

Dokument: SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0004-02

Beskyttelsesgasser ved MIG- og TIG-svejsning i aluminium

SASAK
Projekt 3 - Svejsning

Carsten Jørn Rasmussen
og
Steen Ussing

FORCE Instituttet, oktober 1999

Sammenfatning

På baggrund af bl.a. et større litteraturstudie samt svejsforsøg udført i forbindelse med SASAK-projektet omhandler denne rapport en generel beskrivelse af beskyttelsegassens anvendelse og betydning i forbindelse med MIG- og TIG-svejsning i aluminium.

Ved MIG- og TIG-svejsning i aluminium er ren argon den mest anvendte beskyttelsegas, der er forholdsvis billig og giver en stabil lysbue. Alternativet til ren argon er som regel at benytte en blanding af argon og helium. Med Helium i beskyttelsegassen i passende mængde opnås en større indtrængning især i bredden. Den større og bredere indtrængning kan være nyttig ved svejsning i større godstykker for at reducere risikoen for manglende indtrængning pga. aluminiums gode evne til at lede varmen væk fra svejsestedet.

Bl.a. på baggrund af resultater fra svejsforsøg i SASAK er det dog eftervist, at man kan komme langt med anvendelse af ren argon mht. tilstrækkelig indtrængning, ganske enkelt ved at øge strømstyrken og svejsehastigheden. Dette er belyst i rapporterne SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0016, -0017 og -0021.

MIG-svejsning af 6 mm kantsømme med meget små mængder nitrogen (< 300 ppm) i beskyttelsegassen, havde ingen mærkbar indflydelse på hverken antallet af porer eller indtrængningen. Under forsøgene blev der heller ikke observeret nogen mærkbar forbedring af lysbuestabiliteten med nitrogen i beskyttelsegassen. Ifølge mange kilder i litteraturen skulle mikroadditiver af nitrogen dog forbedre lysbuestabiliteten.

Indhold:

1	Introduktion	4
2	Svejsning af aluminium	4
3	Gasarter	5
3.1	Argon	6
3.2	Helium	6
3.3	Argon/Helium blandinger	7
3.4	Nitrogen	9
3.5	Oxygen	9
3.6	Mikroadditiver	10
3.7	Valg af gas	10
4	Gasflow	11
4.1	Heliums indflydelse på gasflow	12
4.2	Måling af gasflow	13
5	Undgå porer	14
6	Heliums effekt ved puls-MIG-svejsning af kantsømme i 2 mm AlMg3	15
6.1	Svejsforsøg	16
6.2	Foreløbige resultater	16
7	MIG-svejsning med små mængder nitrogen i beskyttelsesgassen	18
7.1	Svejsforsøg	18
7.2	Resultater	19
7.2.1	Nitrogens indflydelse på porer	19
7.2.2	Nitrogens indflydelse på indtrængning	20
7.2.3	Heliums indflydelse på indtrængning	22
7.3	Konklusion	25

1 Introduktion

Ved svejsning i aluminium er det nødvendigt at beskytte smeltebadet mod den omgivende atmosfæriske luft for bl.a. at undgå gasporer i svejsemetallet. Det er især vigtigt at forhindre tilstedeværelse af hydrogen omkring smeltebadet, da aluminium i smeltet tilstand kan opløse store mængder hydrogen. Derudover har aluminium i smeltet tilstand en høj affinitet til oxygen. Udover at beskytte smeltebadet er beskyttelsesgassens funktion at stabilisere lysbuen samt at medvirke til at fjerne oxidlaget på aluminiumsoverfladen.

De fleste inaktive gasser kan benyttes ved svejsning i aluminium, da de hverken reagerer eller opløses betydeligt i smeltebadet. Gasser som neon, krypton eller xenon kunne anvendes, men det er kun argon og helium som hovedgasser, der af prismæssige årsager er relevante til MIG- og TIG-svejsning.

Der er gennem tiderne undersøgt mange forskellige beskyttelsesgasser og blandinger af disse, og det har vist sig, at beskyttelsesgassens sammensætning har en afgørende indflydelse på svejsekvaliteten. Det gælder især forhold som svejse sømmens indbrændingsprofil, overfladeprofil og overfladetilstand samt lysbuestabiliteten.

På baggrund af forsøg under SASAK-projektet samt et større litteraturstudie omhandler denne rapport en beskrivelse af beskyttelsesgassens anvendelse og betydning i forbindelse med MIG- og TIG-svejsning i aluminium.

2 Svejsning af aluminium

Aluminium og stål har vidt forskellige materialeegenskaber, og derfor er svejseegenskaberne for de to typer materialer ligeledes vidt forskellige. De væsentligste forskelle i forbindelse med svejsning er, dels at aluminium har en smeltetemperatur på ca. 600 °C i forhold til stål's ca. 1.500 °C, og dels at aluminium er betydeligt mere varmeledende end stål. Aluminiums lave smeltepunkt betyder, at smeltebadet generelt bliver større ved svejsning i aluminium, og materialets kraftige varmeledende egenskab kan bl.a. give anledning til manglende indtrængning ved svejsning i større godstykkelser.

Derudover befinder der sig på overfladen af aluminium en oxidhinde med en smeltetemperatur på over 2.000 °C, der kan være vanskelig at gennemtrænge ved svejsning.

Ved lysbuesvejsning fjernes oxidhinden sædvanligvis elektrisk ved at have pluspol på brænderen.

De mest anvendte processer er TIG- og MIG-svejsning, hvor TIG-svejsning typisk anvendes til lidt mindre godstykkelse, eller hvor der kræves en høj svejsekvalitet. MIG-svejsning anvendes som

regel, når godstykkelsen overstiger 4-6 mm, da der kan opnå sveiseshastigheder der er betydelig højere end med TIG-processen, og da indtrængningsegenskaberne ved TIG-svejsning er relativt lille.

Pulseret MIG-svejsning er med tiden blevet mere udbredt, da teknikken har nogle markante fordele bl.a. i form af et stort anvendelsesområde, der begynder fra ca. 1 mm's godstykkelse og op efter. Derudover udmærker puls-teknikken sig ved, at der ofte kan anvendes lavere varmetilførelse samt forholdsvis høje sveiseshastigheder, og endelig er det muligt at opnå en meget stabil proces stort set uden sprøjt.

Ved TIG-svejsning skal beskyttelsesgassen beskytte elektroden mod atmosfæren både under og lige efter svejsning. Uden beskyttelse vil der dannes oxider på elektroden, hvilket vil forringe elektrodens virkemåde og levetid. Hvis der tilsættes tråd ved TIG-svejsning, skal man sørge for at den afsmeltende trådende befinder sig under gasdækningen for at sikre sig mod oxidering af tilsætningsmaterialet [1].

Ved oven-ned svejsning anbefales en brændervinkel på ca. 15° stikkende ofte [1], [19]. Ved høje sveiseshastigheder med både TIG- og MIG-svejsning kan brændervinklen øges op til 30-40° stikkende for at opnå en passende gasdækning af smeltebadet [2].

3 Gasarter

Ved MIG- og TIG-svejsning i aluminium anvendes der normalt kun inaktive gasser, hvor den mest anvendte beskyttelsesgas er ren argon. Normalt er alternativet til ren argon at benytte en blanding af argon og helium. Tilsætning af andre gasarter som eksempelvis oxygen og nitrogen m.fl. med argon som hovedkomponent har været undersøgt gennem tiderne [9], [13], [14], men anvendes kun i mindre omfang i dag. Hydrogen er ikke egnet at tilsætte beskyttelsesgassen ved svejsning i aluminium, da det vil resultere i porer i svejsemetallet. Mikroadditiver af gasarter som nitrogen (N₂), oxygen (O₂), kuldioxid (CO₂) og nitrogenmonoxid (NO) tilsættes under tiden til argon eller argon/helium-blandinger hovedsageligt for at forbedre lysbuestabiliteten [7].

Egenskaberne for nogle af de mest relevante gasarter i forbindelse med MIG- og TIG-svejsning i aluminium er vist i tabel 1.

Egenskaberne for de enkelte gasarter og blandinger af disse i forbindelse med MIG- og TIG-svejsning i aluminium er beskrevet på de efterfølgende sider:

Tabel 3.1: Beskyttelsesgassers specifikke egenskaber ved 0°C og 1,013 bar, (efter EN 439)

Gasart	Kemisk	Massefylde	Varmeled-	Ionisations-	Reaktions-
--------	--------	------------	-----------	--------------	------------

	betegnelse	(luft=1,293) [Kg/m ³]	ningsevne*) [W/m ² K]	energi**) [ev]	forhold ved svejsning
Argon	Ar	1,784	0,016	15,8	Inaktiv
Helium	He	0,178	0,143	24,6	Inaktiv
Oxygen	O ₂	1,429	0,024	13,6	Oxiderende
Nitrogen	N ₂	1,251	0,024	14,5	Reaktionstræg

*) Varmeledningsevnen kan betragtes som beskyttelsesgassens evne til at køle lysbuen, hvilket bl.a. påvirker lysbuens form.

**) Ionisationsenergien er et udtryk for den energi der skal til at omdanne et atom til en ion og en elektron.

3.1 Argon

Argon er en inaktiv en-atomig gas, der udvindes fra atmosfærisk luft, og som nævnt den mest anvendte beskyttelsesgas til både MIG- og TIG-svejsning.

Argon er tungere end luft (se massefylde i tabel 3.1), hvilket er en fordel, når der svejses ovenned, da gassen har en tendens til at blive liggende omkring svejsestedet i modsætning til eksempelvis den lagt lettere gasart helium. Den forholdsvis høje massefylde gør ligeledes argon mindre følsom over for træk.

Som det ligeledes ses af tabel 3.1 er ionisationsenergien lavere for argon end for helium, hvilket ved TIG-svejsning betyder, at lysbuen er lettere at tænde i argon end i helium. Endvidere er argons varmeledningsevne mindre i sammenligning med andre gasser. Argon øger lysbuestabiliteten, hvilket er vigtigt for svejseresultatet, specielt i forbindelse med TIG-svejsning med vekselstrøm. En anden betydelig fordel ved argon er, at den er forholdsvis billig.

MIG-svejsning i aluminium med ren argon (99,995 %) resulterer i et indbrændingsprofil med tendens til ”fingerform”, som det er kendt fra svejsning i stål. Pga. aluminiums høje evne til at lede varmen væk fra svejsestedet, kan der ved MIG- og TIG-svejsning med ren argon være problemer med manglende indtrængning især ved svejsning i større godstykkelser. Specielt skal man være opmærksom på, at det fingerformede indbrændingsprofil ved MIG-svejsning kan give anledning til risiko for bindingsfejl.

3.2 Helium

Helium (He) er som argon en en-atomig inaktiv gas. Helium udvindes fra nogle få forekomster i jorden, hvilket gør gassen 3-4 gange dyre end eksempelvis argon.

Helium er ca. 10 gange lettere end argon og ca. 7 gange lettere end luft, og den vil derfor ved udstrømning af svejsebrænderen stige til vejrs. Derfor anbefales normalt et større gasflow, når helium indgår i beskyttelsesgassen i forhold til svejsning med ren argon, (se afsnittet: "Gasflow").

Heliums ioniseringsenergi er næsten dobbelt så stor som argons og samtidig er varmeledningsevnen ca. 10 gange større end argons. Det betyder i praksis, at ved svejsning med helium i beskyttelsesgassen øges lysbuespændingen for samme strømstyrke i forhold til svejsning med ren argon. Heliums store varmeledningsevne og den øgede svejse-spænding resulterer i en større indtrængning især i bredden.

En ulempe ved anvendelse af helium er, at den forringer lysbuestabiliteten. MIG-svejsning i aluminium med 100 % helium anvendes kun til stumpsømme i meget store godstykkelser, hvor den øgede indtrængning og heliums påvirkning af indtrængningsprofilet evt. kombineret med en højere svejsehastighed kan være en fordel.

Ved TIG-svejsning i aluminium anvendes der normalt vekselstrøm (AC), hvor halvperioderne med plus på brænderen i højere grad benyttes til at fjerne oxidlaget på aluminiumsoverfladen. TIG-svejsning i aluminium med anvendelse af jævnstrøm (DC) og minuspol på brænderen kan i midlertidig anvendes sammen med 100 % helium [4], [8], [19] og [21]. I stedet for elektrisk at fjerne oxidlaget udnyttes den øgede varmetilførelse, der forårsages af heliumgassen, til at bryde oxidlaget. DC TIG-svejsning med helium anvendes ofte ved godstykkelser i størrelsesordenen 3-6 mm, men den kan i visse tilfælde også anvendes i tykkelser på op til 20 - 30 mm [4].

Både MIG- og TIG-svejsning med 100 % helium kræver en ekstrem kort lysbue, og anvendes derfor ofte kun sammen med mekaniseret svejsning [4], [11], [12] og [20]. I Danmark anvendes 100 % helium kun i meget lille omfang.

3.3 Argon/Helium blandinger

En blanding af argon og helium kan anvendes, hvis man ønsker at udnytte begge gassers gode egenskaber som eksempelvis en god lysbuestabilitet og en større indtrængning. Med stigende godstykkelse stiger aluminiums evne til at lede varmen væk fra svejsestedet betydeligt, og dermed øges risikoen for manglende indtrængning og bindingsfejl. En efterhånden almindelig metode til at kompensere for den ringere indtrængning ved MIG- og TIG-svejsning i større godstykkelser, er at tilsætte helium til beskyttelsesgassen. Af samme årsag vil behovet for forvarmning mindskes med stigende andel helium. Et typisk eksempel på heliums indflydelse på svejseparametrene kan ses i tabel 3.2:

Tabel 3.2: Eksempel på svejsedata for Ar/He-blandinger ved MIG-svejsning

Gasblanding	Spænding	Strømstyrke
Ar/He %	[V]	[A]
100/0	25	280
75/25	27	282
50/50	30	285
25/75	34	285

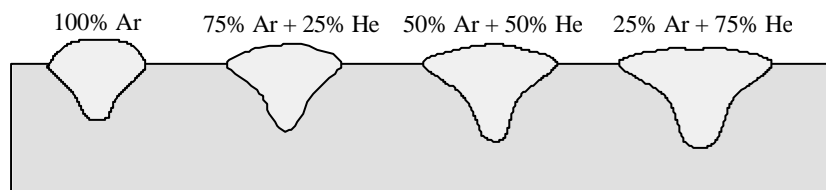
I nedenstående skema er der vist et eksempel på en mulig anvendelse af sammenhørende gasblandinger og godstykkelser ved MIG-svejsning:

Tabel 3.3: Eksempel på en gasleverandørs anbefalede gasblandinger afhængig af godstykkelsen

Gasblanding	Godstykkelse
Ar/He %	[mm]
100/0	1-3
75/25	3-12
50/50	12-20
25/75	20-30

Tabel 3.3 skal ikke tages mere bogstaveligt end, at man også kan svejse med ren argon i eksempelvis godstykkelser på op til 20 mm og sågar derover. FORCE Institutets erfaringer viser, at det er muligt at svejse i store godstykkelser med anvendelse af ren argon ganske enkelt ved at øge varmetilførelsen. Især strømstyrken har indflydelse på indbrændingen [9]. Formålet med at tilsætte helium ved svejsning i godstykkelser ned til 3 mm er som regel, udover at øge indtrængningen, at kunne svejse med større hastighed pga. den større varmetilførelse. Ifølge en amerikansk kilde [11] er det først fordelagtigt at anvende helium eller argon/helium-blandinger, når materialetykkelsen overstiger ca. 12 mm. Ifølge samme kilde er argon/helium-blandinger mere fordelagtige for stumpsømme end for kantsømme.

Ifølge en anden amerikansk kilde [6] anvendes der normalt ren argon i pladetykkelser op til 20 mm. På figur 3.1 ses en skitse af typiske indbrændingsprofiler ved MIG-svejsning i aluminium afhængig af blandingsforhold mellem argon og helium.



Figur 3.1: Typiske indbrændingsprofiler med stigende andel helium ved MIG-svejsning

Med stigende andel af helium i beskyttelsesgassen eksempelvis op til 70–80 %, kan der i højere grad opnås en pæn jævn overgang mellem svejsemetal og grundmateriale, hvilket bl.a. øger mulighederne for at opnå en pæn konkav svejsesøm ved kantsømssvejsning.

Tidligere undersøgelser har vist, at helium i beskyttelsesgassen ligeledes reducerer forekomsten af porer i forhold til svejsning med ren argon [1] og [20]. En af årsagerne er formentlig, at med anvendelse af helium bliver smeltebadet større, hvilket giver gasporerne mere tid til at slippe ud.

Ved anvendelse af helium i beskyttelsesgassen reduceres koncentrationen af sundhedsskadeligt ozon omkring svejsestedet i forhold til svejsning med ren argon. Effekten er størst ved MIG-svejsning, da ozondannelsen ved MIG-svejsning i aluminium er markant større end ved AC-TIG-svejsning i aluminium. Dertil skal nævnes, at ozonkoncentrationerne ved MIG-svejsning i aluminium normalt er så høje, at der under alle omstændigheder kræves anvendelse af friskluftsmaske.

Som nævnt under beskrivelsen af helium er det muligt, at udføre mekaniseret DC-TIG-svejsning i aluminium med minuspol på brænderen sammen med 100 % helium. En tysk undersøgelse [10] angiver, at det er muligt at udføre manuel DC-TIG-svejsning med minuspol på brænderen med mindst 85 % helium i beskyttelsesgassen. Denne teknik skulle resultere i en større svejsehastighed og større indbrænding, hvilket eksempelvis ved reparationsarbejde i større godstykker, kan mindske behovet for forvarmning. Teknikken kræver en grundig oprensning af oxidlaget evt. med rustfri stålborste umiddelbart før svejsning.

3.4 Nitrogen

Undersøgelser tilbage i tiden [14] har vist, at med 5-10 % nitrogen sammen med argon forsvinder den fingerformede indtrængning, og der opnås i stedet en mere bred og dyb og dermed mere gunstig indtrængning. Ligeledes resulterer nitrogen i beskyttelsesgassen i en øget kornforfining, hvilket giver en forstærket struktur i svejsemetallet. Ulempen ved anvendelse af nitrogen ved svejsning i aluminium er, at der fås en brunlig overflade, og derudover at der dannes nitrider i svejsemetallet, hvilket forringer de mekaniske egenskaber. Derfor er anvendelsen af 5-10 % nitrogen i beskyttelsesgassen yderst begrænset i dag.

3.5 Oxygen

Tidligere undersøgelser har vist, at med anvendelse af op til 5 % oxygen (O_2) sammen med argon kan indtrængningsprofilen ændres til en mere eftertragtet rund og dybere indtrængning. Ligeledes reduceres forekomsten af gasporer med anvendelsen af O_2 . Med anvendelse af ned til kun 1 % O_2 i argon kan ovennævnte fordele opnås. Ulempen ved anvendelsen af O_2 er, at der forekommer indeslutninger af oxider i svejsemetallet, og at der fås en oxideret, rynket og brun overflade. Den mørke overflade kan ikke altid børstes ren, og kan derfor ofte ikke accepteres. O_2 indhold på over 1 % har vist sig at være ugunstig pga. oxidindeslutningerne.

På FORCE Instituttet er der tidligere foretaget en undersøgelse [9] af svejsning af kantsømme i 3, 5, 8 og 12 mm AlMg3 plader med dels 0,9 % O₂ og dels ren argon. Undersøgelsen viste, at ved svejsninger med O₂ er det i højere grad muligt at svejse manuelt, da man i højere grad kan svejse langsommere (under 500 mm/min) uden rodfejl. Med ren argon var det tilgængeligt muligt at svejse betydeligt hurtigere. Med 0,9 % oxygen i gassen blev overfladen af svejsningerne oxideret, rynket og brune, og de kunne ofte ikke børstes rene.

3.6 Mikroadditiver

Additiver af gasarter som nitrogen (N₂), oxygen (O₂), kuldioxid (CO₂) og nitrogenmonooxid (NO) i meget små mængder sammen med enten ren argon eller argon/helium-blandinger har vist sig at have en positiv indflydelse på især lysbuestabiliteten [7], [8], [22], [24]. Af eksempler på mikroadditiver af sådanne gasser, kan nævnes 0,03 % O₂ eller 0,015% N₂ eller 0,03 NO.

Ved tilsætning af små mængder NO kan forekomsten af sundhedsskadelig ozon fra svejseprocessen ligeledes reduceres omkring svejsezonen.

Ifølge en undersøgelse fra 1997 [7] har mikroadditiver af O₂ og N₂ ikke indflydelse på hverken porerforekomster eller indtrængningen, men bidrager kun til at forbedre lysbuestabiliteten. Disse resultater er i modstrid med andre undersøgelser [22], [24], hvor resultatet var, at 150 ppm nitrogen tilsat beskyttelsesgassen reducerer poreforekomster betydeligt og samtidig opnås bedre indtrængning, mere stabil lysbue og forbedrede materialeegenskaber både ved TIG- og MIG-svejsning. Bl.a. på baggrund af disse modstridende oplysninger er der i forbindelse med SASAK-projektet foretaget en undersøgelse af MIG-svejsning med små mængder nitrogen tilsat beskyttelsesgassen, se afsnittet: ”MIG-svejsning med små mængder nitrogen i beskyttelsesgassen”.

3.7 Valg af gas

Valget af gastype ved lysbuesvejsning i aluminium står typisk mellem ren argon eller en argon/helium-blanding.

Man bør anvende en argon/helium blanding, hvis der svejses i større godstykker (over 5 – 8 mm) og specielt hvis det kombineres med manuel svejsning.

De primære fordele ved helium i beskyttelsesgassen er, at indtrængning bliver større (især i bredden, hvilket er godt ved kantsømssvejsning til at undgå bindingsfejl), svejsehastigheden kan typisk øges og overgangen mellem svejsemetal og grundmateriale bliver mere glat

To ulemper ved tilsætning af helium er, at stabiliteten af lysbuen bliver forringet, og at argon/helium blandinger typisk er 3-4 gange dyrere end ren argon. Dertil kommer, at heliums massefylde er ca. en

tiendedel af argons, og derfor anvendes der normalt et større gasflow med helium i gassen, hvilket selvfølgelig er med til at fordyrer anvendelsen af helium, (se evt. under afsnittet ”Gasflow”).

Det er dog ved svejseforsøg i SASAK eftervist, at man kan komme langt med anvendelse af ren argon mht. tilstrækkelig indtrængning, ganske enkelt ved at øge strømstyrken og svejsehastigheden. Dette er belyst i rapportererne SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0016, -0017 og -0021. De nødvendige (høje) svejsehastigheder vil dog i lidt større tykkelser (over 5-8 mm) typisk betyde, at fremføringen skal være mekaniseret. Man er over hastighedsområdet, som er realistisk at arbejde med manuelt.

Vedrørende økonomiske betragtninger henvises til SASAK-rapporten: SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0025-01.

4 Gasflow

Et passende gasflow afhænger af en række forhold som eksempelvis beskyttelsesgassens massefylde, luftstrømninger i værkstedet, afstand fra gaskop til plade, diameter af gaskop, spænding/strømstyrke, svejsehastighed, svejsestilling m.m.

En beskyttelsesgas med lav massefylde påvirkes nemmere af luftstrømninger i værkstedsluften, og har større tendens til at stige tilvejs. Derfor bør der anvendes et større gasflow ved anvendelse af en beskyttelsesgas med lav massefylde.

Den omgivende luftstrømningshastighed i værkstedet har afgørende indflydelse på beskyttelsesgassens dækning af smeltebadet. Jo større luftstrømningshastigheden omkring svejsestedet er jo større bør gasflowet være evt. kombineret med en større gaskop, for derved at sikre at gassen når ned og dækker smeltebadet. En anden vigtig faktor er afstanden mellem gaskop og plade. Jo større afstanden er jo større bør gasflowet være.

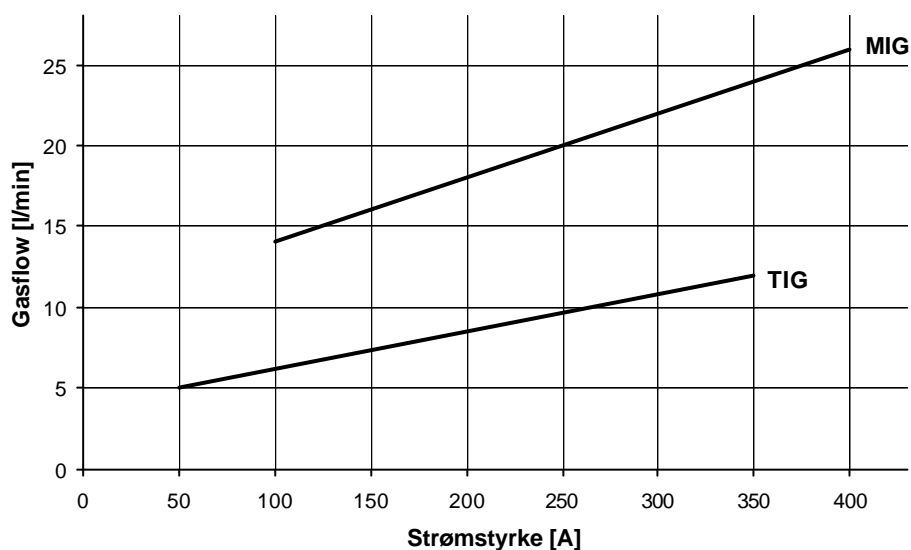
Gasudstrømningens form afhænger i høj grad af gasflowet og gaskoppens diameter. Et højt gasflow kombineret med en lille gaskop-diameter kan give anledning til turbolente gasstrømninger, og dermed forøge risikoen for indtrængning af luft til lysbuen [3].

I forbindelse med TIG-svejsning kan der anvendes gaslinser, der udover at øge afstanden mellem gaskoppen og svejsestedet kan sørge for et jævnt gasflow [1]. Med anvendelse af gaslinser kan gasflowet ofte reduceres betydeligt [12].

Med stigende spænding/strømstyrke vil størrelsen af smeltebadet stige, og dermed vil der være behov for at dække et større område, hvilket kan løses med et større gasflow evt. kombineret med

en gaskop med en større diameter. Det samme gælder ved høje svejsehastigheder, der giver mere aflange smeltebade, og dermed stiller krav til gasdækning af et større område.

Typisk anvendte gasflows som funktion af strømstyrke ved MIG og TIG-svejsning i aluminium med ren argon kan aflæses på figur 5.1. De anviste gasflows er som regel tilstrækkelige til at modstå en luftstrømningshastighed i værkstedet på 10 cm/sek. Hvis luftstrømningshastigheden vurderes til at være mindre kan et mindre gasflow anvendes.



Figur 4.1: Typisk anvendte gasflows afhængig af strømstyrke ved TIG- og MIG-svejsning i aluminium med ren argon.

Efter en TIG-svejsnings afslutning er det vigtigt at opretholde gasflowet i tilstrækkelig tid, for at køle elektroden ned indtil den ikke er i en reaktiv tilstand. En sådan gasefterstrømning anbefales at vare mellem 8 og 25 sekunder afhængig af strømstyrken [23]. Ligeledes bør beskyttelsesgassen strømme gennem slangesystemet i et stykke tid før en svejsning påbegyndes, (5 sekunder ifølge [12]), for at fjerne evt. luft i slangesystemet og omkring svejsestedet. Hvis svejseudstyret ikke har været brugt i længere tid eksempelvis om morgenen, bør slangesystemet skylles ekstra godt i gennem med gas før svejsning for bl.a. at fjerne fugt i slangesystemet.

4.1 Heliums indflydelse på gasflow

Helium er ca. 10 gange lettere end argon og ca. 7 gange lettere end luft, og derfor anbefales normalt et større gasflow, når helium indgår i beskyttelsesgassen i forhold til svejsning med ren argon. I tabel 4.1 ses retningslinier for gasflow ved MIG-svejsning afhængig af heliumindholdet i beskyttelsesgassen.

Tabel 4.1: Anbefalede gasflows ved MIG-svejsning afhængig af gasblanding

Gasblanding Ar/He %	Gasflow [l/min]
100/0	18
75/25	20
50/50	23
25/75	30
0/100	40

En tommelfingerregel siger, at når der skiftes fra 100 % argon til 100 % helium bør gasflowet fordobles [8].

4.2 Måling af gasflow

Ved måling af gasflow skal man være opmærksom på, at hvis der anvendes et flowmeter, der er kalibreret efter 100 % argon, da vil man med en argon/helium-blanding gennem samme flowmeter aflæse et gasflow, der er betydeligt mindre end det effektive, hvilket skyldes heliums lavere massefylde. I tabel 4.2 er der vist korrektionsfaktorer, der skal ganges med det aflæste gasflow på et argonkalibreret flowmeter for at få det effektive gasflow for en given Argon/helium-blanding.

Tabel 4.2: Korrektionsfaktorer afhængig af gassammensætning [3]. Korrektionsfaktoren ganges med det gasflow, der er aflæst på et argon-kalibreret flowmeter.

Gasblanding Ar/He %	Korrektions- Faktor
100/0	1,0
70/30	1,2
50/50	1,4
30/70	1,6
0/100	3,0

Hvis man eksempelvis for en blandingsgas bestående af 30% argon og 70% helium aflæser et gasflow på 18 l/min på et argon-kalibreret flowmeter, så vil man reelt have et gasflow på ca.

$(1,6 \cdot 18) \text{ l/min} = 29 \text{ l/min}$. Tilfældigvis passer dette gasflow godt overens med det anbefalede gasflow for den pågældende gasblanding, se tabel 4.1.

Hvis der anvendes en argon/helium-blanding kan man i mange tilfælde indstille sit gasflow, som om der anvendes 100% argon. Behovet for et større gasflow pga. heliums lavere massefylde opvejes i høj grad af, at når helium er tilsat beskyttelsesgassen, vil det reelle gasflow være større, end det der aflæses på et argonkalibreret flowmeter.

5 Undgå porer

Hovedårsagen til porer i aluminiumssvejsninger er tilstedeværelse af hydrogen i smeltebadet.

Aluminium ved smeltetemperaturen har en meget højere opløselighed af hydrogen end eksempelvis stål. Omkring aluminiums smeltetemperatur (ca. 600°C) stiger opløseligheden af hydrogen i aluminium 20 gange fra størknet tilstand til smeltet tilstand. Med stigende temperatur over smeltepunktet stiger opløseligheden af hydrogen i aluminium meget kraftigt. Under svejsning kan temperaturen lige under lysbuen være 2000°C , og eksempelvis ved 1900°C kan aluminium opløse 50 ml hydrogen pr. 100 g, hvilket er en opløselighed der er ca. 70 gange mere end opløseligheden ved aluminiums smeltetemperatur [2].

Derfor skal der kun små mængder hydrogen til at danne porer i aluminium, hvorimod tilsvarende små mængder hydrogen i stål ofte ikke danner porer. Ved svejsning i aluminium stilles der derfor højere krav til gassens renhed og til en effektiv beskyttelse af smeltebadet.

Hydrogenen stammer typisk fra følgende kilder [18]:

- 1) Hydrogenholdig forurening eller fugt på overfladen af tilsatsmateriale eller grundmateriale.
- 2) Hydrogen i tilsætnings- og grundmateriale.
- 3) Hydrogen eller fugt i beskyttelsesgassen
- 4) Hydrogen eller fugt i luft der trænger ind i lysbuen af forskellige grunde.

I forbindelse med punkt 3 og 4 er beskyttelsesgassens renhed omkring lysbuen og smeltebadet af afgørende betydning. Til svejseformål leveres argon og helium som regel med en renhed på mindst 99,95 %. Det er vigtigt at undgå, at beskyttelsesgassen forurenes i forbindelse med dens fremføring fra gasflasken ud igennem samlinger og slanger, videre ud af gaskoppens munding for til sidst at dække lysbuen og smeltebadet.

I den forbindelse skal man være opmærksom på følgende mulige forureningskilder:

- Utætheder

Med hensyn til samlinger i fremføringssystemet må der ikke forekomme utætheder, hvor luft og dermed fugt kan trænge ind i beskyttelsesgassen. Hvis brænderen er vandkølet kan utætheder i kølesystemet være årsag til at fugt tilføres beskyttelsesgassen.

- Kondens

Hvis brænderen er vandkølet kan der dannes kondens inde i brænderen. Kan afhjælpes ved at slukke vandkølingen efter svejsning.

- Slangekvalitet

Gasslangens kvalitet og alder kan ligeledes have en afgørende indflydelse. Gennem visse slangematerialer kan der, forårsaget af forskellige partialtryk inde i slangen, forekomme diffusion af luft og dermed fugt ind i slangen, selv med et generelt overtryk inde i slangen.

I to undersøgelser fra 1988 [15] og [16] frarådes det i den forbindelse at anvende slangemateriale af polyethen og gummi. Det anbefales i stedet at anvende enten polyvinyl chlorid (PVC) eller polytetrafluoroethen (PTFE). Den bedste løsning er at anvende rør af rustfrit stål, hvor det er muligt.

- Turbolent gasstrømning

Det er vigtigt, at der anvendes et passende gasflow gennem en gaskop med en passende diameter og med en passende vinkel (brændervinkel). Turbolente gasstrømninger kan give anledning til at luft slipper ind til lysbuen og smeltebadet med porerindeslutninger i svejsemetallet som resultat.

- Forurening i gaskop

Forurening der sætter sig i gaskoppen kan give anledning til dårlig gasdækning.

- Ustabil lysbue

En ustabil lysbue pga. af uhensigtsmæssige svejseparametre kan ligeledes forstyrre gasdækningen.

- Træk

En anden årsag til mangelfuld gasdækning kan være luftstrømninger (træk) i svejseværkstedet. Læskærme kan evt. afhjælpe dette.

6 Heliums effekt ved puls-MIG-svejsning af kantsømme i 2 mm AlMg3

I forbindelse med SASAK projektet er der på FORCE Instituttet foretaget indledende svejseforsøg, hvor bl.a. heliums indflydelse på svejsehastigheden er undersøgt ved puls MIG-svejsning af kantsømme i legeringen AlMg3 med pladetykkelsen 2 mm. De foreløbige resultater fra disse undersøgelser, der endnu ikke er afsluttet, er beskrevet nedenfor.

6.1 Svejseforsøg

Svejseforsøgene blev udført som puls-MIG-svejsninger af kantsømme i aluminiumslegeringen AlMg3 (5754) i godstykkelsen 2 mm. Som tilsatsmateriale blev der anvendt en Ø1,2 mm AlMg5-tråd. Som beskyttelsesgas blev der anvendt dels ren argon og dels en blandingsgas bestående af 30% argon og 70% helium. For begge gastyper blev den maksimale svejsehastighed undersøgt ved svejsning af et a-mål på 2-2,5 mm.

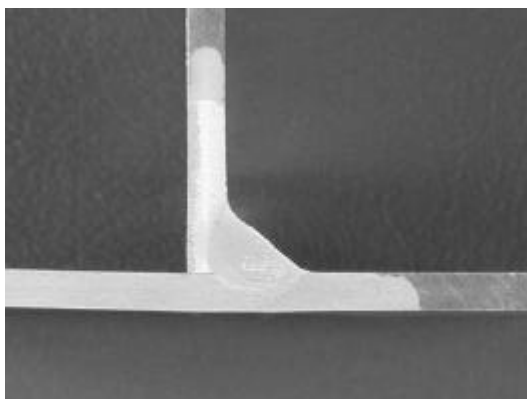
6.2 Foreløbige resultater

Resultatet var, at der for den konkrete svejseopgave ikke er nogen betydelig forskel i opnåede svejsehastigheder mellem anvendelse af ren argon og blandingsgassen bestående af 30% argon og 70% helium. For begge gasser blev der opnåede maksimale svejsehastigheder på 3 – 3,5 m/min. Med så store svejsehastigheder var der tendens til, at overfladen af svejsningerne oxiderede og blev brune, hvilket formentlig skyldes manglende gasdækning pga. de høje svejsehastigheder. Tendensen til brune overflader kunne reduceres ved at svejse mere stikkende. Ved svejsning med høje svejsehastigheder blev der derfor svejst med en ca. 30° stikkende brændervinkel.

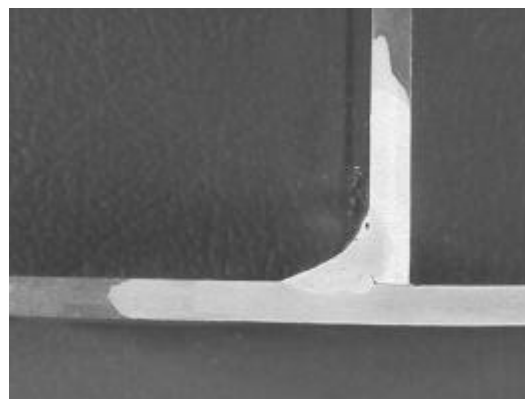
På figurerne 6.1 til 6.6 er der vist makroslib af svejsninger med høj hastighed med anvendelse af dels 100 % Ar (venstre fotos) og dels 30% Ar + 70% He (højre fotos).

Som det kan ses af slibene, er det ved for de konkrete svejsninger i højere grad et spørgsmål om at tilpasse især spænding og strømstyrke i forhold til, om der svejses med 100% Ar eller 30%Ar+70% He.

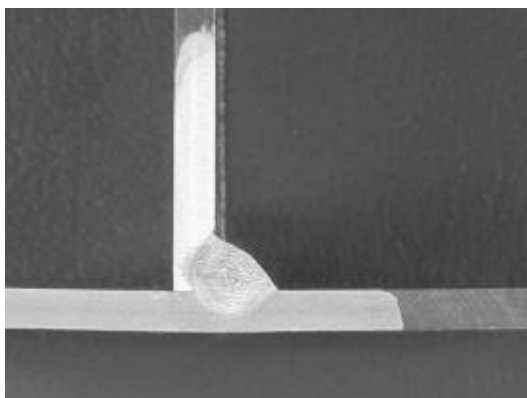
Eksempelvis burde strømstyrken ved svejsningen vist på figur 6.1, hvor der er anvendt 30% Ar + 70% He, have været større for at opnå en større indtrængning.



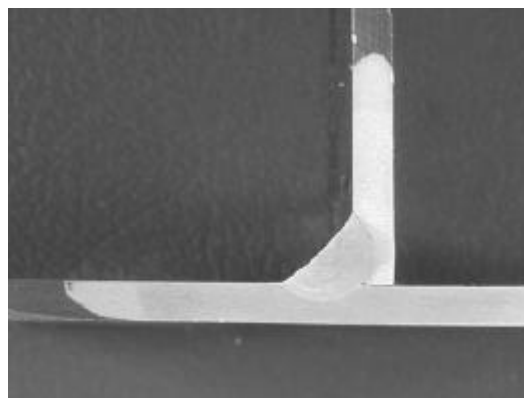
Figur 6.2: Puls-MIG i 2 mm AlMg3, gas = 100% Ar, svejsehast. = 2 m/min, strøm. = 183 A, spænding = 19,3 V



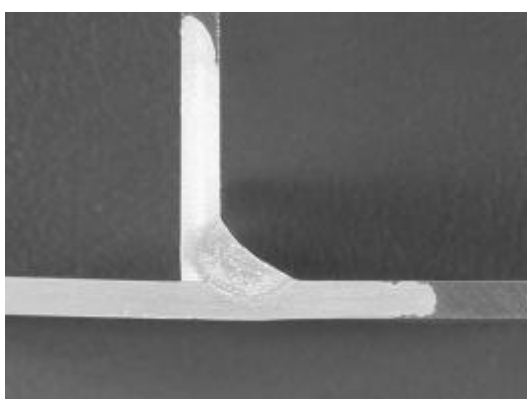
Figur 6.1: Puls-MIG i 2 mm AlMg3, gas = 30% Ar + 70% He, svejsehast. = 2 m/min, strøm. = 146 A, spænding = 21,1 V



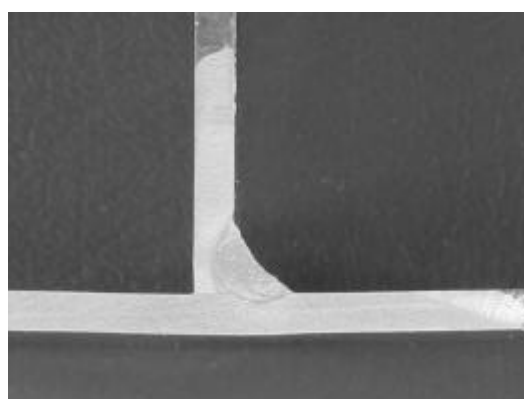
Figur 6.4: Puls-MIG i 2 mm AlMg3, gas = 100% Ar, svejsehast. = 2,5 m/min, strøm. = 187 A, spænding = 18,4 V



Figur 6.3: Puls-MIG i 2 mm AlMg3, gas = 30% Ar+70% He, svejsehast. = 2,5 m/min, strøm. = 170 A, spænding = 21,3 V



Figur 6.6: Puls-MIG i 2 mm AlMg3, gas = 100% Ar, svejsehast. = 3 m/min, strøm. = 201 A, spænding = 19,4 V



Figur 6.5: Puls-MIG i 2 mm AlMg3, gas = 30% Ar+70% He, svejsehast. = 3 m/min, strøm. = 185 A, spænding = 20,6 V

Det skal nævnes at ved svejsning med en svejsehastighed på 3 m/min er tolerancerne forholdsvis små, hvilket betyder, at der stilles store krav til forhold som ensartet fugetilpasning, præcis brænderføring, ensartet opstilling m.m. Under mange produktionsforhold vil en maksimal svejsehastighed på 2-2,5 m/min for den pågældende svejseopgave formentlig være mere realistisk at kunne opnå.

I kommende undersøgelser under SASAK skal svejsehastigheder og indbrændinger ved svejsning af 3, 5, 8 og evt. 12 mm kantsømme for de to nævnte gastyper bl.a. undersøges, og det forventes at tilsætning af helium i beskyttelsesgassen vil få en større indflydelse på svejsehastigheder og indbrændinger i disse større godstykker.

7 MIG-svejsning med små mængder nitrogen i beskyttelsesgassen

Som nævnt tidligere er der i litteraturen modstridende oplysninger om små mængder nitrogen tilsat beskyttelsesgassen har indflydelse på svejseresultatet. I forbindelse med SASAK-projektet er der derfor på FORCE Institutet blevet udført en større undersøgelse af, hvilken påvirkning små mængder nitrogen i beskyttelsesgassen har på forhold som porerforekomster i svejsemetallet og indbrændingsprofil ved MIG-svejsning.

7.1 Svejsforsøg

Der blev udført MIG-svejsning af kantsømme med a-mål ca. 4,5 mm i 6 mm plader af legeringen AlMg4,5Mn (5083). Forsøgsemnerne blev ophæftet til L-profiler, der var 100 mm brede, 100 mm høje og 1000 mm lange.

På hvert forsøgsemne blev der svejst 3 gange 200 mm med 100 mm mellemrum. På den måde blev hvert svejsforsøg gentaget 3 gange, hvilket blev gjort af hensyn til gentagelsesunøjagtigheder. Svejsforsøgene blev udført på en langsømsautomat med anvendelse af en konventionel luftkølet MIG-brænder. Som tilsatsmateriale blev der anvendt en Ø1,2 mm tråd ligeledes med legeringen AlMg4,5Mn.

Der er eksperimenteret med tilsætning af mikroadditiver af nitrogen i mængder på 0, 100, 150 og 300 ppm tilsat to forskellige hovedgasser bestående af dels ren argon og dels 30% argon + 70 % helium. Forsøgene er udført både med og uden pulsering af svejsestrømmen, hvor svejseparametrene i begge tilfælde er varieret på to forskellige niveauer. I alt er der udført 32 forskellige svejsforsøg, hvor hvert forsøg som nævnt blev gentaget 3 gange. I bilag A er der vist en skematisk oversigt over svejsforsøgene.

Der blev foretaget røntgenfilm af alle svejsningerne for bl.a. at kunne studere poreforekomster. Det samlede antal porer over 0,5 mm for hvert forsøg, (dvs. det samlede antal porer over en længde på 3 gange 200 mm), er optalt og vist i skemaet bilag A. Antallet af porer inden for de første 10 mm svejsning er ligeledes vist i skemaet bilag A.

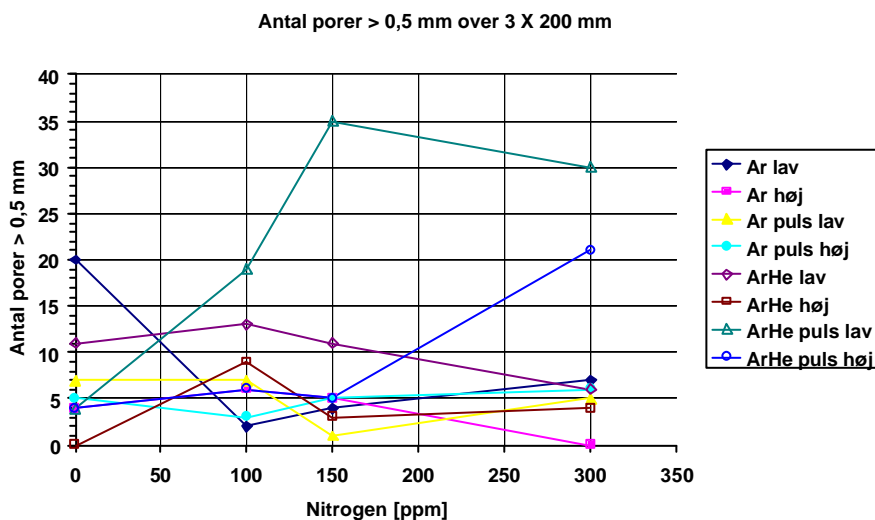
Derudover blev der foretaget makroslib af udvalgte svejseforsøg for at kunne studere indbrændingsprofiler.

7.2 Resultater

Generelt var der kun få porer i svejsningerne, og som regel var de relative små. Tilsætning af små mængder nitrogen til beskyttelsesgassen havde generelt ikke nogen mærkbar indflydelse på antallet af porer. Ligeledes havde nitrogenindholdet heller ikke nogen mærkbar indflydelse på indtrængningsprofilen. Helium har derimod en effekt på indtrængningen, der som ventet bliver større. Nedenfor er resultaterne behandlet mere indgående.

7.2.1 Nitrogens indflydelse på porer

På figur 7.1 er antallet af porer større end 0,5 mm over en længde på 3 gange 200 mm vist som funktion af nitrogenindholdet i beskyttelsesgassen. Grafen viser 8 kurver, én for hver kombination af svejseparametre, se evt. bilag A.

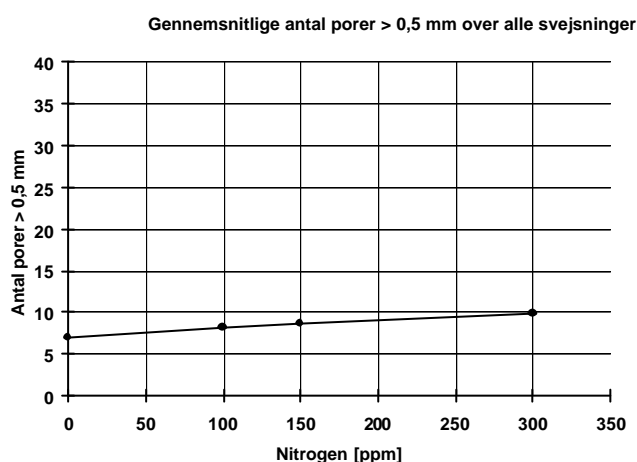


Figur 7.1 Nitrogens indflydelse på antallet af porer > 0,5 mm under 8 forskellige svejseforhold

Af figur 7.1 kan der ikke uddrages nogen generel sammenhæng mellem nitrogenindholdet og antallet af porer. Der er flest porer i det tilfælde hvor der svejses med pulseret MIG-svejsning med 30% Ar

+ 70% He som beskyttelsesgas, og i særdeleshed i det tilfælde, hvor der svejses med "lave" svejseparametre. Årsagen til de relative mange porer i dette ene forsøg findes der ingen umiddelbare forklaring på. En årsag kan være at der er valgt uhensigtsmæssige svejseparametre, hvilket har givet anledning til en mere ustabil lysbue og dermed flere porer.

På figur 7.2 er der vist et gennemsnit af antallet af porer for alle svejseforsøgene. Som det ses af figuren er det gennemsnitlige antal af porer så godt som uafhængig af nitrogenindholdet. Den svage stigning i antallet af porer skyldes i høj grad forsøget hvor der svejses med pulsering og 30% Ar + 70% He med lave svejseparametre.



Figur 7.2: Gennemsnitlig antal porer under 8 forskellige svejseforhold.

Nitrogenindholdet i beskyttelsesgassen havde heller ikke indflydelse på antallet af porer indenfor de 10 første mm svejsning.

7.2.2 Nitrogens indflydelse på indtrængning

Nitrogens indflydelse på indtrængningsprofilet blev undersøgt ved at foretage makroslib af udvalgte svejsninger fra forsøgsserien vist i bilag A.

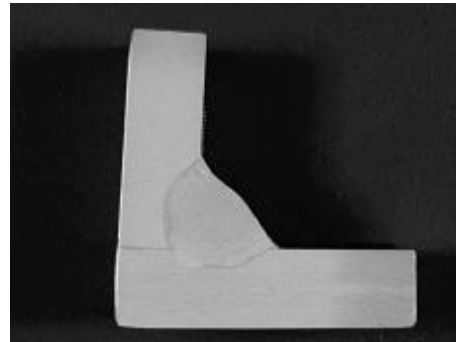
På figur 7.3 er der vist makroslib af MIG-svejsninger uden pulsering, med ren argon og med nitrogen tilsat beskyttelsesgassen i mængder på 0, 100, 150 og 300 ppm svarende til forsøg 1, 2, 3 og 4 i bilag A.

Som det ses af makroslibene har nitrogen ingen mærkbar indflydelse på indtrængningen.

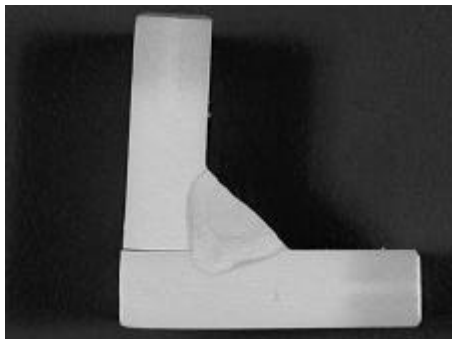
Indtrængningen variere en lille smule, hvilket afhænger af hvor snittet til makroslibet foretages i svejseømmens længderetning.



Forsøg 1, 0 ppm N₂



Forsøg 2, 100 ppm N₂



Forsøg 3, 150 ppm N₂

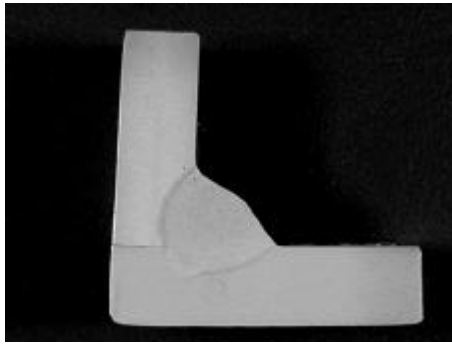


Forsøg 4, 300 ppm N₂

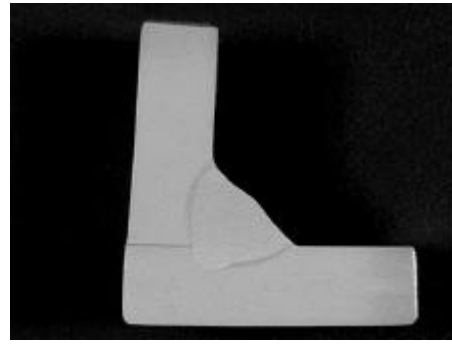
Figur 7.3: Ovenstående 4 fotos viser makroslib af MIG-svejsninger i 6 mm plader af legeringen AlMg_{4,5}Mn med tilsætning af hhv. 0, 100, 150 og 300 ppm nitrogen i beskyttelsesgassen. Svejsningerne er udført uden pulsering, med ren argon som beskyttelsesgas og med konstante svejseparametre: Strøm ca. 200 A, Spænding ca. 21,5 V, Sv.hast. ca. 550 mm/min, Varmetilf. ca. 0,46 kJ/min. Se hhv. forsøg 1, 2, 3 og 4 i bilag A for mere detaljerede svejsedata.

På figur 7.4 er der vist 4 tilsvarende makroslib med anvendelse af MIG-svejsning med ren argon som beskyttelsesgas, med den eneste forskel at der anvendes pulserende svejseparametre.

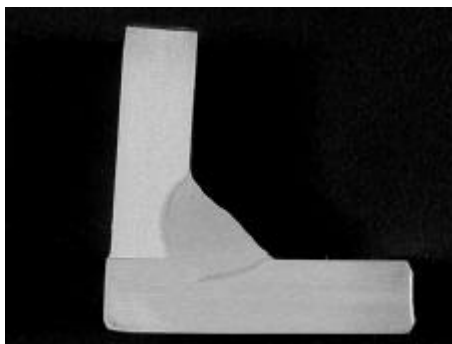
Som det ses af makroslibene på figur 7.4 har nitrogenindholdet heller ingen betydning for indbrændingen, når der anvendes pulserende MIG-svejsning.



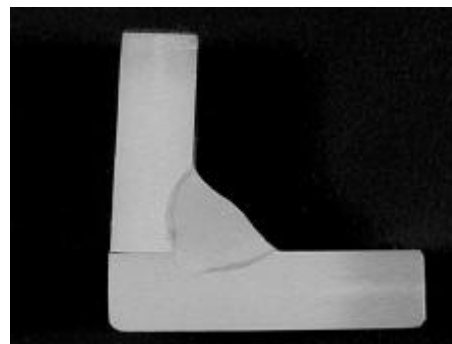
Forsøg 9, 0 ppm N₂



Forsøg 10, 100 ppm N₂



Forsøg 11, 150 ppm N₂



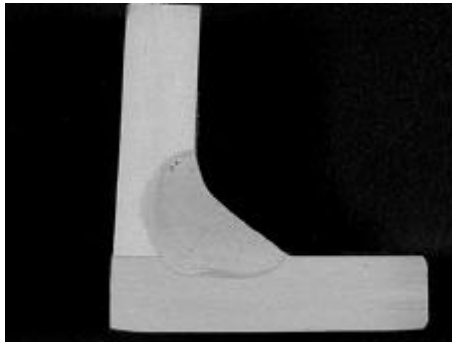
Forsøg 12, 300 ppm N₂

Figur 7.4: Ovenstående 4 fotos viser makroslib af MIG-svejsninger i 6 mm plader af legeringen AlMg_{4,5}Mn med tilsætning af hhv. 0, 100, 150 og 300 ppm nitrogen i beskyttelsesgassen. Svejsningerne er udført med pulsering, med ren argon som beskyttelsesgas og med konstante svejseparametre: Strøm ca. 200 A, Spænding ca. 21,5 V, Sv.hast. ca. 550 mm/min, Varmetilf. ca. 0,47 kJ/min. Se hhv. forsøg 9, 10, 11 og 12 i bilag A for mere detaljerede svejsedata.

For den konkrete svejseopgave ses det i øvrigt ved sammenligning af figur 7.3 og figur 7.4, at det ikke har nogen mærkbar betydning for indtrængningsprofilet, om der svejses med eller uden pulsteknikken.

7.2.3 Heliums indflydelse på indtrængning

På figur 7.5 er der vist makroslib af forsøgene 17, 18, 19 og 20, hvor der blev svejst med henholdsvis 0, 100, 150 og 300 ppm nitrogen tilsat en beskyttelsesgas, der som hovedkomponenter bestod af 30% Ar + 70% He.



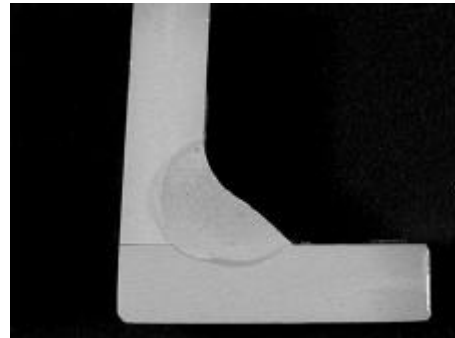
Forsøg 17, 0 ppm N₂



Forsøg 18, 100 ppm N₂



Forsøg 19, 150 ppm N₂



Forsøg 20, 300 ppm N₂

Figur 7.5: Ovenstående 4 fotos viser makroslib af MIG-svejsninger i 6 mm plader af legeringen AlMg4,5Mn med tilsætning af hhv. 0, 100, 150 og 300 ppm nitrogen i beskyttelsesgassen. Svejsningerne er udført uden pulsering, med 30% Ar + 70% He som beskyttelsesgas og med konstante svejseparametre: Strøm ca. 200 A, Spænding ca. 25,7 V, Sv.hast. ca. 550 mm/min, Varmetilf. ca. 0,56 kJ/min. Se hhv. forsøg 17, 18, 19 og 20 i bilag A for mere detaljerede svejsedata.

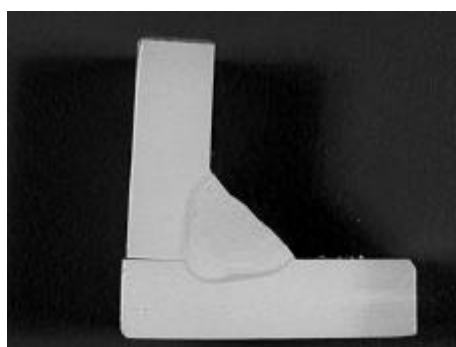
Som det ses på figur 7.5 har små tilsætninger af nitrogen heller ikke indflydelse på indtrængningsprofilen ved anvendelse af gasblandingen 30% Ar + 70% He.

Forsøg 17, 18, 19 og 20 (se figur 7.5), hvor der er anvendt 30% Ar + 70% He, kan sammenlignes med forsøg 1, 2, 3 og 4 (se figur 7.3), hvor der er anvendt 100% Ar. Den eneste forskel mht. svejseparametrene er, at med anvendelse af 30% + 70% He er svejse-spændingen øget med ca. 4 volt, hvilket svarer til en forøgelse af varmetilførelsen på ca. 20%. Den øgede svejse-spænding skyldes dels heliums højere ioniseringsenergi og dels heliums højere varmeledningsevne i forhold til argon, se evt. afsnit 3.2.

Ved sammenligning af figur 7.3 og 7.5 ses, at med 70% helium i beskyttelsesgassen opnås en større indtrængning især i bredden.

Ved en samlet betragtning af svejsforsøgene, hvor der er anvendt strømstyrker i området 170 til 250 A, har det ved at skifte fra ren Ar til 30% Ar + 70% He for samme strømstyrke betydet en forøgelse af svejsspændingen på et sted mellem 2 og 4 volt, hvilket svarer til en forøgelse af varmetilførelsen på ca. 10 – 20 %.

På nedenstående figur 7.6 ses en sammenligning af forsøg 1, 17 og 5.



Forsøg 1

MIG uden puls i 6 mm AlMg4,5Mn

Gas = 100% Ar

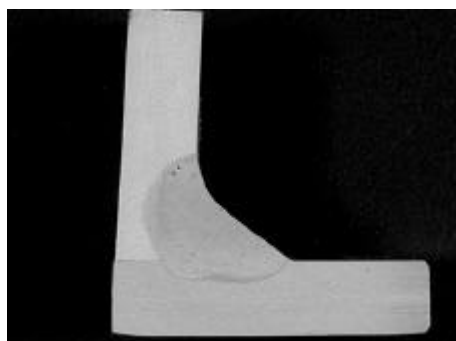
Strøm = 198 A

Tråd hast. = 11,5 m/min

Spænding = 21,5 V

Sv.hast. = 550 mm/min

Varmetilf. = 0,46 kJ/mm



Forsøg 17

MIG uden puls i 6 mm AlMg4,5Mn

Gas = 30% Ar + 70% He

Strøm = 204 A

Tråd hast. = 11,4 m/min

Spænding = 25,8 V

Sv.hast. = 550 mm/min

Varmetilf. = 0,57 kJ/mm



Forsøg 5

MIG uden puls i 6 mm AlMg4,5Mn

Gas = 100% Ar

Strøm = 240 A

Tråd hast. = 13,3 m/min

Spænding = 24,3 V

Sv.hast. = 650 mm/min

Varmetilf. = 0,54 kJ/mm

Figur 7.6: Sammenligning af indbrændingsprofiler mellem forsøg 1, 17 og 5.

Ved sammenligning af forsøg 1 og forsøg 17 på figur 7.6 ses som tidligere nævnt, at indtrængningen øges for samme strømstyrke ved at anvende 30% Ar + 70% He i stedet for 100% Ar.

I forsøg 5 er svejseparametrene øget i forhold til forsøg 1. I begge tilfælde er der anvendt 100% argon. Varmetilførelsen er bl.a. øget med ca. 17 % og svejsehastigheden er øget med ca. 18 %. På figur 7.6 ses, at indtrængningen ved forsøg 5 er væsentlig større end ved forsøg 1, hvilket skyldes den øgede varmetilførelse og den øgede svejsehastighed.

Ved sammenligning af forsøg 17 og forsøg 5 på figur 7.6, hvor der er anvendt hhv. 30% Ar + 70% He og 100% Ar, og hvor varmetilførelsen er nogenlunde ens i begge forsøg, ses det, at der i begge tilfælde opnås en god bred og dyb indtrængning.

Ved en samlet betragtning af forsøg 1, 17 og 5 på figur 7.6 ses, at ved at øge strømstyrken og svejsehastigheden ved svejsning med 100% Ar, var det muligt at øge indtrængningen til et niveau, der svarer til at skifte til en blandingsgas bestående af 30% Ar + 70% He.

7.3 Konklusion

Ifølge resultaterne i denne undersøgelse, har nitrogen i koncentrationer på 0, 100, 150 og 300 ppm tilsat beskyttelsesgassen ingen mærkbar indflydelse på hverken porerforekomster i svejsemetallet eller på svejsningens indtrængningsprofil, når der MIG-svejses kantsømme i 6 mm AlMg4,5Mn.

Under de konkrete svejsforsøg blev der ikke observeret nogen effekt på lysbuestabiliteten ved at tilsætte små mængder nitrogen til beskyttelsesgassen. Ud fra litteraturen at dømme, skulle små mængder nitrogen dog i mange tilfælde forbedre lysbuestabiliteten.

Under forsøgene blev det bekræftet, at med 30% Ar + 70% He i beskyttelsesgassen opnås en større indtrængning i de konkrete svejsforsøg i forhold til svejsning med 100 % argon med samme strømstyrke.

Ved at øge strømstyrke og svejsehastighed kunne der med 100% Ar opnås en forøget indbrænding, der svarer til den forøgede indbrænding der blev opnået ved at skifte til en blandingsgas bestående af 30% Ar + 70% He.

Forsøgsresultaterne indikerer at det i mange tilfælde er lige så effektivt mht. indbrænding at øge strømstyrken og svejsehastigheden ved anvendelse af ren argon i forhold til at skifte gas til en 3-4 gange dyre argon/helium blanding.

Litteraturliste

- [1] Schoer, Heinz
”*Schwerßen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen*”
DVS, 1998.

- [2] ”*Successful Welding of Aluminium*”
WTIA Technical Note No. 2
Welding Technology Institute of Australia, 1997

- [3] ”*Goda råd vid Aluminiumsvetsning*”
Svetskommissionen, 1997

- [4] ”*Materials and applications – Part 1*”
Welding Handbook - eighth edition,
American Welding Society, 1996.

- [5] ”*Sammenføjning af aluminium*”
Efteruddannelse i materialeteknologi, FORCE Institutet, DTI, Danmarks Ingeniørakademi
og Forskningscenter Risø, 1995

- [6] ”*Guide for Aluminum Hull Welding*”
An American National Standard
ANSI/AWS D3.7-90, 1989

- [7] Haas, B. (DVS)
”*Schutzgasschweißen von Aluminium*”
Der Praktiker, 9/97

- [8] Runnerstam, O., Persson, K.A., and Lund, T. (AGA)
”*The importance of a good quality gas shield*”
Svetsaren No. 3, 1995

- [9] Aastrup, P.
”*Arbejdsområder for MIG-svejsning af kantsømme i aluminium AlMg3 og Al99,5.*”
Rapport 93.20, FORCE Institutet, 1993.

- [10] Zerner, I.
"Trends in der Schweißtechnik – Schweißen von Aluminium."
Schweissen & Schneiden, 51 (1999) Heft 8
- [11] Altshuller, B.
"A guide to GMA Welding of Aluminium"
Welding Journal, June 1998
- [12] *"Facts about TIG-svejsning"*
AGA
- [13] Dye, S.A.
"Gas shielding for arc welding aluminium and its alloys – part 1: Gas mixtures for MIG welding"
WI Research Bulletin Vol. 13 1972. 301-305.
- [14] Fukui, T., Sugiyama, Y. and Terai, S.
"Effects of Nitrogen, Oxygen and Hydrogen Gases Added to Argon Gas on MIG welding of Aluminium Alloys"
Transactions of J.W.S., april 1970
- [15] Harris I.D.
"A review of porosity formation and recommendations on the avoidance of porosity in TIG welding"
The Welding Institutet, 1988
- [16] Harris I.D.
"A review of literature on porosity formation and recommendations on the avoidance of porosity in MIG welding"
The Welding Institutet, 1988
- [17] Lindstrom, J. (AGA)
"Adding NO to the argon or argon/helium mixture does the trick"
Inalco 98, 7th International Conference, Joints in aluminium, vol. 1., 1998.
- [18] Weiping Liu, Dalian and Dorn, L.
"Improved filler wires for aluminium alloy welding – a review, part 1."
ALUMINIUM – 70, 9/10, 1994

- [19] Ellis, M.B.D. and Spiller, K.R.
”*Gas shielded fusion welding of aluminium alloys – a review of the techniques*”
Welding and Fabrication, November/December 1993.
- [20] Blewett, R.V.
”*Welding aluminium and its alloys*”
Welding and Fabrication, October 1991.
- [21] Dye, S.A.
”*Gas shielding for arc welding aluminium and its alloys – part 2: D.C. helium-shielded TIG welding of horizontal/vertical joints in aluminium*”
WI Research Bulletin Vol. 13, 1972, 301-305.
- [22] Farwer, A. (FRG)
”*Recent Investigation on MIG and TIG aluminium welding with different shielding gases*”
IIW Doc. XII – 1436 – 1996
- [23] HEDE NIELSEN
”*Svejseshåndbogen for TIG- MIG- og MAG-svejsning*”
1997
- [24] Aichele, G. (Breisgau)
”*Aluminium – ein Thema für die Schweißtechnik*”
ALUMINIUM, 71. 1995