
- Det er muligt at svejse 5083 næsten dobbelt så hurtigt som 6082, dette skyldes sandsynligvis forskellen i varmeledningsevne.
- Ved at anvende trådtilsætning er det muligt at opnå acceptable ikke fuldt penetrerende lasersvejsninger i 8mm 5083 og 6082.
- Anvendelse af nitrogen som plasmagas har ingen entydig effekt på poreindholdet, for 5083 legeringer stiger poreniveauet, mens billedet ikke er så klart for 6082 legeringen.
- Anvendelse af nitrogen som plasmagas har ingen indflydelse på hårdheden af svejsningen.
- Afhængig af varmetilførslen er den varmepåvirkede zone, med reduceret hårdhed, mellem 5 og 13mm bred.
- Generelt blev der ikke observeret problemer med revnedannelse under svejsning.

Rapport SASAK-RAP-SV-FI-0018 uddyber erfaringerne med svejsning af aluminium med CO<sub>2</sub>-laser.

### 5.2 Svejsforsøg med Nd-YAG laser

I de senere år har udviklingen inden for YAG-laser udstyr bevæget sig mod kraftigere systemer, derfor kan der nu opnås højere lasereffekter end tidligere. De stadig højere effekter betyder at YAG-laseren kan blive et seriøst alternativ til de traditionelle svejseprocesser og CO<sub>2</sub> -laseren, desuden har YAG-laseren en række andre fordele, der giver bredere perspektiver for svejsning af aluminium i større dimensioner.

- Bølgelængden af laserlyset for YAG-lasere (1064 nm) er fordelagtigt ved aluminiumsvejsning (pga. reflektionsforholdene) sammenlignet med CO<sub>2</sub> -laserens bølgelængde (10060 nm).
- Laserstrålen kan fremføres gennem fiberoptik, hvilket giver processen en øget fleksibilitet ved automation.

- højenergi proces, som betyder dybe og smalle svejsninger med lav varmetilførsel og deraf en smal varmpåvirket zone (HAZ), hvilket resulterer i mindre deformationer.
- Forholdsvis høje svejsehastigheder og mulighed for ensidige svejsninger i relativt store dimensioner.

Man skal dog ikke lade sig forblinde af processens mange fordele, for de traditionelle problemer ved svejsning i aluminium forefindes stadigvæk, eksempelvis kan nævnes:

- Poredannelse.
- Revnedannelse.
- Problemer med aluminiums store affinitet til oxygen og det deraf fremkommende oxidlag.
- Lasersvejsning tolererer kun meget små variationer, hvilket kræver en god tilpasning af emner og fuger.
- Nedsynkning af svejsningen, aluminium har en begrænset evne til at bære smelten pga. en lav overfladespænding.

Der er udført en serie svejseforsøg, autogent og med tilsatsmateriale, i 2 forskellige aluminiums-legeringer:

- AA6082 (AlSiMgMn) leveringstilstand T6 og dimensionen 2mm, 5mm.
- AA5083 (AlMg4,5MnO,7) leveringstilstand H116 og dimensionerne 2mm, 5mm og 8mm.

Tilsatsmateriale: AlSi5 0,8mm og 1,2mm.

Alle svejsninger er udført som stumpsømme med fuld gennemsvæjsning. Indledningsvis er forsøgene evalueret visuelt, derefter røntgenundersøgt for porer og revner, svejsningerne i 5 mm materialet er desuden bedømt efter EN ISO 13919-2. Det var ikke muligt at opnå bedre kvalitet end niveau C (intermediate).

Undersøgelsen har påvist følgende svejsbare område for de 2 valgte legeringer:

**AA5083:**

2 mm svejsbart op til 14000 mm/min.

5 mm svejsbart op til 1500 mm/min.

8 mm svejsbart ved 400 mm/min (dog ikke stabilt).

**AA6082:**

2 mm svejsbart op til 8000 mm/min.

5 mm svejsbart op til 1250 mm/min.

Der observeres en forskel i svejsbarhed mellem de 2 legeringer, idet AA5083 er mindre kritisk over for parameter-ændringer og dermed kan svejdes i et større område end AA6082.

Desuden ses det at der forekommer en kraftig indsnævring af det svejsbare område ved stigende materialetykkelse.

I 5 mm materialet blev der forsøgt svejsning med tilsatstråd. Ved en screening af et udvalgt område lykkedes det ikke at opnå bedre resultater end ved autogen svejsning. Det kan dog ikke afvises at dette vil være muligt, ved videregående undersøgelser.

Der fremkom en del porer i visse parameterområder, desuden blev der set enkelte tilfælde af tværrevner i AA6082 (2 mm), den hyppigst fremkommende svejsefejl var uacceptabel nedsynkning af svejsningen og tendensen var størst hos legeringen AA6082.

Rapport SASAK-RAP-SV-FI-0019 uddyber erfaringerne med svejsning af aluminium med Nd-YAG laser.