

Dokument: SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0032-01

# **Hybrid Nd-YAG laser + MIG svejsning i aluminium.**

SASAK  
Projekt 3 - Svejsning

Michael Myrup Andersen  
Thomas Aaboe Jensen

FORCE Instituttet, december 2000

## **Sammenfatning.**

YAG-lasersvejsning af aluminium er beskrevet i en tidligere rapport SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0019 "Nd-YAG-lasersvejsning af aluminium".

Formålet med denne undersøgelse var at skabe overblik over potentialet for anvendelse af hybrid Nd-YAG laser + MIG til svejsning i aluminium. Ligeledes skulle der opstilles nogle retningslinier med tilhørende svejsedata.

Forsøgene blev udført som stumpsømme med fuld gennemsvajsning, hvilket må anses som den vanskeligste svejsegeometri for højenergi-processerne. Samlinger som kantsømme, overlap og stumpsømme uden gennemsvajsning er langt mere tolerante, sammenlignet med nærværende forsøgsprogram.

Undersøgelsen har vist at der ikke opnås fordele ved at benytte hybridprocessen til svejsning uden spalte. Forekommer der en veldefineret spalte kan svejsehastigheden hæves med 100 – 250% sammenlignet med ren lasersvejsning, samtidigt opnås en bedre geometri og mindre poreforekomst.

Denne begrænsede undersøgelse har dog efterladt flere uafprøvede parameterområder, som evt. kan give endnu bedre resultater.

## Indhold:

|       |                               |    |
|-------|-------------------------------|----|
| 1     | Introduktion.....             | 4  |
| 2     | Formål.....                   | 5  |
| 3     | Forsøgsopstilling.....        | 6  |
| 4     | Svejsforsøg.....              | 7  |
| 4.1   | Svejsning uden spalte.....    | 8  |
| 4.2   | Svejsning med spalte.....     | 11 |
| 4.2.1 | Eksempel 1.....               | 11 |
| 4.2.2 | Eksempel 2.....               | 12 |
| 4.2.3 | Eksempel 3.....               | 13 |
| 5     | Resultater og diskussion..... | 14 |
| 5.1.1 | Svejsning uden spalte.....    | 15 |
| 5.1.2 | Svejsning med spalte.....     | 15 |
| 6     | Svejsfejl.....                | 17 |
| 6.1   | Poredannelse.....             | 17 |
| 6.2   | Revnedannelse.....            | 17 |
| 6.3   | Geometriske svejsfejl.....    | 17 |
| 7     | Konklusion.....               | 18 |
| 8     | Litteraturliste.....          | 19 |

# 1 Introduktion.

Aluminium benyttes i vid udstrækning som konstruktionsmateriale pga. sin relativ høje styrke sammenlignet med den lave egenvægt, desuden har flere legeringer en god korrosionsbestandighed og er lette at bearbejde. Derfor er perspektiverne store hvis hybridsvejsning kan lette sammenføjnngen og dermed åbne op for nye muligheder inden for anvendelsen af aluminium.

I de senere år har der været en stor udvikling af svejseudstyr. YAG-laser udstyret har bevæget sig mod kraftigere systemer, med højere lasereffekter end tidligere. MIG udstyret har gennemgået en stor udvikling af strømkilderne, hvilket har resulteret i mere stabile strømkilder med bedre styring og flere reguleringsmuligheder.

Hver for sig har de 2 processer store muligheder, men stadigvæk visse begrænsninger når det gælder svejsning af aluminium.

- Lasersvejsning er en fleksibel højenergi proces, som betyder dybe og smalle svejsninger med lav varmetilførsel og deraf en smal varmepåvirket zone (HAZ), hvilket resulterer i små deformationer. Der kan opnås høje svejsehastigheder og mulighed for ensidige svejsninger i relativt store dimensioner.  
Laserens største ulempe er at den har en meget lav tolerance overfor spalte og forsætninger, tolerancen er typisk i størrelsesordenen nogle få tiendedele millimeter.
- MIG-svejsning giver en høj produktivitet og er velegnet til automatisering, processen tåler modsat laseren store spaltevariationer. MIG-svejsning er velegnet til store godstykkelser, dog kræves der fugeforberedelse ved stumpsømme over 2-3 mm gods. MIG-svejsning giver en moderat svejsekvalitet med større deformationer pga. høj varmetilførsel.

Hybridsvejsning kombinerer de 2 processer i een. Processen tager samtidigt det bedste fra de 2 metoder.

Fra laseren opnås en stor indtrængning og en høj svejsehastighed, fra MIG processen fås en stor spaltetolerance. Den samlede svejsehastighed kan ligeledes hæves derved falder heat-inputtet og deformationerne.

## 2 Formål

At undersøge potentialet for hybridsvejsning med en kombination af Nd-Yag laser og MIG med henblik på sammenføjning af aluminium i større dimensioner, dette gøres gennem praktiske svejseforsøg og evaluering af disse.

Der skal findes svejsbare områder med brugbare svejseparametere og opstilles vejledende sammenhænge mellem parametrene der kan belyse følgende:

- sammenhængen mellem parametre (primært lasereffekt / MIG-effekt) og svejse-kvaliteten.
- introduktion af spalter i samlingen og indvirkningen på svejsehastigheden og kvaliteten

Målet er at give retningslinier herunder vejledende data, for indførelse af hybridsvejsning med Nd-YAG laser og MIG svejsning til aluminiumskonstruktioner.

### 3 Forsøgsopstilling

Forsøgene er udført som stumpsømme, med fuld gennemsvæjsning. Det anvendte materiale er i alle tilfælde plader med længden 200mm og bredden 100mm af typen:

- AA5083 (AlMg4,5MnO,7) leveringstilstand H11 og dimensionen 5mm.
- MIG tilsatsmateriale: AlSi5 Ø 1,2mm.

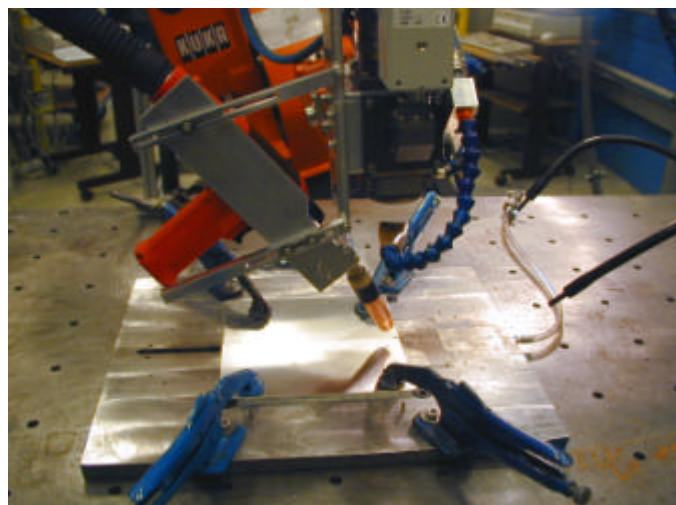
For at sikre en god fugetilpasning og sammenlignelige resultater, blev alle plader fræset på kanten og derefter affedet med triclorethylen, kanterne blev ikke mekanisk bearbejdet umiddelbart inden svejsningen, idet tidligere forsøg har påvist at dette ingen effekt har. Til svejsforsøgene er der anvendt følgende udstyr;

| Udstyr | Fabrikat | Type                                |
|--------|----------|-------------------------------------|
| Laser  | HAAS     | HL 4006D                            |
| MIG    | Fronius  | Transpuls Synergic 2700 ALU-edition |
| Robot  | KUKA     | IR364/10.0                          |

Tabel 3.1 Anvendt udstyr

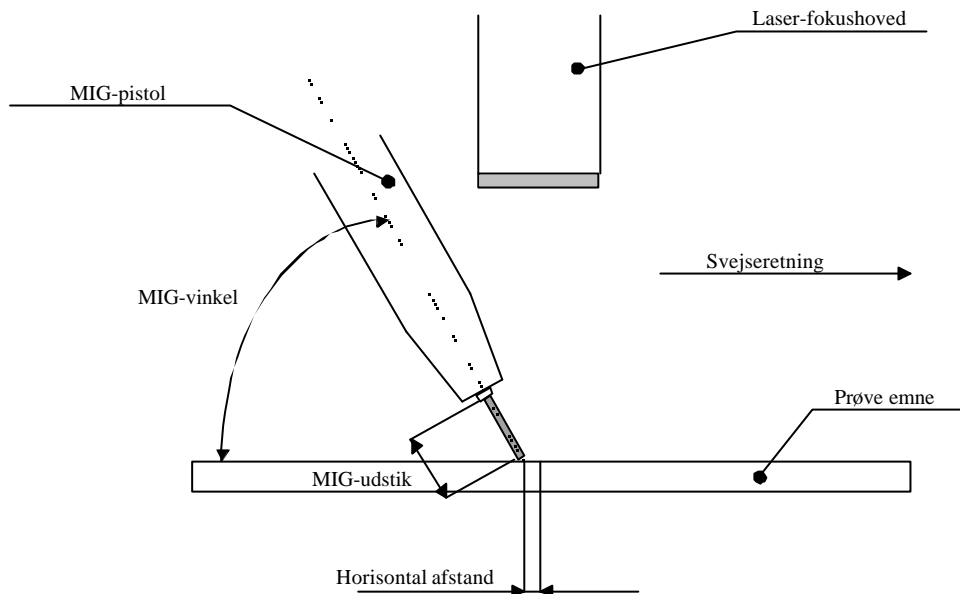
For at begrænse antallet af varierende parametre blev der anvendt en MIG-svejsmaskine med synergisk puls. Det valgte udstyr er desuden designet specielt til svejsning i aluminium og har derfor indbygget konkrete programmer til dette.

Der blev fremstillet en holder til fastspænding af MIG svejsepistolen, denne holder sikrer en stabil opspænding med mulighed for at variere højde og vinkel i forhold til laserens fokuspunkt. Figur 3.1 viser den anvendte forsøgs-opstilling.



Figur 3.1 Forsøgsopstilling.

Svejseretning og vinkel defineres i forsøgene ud fra følgende principskitse:



**Figur 3.2** Principskitse.

## 4 Svejseforsøg

Der blev udført en del indledende forsøg for at få processen til at forløbe rigtigt, dvs. at opnå den synergieffekt mellem laserprocessen og MIG-processen som kendetegner hybridsvejsning.

På baggrund af litteraturstudier og de indledende forsøg blev det besluttet at holde enkelte parametre konstante for at begrænse forsøgsarbejdet.

Konstante parametre:

- Lasermode: CW
- Fokuslinse: 200 mm
- Beskyttelsesgas: Argon
- Tråd-udstik: 12 mm
- Pistol-vinkel: 60 grader

Følgende parametre blev varieret under det praktiske forsøgsarbejde:

- Lasereffekt
- MIG effekten herunder:
  - Strøm/tråd hastighed
  - Lysbuelængde
- Svejseshastighed
- Gab mellem pladerne
- Gasflow
- Horisontal afstand mellem lysbuerne

Svejsningerne bedømmes visuelt ud fra nævnte krav.

- fuld gennemsvæjsning.
- ingen revner.
- ingen umiddelbare geometriske svejsefejl.

Denne vurdering giver en række parametersæt hvor hybridsvejsning tilsyneladende giver et godt resultat. Svejsningerne i dette område udtages til røntgenundersøgelse for porer, med henblik på yderligere kontrol. De visuelt godkendte svejsninger gennemgår efter røntgenundersøgelsen en makroundersøgelse.

Makroundersøgelsen foretages med henblik på yderligere vurdering af kvaliteten og svejsegeometrien, som sammenholdt med røntgenundersøgelsen vurderes ud fra kravene i **EN ISO 13919-2** "Welding, Electron and laser beam welded joints, Guidance on quality levels for imperfections. Part 2: Aluminium and its weldable alloys". Standarden omhandler retningslinier til bedømmelse af elektronstråle- og lasersvejsninger i aluminium og dens legeringer.

#### **4.1 Svejsning uden spalte.**

Ved indledende forsøg fastsættes fokusafstanden til 0,0mm, dvs. fokuspunktet ligger på overfladen af pladen.

En stor del af forsøgene med svejsning uden spalte havde til formål at finde en passende fordeling af den tilførte energi fra laseren og MIG maskinen. Laserenergien skal sørge for tilstrækkelig

gennembrænding mens MIG maskinen giver en passende overvulst og trådtilførslen sikrer en større tolerance for eventuelle gap.

Litteraturen anbefaler en energifordeling på ca. 50/50% fra henholdsvis laser og MIG, i praksis blev der forsøgt med variationer fra 41/59% til 62/48%. Nedenstående tabel 4.1 viser 3 forskellige parametersæt der resulterede i visuelt acceptable resultater og repræsenterer forskellige niveauer. Bemærk! de nævnte heat-input er alle beregnet 100% termisk virkningsgrad.

| Forsøgs nr. | Svejseshastighed<br>[mm/min] | Samlet heat-input<br>[J/mm] | Heat-input laser<br>[%] | Heat-input MIG<br>[%] |
|-------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| SH1.10      | 2500                         | 164                         | 58                      | 42                    |
| SH1.15      | 1000                         | 297                         | 56                      | 44                    |
| SH1.20      | 1000                         | 332                         | 45                      | 55                    |

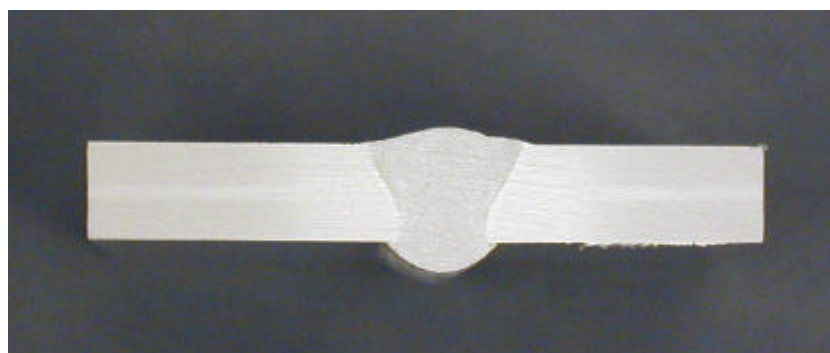
Tabel 4.1 Eksempel på energifordeling resulterende i visuelt acceptable svejsninger.

De 3 ovennævnte svejseprøver blev udtaget til røntgenundersøgelse for porer, svejsegeometrien blev vurderet og svejsekvaliteten bedømt ud fra **EN ISO 13919-2**, som opererer med følgende kvalitetsklasser:

- B stringent
- C intermediate
- D moderate

| Forsøgs nr. | Pore indhold<br>[kvalitets klasse] | Svejsegeometri<br>[kvalitets klasse] | Samlet vurdering<br>[kvalitets klasse] |
|-------------|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| SH1.10      | -                                  | -                                    | -                                      |
| SH1.15      | -                                  | B                                    | -                                      |
| SH1.20      | D                                  | D                                    | D                                      |

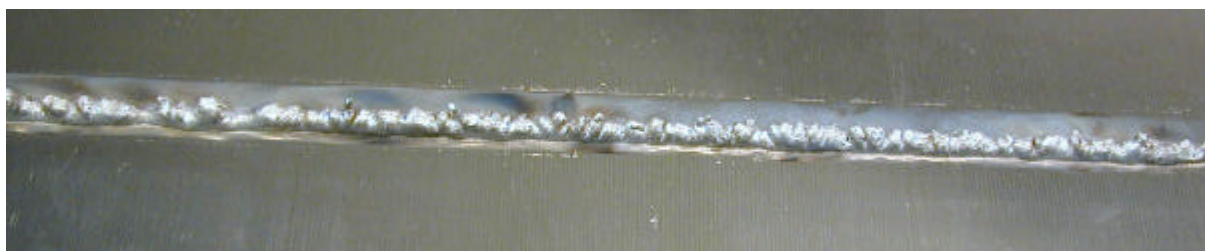
Tabel 4.2 Vurdering af svejsekvaliteten efter norm.



**Figur 4.1** Svejsgeometri SH1.20

Forsøgene viste ligeledes at det kan være problematisk at opnå en stabil rodside på svejsningen når der svejdes uden gap, billederne i figur 4.2 og 4.3 illustrerer problemstillingen.

De 2 viste svejseprøver har stort set samme energifordeling, men SH1.09 har et lavt heat-input resulterende i en ustabil rodside, hvorimod SH1.12 har et højere heat-input resulterende i en blødere rodside med stor undervulst.



**Figur 4.2** Rodside SH1.09 Svejsehastighed 2000 mm/min, samlet heat-input 204 J/mm.  
Energifordeling: Laser 59%, MIG 41%



**Figur 4.3** Rodside SH1.12 Svejsehastighed 1000 mm/min, samlet heat-input 311 J/mm.  
Energifordeling: Laser 58%, MIG 42%

For at opnå en mere stabil rodside blev det forsøgt at regulere den horisontale afstand mellem lysbuerne (se evt. figur 3.2 principskitse).

| Forsøgs nr. | Horisontal afstand mellem lysbuer | Bemærkninger                      |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| SH1.20      | 3 mm                              | Stabil proces                     |
| SH1.63      | 0 mm                              | Ustabil (lysbue længden varierer) |
| SH1.64      | 6 mm                              | 2 separate lysbuer observeres     |

Tabel 4.3 Observationer vedr. ændring i horisontal afstand mellem lysbuerne, figur 4.4 på næste side viser forskellen i svejsegeometrien.



SH1.20

SH1.63

SH1.64

Horisontal afstand 3mm, Horisontal afstand 0mm, Horisontal afstand 6mm

**Figur 4.4** Svejsgeometrier

Som det tydeligt fremgår af figur 4.4, har den horisontale afstand mellem lysbuerne stor betydning for indtrængningen og processens stabilitet, ved alle yderligere forsøg fastholdes afstanden til 3mm.

## 4.2 Svejsning med spalte.

For at opnå klare fordele af hybridprocessen skal der introduceres en spalte. Der blev indledningsvis lavet forsøg med små spalter på 0,2mm. For ren lasersvejsning er dette en moderat spalte, ved hybridsvejsningen var der umiddelbart ingen forskel i resultaterne, derfor blev alle yderligere forsøg udført med spalter på henholdsvis 0,6 og 1,0mm.

Ved indledende forsøg observeres at det med spalte er markant nemmere at opnå en stabil og acceptabel rodside på svejsningerne, dette skyldes formentlig at smelten har lettere ved at flyde sammen på bagsiden.

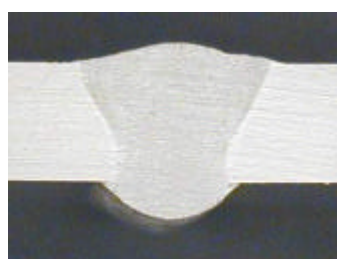
De 3 parametersæt som fremkom med visuelt acceptable resultater ved svejsning uden spalte (se tidligere afsnit) bruges som udgangspunkt og optimeres nu mod spaltebredder på 0,6 og 1,0mm.

### 4.2.1 Eksempel 1

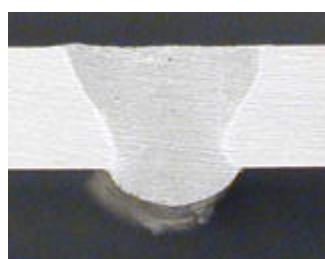
Som eksempel benyttes den tidligere udførte prøve SH1.20 den repræsenterer forsøgene hvor heat-inputtet har overvægt af MIG-energi. Der introduceres spalter på 0,6 og 1,0mm den eneste yderligere ændring sker på svejsehastigheden.

| Forsøgs nr. | Svejsehastighed<br>[mm/min] | Spaltebredde<br>[mm] | Samlet Heat-input<br>[J/mm] | Energifordeling<br>Laser/MIG [%] |
|-------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| SH1.20      | 1000                        | 0,0                  | 332                         | 45/55                            |
| SH1.38      | 1000                        | 0,6                  | 332                         | 45/55                            |
| SH1.44      | 1500                        | 1,0                  | 223                         | 45/55                            |

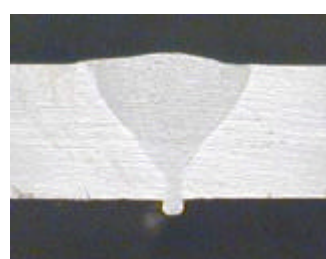
Tabel 4.4 Heat-input og svejsehastighed for forsøg med spalte. Billederne i figur 4.5 viser de tilhørende svejsegeometrier.



SH1.20, spalte 0,0mm  
1000 mm/min,



SH1.38, spalte 0,6mm  
1000mm/min,



SH1.44, spalte 1,0mm  
1500mm/min

**Figur 4.5** Svejsegeometrier

De udvalgte prøver er ligeledes bedømt efter **EN ISO 13919-2** med følgende resultat:

| Forsøgs nr. | Pore indhold<br>[kvalitets klasse] | Svejsegeometri<br>[kvalitets klasse] | Samlet vurdering<br>[kvalitets klasse] |
|-------------|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| SH1.20      | D                                  | D                                    | D                                      |
| SH1.38      | B                                  | D                                    | D                                      |
| SH1.44      | B                                  | B                                    | B                                      |

Tabel 4.5 Vurdering af svejsekvaliteten efter norm.

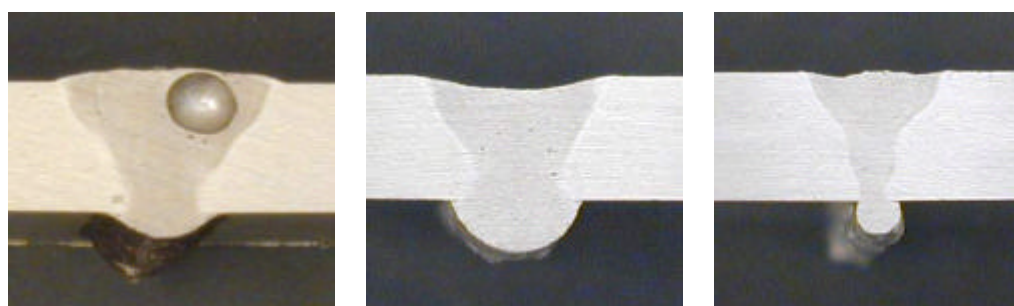
Som det kan ses på ovenstående makroslib skaber en spalte på 0,6 mm uden hastighedsændring en yderligere nedsynkning. En spalte på 1,0mm sammen med en hastighedsforøgning på 50% skaber derimod et svejseprofil hvor det tydeligt kan ses at energien fra laseren opsmelter roden af svejsningen og trådtilførslen fra MIG processen lukker spalten. Bemærk desuden at introduktion af en spalte i disse tilfælde reducerer poreindholdet (se tabel 4.5).

#### 4.2.2 Eksempel 2

Som eksempel benyttes den tidligere udførte prøve SH1.15 den repræsenterer forsøgene hvor heat-inputtet har overvægt af Laser-energi. Der introduceres spalter på 0,6 og 1,0mm den eneste yderligere ændring sker på svejsehastigheden.

| Forsøgs nr. | Svejsehastighed<br>[mm/min] | Spaltebredde<br>[mm] | Samlet Heat-input<br>[J/mm] | Energifordeling<br>Laser/MIG [%] |
|-------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| SH1.15      | 1000                        | 0,0                  | 300                         | 56/44                            |
| SH1.46      | 1000                        | 0,6                  | 300                         | 56/44                            |
| SH1.51      | 1800                        | 1,0                  | 166                         | 56/44                            |

Tabel 4.6 Heat-input og svejsehastighed for forsøg med spalte. Billederne i figur 4.6 viser de tilhørende svejsegeometrier.



SH1.15, spalte 0,0mm  
1000 mm/min

SH1.46, spalte 0,6mm  
1000 mm/min

SH1.51, spalte 1,0  
1500 mm/min

**Figur 4.6** Svejsegeometrier

De udvalgte prøver er ligeledes bedømt efter **EN ISO 13919-2** med følgende resultat:

| Forsøgs nr. | Pore indhold<br>[kvalitets klasse] | Svejsegeometri<br>[kvalitets klasse] | Samlet vurdering<br>[kvalitets klasse] |
|-------------|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| SH1.15      | -                                  | B                                    | -                                      |
| SH1.46      | D                                  | -                                    | -                                      |
| SH1.51      | D                                  | C                                    | D                                      |

Tabel 4.7 Vurdering af svejsekvaliteten efter norm.

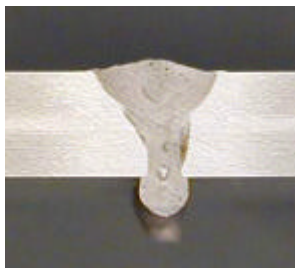
Ligesom i det tidligere eksempel skaber en spalte på 0,6 mm uden hastighedsændring en yderligere nedsynkning. Spalten på 1,0mm sammen med en hastighedsforøgning skaber igen et svejseprofil hvor det tydeligt kan ses at energien fra laseren opsmelter roden af svejsningen og trådtilførslen fra MIG processen lukker spalten. Introduktion af spalter har igen reduceret poreindholdet.

### 4.2.3 Eksempel 3

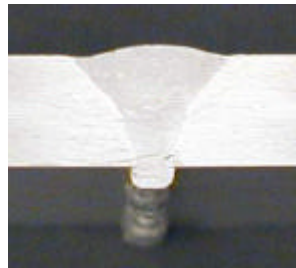
Som eksempel benyttes den tidligere udførte prøve SH1.10. I dette tilfælde optimeres mod den maksimale svejsehastighed. For at lukke spalten ved højere svejsehastighed var det nødvendigt at tilføre mere tråd, energifordelingen kan derfor ikke holdes konstant. Der optimeres kun mod en spaltebredde på 0,6mm, fordi den anvendte MIG svejsemaskine ikke kunne levere tilstrækkeligt tråd til at lukke spalten på 1,0mm.

| Forsøgs nr. | Svejsehastighed<br>[mm/min] | Spaltebredde<br>[mm] | Samlet Heat-input<br>[J/mm] | Energifordeling<br>Laser/MIG [%] |
|-------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| SH1.10      | 2500                        | 0,0                  | 165                         | 58/42                            |
| SH1.59      | 3000                        | 0,6                  | 191                         | 42/58                            |

Tabel 4.8 Heat-input og svejsehastighed for forsøg med spalte. Nedenstående figur 4.7 viser de tilhørende svejsegeometrier.



SH1.10 spalte 0,0mm  
2500 mm/min



SH1.59 spalte 0,6mm  
3000 mm/min

**Figur 4.7** Svejsegeometrier

De udvalgte prøver er ligeledes bedømt efter **EN ISO 13919-2** med følgende resultat:

| Forsøgs nr. | Pore indhold<br>[kvalitets klasse] | Svejsegeometri<br>[kvalitets klasse] | Samlet vurdering<br>[kvalitets klasse] |
|-------------|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| SH1.10      | -                                  | -                                    | -                                      |
| SH1.59      | B                                  | C                                    | C                                      |

Tabel 4.9 Vurdering af svejsekvaliteten efter norm.

SH1.59 repræsenterer den højest opnåede svejsehastighed i forsøgsprogrammet, formentlig kan hastigheden optimeres yderligere ved 1,0mm spalte, desværre kunne det anvendte MIG udstyr ikke belastes yderligere. Bemærk at også her mindskes poreindholdet ved svejsning med spalte.

## 5 Resultater og diskussion

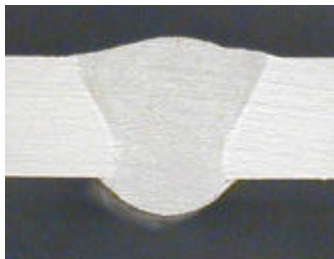
Dette afsnit vil give en kort gennemgang af de opnåede resultater, samt en diskussion af de observationer der blev gjort under forsøgene og en evaluering af disse.

### 5.1.1 Svejsning uden spalte

Svejsforsøgene uden spalte havde til formål at undersøge betydningen af energifordelingen mellem laser og MIG maskine, de fremkomne data viser at der kræves et forholdsvist højt heat-input med overvægt af MIG energi for at opnå et acceptabelt resultat.

Rodsiden på prøverne svejst uden spalte var generel problematisk at styre og i mange tilfælde ustabil. Det blev forsøgt at ændre den horisontale afstand mellem lysbuerne, men dette gav en markant mindre indtrængning.

Tidligere i SASAK projektet er der udført forsøgsarbejde med autogen Nd-YAG lasersvejsning i 5mm AA5083 uden spalte. Disse forsøg viste det ved ren Nd-YAG lasersvejsning var muligt at opnå svejsehastigheder fra 750mm/min til 1500 mm/min. Disse resultater betyder, der ikke umiddelbart er nogen fordel ved at benytte hybridsvejsning kontra ren lasersvejsning ved svejsning uden spalte. Det skal dog nævnes at hybridsvejsning giver en bedre svejsegeometri, se nedenstående billeder.



5mm AA5083  
Hybridsvejsning 1000mm/min

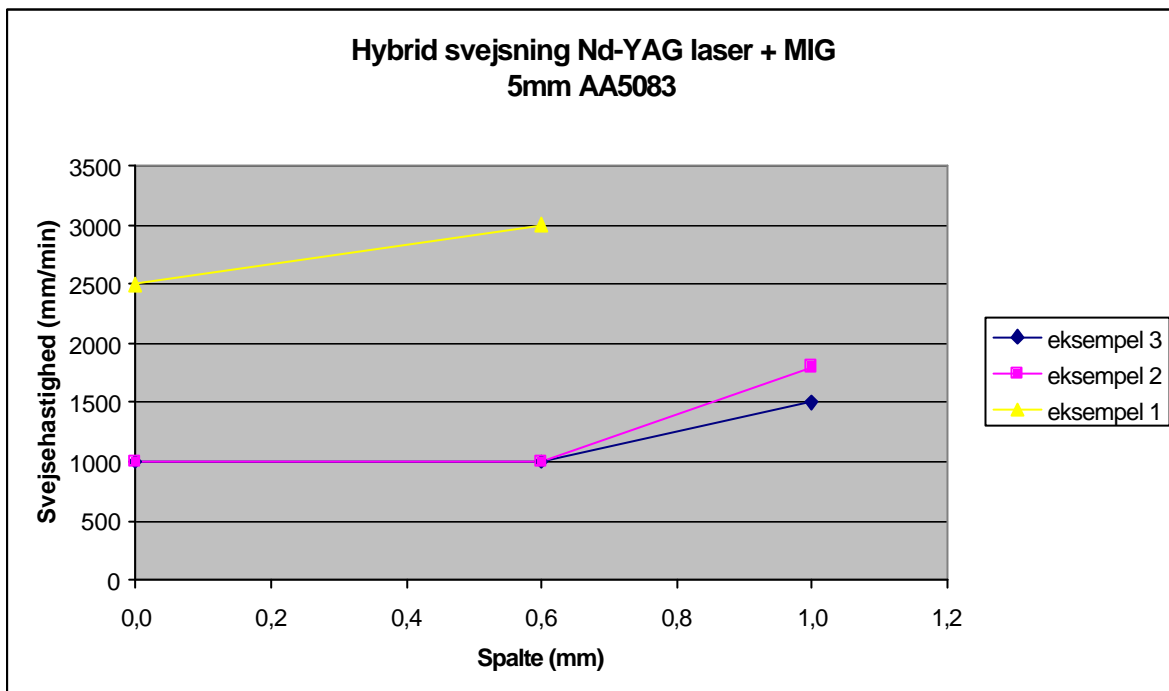


5mm AA5083  
Lasersvejsning 1000mm/min

**Figur 5.1**

### 5.1.2 Svejsning med spalte

Som udgangspunkt for svejseforsøgene med spalte anvendes 3 parametersæt som havde givet visuelt acceptable resultater ved svejsning uden spalte. Ved at introducere en spalte på henholdsvis 0,6mm og 1,0mm blev der opnået en større stabilitet i selve processen og på rodsiden af svejsningen. Ved spaltforsøgene kunne der opnås signifikant højere svejsehastighed end uden spalte. Forsøgene viste dog at øgningen i svejsehastigheden først kommer ved spaltebredder over 0,6mm, som illustreret på nedenstående figur. Grafen er fremkommet ved at sammenholde de opnåede svejsehastigheder med spaltebredden for 3 udvalgte eksempler.



**Figur 5.2** Spaltebreddens indvirkning på svejsehastigheden.

Sammenligner man igen med det tidligere udførte forsøgsarbejde med autogen Nd-YAG lasersvejsning i 5mm AA5083 uden spalte fra SASAK projektet udledes følgende.

- Svejsehastigheden ved hybrid er forbedret mellem 100% og 250% sammenlignet med henholdsvis hurtigste og langsomste hastighed for ren lasersvejsning.
- Spalter ved ren lasersvejsning nedsætter normalt svejsehastigheden yderligere.
- Spalter på ca. 0,3mm er det maksimalt tilladelige for ren lasersvejsning.

En overraskende observation ved disse svejseforsøg var at, introduktionen af selv små spalter nedsatte indholdet af porer i svejsningen markant, dette skyldes formentlig at processen forløb mere stabilt med en spalte.

## 6 Svejsefejl

En af de tilbagevendende udfordringer ved svejsning i aluminium er at undgå eller reducere antallet af svejsefejl. Dette afsnit giver en kort gennemgang af de observerede svejsefejl og deres baggrund.

### 6.1 Poredannelse

Poredannelse er almindeligt forekommende ved svejsning i aluminium. Røntgenundersøgelser af de udførte svejsninger viste generelt et stort poreindhold i svejsningerne der blev udført uden spalte. Dette kan skyldes flere forskellige mekanismer der kan udløse porer i svejsningen.

- Pga. en høj energiintensitet i laserstrålen kan legeringselementer med et højt damptryk primært Mg forgasse og blive fanget i svejsningen under størkning.
- Gasindeslutninger kan også stamme fra beskyttelsesgas der tilføres ned i svejsningen, eller presses ned i smelten af en ustabil plasmadannelse.
- Aluminium kan i flydende tilstand opløse ca. 20 gange mere brint end i størknet tilstand, derfor kan porerne være gasindeslutninger af brint, der ikke kan nå at slippe ud af smelten under størkningen, brinten stammer hovedsageligt aluminiums oxidlag.

### 6.2 Revnedannelse

Der blev ikke observeret nogen form for revner, hverken i svejsforsøgene med eller uden spalte. Ved ren lasersvejsning kan der i nogle legeringer opstå varmerevner (størkningsrevner). Revnerne fremkommer normalt pga. de spændinger der fremkommer under afkøling af smelten, hvor der sker en tværkrumning.

### 6.3 Geometriske svejsefejl

En stor fejlkilde ved de udførte forsøg var uden tvivl selve svejsningens geometri. Pga. aluminiums lave overfladespænding og smeltens gode flydeevne har svejsningen svært ved at "holde" på smelten, det betyder i praksis at man meget nemt får en alvorlig nedsynkning af smelten. Selv ganske små parameter-ændringer kan have stor indflydelse på nedsynkningen. Den anvendte standard tillader dog en vis nedsynkning og undervulst, men i praksis er det svært at opnå den nødvendige stabilitet,

som kræves for at styre processen i det snævre område mellem fuld gennemsvæjsning og uacceptabel nedsynkning.

Det blev observeret at temperaturen på selve fiksturet som benyttes til fastspænding af emnerne har betydning for gennembrændingen. Der observeres en større gennembrænding hvis fiksturet var varmt og dermed kunne "forvarme" emnerne en smule, dette er en reel problemstilling som skal undersøges nærmere hvis man ønsker at benytte hybridsvejsning af stumpsømme i et produktionsmiljø.

## **7 Konklusion**

Der er udført praktiske svejseforsøg med hybridsvejsning ved kombination af Nd-YAG laser og MIG svejsning.

Forsøgsmaterialet var AA5083 (AlMg4,5MnO,7) leveringstilstand H111 (blød) med godstykkelsen 5mm. Den anvendte tråd til MIG svejsningen var AlSi5 1,2mm.

Alle svejsninger er udført som stumpsømme med fuld gennemsvæjsning. Indledningsvis er forsøgene evalueret visuelt, derefter røntgenundersøgt for porer, revner og desuden bedømt efter EN ISO 13919-2. Der blev udført svejsforsøg uden spalte og med spalter på henholdsvis 0,6mm og 1,0mm. Der blev i ingen tilfælde observeret revnedannelse i svejsningerne. Undersøgelsen har påvist følgende:

#### Hybridsvejsning uden spalte:

- Kræver et højt heat-input
- Problematisk at styre rodsiden på svejsningen
- Giver en del porer i svejsningen
- Ingen umiddelbar forøgelse af svejsehastigheden kontra ren lasersvejsning.

#### Hybridsvejsning med spalte:

- Forøger svejsehastigheden 100 – 250%, ved spalter over 0,6mm
- Selv små spalter forøger processens stabilitet og svejsningens rodside
- Ved spalter observeres et markant lavere poreindhold i svejsningerne
- Forbedring af svejsegeometrien

For at opnå fordele af hybridprocessen med Nd-YAG laser og MIG svejsning, skal der være en forholdsvis veldefineret spalte. Er dette opfyldt kan der svejses med signifikant højere svejsehastighed og der opnås en bedre svejsegeometri med mindre forekomst af svejsefejl.

Forsøgene har ligeledes vist at variationer i emnernes temperatur inden svejsestart bør undgås fordi disse har betydning for gennembrændingen.

På grund af processens kompleksitet og forsøgsprogrammets størrelse, bør dette betragtes som en forundersøgelse. F.eks. blev betydningen af MIG-vinklen og trådudstikket ikke undersøgt, ligeledes er der ikke forsøgt svejsning med spalter over 1,0mm, hvilket dog vurderes til at være muligt.

## **8 Litteraturliste**

- [1] Prof. Dr-Ing. U. Dilthey, Dipl.-Ing. A. Wieschemann  
”Prospects by Combining and Coupling Laser Beam and Arc Welding Processes”  
ISF-Welding Institute, Aachen University, Germany

- [2] T. Ishide, M. Nayama, T. Nagashima, G. Takano  
"Hybrid Laser Welding Technique (GTA-YAG coaxial welding)"  
Mitsubishi Heavy Industries Ltd. March 1999
- [3] U. Dilthey, A. Brandenburg, A. Wieschemann  
"Laser-Beam-GMA-Hybrid Welding of Steel and Aluminium"
- [4] Michael M. Andersen, Thomas Aaboe Jensen  
Nd-YAG laser svejsning i aluminium  
SASAK Projekt 3 – Svejsning, Maj 2000
- [5] Jens Klæstrup Kristensen  
Industrial Potential in Laser Welding of Aluminium Alloys  
Proc. of the seminar on Joining of Large Aluminium structures  
Kolding, Denmark (May 2000)