STORINGEN IN DE DRAADAANVOER TIJDENS HET MIG/LASSEN VAN ALUMINIUM

M.C.L.F. de Kanter

Afstudeerverslag TU Delft Faculteit der Scheikundige Technologie en der Materiaalkunde Sectie Lastechnologie en NDO Juni 1993

Afstudeerhoogleraar: Prof. Dr. G. den Ouden

Begeleiders:	Ir. T. Luijendijk	(TUD)		
U	Ir. M. P. Sipkes	(IPL/TNO)		

·

·

INHOUD.

SAM	ENVATTING	1
SUM	MARY	3
1	INLEIDING	5
2	HET ONDERZOEK PROGRAMMA	11
3	PROEFOPSTELLINGEN EN PROEFOMSTANDIG- HEDEN	13
4	ADHESIE-ONDERZOEK	21
5	DE LASPROEVEN	25 25 29 33
6	DE OPPERVLAKTE GESTELDHEID VAN DE DRADEN	37
7	DE LASSIMULATIEPROEVEN	43
8	MODELMATIGE BESCHRIJVING VAN DE VERSCHILLEN IN DOORVOERBAARHEID	47
9	CONCLUSIES	59
10	AANBEVELINGEN	61
11	LITERATUUR	63

•

•

·

SAMENVATTING

Als afstudeeropdracht is in een samenwerkingsverband tussen de TUD en TNO/IPL, bij het laatste instituut, een onderzoek uitgevoerd naar de oorzaak van storingen in de draadaanvoer tijdens het MIG-lassen van aluminium. Er is hierbij gekeken naar twee typen draden namelijk AlMg5 (AA5356) en AlSi5 (AA4043). De AlMg5-draad bleek veel storingsgevoeliger te zijn dan de AlSi5-draad. Tevens bleek er een groot verschil te zijn in de storingsgevoeligheid van draden van verschillende leveranciers.

Er is tijdens het onderzoek gekeken naar:

- de invloed van adhesie tussen lasdraad en contactbuis;
- de invloed van de dikte en samenstelling van de oxyde laag;
- andere mechanismen die ten grondslag liggen aan de storingen;

Voor dit onderzoek is speciale meetapparatuur ontwikkeld en is ten dele gebruik gemaakt van reeds bestaande apparatuur.

Uit dit onderzoek is gebleken dat:

- adhesie geen rol van betekenis speelt bij het optreden van storingen;
- spaantjes en vuil die zich op de draad bevinden worden, bij gebruik van een teflon liner, in deze liner samengewreven tot plakkaten, die bij voldoende dikte weer loskomen en meegevoerd worden naar de contactbuis. Deze plakkaten verhogen, als zij in de contactbuis terecht komen de kans op storingen;
 - de storingen worden veroorzaakt door het vastvriezen van de lasdraad in de contactbuis. Er worden daar vloeibare contacten gevormd die soms de kans krijgen te stollen, waardoor de lasdraad vast komt te zitten aan de contactbuis.

De waarnemingen blijken te kunnen worden beschreven door een aan de literatuur ontleend model. Uit dit model blijkt dat de hardheid en de voorbuiging van de lasdraad het verschil tussen de storingsgevoeligheid van de twee typen legeringen bepaalt. Het verschil in storingsgevoeligheid tussen draden (van hetzelfde materiaal) van verschillende leveranciers wordt bepaald door de oppervlaktegesteldheid van de draad en de dikte van de oxydehuid die op de draad zit.

SUMMARY

An investigation has been carried out, in a co-operation between TUD and TNO/IPL, to establish the causes of failures in wire feeding during MIGwelding of aluminum. The research work was carried out at TNO/IPL. Two different types of alloys were subject to the investigation namely, AlMg5 (AA5356) and AlSi5 (AA4043). The AlMg5-wire appeared to be more sensitive to the occurrence of failures than the AlSi5-wire. Furthermore there appeared to be a great difference in feedability between wires from different manufacturers.

The following subjects have been investigated:

- the influence of adhesion between welding wire and contact tube;
- the influence of the thickness and composition of the oxide layer on the welding wire;
- other mechanisms that can be underlying to the failures in wire feeding.

Especially developed measuring devices as well as existing were used in carrying out this research.

The results of this investigation show that:

- adhesion does not play a significant role in the occurrence of failures;
- metallic powder, dirt and debris which are on the surface of the welding wire will, when a teflon liner is used, collect in this liner to form a kind of flakes. These flakes will eventually let go from the internal surface of the liner, and are then transported to the contact tube. Upon reaching the contacttube these flakes will enlarge the chances of occurrence of failures;
- the failures are caused by the sticking of the welding wire to the contacttube. Contacts consisting of molten metal are formed which sometimes get the chance to solidify, causing the wire to stick to the contacttube.

The observations appear to be describable by a model, which was derived from the literature. According to this model the difference in feedability between the two types of alloys is caused by the difference in hardness and cast of the different wires. The difference in feedability of the wires (of the same alloy) from different manufacturers is caused by the difference in surface condition and composition.



Figuur 1.2: Een slangenpakket met toorts.

1 INLEIDING

Het MIG/MAG-lasproces is een booglasproces met een afsmeltende elektrode die continu vanaf een rol wordt aangevoerd en waarbij het lasbad wordt beschermd door een beschermgas. Een MIG/MAG systeem is opgebouwd uit een stroombron, een draadaanvoerinrichting, een opslag voor het beschermgas, een stroomkabel- en slangenpakket, waardoor draad, beschermgas, lasstroom en, bij een vloeistof gekoelde toorts, de koelvloeistof naar de lastoorts worden gebracht. Aan het eind van het slangenpakket bevindt zich tenslotte de toorts (zie figuren 1.1 en 1.2) met daarin de contactbuis waarin de lasstroom op de lasdraad wordt overgebracht.

Het draadaanvoersysteem bestaat uit een draadrol waarop de lasdraad is gewikkeld, een stel door een elektromotor aangedreven draadaanvoerwielen en een liner, die de draad door het slangenpakket geleidt naar de toorts, waar de draad vervolgens de contactbuis inloopt. In de contactbuis wordt de lasstroom overgebracht op de lasdraad. De draad wordt door de liner naar de toorts geduwd. De verschillende onderdelen zijn te zien in figuren 1.1 en 1.2.

Het MIG/MAG-lasproces is op dit moment één van de meest toegepaste lasprocessen in de wereld en is één van de weinige die geschikt is voor het lassen van aluminium. Zij koppelt een hoge laskwaliteit aan een goede efficiëntie en daarmee aan lage kosten. De wens is dan ook veelal om juist met dit proces te automatiseren of robotiseren. Storingen in de apparatuur moeten hierbij vanzelfsprekend achterwege blijven. Dit schept de voorwaarde dat er met een zeer betrouwbaar MIG/MAG-systeem wordt gelast. Naar deze systeembetrouwbaarheid is in het kader van een NIL-project bij IPL-TNO onderzoek gedaan. Uit dit onderzoek is gebleken dat storingen die tijdens het proces optreden meestal veroorzaakt worden door storingen in de draadaanvoer. Tijdens dit onderzoek is het begrip 'doorvoerbaarheid' gebruikt. Dit begrip is als volgt te omschrijven:

de doorvoerbaarheid geeft de mate waarin een lasdraad mechanische weerstand ondervindt tijdens het transport van de rol naar de lasboog aan.

Kenmerken van een goede doorvoerbaarheid zijn:

- een gelijkmatig en ongestoord transport van de lasdraad van de rol naar de lasboog;
- een lage aandrijfkracht voor het doorschuiven van de draad door het systeem.

Ook bleek uit het NIL-onderzoek naar de doorvoerbaarheid van een aantal aluminium lasdraden dat een AlMg5 (AA5356) legering veel meer last heeft van deze storingen dan een AlSi5 (AA4043) legering en dat

er ook aanzienlijke verschillen in doorvoerbaarheid zijn tussen de draden van de verschillende leveranciers (We nemen aan dat de fabrikagemethode van de draad hierin een rol speelt). De bron van deze storingen leek voornamelijk in de contactbuis te liggen.

De opdracht voor dit onderzoek is als volgt geformuleerd.

- 1. Stel het verloop van de mechanische weerstand voor een aantal verschillende merken draden en voor ten minste twee typen (nl. AlMg5 en AlSi5) vast.
- 2. Stel vast waar in het draadaanvoersysteem en door welke oorzaak de mechanische weerstand toeneemt.
- 3. Bepaal de soort en de mate van invloed van samenstelling en fabrikagemethode van de draad op de toeneming in mechanische weerstand en op het niveau van de elektrische weerstand.
- 4. Bepaal de invloed van adhesie tussen de lasdraad en de contactbuis op de mechanische weerstand.

Het doel van dit onderzoek is vast te stellen waar en hoe de storingen optreden, en waardoor zij worden veroorzaakt. De opdracht moet leiden tot een uitspraak over de gewenste samenstelling en oppervlaktegesteldheid van lasdraden uit aluminium en zijn legeringen voor een ongestoorde draadaanvoer.

Het onderzoek is uitgevoerd bij TNO/IPL, waar speciale apparatuur aanwezig is om de doorvoerbaarheid te meten. De resultaten van het onderzoek zijn neergelegd in dit verslag. Het verslag is als volgt opgebouwd:

1 Inleiding

Een beschrijving van de achtergrond van het uitgevoerde onderzoek.

- 2 Het onderzoekprogramma
- 3 De proefopstellingen en proefomstandigheden.

Een beschrijving van de proefopstellingen, het gebruikte materiaal en de proefomstandigheden.

4 Adhesie-onderzoek

De resultaten van het onderzoek naar de invloed van adhesie bij het optreden van storingen.

5 De lasproeven

De resultaten van de uitgevoerde lasproeven, met als belangrijkste resultaat de juiste indeling van de verschillende draden naar hun doorvoerbaarheid. 6 De oppervlakte gesteldheid van de draden

Oppervlakte-analyse van de oppervlakken van vier draden om vast te stellen of de verschillen in doorvoerbaarheid zijn terug te vinden in verschillen in het draadoppervlak.

7 De lassimulatieproeven

De resultaten van de proeven met een unieke nieuwe opstelling, waarmee de draad wel door stroomoverdracht wordt belast maar niet wordt verlast. Het draadoppervlak kan daardoor na het "verlassen" worden geïnspecteerd.

- 8 Modelmatige beschrijving van de verschillen in doorvoerbaarheid
- 9 Conclusies

Conclusies op basis van de verkregen onderzoekresultaten.

- 10 Aanbevelingen
- 11 Literatuur

2 HET ONDERZOEK PROGRAMMA

De aanvangshypothese van het uitgevoerde onderzoek is dat bij het MIG/MAGlassen storingen in de draadaanvoer optreden door het vastvriezen van de lasdraad in de contactbuis onder invloed van stroomoverdracht.

Het onderzoekprogramma luidt als volgt:

- 1. Stel vast of adhesie tussen de contactbuis en de lasdraad een rol speelt bij het optreden van storingen.
- 2. Stel door middel van lasproeven het verloop van de mechanische weerstand voor twee typen lasdraad (nl. AlMg5 en AlSi5) vast.
- 3. Bepaal wat de uitgangsconditie van de draden is en wat de gevolgen hiervan voor het draadaanvoersysteem zijn, onder andere met betrekking tot de interactie met de liner.
- 4. Bepaal welke interactie er is tussen de contactbuis en de lasdraad.
- 5. Bepaal de oppervlaktegesteldheid van de belaste lasdraden en de relatie hiervan met de interactie tussen de contactbuis en de lasdraad.



Figuur 3.1: schematische weergave van de proefopstelling voor de adhesie proeven.

3 PROEFOPSTELLINGEN EN PROEFOMSTANDIGHEDEN

In de praktijk wordt voor het MIG- of Puls/MIG-lassen van aluminium meestal een push draadaanvoersysteem gebruikt. Tegenwoordig wordt er echter steeds meer (vooral bij robots) gebruik gemaakt van push/pull-draadaanvoersystemen, waarbij een motortje in de toorts ook aan de draad trekt. Het voordeel hiervan is dat de draad bij een verhoogde mechanische weerstand in de toorts niet meer uitknikt, maar storingen treden nog steeds op.

De eerste twee onderdelen van het hieronder beschreven onderzoek zijn uitgevoerd met een vierwiels duw-(push)systeem, dat zo goed mogelijk is aangepast aan het aanvoeren van aluminiumdraad.

In figuur 3.1 is schematisch de proefopstelling voor de adhesieproeven en in figuur 3.2 de proefopstelling voor de lasproeven weergegeven. Tevens zijn in deze figuren de mogelijkheden die zijn aangebracht voor het meten en/of registreren van gegevens, die informatie verschaffen over de betrouwbaarheid van het systeem, weergegeven. In figuur 3.3 is een foto te zien van de proefopstelling voor de lasproeven.

De opstelling voor de adhesie proeven is een aangepaste versie van de opstelling die gebruikt is voor de lasproeven. De verschillen zijn dat in plaats van de watergekoelde pijp een slippend opwikkelende haspel is gemonteerd en de contactbuis wordt verwarmd door middel van een kleine propaanbrander.

De in het schema in figuur 3.2 opgenomen stroombron is een conventionele Philips transformator type PZ 2330/10 met een instelbare karakteristiek en een bijbehorende draadaanvoermotor. Het slangenpakket in de schema's van zowel figuur 3.1 als figuur 3.2 is een standaard Binzel-pakket met een lengte van 3 meter.

De in de figuren 3.1 en 3.2 weergegeven systemen zijn oorspronkelijk bedoeld voor het lassen van staal. Op grond van een inventarisatie (navragen bij een aantal leveranciers van MIG/MAG-apparatuur) is de opstelling aangepast voor het lassen met aluminium-draden. De voor het lassen van aluminium-draden noodzakelijke aanpassingen zijn:

- Van de voor staal gebruikelijke stalen aandrijfwielen zijn voor het gehele onderzoek de twee onderste gegroefde wielen (groefdoorsnede = halve cirkel) vervangen door twee kunststofwielen¹; de twee vlakke wielen zijn gehandhaafd. De aandrukkracht is de minimaal instelbare: 157N.

¹ Alleen de AlSi5 draad van leverancier C is wel met stalen onderwielen gelast omdat deze draad te glad was om door te voeren met kunststofwielen.



Figuur 3.2: Schematische weergave van de proefopstelling voor de lasproeven

Figuur 3.3: De lasopstelling.

- In het slangenpakket en de lastoorts is de stalen liner vervangen door een teflonliner. Dit is de in de praktijk het meest gebruikte liner. Een betere liner is echter een liner van polyamide met koperen in- en uitloop. Deze liner is veel duurder maar heeft als voordeel dat hij niet statisch oplaadt. Omdat de teflonliner het meest gebruikt wordt, is deze ook in het onderzoek gebruikt. Tevens zijn alle in- en doorvoerstukjes voorzien van een stukje teflonliner. De diameter van de in het slangenpakket aangebrachte lus bedraagt 500 mm.
- Voor het lassen van aluminium worden contactbuizen van elektrolytisch koper aanbevolen. Wanneer deze contactbuis bedoeld is voor het lassen van een \emptyset 1,2 mm draad, ligt de diameter van het inwendige kanaal tussen de 1,5 en 1,6 mm. (de overmaat van de boring is overigens 2 maal zo groot als bij het lassen met staaldraad).

Terwille van de tijdsduur van het onderzoek is gekozen voor een zo hoog mogelijke lasstroom. Anderzijds moeten de proefresultaten representatief zijn voor 'normale' in de praktijk gebruikelijke omstandigheden.

De lasstroom (draadsnelheid) wordt per onderzoekgedeelte apart vermeld. De uitsteeklengte is constant gehouden; de afstand van de punt van de contactbuis tot de oppervlakte van de ronddraaiende pijp bedraagt voor het gehele onderzoek 15 mm (in de richting van de draad gemeten!).

Alle te meten grootheden worden tegelijk continu geregistreerd met behulp van een zeskanaalsschrijver (Watanabe multicorder type MC641), zodat het direct mogelijk is verbanden te herkennen tussen deze grootheden tijdens stroomloos doorvoeren en het lassen. Bij de in dit verslag beschreven proeven zijn twee draadsoorten betrokken, te weten:

- AlMg5; type AA5356, Ø 1,2 mm en

- AlSi5; type AA4043, Ø 1,2 mm.

Beide de draden zijn met argon als beschermgas gelast.

De draden van vier verschillende leveranciers (lees: vervaardigingswijzen) zijn onderzocht.

De vier draadleveranciers zijn:

- Drahtwerk Elisental te Neuenrade (Duitsland).
- Filarc te Utrecht (Nederland).
- Hermann Gutmann Werke te Weissenburg (Duitsland).
- Migal te Savigny (Zwitserland).

De vier leveranciers zijn in het vervolg in geheel willekeurige maar constante volgorde aangeduid met A, B, C en D.

Figuur 3.4: Schematische weergave van de proefopstelling voor de lassimulatieproeven





Figuur 3.5: Overzicht van de lassimulatie opstelling.

Voor de uitvoering van de lassimulatieproeven, waarmee de interactie tussen de lasdraad en de contactbuis wordt bepaald, is een nieuwe opstelling gebouwd die uniek is in zijn soort. Dit nieuwe systeem is schematisch weergegeven in figuur 3.4 en foto's ervan zijn weergegeven in figuren 3.5 en 3.6 Met dit nieuwe systeem worden de draad en de contactbuis wel door de stroomoverdracht belast, maar de draad wordt niet verlast.

Het grote probleem bij een dergelijke opstelling is de stroom weer van de draad af te krijgen zonder het effect, dat de stroomoverdracht in de contactbuis veroorzaakt twee keer te laten plaatsvinden. Deze stroom moet zo snel mogelijk na de contactbuis de draad verlaten, omdat de draad anders te warm wordt door de I²R verhitting en kan vervormen of breken. In eerste instantie is geprobeerd om de stroom met behulp van een ronddraaiende watergekoelde trommel van de draad af te nemen maar met deze methode kon de uitsteeklengte niet kort genoeg worden gehouden. Als tweede oplossing bleef de opstelling waarbij de draad na de contactbuis door een kwikbad loopt over, en dit werkte wel. Het kwikbad zorgde niet alleen voor het afnemen van de stroom zonder daarbij de draad te beschadigen, maar ook voor een uitstekende warmteafvoer waardoor de hete draad ook nog eens snel gekoeld werd. Een nadeel van deze methode is dat liquid metal embrittlement van de draad (vooral de AlMg5) kan optreden. De aantastingen door het kwik zijn echter goed te onderscheiden van de aantastingen door de stroomoverdracht.

Omdat de interactie tussen de liner en de lasdraad niet de hoofdoorzaak is van het optreden van storingen is in dit nieuwe systeem het slangenpakket weggelaten. Zo worden ook draadsnelheidsvariaties door het opslaan van de draad in het slangenpakket bij toenemende weerstand in de contactbuis vermeden.

De werking van het lassimulatiesysteem is als volgt. De draad wordt van de haspel aangevoerd door hetzelfde draadaanvoersysteem als van de andere opstelling. De draad wordt dan door de kop met de contactbuis gevoerd en loopt zo snel mogelijk na de contactbuis het kwikbad in. Na het kwikbad passeert de draad een draadsnelheidsmeter en wordt vervolgens opgewikkeld. De opwikkelhaspel is met een slipkoppeling gekoppeld aan een aandrijving. De aandrijving van de opwikkelhaspel kan door middel van een ten-turns potmeter nauwkeurig worden afgesteld zodat er tijdens het opwikkelen niet aan de draad getrokken wordt. De lasstroom wordt geleverd door een TIG-bron (DC arc welding machine ANALOG 300) die een constante stroom levert welke in de contactbuis op de draad overgaat en in het kwikbad weer van de draad wordt afgenomen. Alle gemeten signalen worden op een zeskanaals schrijver geregistreerd.



Figuur 3.6: Detailopname van het kwikreservoir en de kop met de contactbuis.

Tijdens de proeven worden de lasomstandigheden zo nauwkeurig mogelijk gesimuleerd. Met behulp van de opgenomen schrijverstroken van de lasproeven wordt eerst de draadsnelheid ingesteld op de juiste waarde. Daarna wordt de stroom langzaam opgevoerd naar de waarde die ook is geregistreerd bij het lassen. Om te voorkomen dat er kwikdampen vrijkomen is het kwikreservoir watergekoeld uitgevoerd. Met de koelspiraal van de waterkoeling wordt tevens de stroom van het kwikbad afgenomen. Met deze opstelling kunnen zowel aluminium draden als verkoperde staaldraden worden belast tot 280 A zonder dat zij smelten of breken door een te hoge verhitting. Een hogere stroom is niet mogelijk omdat de gebruikte bron niet meer levert. Bij het belasten van staaldraad dienen er wel extra veiligheidsmaatregelen getroffen te worden, want door het grotere I²R-effect dat bij deze draden optreedt ontstaat er op de plaats waar de draad het kwik inloopt een verhoogde ontwikkeling van de giftige kwikdampen. Een nadeel bij verkoperde staaldraad is dat de koperlaag bij de hoge temperatuur waarmee de draad het kwik in loopt als een soort spons gaat werken en kwik opneemt, dat na afkoelen weer uit het koper wordt verdreven. De draad wordt door het kwik echter niet aangetast.

Draad merk en type	Contact- buis nummer	proefduur in [min]	ΔM in [mg]	bijzonderheden
C/AlMg5	2	20	3,5	vast gelopen
C/AlMg5	5	90	7,5	CB-kracht liep aan het eind op
C/AlMg5	7	90	niet gemeten	niets te zien in de CB-kracht.

Tabel 4.1: Resultaten van de adhesieproeven.

4 ADHESIE-ONDERZOEK

Adhesie is het verschijnsel dat twee lichamen of stoffen "aan elkaar kleven" onder invloed van atomaire of moleculaire attractiekrachten. Adhesie speelt een rol bij droge wrijving. In het algemeen is het zo dat bij droge wrijving de totale wrijvingskracht wordt veroorzaakt door twee effecten. Ten eerste hebben we te maken met een ploegeffect, waarbij de ruwheidstoppen van de hardste contactpartner door het materiaal van de zachtere contactpartner heen "ploegen". Ten tweede is er het adhesie-effect waarbij de twee partners "aan elkaar kleven".

De bijdrage van het ploegeffect is, zeker wanneer de hardste contactpartner niet erg ruw is, relatief klein (ploegwrijvingscoëfficiënten liggen in de orde van 0,05 tegen totale wrijvingscoëfficiënten in de orde 0,1 - 1). In het bijzonder bij droog contact tussen vaste oppervlakken is de adhesie verantwoordelijk voor een groot deel van de wrijving [1].

Adhesie wordt zeer sterk beïnvloed door de oppervlakte toestand. Door Rabinowicz [1] is vastgesteld dat tussen twee metalen onderling weinig of geen adhesie zal optreden als zij voldoen aan de volgende twee eigenschappen:

1) zij zijn in vloeibare fase niet in elkaar oplosbaar;

2) de onderlinge oplosbaarheid in de vaste fase is kleiner dan 0,1%.

Koper (het contactbuismateriaal) en aluminium (het lasdraadmateriaal) zijn echter zowel in de vaste fase als in de vloeibare fase uitstekend in elkaar oplosbaar. Deze twee metalen zullen dus onderling een zeer sterke neiging tot adhesie vertonen.

Niet-metallische legeringselementen (bv. Si) die in kleine hoeveelheden in een metaal aanwezig zijn, zijn vaak verrijkt aanwezig in het oppervlak van het metaal. Een hoge concentratie niet metallische elementen in het oppervlak is zeer effectief in het verlagen van de adhesieve wrijving [2].

Door combinatie van deze laatste twee gegevens met de bevindingen, van eerder uitgevoerd onderzoek, dat de AlMg5-legering gevoeliger is voor storingen dan de AlSi5-legering, rees het vermoeden dat adhesie een rol zou kunnen spelen bij dit optreden van storingen. Onder aanname van de hypothese dat storingen in de draadaanvoer worden veroorzaakt door het optreden van adhesie tussen de lasdraad en de contactbuis, is dit deel van het onderzoek uitgevoerd.



Figuur 4.1: Inloop van contactbuis nr. 6 (zit vol met spaantjes), vergroting 17x.



Figuur 4.2: De ingang van contactbuis nr. 7, vergroting 17x.



Figuur 4.3: De tip van contactbuis nr. 7, vergroting 15x.

Er is daarbij aangenomen dat indien adhesie een rol van betekenis speelt, de draad ook vast moet lopen of een verhoogde weerstand moet gaan ondervinden zonder stroomoverdracht. De uitvoering van de proeven is daarom als volgt gekozen:

- 1. De massa van de contactbuis voor en na de proef worden bepaald met behulp van een Mettler weegschaaltje. Indien adhesie optreedt en er dus aluminium wordt afgezet in de boring van de contactbuis moet de massa van de contactbuis toenemen.
- 2. De draden worden stroomloos doorgevoerd waarbij de contactbuis wordt verwarmd tot ongeveer 300°C-350°C om de omstandigheden in de contactbuis bij het lassen te simuleren.
- 3. De proeven zijn uitgevoerd met de "best en slechtst" doorvoerbare draad uit het eerder verrichte onderzoek.

De proeven zijn uitgevoerd op de in figuur 3.1 schematisch weergegeven opstelling. Een samenvatting van de resultaten is weergegeven in tabel 4.1. De contactbuizen van proef 1 tot en met 6 waren na de proef allemaal zwaarder dan voor de proef. Bij een inspectie van deze contactbuizen onder de microscoop bleek dat zij vol zaten met aluminium spaantjes zoals is te zien in figuur 4.1. De hoeveelheid spaantjes was bij proef 2 zelfs zo groot dat de draad er in is vastgelopen. Dat ΔM (ΔM is de massa van de contactbuis na de proef min de massa van de contactbuis voor de proef) bij contactbuis nummer 2 minder groot is dan bij contactbuis nummer 5 komt waarschijnlijk door het verdwijnen van een deel van de spaantjes bij het verwijderen van de draad uit de contactbuis. Het is dus helaas ook niet mogelijk om op grond van deze resultaten aan te geven hoeveel volume aan spaantjes er in de contactbuis moet worden verzameld om de draad te doen vastlopen.

Inspectie van de proefopstelling wees vervolgens uit dat deze spaantjes werden gevormd door het schrapen van de draad langs het messing aandrukwieltje van de draadsnelheidsmeter aan de haspelzijde van het systeem. Het zelfde aandrukwieltje in de andere draadsnelheidsmeter verspaande de draad niet. Daar intussen was gebleken dat de draadsnelheidsmeter aan de haspelzijde geen interessante informatie verschafte is deze uit het systeem verwijderd en is voor de zekerheid het aandrukwieltje van de draadsnelheidsmeter aan de toortszijde vervangen voor een teflon wieltje. Vervolgens is de liner met perslucht doorgeblazen.

Na deze verbeteringen aan het aanvoersysteem is nog een proef uitgevoerd (proef 7). Tijdens deze proef zijn totaal geen krachten in de contactbuis waargenomen. Helaas is de contactbuis open gefreesd voordat de eindmassa was bepaald maar bij microscopisch onderzoek bleek hij helemaal schoon te zijn. De foto's in figuren 4.2 en 4.3 illustreren dit. Vanwege het feit dat er geen krachten in de contactbuis zijn waargenomen en de contactbuis helemaal schoon was na 1,5 uur doorvoeren is aangenomen dat adhesie geen rol van betekenis speelt bij het optreden van storingen in de draadaanvoer.

2	Tabel:	5.1
	1 4001.	~ •

proefnr draadmerk draad type	proefduur	stand draads- nelheid	gem. stroom	gem. spanning	gem. CB-tem- peratuur	gem. pakket- kracht	aantal pie- ken per mi- nuut	voorbuiging na de toorts zon- der CB	treksterkte
6/A/Mg5	15 min	10,5	250 A	31 V	293°C	9 N	4,33	?	444 N/mm ²
7/A/Mg5	44 min	10,5	250 A	31 V	217°C	9,5 N	3,07	?	444 N/mm ²
2/B/Mg5	10 min	10,5	245 A	30 V	296°C	11,5 N	1,70	95 cm .	424 N/mm ²
3/B/Mg5	23 min	10,5	245 A	30 V	289°C	11,5 N	5,61	95 cm	424 N/mm ²
1/C/Mg5	65 min	10,5	250 A	30 V	276°C	10 N	0,17	85 cm	427 N/mm ²
4/D/Mg5 ²	50 min	10,5	245 A	30 V	291°C	15 N	2,56	95 cm	442 N/mm ²
5/D/Mg5	65 min	10,5	250 A	30 V	291°C	9 N	0,85	95 cm	442 N/mm ²
11/A/Si5	35 min ³	8	235 A	31 V	242°C	15 N	*4	63 cm	196 N/mm ²
9/B/Si5	60 min	8,75	255 A	30 V	242°C	11 N	0,22	56 cm	252 N/mm ²
8/C/Si5	60 min	8	235 A	30,5 V	242°C	13 N	0,93	51 cm	183 N/mm ²
10/D/Si5	60 min	8	235 A	31 V	291°C	14 N	0,88	53 cm	202 N/mm ²

² dit is de proef waarbij de draad verspaand werd door de slingerende draadaanvoerwielen. Let op de verhoogde pakketkracht en het grotere aantal piekjes in de contactbuiskracht dat ten opzichte van proef 5 geregistreerd wordt.

³ Na 35 minuten lassen was de draad op.

⁴ De kracht in de contactbuis vertoonde geen pieken maar liep langzaam op.

24

5 DE LASPROEVEN

Meting van de doorvoerbaarheid

De lasproeven werden in eerste instantie uitgevoerd om kennis te maken met het systeem waarop door TNO in het verleden proeven waren uitgevoerd en zo de interpretatie van de tijdens eerder uitgevoerd onderzoek verzamelde gegevens te vereenvoudigen. Tijdens deze kennismakingsproeven bleek echter dat het na de adhesie-proeven voorgestelde doorblazen met perslucht niet voldoende was om de liners goed te reinigen en dat, om alle draden een gelijke uitgangspositie te geven, iedere draad met nieuwe liner moest worden verlast. Daar tijdens voorgaand onderzoek de liners ook steeds waren doorgeblazen met perslucht lag de status van de liners tijdens dat onderzoek niet goed vast en werden de resultaten niet voldoende betrouwbaar geacht. Om deze reden is dat onderzoek in hoofdlijnen herhaald.

De proeven zijn uitgevoerd op de in figuur 3.2 schematisch weergegeven opstelling. Er is bij iedere proef een nieuwe liner en een ultrasoon gereinigd stel kunststof draadaanvoerwielen gebruikt. In eerste instantie zouden er voor iedere proef nieuwe draadaanvoerwielen worden gebruikt, maar het eerste stel nieuwe wielen dat gebruikt werd slingerde en sneed daarbij spaantjes van de draad af die binnen een uur al tot in de contactbuis waren getransporteerd. Deze spaantjes veroorzaakten een hogere mechanische weerstand in de contactbuis en in het slangenpakket en tevens veroorzaakten zij erg veel spatten tijdens het lassen, hetgeen een enorme vervuiling van de gascup tot gevolg had. Om dit soort problemen te voorkomen zijn bij alle volgende proeven één stel draadaanvoerwielen gebruikt, waarvan bekend was dat zij geen draad verspaanden en die tussen twee proeven in, steeds met zorg gereinigd werden.

De onafhankelijke variabele bij het vergelijken van de verschillende draden, is de tijdsduur dat er met een draad gelast kan worden. Op grond van de resultaten van het NIL-onderzoek naar aluminium is besloten om een maximum proefduur aan te houden van één uur, bij een stroomsterkte van ± 250 A en een uitsteeklengte van 15 mm. Als met een draad één uur kon worden gelast werd de proef in enkelvoud uitgevoerd, als een draad vastliep werd er nog een tweede proef gedaan. In die gevallen waar de draad minder dan één uur liep en er geen resultaten zijn vermeld van een tweede proef was de draad niet meer voorradig. Na de proeven zijn de gebruikte liners opengesneden en onder de microscoop bestudeerd. Ook de contactbuizen zijn na de proeven opengefreesd en onder de rasterelektronenmicroscoop (REM) bekeken.



Figuur 5.1: Een plakkaat van samengewreven spaantjes, vuil en aluminiumpoeder in een opengesneden liner, vergroting 150x.



Figuur 5.2: Spaantjes in het stuk liner tussen draadhaspel en draadaanvoerunit, vergroting 100x.
In de schematische weergave van de proefopstelling in figuur 3.2, zijn een aantal mogelijkheden tot het verrichten van metingen aangegeven. Tijdens de lasproeven zijn de volgende grootheden geregistreerd:

- de lasstroom
- de lasspanning
- de contactbuistemperatuur
- de contactbuiskracht (Deze is normaal nul omdat eerst de kracht van een veertje dat de toorts in positie houdt moet worden overwonnen, de hiervoor benodigde kracht is 2 N. Bij storingen zien we krachtpiekjes; het aantal van deze krachtpiekjes dat per minuut wordt geregistreerd is een belangrijke maat met betrekking tot de doorvoerbaarheid).
- de pakketkracht
- de draadsnelheid (Hiervan is de stand van de regeling van de draadaanvoermotor weergegeven, zij beïnvloedt de doorvoerbaarheid niet; wel is waargenomen dat bij het optreden van een krachtpiekje de draadsnelheid kortstondig tot nul kan dalen).

De tijdens de proeven voor deze grootheden geregistreerde waarden zijn weergegeven in tabel 5.1. Tevens zijn in deze tabel de volgende grootheden weergegeven die betrekking hebben op de gebruikte lasdraden:

- de proefduur;
- de treksterkte;
- de voorbuiging van de draad gemeten na de toorts en zonder contactbuis.

Uit de resultaten wordt in de eerste plaats de indeling van de draden naar hun doorvoerbaarheid bepaald. We noemen een draad goed doorvoerbaar als er minstens één uur mee gelast kan worden, en de draad is des te beter doorvoerbaar naarmate het aantal krachtpiekjes, dat daarbij per minuut in de contactbuiskracht geregistreerd wordt, lager is. De rangschikking van de draden die met deze criteria uit de proefresultaten naar voren komt is:

de AlSi5-draden:

- 1) de draad van leverancier B
- 2) de draad van leverancier D
- 3) de draad van leverancier A
- 4) de draad van leverancier C^5

de AlMg5-draden:

- 1) de draad van leverancier C
- 2) de draad van leverancier D
- 3) de draad van leverancier A
- 4) de draad van leverancier B

⁵ De AlSi5-draad van leverancier C laste op zich wel mooier en constanter met de stalen wielen dan de AlSi5-draad van leverancier A, die bovendien aan het einde van de proef ook nog een constant oplopende kracht in de contactbuis ging vertonen. Echter het feit dat draad A wel en draad C niet doorvoerbaar was met kunststofwielen en de mogelijkheid van beperking tot twee draadfabrikanten, heeft geleid tot de keuze van de AlSi5-draad van leverancier C als "slechtste AlSi5-draad" voor het vervolgonderzoek.



Figuur 5.3: Aluminium bolletjes in de liner uit de toorts, vergroting 25x.



Figuur 5.4: Opengesneden liner waarmee ± 7 rollen à 6,5 kg AlSi5 draad Ø 1,6 mm zijn verlast, vergroting 50x. Ter beschikking gesteld door BAYARDS BV.

Uit vergelijking van de indeling van de draden naar hun doorvoerbaarheid met de meetresultaten uit tabel 5.1 blijkt verder dat geen van de andere gemeten grootheden een directe relatie vertoont met de doorvoerbaarheid.

Inspectie van de liners

Inspectie van de opengesneden liners levert de volgende interessante informatie op. Het blijkt dat op de draad aanwezige aluminium en stofdeeltjes in het oppervlak van de liner worden gewreven en daar langzaam maar zeker een soort plakkaten vormt, die bij voldoende dikte weer los komen. Een foto van een dergelijk plakkaat is te zien in figuur 5.1. Deze plakkaten kunnen worden meegevoerd naar de contactbuis waar zij zich, door de hoge temperatuur ter plaatse, kunnen vastzetten. Aangezien de plakkaten bestaan uit geoxideerd aluminiumpoeder, teflon en vuil, kunnen zij de stroomoverdracht belemmeren en verstoppingen veroorzaken. Een tweede interessant resultaat is dat in het stukje liner tussen de draadhaspel en de draadaanvoereenheid van de proef met de AlMg5 draad van leverancier D een grote hoeveelheid zeer kleine aluminiumspaantjes bleek te zitten, zoals ook blijkt uit de foto in figuur 5.2. Daar de draad die door dat stuk liner loopt met niets anders in aanraking is geweest dan dat stuk liner moeten de spaantjes dus op de haspel hebben gezeten. De draad⁶ is dus door de fabrikant met deze spaantjes afgeleverd. Dat zelfde geldt vermoedelijk voor het poeder op de draad.

Verder zijn er in het stukje liner vlak voor de contactbuis bolletjes gevonden die uit aluminium bleken te bestaan. Deze bolletjes kunnen alleen ontstaan als het aluminium smelt en zij zijn dus ofwel afkomstig van de lasboog, hetgeen zeer onwaarschijnlijk is, of zij zijn afkomstig van boogvorming of smeltverschijnselen in de contactbuis. Een foto van een dergelijk bolletje is te zien in figuur 5.3.

Gezien de grote vervuiling, die vooral in de liners waar de AlMg5-legering mee is gelast optrad, rees de vraag of dit soort vervuiling ook in de praktijk voorkomt. In verband hiermee zijn door de firma Bayards B.V. twee gebruikte liners ter beschikking gesteld. De ene liner is van 16 november 1992 tot en met 18 december 1992 gebruikt om \pm 7 rollen á 6,5 kg AlSi5 draad te verlassen, de andere liner is vier en een halve dag gebruikt om \pm 2,5 rollen á 6 kg AlMg4,5-Mn draad te verlassen. Deze liners zijn opengesneden en de liner waarmee de AlSi draad is verlast bleek brandschoon te zijn, terwijl de liner waarmee de aluminium-magnesium legering is verlast een enorme vervuiling vertoonde. Foto's van deze opengesneden liners zijn te zien in figuren 5.4 en 5.5.

⁶ Deze liner is niet gebruikt bij de proef met de slingerende wielen en de draad zat voor de aanvang van de proef nog in de afgesloten plastic verpakking waarin zij geleverd was.



Figuur 5.5: Opengesneden liner waarmee $\pm 2,5$ rollen à 6 kg AlMg5 draad Ø 1,2 mm zijn verlast, vergroting 50x. Ter beschikking gesteld door BAYARDS BV.



Figuur 5.6: Afzettingen aan de ingang van de contactbuis waarmee draad 9/B/Si5 is verlast, vergroting 30x.

CB gebruikt tijdens	CB gebruikt tijdens Afzettingen aanwezig op plaats a, b en				smeltverschijnselen op plaats a, b en c			
legering	a inloop	b midden	c tip	a inloop	b midden	c tip		
11/A/Si	weinig	schoon	weinig	geen	geen	geen		
10/D/Si	wat Al- en teflon deel- tjes	schoon	een paar Al-bolle- tjes die gesmolten zijn ge- weest zitten op de wand	geen	geen	alleen een paar gesmol- ten bolletjes		
9/B/Si	een beetje Al-afzet- ting	schoon	schoon	geen	geen	geen		
8/C/Si	schoon	schoon	een beetje Al-afzet- ting	geen	geen	smeltstructu- ren waarge- nomen		
7/A/Mg	schoon	schoon	veel afzettingen	geen	geen	smeltstructu- ren waarge- nomen		
6/A/Mg	een klein beetje afzetting	schoon	veel afzettingen	geen	geen	smeltstructu- ren waarge- nomen		
5/D/Mg	schoon	schoon	er is een kleine hoeveel- heid Al afgezet	geen	geen	al het afgezette Al is gesmolten geweest		
3/B/Mg	schoon	schoon	veel afzettingen	geen	geen	smeltstruc- turen waar- genomen		
2/B/Mg	schoon	schoon	veel afzettingen	geen	geen	smeltstruc- turen waar- genomen		
1/C/Mg	schoon	schoon	weinig afzettingen	geen	geen	smeltstruc- turen waar- genomen		

Tabel 5.2: Plaatsen waar afzettingen en smeltstructuren in de contactbuis zijn waargenomen.

.

tabel 5.3

	AlSi5	AlMg5
"beste"	B/Si5	C/Mg5
"slechtste	C/Si5	B/Mg5



Figuur 5.7: De tip van de contactbuis waarmee draad 9/B/Si5 is verlast (vrijwel helemaal schoon), vergroting 30x.



Figuur 5.8: Tip van de contactbuis waarmee draad 8/C/Si5 is verlast (vertoont wat afzettingen), vergroting 30x.

De contactbuizen

Om een indruk te krijgen van de afzettingen in de contactbuis werden de gebruikte contactbuizen opengefreesd en onder de stereo-microscoop bekeken. Daarna werden de afzettingen met behulp van de REM onderzocht.

De resultaten van deze proeven zijn samengevat in tabel 5.2 en enkele voorbeelden van de boringoppervlakken zijn te zien in de figuren 5.6 t/m 5.13. Het valt op dat de oppervlakken van de boring van de contactbuizen waarmee AlMg5-draad is verlast vrijwel altijd veel aluminiumafzettingen en grove smeltstructuren vertonen. De oppervlakken van de boring van de contactbuizen waarmee de AlSi5-draden zijn verlast vertonen allemaal zeer weinig tot geen afzettingen en slechts in één geval worden smeltstructuren in het oppervlak waargenomen.

Omwille van de overzichtelijkheid is de rest van het onderzoek voortgezet met vier draden namelijk, de "beste" en de "slechtste" draden van iedere legering. Deze draden zijn nog eens weergegeven in tabel 5.3.



Figuur 5.9: Detail van de afzettingen in de contactbuis van figuur 5.8 (laat smeltstructuren in de afzetting zien), vergroting 1000x.



Figuur 5.10: Tip van de contactbuis waarmee draad 1/C/Mg5 is verlast, (vertoont vrijwel geen aluminium afzettingen), vergroting 30x.



Figuur 5.11: Detail van de foto in figuur 5.10 (laat zien dat er wel smeltstructuren in de contactbuis zijn), vergroting 200x.



Figuur 5.12: De zwaar vervuilde tip van de contactbuis waarmee 10 minuten met draad 2/B/Mg5 is gelast (vastgelopen), vergroting 30x.



Figuur 5.13: Detail van de foto uit figuur 5.12 (laat smeltstructuren zien en gaten die lijken te zijn veroorzaakt door vonkerosie), vergroting 500x.



Figuur 6.1: A/Mg5, vergroting 10.000x.



Figuur 6.2: C/Mg5, vergroting 10.000x



Figuur 6.3: D/Mg5, vergroting 10.000x.



Figuur 6.4: B/Mg5, vergroting 10.000x.



Figuur 6.5: B/Si5, vergroting 10.000x.



Figuur 6.6: C/Si5, vergroting 10.000x.

6 DE OPPERVLAKTE GESTELDHEID VAN DE DRADEN

Om vast te stellen of de verschillen in doorvoerbaarheid zijn terug te vinden in de oppervlaktegesteldheid van de draden, zijn alle vier draden waarmee het onderzoek is voortgezet aan een uitgebreid oppervlakte-onderzoek onderworpen. De oppervlakte-analyse van de draden is in drie delen uitgevoerd. Bij het eerste deel zijn de draden bekeken en gefotografeerd in de scanning elektron microscope bij vergrotingen van 1000, 3000 en 10000 maal. Omdat dit relatief weinig tijd kost zijn bij dit deel nog alle AlMg5-draden onderzocht. De foto's van de oppervlakken bij een vergroting van 10000 maal zijn weergegeven in de figuren 6.1 t/m 6.6.

Van de beschadigingen aan het oppervlak van draad A/Mg5 (fig. 6.1) is niet bekend of zij door ons of door de fabrikant zijn aangebracht. Om deze reden worden de foto's van deze draad bij de bespreking buiten beschouwing gelaten.

Op de oppervlakken van de draden C/Mg5, D/Mg5 en B/Mg5 (respectievelijk figuren 6.2, 6.3 en 6.4) is een naar het zich laat aan zien steeds dikkere oxydehuid te zien. In de zelfde volgorde zien we ook een toename of vergroving van de craquelé structuur in die oxydehuid. De dikkere oxydehuid en een grovere craquelé structuur vertoont dus een eenduidig verband met de doorvoerbaarheid. Verder lijkt draad B/Mg5 (fig. 6.4) ook scheuren in het oppervlak te hebben. Kijken we naar de twee AlSi5 draden dan zien we dat draad B/Si5 (fig. 6.5) deze structuur niet vertoont en draad C/Si5 (fig. 6.6) de craquelé structuur nauwelijks vertoont. Er lijkt dus een eenduidig verband te bestaan tussen de aanwezigheid van de craquelé structuur in de oxyde huid van een draad en de doorvoerbaarheid van de draad. De doorvoerbaarheid is des te slechter naar mate de craquelé structuur grover is.

Het tweede deel van de oppervlakte-analyse was het bepalen van de samenstelling van de oxydehuid met behulp van ESCA (Elektron Spectroscopy for Chemical Analysis. Voor deze analyse werd gebruik gemaakt van de PHI 5400 ESCA van het laboratorium voor materiaalkunde van de T.U. Delft).

De condities waaronder gemeten is zijn als volgt:

- detector	=	single channel
- Inputlens	=	Omni Focus
- Anode materiaal	=	Al (Kα=1486,6 eV)
- Anode vermogen	=	400 W
- Diameter van gemeten oppervlak	=	1.1 mm

De uit de, onder deze condities, gemeten spectra berekende concentraties van de verschillende elementen in de verschillende draden staan vermeld in tabel 6.1. De vermelde concentraties zijn geen absolute waarden. Zij zijn echter wel

onder dezelfde omstandigheden gemeten en kunnen dus met elkaar vergeleken worden.

De verwachting was dat er een verband zou bestaan tussen de doorvoerbaarheid en de samenstelling van de oxydehuid. De soortelijke elektrische weerstand van puur Al_2O_3 is ongeveer $10^{12} \Omega cm$. De elektrische weerstand van $MgAl_2O_4$ is nog een orde hoger maar die van $3Al_2O_32SiO_2$ is 5 orden kleiner dan die van Al_2O_3 . Een hogere weerstand betekent bij stroomdoorgang een hogere warmte ontwikkeling, waardoor de kans op vastsmelten toeneemt. Het doel was om te kijken hoe groot het percentage legeringselementen in de oxydehuid was. Op grond van dit percentage met inachtneming van het effect van de aanwezigheid van deze elementen op de elektrische weerstand van de oxydehuid zou dan gekeken worden of er een relatie is met de doorvoerbaarheid.

Gezien de samenstelling van de oxydelaag zijn de elementen waar op gelet moet worden magnesium en silicium en in tabel 6.2 zijn de concentraties van deze elementen apart vermeld.

Het blijkt dan dat de gevonden waarden voor de concentraties aan de verwachting voldoen. De beste AlMg5-draad heeft het laagste percentage magnesium in de oxydehuid en de beste AlSi5-draad heeft het hoogste percentage silicium in de oxydehuid.

Bij het derde deel van de oppervlakte-analyse is met behulp van Auger analyse (Voor deze analyse werd gebruik gemaakt van de PHI 4300 SAM van het laboratorium voor materiaalkunde van de T.U. Delft) de dikte van de oxydehuid op de vier draden bepaald. De metingen zijn onder de volgende omstandigheden uitgevoerd:

- de sputtersnelheid is voor alle draden 1,1 nm/min. op tantaaloxyde
- behalve voor draad B/Mg5, daar is vanwege de dikke oxydelaag na 28 minuten overgegaan op een sputtersnelheid van 17,5 nm/min. op tantaaloxyde
- er is gesputterd onder 15 mPa argon
- de vergroting is 400 maal
- de elektronenspanning = 5 kV
- de stroom is 200 nA

De onder deze omstandigheden gemeten dikten van de oxydehuiden zijn vermeld in tabel 6.3. Ook hier geldt weer dat het niet gaat om absolute waarden, omdat de sputtersnelheid op Al_2O_3 niet bekend is, maar de waarden mogen wel vergeleken worden.

ta	be	1	6.	1

type en merk	berekende concentraties in procenten voor								
	O1s	C1s	Al2p	Mg1s	Si2s	Zn2p3	Ca2p	S2p	Nals
C/AlMg5	48,64	33,50	11,17	4,43			0,82	1,44	
B/A1Mg5	50,74	20,10	19,83	7,69			1,64		
C/AISi5	53,76	22,54	21,38		1,23	0,96	0,13		
B/A1Si5	52,29	21,22	21,57		2,60				2,33

tabel 6.2

draad merk en legering	% Mg in oxydehuid	% Si in oxydehuid		
B/A1Mg5	7,69			
C/AlMg5	4,43			
B/AISi5		2,60		
C/AlSi5		1,23		

tabel 6.3

draadmerk en legering	dikte oxyde huid in [nm] bepaald ten opzichte van tantaaloxyde.
B/AIMg5	3+307
C/AlMg5	5,5
B/AISi5	6
C/A1Si5	8

⁷ De oxyde huid op deze draad bestaat uit 3 nm puur oxyde en 30 nm van een mengsel van oxyde en aluminium

De verwachting is dat er een verband bestaat tussen de dikte van de oxydehuid en de doorvoerbaarheid, immers een dikkere oxyde huid betekent een grotere elektrische weerstand.

Uit tabel 6.3 blijkt dat er een eenduidig verband bestaat tussen de dikte van de oxydehuid en de doorvoerbaarheid: hoe dikker de oxydehuid hoe slechter de doorvoerbaarheid. Wel dient te worden opgemerkt dat de oxydelaag op draad B/Mg5 geen natuurlijke oxydelaag kan zijn, daarvoor is zij veel te dik.



Figuur 7.1: Een lasrups op draad B/Mg5, vergroting 150x.



Figuur 7.2: Smeltplek met breukvlakken op draad B/Mg5, vergroting 130x.



Figuur 7.3: gesmolten materiaal met breukvlakken afgezet op draad B/Si5, vergroting 50x.



Figuur 7.4: Gesmolten materiaal met breukvlakken op draad B/Si5, vergroting 30x.

7 DE LASSIMULATIEPROEVEN

Het probleem bij het microscopisch onderzoek van de opengefreesde contactbuizen is dat zij op het boringoppervlak aantasting over aantasting vertonen. Het zou dus veel mooier zijn als niet de contactbuis maar de lasdraad na de stroomoverdracht in de contactbuis kon worden bekeken. Om deze wens te verwezenlijken is een unieke opstelling gebouwd welke schematisch is weergegeven in figuur 3.4. Deze opstelling maakt het mogelijk om de 1,2 mm dikke lasdraden te belasten met een stroom tot 280 A zonder dat de draad daarbij smelt. De mogelijkheid tot het bekijken van de draadoppervlakken na de belasting heeft het mechanisme ontsluierd dat ten grondslag ligt aan de optredende piekjes in de contactbuis.

Uit de foto in figuur 7.1 is duidelijk te zien dat er in de contactbuis boogverschijnselen optreden die micro-lasrupsjes op de draad leggen. Van de smeltverschijnselen op de foto's in figuren 7.2 t/m 7.4 is echter niet te zeggen of zij zijn veroorzaakt door boogvorming in de contactbuis of door een (extreem) hoge temperatuur in het contactvlak tussen de contactbuis en de lasdraad.

De foto's in figuren 7.5 t/m. 7.8 zullen worden gebruikt om het mechanisme dat ten grondslag ligt aan het optreden van de krachtpiekjes te verklaren. Als door boogvorming tussen contactbuis en lasdraad of door verhitting van het contactvlak tussen lasdraad en contactbuis de contactoppervlakken smelten is de basis voor de krachtpiekjes gelegd. Er zijn nu twee mogelijkheden:

1 Het geval van een micro-boog tussen de contactbuis en de lasdraad.

Als hierbij de gesmolten metaaloppervlakken met elkaar in contact komen zal de boog doven en het gesmolten metaal kunnen stollen. Daar de draad blijft bewegen zullen de twee vlakken weer van elkaar verwijderd worden en kunnen er vloeibare contactbruggen ontstaan tussen de draad en de contactbuis. Als deze bruggen, bijvoorbeeld door de vorming van een gunstiger contact op een andere plaats, volledig stollen zal de draad vast zitten aan de contactbuis en dus stilstaan. Het gevolg hiervan is dat door het draadaanvoersysteem een kracht wordt opgebouwd totdat deze kracht zo groot is dat de bruggen breken. Het opbouwen van deze kracht en het daaropvolgende breken van de contactbruggen wordt in het meetsysteem waargenomen als een piekje in de contactbruggen op de lasdraad te zien en de foto's in figuren 7.7 en 7.8 laten dezelfde resten zien in de boring van de contactbuis.

2 Het geval waarbij het contactvlak smelt bij verhitting door stroomdoorgang. Hierbij wordt door de verhitting van de contactvlakken, ten gevolge van de overgangsweerstand, bij stroomdoorgang het materiaal in het contactvlak gesmolten. We hebben dan de situatie van geval 1, na het doven van de boog en de krachtpiekvorming verloopt verder analoog.



Figuur 7.5: Gesmolten materiaal met breukvlakken op draad B/Si5, vergroting 50x.



Figuur 7.6: Detail van de breukvlakjes uit figuur 7.5, vergroting 300x.



Figuur 7.7: Het oppervlak van de boring van een contactbuis waarmee draad B/Mg5 is verlast toont een zelfde beeld als de draad uit figuur 7.5, vergroting 30x.



Figuur 7.8: Detail van de breukvlakjes uit figuur 7.7, vergroting 100x.

De tijd tussen vormen en breken van deze contactbruggen wordt bepaald door het contactoppervlak, daar dit oppervlak de kracht bepaalt die nodig is om de brug weer te breken en deze kracht een bepaalde tijd nodig heeft om opgebouwd te worden. De tijd dat de draad in de contactbuis vast zit is van belang, daar bij het stilstaan van de lasdraad de boog zal opklimmen. Bij het lassen van aluminium gaat dit opklimmen razendsnel en de boog zal dus in een zeer korte tijd de contactbuis kunnen bereiken en daar de contactbuis en de draad doen samensmelten. Verder zal de kracht die nodig is om de contactbrug te breken ook afhangen van de speling die de draad ter plaatse van de brug in de contactbuis heeft. Als de draad enige speling heeft is een soort wrikkende beweging mogelijk waardoor de contactbrug als het ware gebogen wordt en gemakkelijker breekt, terwijl bij het ontbreken van speling tussen de draad en de contactbuis de brug door pure afschuiving moet worden gebroken. Dus als er veel materiaalafzettingen zijn zullen niet alleen meer krachtpiekjes optreden maar wordt ook de kans dat een contactbrug niet meer gebroken wordt vergroot doordat de materiaalafzettingen de boring vernauwen.



Figuur 8.1: De lasdraad in de contactbuis, beschouwd als driepunts-buigstaaf, met alle grootheden uit de formules [3].



Figuur 8.2: Het derde contactpunt ligt in de liner, voor de contactbuis.

8 MODELMATIGE BESCHRIJVING VAN DE VERSCHILLEN IN DOORVOERBAARHEID

Met de resultaten van het onderzoek zijn de verschillen tussen de verschillende leveranciers te verklaren. Het is echter niet erg aannemelijk dat het verschil in doorvoerbaarheid tussen AlMg5 en AlSi5 alleen wordt veroorzaakt door het verschil in samenstelling van de oxydehuid. Als dit zo was dan zou een groot verschil in spanning bij het belasten van de verschillende legeringen waargenomen zijn tijdens de lassimulatie, daar het verschil in weerstand dan toch een ordegrootte verschilt. Het verschil tussen de beide legeringen is dus niet volledig te verklaren op grond van de proefresultaten. Wel is het duidelijk dat voor het optreden van storingen in de draadaanvoer, smeltverschijnselen in de contactbuis nodig zijn. Ook blijken deze smeltverschijnselen zich voornamelijk voor te doen bij het lassen met AlMg5-draad en deze draad is dan ook gevoeliger voor storingen.

De vraag die gesteld moet worden is dus: waarom treden er bij het lassen met AlMg5-draad meer of eerder smeltverschijnselen op dan bij het lassen met AlSi5-draad?

Het antwoord op deze vraag ligt in de combinatie van de hardheid en de voorbuiging van de draad (hierbij dient de voorbuiging te worden gemeten na de toorts zonder contactbuis). Dit wordt duidelijk gemaakt in de volgende uiteenzetting.

- A) Als we de draad in de contactbuis opvatten als een drie-punts buigbalk, zoals afgebeeld in figuur 8.1 [3] die wordt teruggebogen door de contactkracht tussen de draad en de contactbuis, dan is de contactkracht die optreedt in het contactvlak tussen de lasdraad en de contactbuis afhankelijk van de volgende grootheden:
 - 1 de voorbuiging van de draad;
 - 2 de virtuele contactbuislengte;
 - 3 de diameter van de lasdraad;
 - 4 de diameter van de boring van de contactbuis;
 - 5 de elasticiteitsmodulus van het draadmateriaal.

Deze contactkracht kan worden uitgerekend.

Er wordt uitgegaan van een virtuele contactbuislengte, omdat de situatie in werkelijkheid niet zo is als is aangegeven in figuur 8.1. In de praktijk zal het middelste contactpunt ongeveer aan de ingang van de contactbuis liggen, en op grond van evenwicht moet er dus ergens in de toorts voor de ingang van de contactbuis nog een punt liggen zoals aangegeven in figuur 8.2. Als we voor het gemak aannemen dat de draad in dat punt eindigt, ofwel we beschouwen een stuk draad dat los is van de rest van de



Figuur 8.3: De contactkracht als functie van de virtuele contactbuislengte, voor AlSi5 en AlMg5 [4].

aangevoerde draad, dan zal op grond van symmetrie het middelste contactpunt precies tussen de twee uiterste punten in liggen. Uit tabel 5.2 blijkt dat de draad alleen aanligt bij in- en uitloop van de contactbuis. We beschouwen het contactpunt bij de inloop dan als het middelste contactpunt van figuur 8.1. De virtuele contactbuislengte is dan circa twee maal de werkelijke contactbuislengte.

De contactkracht F_n kan nu met de volgende formules uitgerekend worden, waarbij wordt uitgegaan van de situatie die is aangegeven in figuur 8.1.

De doorbuiging W van de draad die wordt opgelegd door de afmetingen wordt gegeven door:

(8.1)

$$W=H+D_1-D_2$$

waarin H=R-K en K= $\sqrt{R^2-(\frac{S}{2})^2}$

met H = als aangegeven in figuur 8.1, R = de halve voorbuiging van de draad (de voorbuiging is de diameter van de cirkel die wordt gevormd als een eind draad op een gladde ondergrond wordt neergelegd), S= de virtuele contactbuislengte en K = als aangegeven in figuur 8.1.

Bij bekende doorbuiging W wordt de contactkracht F_n gegeven door:

(8.2)

$$F_n = W \times \frac{48 \times E \times I}{S^3}$$

E=elasticiteits modulus van het draadmateriaal $I=\frac{\Pi \times D_1^4}{32}=weerstandsmoment tegen buiging$ S=de virtuele contactbuislengte

In figuur 8.3 is de contactkracht als functie van de contactbuislengte weergegeven zoals berekend met deze formules. Hieruit blijkt onder andere dat het geen zin heeft om de contactbuis te blijven verlengen maar dat er een optimum is voor de contactbuislengte, bij een gegeven draad, met betrekking tot de contactkracht.

B) Bij bekende contactkracht F_n is het mogelijk om met behulp van de hardheid het ware contactoppervlak A_w tussen de draad en de contactbuis uit te rekenen. Dit contactoppervlak wordt volgens Slade [5] gegeven door:

(8.3)

$$A_W = \frac{F_n}{\xi \times H}$$

waarin F_n =de berekende contactkracht H=de hardheid van de draad ξ =een constante kleiner dan 1 meestal tussen 0,1 en 0,3

De constante ξ is afhankelijk van de ruwheid van de contactoppervlakken en is kleiner naarmate de contactvlakken gladder zijn afgewerkt.

Dit ware contactoppervlak is een zeer klein oppervlak en er zal bij stroomoverdracht door dit oppervlak dan ook een vernauwingsweerstand R_k optreden. Deze vernauwingsweerstand wordt [5] gegeven door:

(8.4)

$$R_k = \frac{\rho}{2 \times a}$$

waarin ρ =de soortelijke weerstand van het contactmateriaal a=de straal van het cirkelvormige contactoppervlak

Als het contact wordt gemaakt tussen twee verschillende materialen dan wordt er maar een zeer kleine fout gemaakt als voor ρ de volgende betrekking wordt ingevuld [6]:

(8.5)

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$$

waarin

 ρ_1 =de soortelijke weerstand van materiaal 1 ρ_2 =de soortelijke weerstand van materiaal 2





Combinatie van de vergelijkingen (8.3) en (8.5) met $A_w = \pi a^2$ levert:

(8.6)

$$R_k = \frac{\rho}{2} \times \sqrt{\frac{\pi \times \xi \times H}{F}}$$

Als nu R_f de weerstand is van eventueel aanwezige films op het oppervlak, dan wordt de totale contactweerstand R_c :

(8.7)

$$R_c = R_f + R_k$$

Bij verwaarlozing van de aanwezigheid van eventuele films op het oppervlak is de contactweerstand R_c dus gelijk aan de vernauwingsweerstand R_k en kan met de lasstroom I_{las} de spanningsval V_c over het contact berekend worden uit:

(8.8)

$$V_c = I_{las} \times R_k$$

Uit deze spanningsval V_c over het contact kan vervolgens, de maximale temperatuur T_{max} die in het contact optreedt worden berekend volgens:

(8.9)

$$T_{\max} = \frac{V_c}{2 \times \sqrt{L}}$$

waarin L=de Lorentz constante welke wordt gegeven door:

$$L = \frac{\pi^2}{3} \times \left(\frac{k}{e}\right)^2$$

met k=de Boltzmann constante en e=de electronlading uit berekening volgt dat $L=2.45\times10^{-8}$ W Ω /graad²

Experimenteel is de geldigheid van deze formule geverifieerd door de spanningsval over een geleider bij zijn smeltpunt te bepalen. De resultaten van die bepaling zijn weergegeven in figuur 8.4. De getrokken lijn volgt uit formule 8.9.



Figuur 8.5: De contactvlaktemperatuur als functie van de virtuele contactbuislengte voor AlMg5 en AlSi5 en $\xi=0,1$ en $\xi=0,3$. Dit is de situatie voor het middelste contactpunt.



Figuur 8.6: De contactvlaktemperatuur als functie van de virtuele contactbuislengte voor AlMg5 en AlSi5 en $\xi=0,1$ en $\xi=0,3$. Dit is de situatie voor het contactpunt aan de tip.

Na de bepaling van de hardheid van één AlSi5-draad en van één AlMg5 draad⁸ zijn met behulp van de formules 8.1 tot en met 8.9 de contactvlak temperaturen voor de verschillende legeringen berekend als functie van de virtuele contactbuislengte. Dit is gedaan voor de twee grenswaarden van ξ , namelijk $\xi=0,1$ en $\xi=0,3$. De berekende waarden van de contactvlaktemperatuur zijn in figuur 8.5 uitgezet tegen de virtuele contactbuislengte, in deze figuur zijn tevens de smelttemperaturen van koper en aluminium aangegeven. De waarden van de verschillende in de formules voorkomende grootheden zijn weergegeven in tabel 8.1.

De werkelijke lengte van de boring in de contactbuis is bij deze proeven 25 mm. Dat wil zeggen dat in figuur 8.5 voor ons geval een virtuele lengte van 40-60 mm relevant is. We zien dan dat de contactvlaktemperatuur vrijwel altijd beneden de smelttemperatuur van aluminium ligt. Maar dit is de situatie voor het middelste contactpunt terwijl de smeltverschijnselen volgens tabel 5.2 altijd aan de tip zijde van de contactbuis worden waargenomen. Voor de contactkracht aan de tip geldt op grond van evenwicht dat deze de helft is van de contactkracht in het middelste contactpunt. Als met deze contactkracht de zelfde grafiek wordt geplot voor de temperatuur in het contact aan de tip dan blijkt (zie figuur 8.6) dat de contactvlak temperatuur van een AlMg5-draad voor $\xi=0,3$ nog maar net onder de smelttemperatuur van aluminium komt.

Uit figuur 8.4 blijkt dat bij een spanningsval van $\pm 0,3$ V over het contact, in het contactvlak de smelttemperatuur van aluminium reeds wordt bereikt. Vergelijken we deze spanningsval met de tijdens de lassimulatie waargenomen spanningsval van 0,5-0,6 V, over de messing kop met daarin de contactbuis, het contact en \pm 5mm lasdraad. Dan blijken deze spanningsvallen van de zelfde ordegrootte te zijn. Het is daarom zeer goed mogelijk dat het model het contact in de contactbuis correct beschrijft.

De situatie waarbij $0,2 \le \xi \le 0,3$ is gezien de ruwheid van het oppervlak van de boring van de contactbuis voor ons geval waarschijnlijk het meest relevant. ξ heeft dan, voor een goede AlMg5-draad, een zodanige waarde dat de contactvlaktemperatuur, bij een virtuele contactbuislengte > 40 mm, onder de smelttemperatuur van aluminium blijft.

Op grond van deze resultaten kan het verschil in doorvoerbaarheid, tussen AlMg5 en AlSi5, als volgt worden verklaard. Bij een gegeven ξ , virtuele contactbuislengte en voorbuiging en hardheid van de lasdraad ligt de contact-vlaktemperatuur, zoals hierboven berekend, vast. Deze temperatuur wil ik de basis-contactvlaktemperatuur noemen.

⁸ Er is van uitgegaan dat er ook bij aluminium een relatie bestaat tussen de hardheid van de draad en de treksterkte. Daar de treksterktes van de draden van de verschillende leveranciers voor een gegeven legering vrijwel gelijk zijn, is aangenomen dat dit voor de hardheid ook geldt en is dus per legering maar van één draad de hardheid bepaald.

Tabel 8.1

draadtype	R [mm]	E [n/mm ²]	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	Hardheid [n/mm ²]	ρ_{c_u} [Ω mm]	ρ _{Al} [Ωmm]	ρ [Ωmm]
AlMg5	425	7000	1,2	1,6	1177	16,7*10 ⁻⁶	27*10 ⁻⁶	21,85*10-6
AlSi5	280	7000	1,2	1,6	633	16,7*10 ⁻⁶	27*10-6	21,85*10-6

Ook ligt nu het verschil tussen deze basis-contactvlaktemperatuur en de smelttemperatuur van aluminium vast. Deze temperatuur noemen we de temperatuurdrempel van de draad, $\Delta T_{drempel}$. Deze $\Delta T_{drempel}$ is voor een AlSi5-draad veel groter dan voor een AlMg5-draad. De reden dat er een verschil is tussen de doorvoerbaarheid van AlSi5-draad en de doorvoerbaarheid van AlMg5-draad de drempel eerder wordt overschreden. Daarom is de AlMg5-draad dus gevoeliger voor storingen dan de AlSi5-draad.

In het voorgaande is er bij de berekening van de contactvlaktemperatuur van uitgegaan dat $R_c=R_k$ (m.a.w. R_f is verwaarloosd). De werkelijke hoogte van de contactvlaktemperatuur wordt echter bepaald door de totale contactweerstand $R_c=R_f+R_k$. De waarde van R_f wordt bij een gegeven hardheid en voorbuiging door de fabrikanten beïnvloed door de manier waarop deze het oppervlak van de draad afwerkt. De waarde van R_f zal altijd groter zijn dan nul en is afhankelijk van:

- de dikte van de aanwezige oxydehuid
- de samenstelling van de oxydehuid
- vuil op de draad
- etc.

De verschillen in doorvoerbaarheid tussen de verschillende leveranciers worden dus veroorzaakt door de verschillen in de oppervlakte-gesteldheid van de verschillende draden. Ook wordt nu duidelijk dat de storingsgevoeligheid van de draad groter wordt naarmate de oxydehuid toeneemt.
9 CONCLUSIES

De hypothese, dat storingen in de draadaanvoer optreden door het vastvriezen van de draad in de contactbuis, blijkt juist te zijn. De hierbij optredende vertragingen in de draadaanvoersnelheid veroorzaken opklimmen van de boog langs de draad en in het ergste geval smelt hierbij de tip van de contactbuis. Spaantjes, aluminiumpoeder en vuil, dat ofwel op de draad zit ofwel in het systeem gevormd wordt, zullen opeenhopen in de contactbuis, de boring vernauwen, en de kans op storingen aanzienlijk verhogen.

Het onderzoek heeft geleid tot de volgende conclusies.

- 1) Adhesie speelt geen rol bij het optreden van storingen in de draadaanvoer.
- 2) Op de draad aanwezige spaantjes, vuil en aluminiumpoeder worden in een teflon liner samengewreven in de wand tot een soort koeken of plakkaten die bij een voldoende dikte weer loskomen en mee worden gevoerd naar de contactbuis. Deze plakkaten zullen in de contactbuis de kans op storingen aanzienlijk vergroten.
- 3) Storingen in de draadaanvoer gaan gepaard met het optreden van smeltverschijnselen in de contactbuis. De storingen in de draadaanvoer blijken te worden veroorzaakt door de vorming van vloeibare contactbruggen die op de een of andere manier de kans krijgen te stollen waarna de draad vast zit aan de contactbuis. Het losscheuren van de draad kost kracht en belemmert daardoor de vrije doorvoer.
- 4) Het verschil in storingsgevoeligheid tussen de twee typen legeringen blijkt te worden veroorzaakt door het verschil in hardheid en voorbuiging van de draden die uit de verschillende legeringen zijn vervaardigd.
- 5) De dikte van een op de draad aanwezige oxydehuid en de doorvoerbaarheid van die draad lijken met elkaar in verband te staan.

Tabel 10: De contactvlaktemperatuur voor verschillende waarden van de hardheid en de voorbuiging (D) van de draad, voor $\xi=0,1$ en $\xi=0,3$ en bij de optimale virtuele contactbuislengte (L). deze waarden gelden voor draden met een diameter van 1,2 mm en een boringsdiameter in de contactbuis van 1,6 mm. De smelttemperatuur van aluminium is 932 °K.(in dit onderzoek: AlSi: Hv_{0,02}=60 en 510 mm $\leq D \leq 630$ mm; AlMg: Hv_{0,02}=120 en 850 mm $\leq D \leq 950$ mm).

		contactvlaktemperatuur [°K]					
hardheid micro Vickers		60		90		120	
D [mm]	L [mm]	ξ=0,1	ξ=0,3	ξ=0,1	ξ=0,3	ξ=0,1	ξ=0,3
400	44	208	360	254	440	294	509
500	49	246	425	301	521	347	601
600	54	282	488	345	598	398	690
700	58	316	548	387	671	447	774
800	62	350	606	428	742	495	856
900	66	382	662	468	810	540	932
1000	69	413	716	506	877	558	1012

10 AANBEVELINGEN

Om storingen te voorkomen dient er geprobeerd te worden om smeltverschijnselen en boogvorming in de contactbuis te voorkomen.

Dit kan worden gerealiseerd door de volgende eisen aan een lasdraad te stellen, de draad moet:

- zacht zijn;
- een kleine voorbuiging hebben;
- een schoon oppervlak hebben met een dunne oxydehuid zonder scheuren (dikte oxydehuid ≤ 6 nm);
- een oppervlakteruwheid hebben die een compromis vormt tussen een lage waarde voor de constante ξ en voldoende grip om de draad met kunststof wielen door te kunnen voeren (door het doorvoeren van de draad met stalen wielen, wordt de draad beschadigd waardoor de kans op storingen wordt vergroot).

In tabel 10 zijn voor een aantal waarden van de hardheid en voorbuigingen van de draad bij de optimale virtuele contactbuislengtes de berekende contactvlaktemperaturen weergegeven voor $\xi=0,1$ en $\xi=0,3$. Het hangt van de constructie van de toorts af hoe groot de werkelijke contactbuislengte moet zijn (niet in alle gevallen zal het middelste contactpunt zoals tijdens dit onderzoek in de buurt van of in de ingang van de contactbuis liggen, denk bijvoorbeeld aan de verschillen die zullen optreden bij gebruik van rechte toortsen).

Voor wat betreft het draadaanvoer/lassysteem geldt dat er voor moet worden gezorgd dat:

- de draad niet door het draadaanvoersysteem wordt beschadigd, stalen wielen zijn dus niet aan te raden;
- de draad niet overmatig gericht wordt, de aandrukkracht tussen de draadaanvoerwielen moet dus zo laag mogelijk zijn;
- het aanvoersysteem zo schoon mogelijk is, dus veelvuldige inspectie van het systeem en regelmatig de liners vervangen;
- er wordt gelast met een contactbuis met een lengte die, bij de diameter en voorbuiging van de gebruikte lasdraad, de maximaal haalbare contactkracht oplevert. Tabel 10 geeft voor een draad met een diameter van 1,2 mm en een contactbuisboring met een diameter van 1,6 mm voor verschillende waarden van de voorbuiging (D), in de tweede kolom de optimale virtuele contactbuislengte (L).

11 LITERATUUR

- [1] Ir. D. landheer en prof. ir. A.W.J. de Gee,
 "Tribotechniek deel A Inleiding dynamische contactverschijnselen". College diktaat TU-Delft, 4^e druk Augustus 1991.
- [2] Gesprek met prof. ir. A.W.J. de Gee op 28-07-1992 12.30 uur.
- [3] V. Tammi en M. Dios,
 "Reibkraftmessungen in Schutzgas-Schweißbrennern".
 Uitgave van de firma Binzel naar aanleiding van de vakbeurs
 "Schweißen und Schneiden '89" best.-nr. SFE.0002.
- [4] M.C.L.F. de Kanter,"De doorvoerbaarheid van de draad bij het MIG/MAG-lassen". 08-10-1992.
- [5] T. Brown jr. E.A.,"Circuit interruption".uitg. Marcel Dekker New York.
- [6] R. Holm,
 "Electric contacts".
 Almqvist & Wiksells 1946,
 Boktryckeri aktie bolag Uppsala 1946.