

DE STROOMOVERDRACHT VAN DE CONTACTBUIS NAAR DE LASDRAAD BIJ HET MIG/MAG-LASSEN VAN STAAL

Rick de Zeeuw

Afstudeerverslag
Vakgroep Lastechnologie en NDO
Faculteit Scheikundige Technologie en Materiaalkunde
TU Delft, Augustus 1994

Afstudeerhoogleraar:	Prof. Dr. G. den Ouden	
Afstudeerbegeleiders:	Ir. M.P. Sipkes,	TNO Metaalinstituut
	Ir. T. Luyendijk,	TU Delft

VOORWOORD

Dit rapport is de afsluiting van het onderzoek dat ik heb uitgevoerd op de lasafdeling van het Metaalinstituut TNO in Apeldoorn. Het schrijven van het rapport geldt als het laatste onderdeel van mijn studie Werktuigbouwkunde aan de Technische Universiteit in Delft.

Op de TU heb ik de laatste twee jaar kunnen profiteren van het enthousiasme waarmee de leden van de vakgroep "Lastechnologie en Niet Destructief Onderzoek" onderzoek verrichten. Vooral van Theo Luyendijk, mijn afstudeerbegeleider van de TU, heb ik geleerd hoe leuk het is om lasonderzoek te doen en hoe belangrijk het is om de onderzoeksresultaten van anderen niet zonder meer over te nemen.

Bij TNO in Apeldoorn, waar ik het onderzoek heb uitgevoerd, ben ik dank verschuldigd aan mijn begeleider Rien Sipkes. Hij heeft me met veel vrijheid laten werken aan een bijzonder leuk probleem. Verder ben ik door alle medewerkers van de lasafdeling vanaf de eerste dag zonder enige klacht geholpen aan bruikbare antwoorden op al mijn vragen.

Lastechnologie blijkt een interessant kruispunt van verschillende disciplines te zijn. Bij het schrijven van dit verslag heb ik dan ook een beroep gedaan op de kennis van Ir. G.J.J. Streefland, deskundige op het gebied van het omvormen, Prof. ir. A.W.J. de Gee, triboloog en Ir. A. Steinmetz, expert op het gebied van elektrische contacten. Graag wil ik hen bij deze bedanken voor hun medewerking aan het onderzoek.

Rick de Zeeuw
Delft, 16 Augustus 1994

SAMENVATTING

Het MIG/MAG-lassen is een belangrijke verbindingstechniek, die brede toepassing vindt in de metaalindustrie. Het proces is gevoelig voor storingen. De meeste storingen ontstaan in de contactbuis van de lastoorts. De oorzaak hiervan is de grote thermische en mechanische belasting waaraan de contactbuis blootstaat. Ondanks uitgebreid onderzoek naar de achtergronden van het storingsgedrag is nog geen mechanisme gevonden dat het storingsgedrag afdoende kan beschrijven.

In dit onderzoek zijn de op dit moment bekende storingsoorzaken verzameld. Met behulp van een gebeurtenissenboom is onderzocht hoe de verschillende oorzaken het lasproces en elkaar beïnvloeden.

Op grond van deze literatuurstudie is de hypothese geformuleerd, dat storingen die optreden tijdens het MIG/MAG-lassen zijn te omschrijven als een verstoring van de stroomdoorvoer vanaf de contactbuis naar het lasbad. Zo'n verstoring van de stroomdoorvoer treedt op wanneer de stroomovergang van de contactbuis naar de lasdraad wordt belemmerd of als de voortloopsnelheid van de lasdraad varieert.

Om een verstoring van de stroomoverdracht van de contactbuis naar de lasdraad te voorkomen moet een continu elektrisch contact tussen de contactbuis en de lasdraad worden verzekerd. Dit elektrisch contact wordt voornamelijk bepaald door de contactkracht waarmee een lasdraad tegen de contactbuis drukt. Ook vervuiling van het elektrisch contact kan een ongestoorde stroomoverdracht onmogelijk maken.

In dit onderzoek is een vergelijking afgeleid die het verband beschrijft tussen de eigenschappen van de lasdraad en de contactkracht die de lasdraad in de contactbuis opbouwt. Uit de vergelijking blijkt dat de grootte van de contactkracht voornamelijk wordt bepaald door de voorbuiging waarmee de lasdraad de contactbuis inloopt. Deze voorbuiging wordt, bij het gebruik van een gebogen toorts, door plastische deformatie van de lasdraden in de bocht van de toorts bepaald.

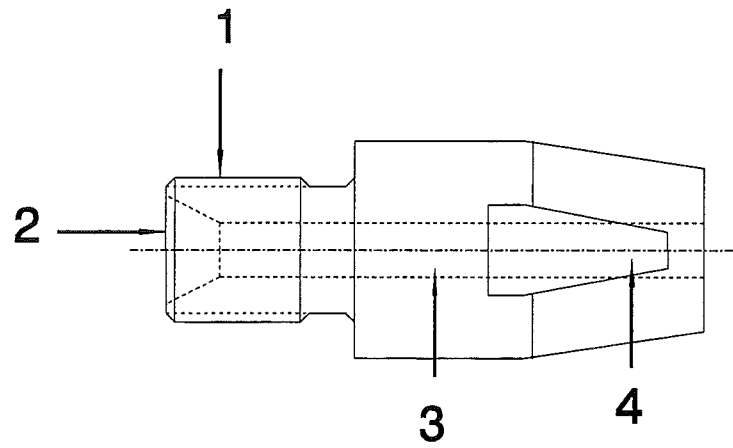
Om de hypothese te kunnen toetsen is in dit onderzoek een achttal stalen lasdraden beproefd. Lasdraden waarbij tijdens de lasproeven de contactbuis vervuilde en lasdraden waarvan tijdens de proeven de voortloopsnelheid van de draad varieerde, veroorzaakten de meeste storingen. De lasdraden die het beste de lastest doorstonden, bleken zelf in staat om tijdens het lassen de vervuiling van de contactbuis minimaal te houden.

Uit de lastests bleek ook dat het optreden van smeltverschijnselen in de contactbuis, zonder dat in het systeem contactbuis-lasdraad iets veranderde, niet voldoende was om storingen te laten optreden.

Op grond van de in dit onderzoek uitgevoerde test kan de hypothese niet worden weerlegd.

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD	1
SAMENVATTING	2
HOOFDSTUK 1: Inleiding	5
HOOFDSTUK 2: Introductie van het stroomdoorvoer-probleem	8
2.1 Het MIG/MAG-lasproces	8
2.2 Storingen die kunnen optreden tijdens het MIG/MAG-lassen	9
2.3 Verzamelen van de storingen in een gebeurtenissenboom	13
2.4 Verwerking van de gebeurtenissenboom	14
HOOFDSTUK 3: Theorie	16
3.1 Grootheden die een rol spelen bij het maken van elektrisch contact	16
3.2 Elektrisch contact tussen MIG/MAG-contactbuis en lasdraad	26
3.3 Het model van De Kanter	39
3.4 Hypothese	40
HOOFDSTUK 4: Experimenten	42
4.1 Experimenten voor het opstellen van de theorie	42
4.2 Vaststellen van de eigenschappen van de lasdraden	44
4.3 Duurtests doorvoerbaarheid	49
4.4 Lassimulaties	65
4.5 Bruikbaarheid van de resultaten belicht.	70
HOOFDSTUK 5: Berekeningen	72
5.1 Berekening van de contactkracht	72
5.2 Berekening van het contactoppervlak tussen draad en contactbuis	76
5.3 Berekening van de contactweerstand	78
5.4 Berekening van de contacttemperatuur	79
HOOFDSTUK 6: Bespreking van de proefresultaten	81
6.1 bespreking van de tests voorafgaande aan de lasexperimenten	81
6.2 bespreking van de duurtest	82
6.3 bespreking van de lassimulaties	83
6.4 Bespreking van de hypothese.	84
HOOFDSTUK 7: Conclusies	85
REFERENTIES	86
BIJLAGEN	92



Figuur 1.1: standaard contactbuis.

HOOFDSTUK 1: Inleiding

Introductie van het onderwerp: storingen bij het MIG/MAG-lassen.

Het MIG/MAG-lasproces vindt in de metaalindustrie brede toepassing als verbindingstechniek. Zowel voor het maken van grote constructies zoals bijvoorbeeld schepen, als voor het uitvoeren van klein laswerk is het proces geschikt. Eén van de goede eigenschappen van het lasproces is de grote produktiesnelheid die ermee valt te behalen.

De warmte die nodig is voor het leggen van een las wordt bij MIG/MAG-lassen geleverd door een elektrische stroom. Deze lasstroom wordt in een laspistool zo dicht mogelijk bij de lasboog aan een afsmeltende lasdraad overgedragen. De stroomoverdracht wordt door een speciaal daarvoor gemonteerd onderdeel uitgevoerd: de *contactbuis*. De lasdraad loopt door de contactbuis heen en de contactbuis kan naast de stroomoverdracht ook zorg dragen voor het sturen van het uiteinde van de lasdraad. In figuur 1.1 is een standaard uitvoering van een contactbuis te zien. De contactbuis is voorzien van schroefdraad (1) voor de bevestiging in de lastoorts, heeft een taps toelopende entree (2), een inwendig kanaal over de volle lengte van de buis (3) en op de buis zijn vlakjes gemaakt om montage te vereenvoudigen (4).

Tijdens het lassen staan contactbuizen bloot aan een grote thermische en mechanische belasting. Daardoor treedt in het onderdeel tijdens het lassen slijtage op. Bovendien kan de contactbuis door het gebruik verstopt raken door vervuiling. Een regelmatig transport van de draad door de buis en een goede stroomoverdracht in de buis worden daarmee onmogelijk. De contactbuis kan dan zijn taak niet meer naar behoren uitvoeren en wordt onbruikbaar. In de constructie van het laspistool is hiermee rekening gehouden: een contactbuis kan eenvoudig en in korte tijd vervangen worden [1].

Het tempo waarmee de contactbuis zijn bruikbaarheid verliest, is direct afhankelijk van de lasdraad die met de contactbuis wordt verlast. De gebruiksduur van contactbuizen varieert, afhankelijk van de eigenschappen van een lasdraad, van enkele minuten tot vele uren. Het is van belang om te weten welke eigenschappen van een lasdraad de insteltijd van een contactbuis bepalen.

Verantwoording van het uitvoeren van onderzoek naar het faalgedrag van het systeem contactbuis-lasdraad.

De contactbuis wordt, vanwege de lage grondstof- en produktiekosten, door veel mensen als wegwerpartikel gezien. Lassers kunnen het onderdeel tenslotte naar behoefte vervangen.

Die overweging past op dit moment zeker niet meer bij het volledig geautomatiseerd lassen en bij de hoge kwaliteitseisen die aan de lassen worden gesteld. Want iedere verstoring van een regelmatige draaddoorvoer of een constante stroomoverdracht in de contactbuis betekent: een verstoring van de lasboog. En dat betekent kwaliteitsverlies van de las die gelegd wordt.

Juist voor het geautomatiseerd en gerobotiseerd lassen is het van groot belang, dat de stroomoverdracht zonder problemen plaatsvindt en de lasdraad zonder storingen kan worden doorgevoerd. Bij deze processen wordt immers gedurende langere tijd zonder de tussenkomst van een operator of lasser gewerkt. Bepaalde kwaliteitsvariaties die een lasser eenvoudig kan verhelpen, worden door een robot niet herkend. Het uitvallen van een contactbuis, veroorzaakt stilstand van een heel lassysteem en soms zelfs produktieverlies van een hele produktiestraat. De kosten van het falen van een contactbuis kunnen op deze manier vele malen hoger zijn dan alleen de aanschafprijs van het onderdeel [2].

Bovendien zijn er grote verschillen in het optreden van storingen tussen verschillende lasdraden. Er zijn lasdraden waarbij er sporadisch storingen optreden. Door het veranderen van de eigenschappen van alleen de lasdraad kan het MIG/MAG-systeem worden verbeterd. De vraag is dan wel: welke eigenschappen van een lasdraad zijn bepalend voor het storingsgedrag van het lassysteem?

Doelstelling van dit onderzoek.

Het probleem van een verstoring van een regelmatige draad-doorvoer en een regelmatige stroomoverdracht bij het MIG/MAG-lassen, is onderwerp geweest van uitgebreid onderzoek. In de literatuur zijn daarom ook tal van publikaties bekend waarin het falen van contactbuizen wordt beschreven. Geen van de onderzoeken heeft echter een bevredigend antwoord kunnen geven op de vraag: wat is nu precies het mechanisme dat verantwoordelijk is voor het verstoren van de doorvoer van lasdraden.

In de loop der jaren is ook een groot aantal oplossingen bedacht om de betrouwbaarheid van het MIG/MAG-systeem te verhogen. Geen van de oplossingen heeft het proces echt kunnen verbeteren. Dat toont eens te meer aan dat het precieze faalmechanisme nog steeds niet is blootgelegd.

Ook bij het Metaalinstituut TNO is aan het onderwerp doorvoerbaarheid ruime aandacht geschonken. M.C.L.F. de Kanter heeft in 1993, in het kader van zijn afstudeeronderzoek, een verklaring proberen te vinden voor de problemen die ontstaan met de doorvoer van aluminium lasdraden tijdens het MIG-lassen. Ook heeft hij getracht de oorzaak te achterhalen van het verschil in doorvoerbaarheid tussen verschillende soorten aluminiumdraad.

Het onderzoek heeft als resultaat een model opgeleverd, waarmee De Kanter verschillen in doorvoerbaarheid verklaart aan de hand van het verschil in hardheid van de onderzochte draden. Volgens zijn model leveren de hardste draden de grootste problemen tijdens het doorvoeren [3].

Het streven van dit afstudeeronderzoek is om te achterhalen wat het mechanisme is dat ten grondslag ligt aan het optreden van storingen tijdens het lassen met stalen lasdraden. Daarbij is het wenselijk dat op grond van eigenschappen van de lasdraden zelf, het verschil in lasgedrag tussen de verschillende draden kan worden verklaard. Tevens zal de bruikbaarheid van het door De Kanter opgestelde

model voor het beschrijven van het vastloopgedrag van staaldraden worden onderzocht.

Opzet van dit verslag

In **hoofdstuk 2** wordt begonnen met een korte uitleg van het MIG/MAG lasproces. Vervolgens worden de in de literatuur bekende storingsoorzaken geïnterpreteerd. Ook wordt met behulp van een overzicht van octrooien aangegeven in welke richting oplossingen worden gezocht. Als afsluiting van het hoofdstuk wordt de belangrijkste storingsoorzaak, de stroomoverdracht in de contactbuis, opgespoord.

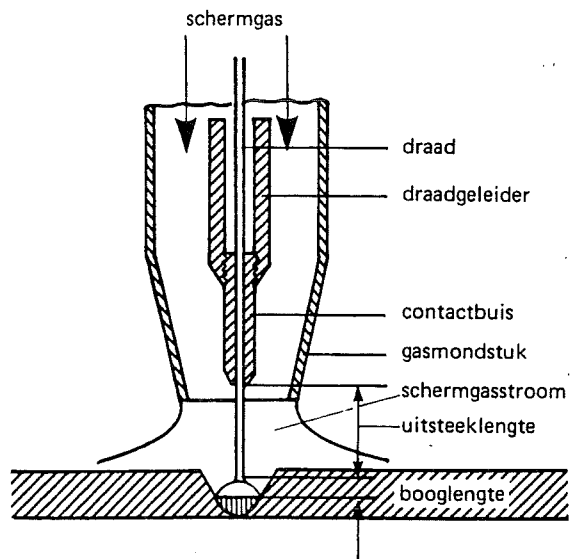
In **hoofdstuk 3** wordt de theorie behandeld die de stroomoverdracht in een MIG/MAG-systeem beschrijft. Aandacht is er voor algemene wetten die voor stroomoverdracht gelden. Deze algemene wetten worden vertaald in een rekenmodel om de stroomoverdracht in het systeem contactbuis-lasdraad te kunnen beschrijven. Het hoofdstuk wordt afgesloten met de formulering van de hypothese die in dit onderzoek zal worden getoetst.

In **hoofdstuk 4** worden de experimenten besproken die zijn uitgevoerd in dit onderzoek. In het hoofdstuk staan ook alle proefresultaten vermeld.

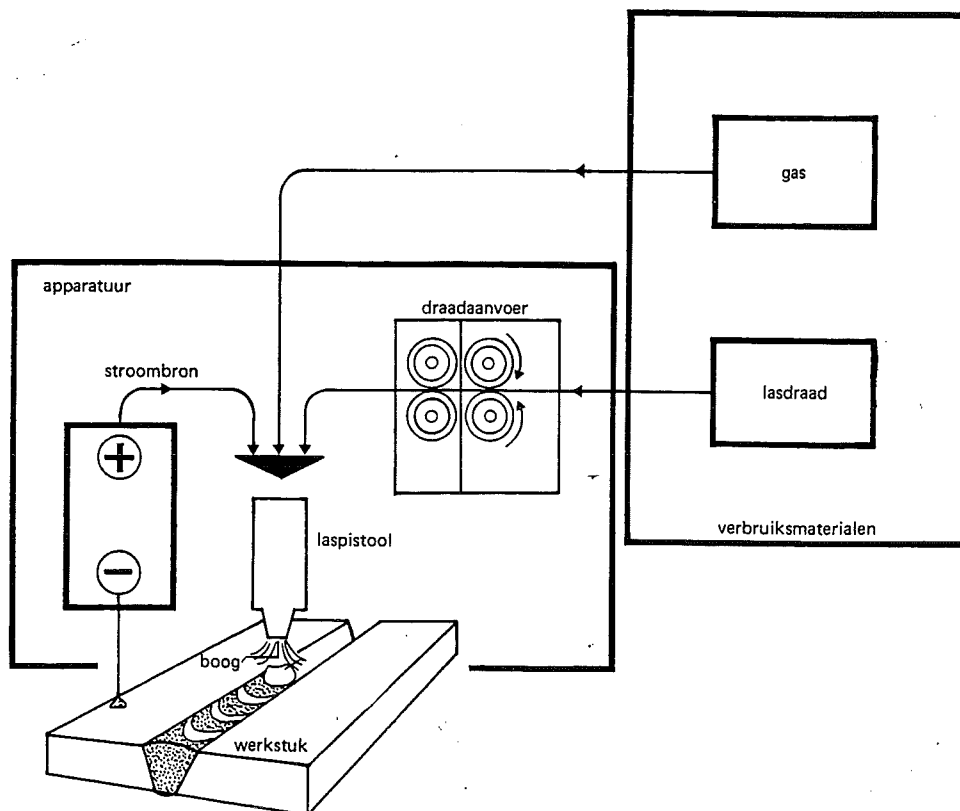
In **hoofdstuk 5** worden met behulp van de proefresultaten en het rekenmodel uit hoofdstuk 3 berekeningen uitgevoerd.

In **hoofdstuk 6** worden de proefresultaten en de uitkomsten van de berekeningen besproken en wordt de houdbaarheid van de hypothese onderzocht.

In **hoofdstuk 7** zijn de conclusies, die uit het dit onderzoek volgen, verzameld.



Figuur 2.1: opbouw van een lastoorts [4].



Figuur 2.2: overzicht van een MIG/MAG-installatie.

HOOFDSTUK 2: Introductie van het stroomdoorvoer-probleem

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de ideeën die er op dit moment zijn over het optreden van storingen in een MIG/MAG-lassysteem. In dit hoofdstuk wordt ook bekeken, wat er nog niet bekend is over storingen in het lassyteem.

Om te beginnen wordt in **paragraaf 2.1** het lasproces zelf geïntroduceerd.

In **paragraaf 2.2** wordt uitgelegd op welke manieren een storing kan optreden in het MIG/MAG-lassysteem.

In **paragraaf 2.3** zijn alle, op dit moment bekende, storingsoorzaken verzameld en samengevoegd in één grote gebeurtenissenboom.

In **paragraaf 2.4** wordt de gebeurtenissenboom gebruikt om het onderwerp te kunnen selecteren waaraan de rest van het onderzoek is gewijd.

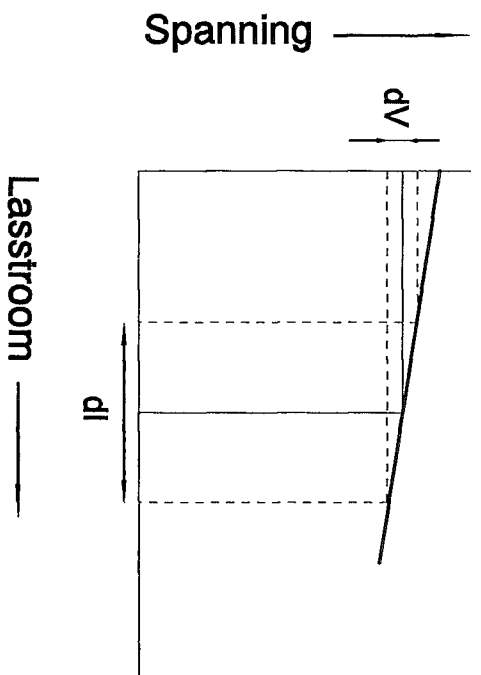
2.1 Het MIG/MAG-lasproces

Het MIG/MAG-lasproces is een booglasproces. Dat betekent dat de voor het proces benodigde warmte wordt geleverd door een elektrische boog. De boog wordt getrokken tussen een elektrode en het te lassen werkstuk. Bij het MIG/MAG-lassen wordt een afsmeltende, continu toegevoerde draad als elektrode gebruikt. Tijdens het lassen wordt het smeltbad door een schermgas afgedekt. Bij het Metal-Inert-Gas (MIG) lassen is dat een gas dat niet met het lasmetaal reageert, zoals argon of helium. Bij het Metal-Active-Gas (MAG) lassen is dat een gas waarin wel actieve componenten aanwezig zijn, zoals kooldioxide of zuurstof. De gasstroom wordt door een gascup naar de lasboog geleid.

De lasstroom wordt geleverd door een stroombron. De stroomoverdracht vindt plaats in een koperen holle buis, de contactbuis. Het elektrisch contact in de contactbuis is een sleepcontact. De lasdraad loopt met een zekere snelheid door de stilstaande contactbuis heen. De boring van de contactbuis wordt voor staal 0,2 mm en voor aluminium 0,4 mm groter gekozen dan de diameter van de draad. Op het moment dat de draad de buis inloopt, heeft de draad een zekere kromming. In de contactbuis wordt de draad rechtgebogen. Door de veerkracht van de draad wordt een contactkracht tegen de wand van de contactbuis opgebouwd [1, 5]. De houder waarin de contactbuis is bevestigd, kan met water worden gekoeld. Figuur 2.1 toont de opbouw van de lastoorts.

De lasdraad wordt vanaf een haspel met behulp van vier wieltjes richting toorts geduwd. Twee daarvan worden met behulp van een elektromotor aangedreven en zijn voorzien van een groef. De andere wieltje worden niet aangedreven maar dienen als aandrukrollen en hebben een glad oppervlak.

De draad wordt geleid door een metalen spiraal, de liner. Deze spiraal is flexibel genoeg om de toorts bewegingsvrijheid te geven, maar is ook star genoeg om te voorkomen dat de draad knikt. De liner is samen met de gastoevoer en de toevoer van koelwater in één slang opgeborgen. Figuur 2.2 geeft een overzicht van een complete MIG/MAG-installatie.



Figuur 2.3: vlakke karakteristiek.

Om het MIG/MAG-proces efficiënt te kunnen gebruiken moet er aan het einde van de draad een stabiele boog staan en blijven. Iedere verstoring van de lasboog, of dat nu een verminderde warmte-inbreng of bijvoorbeeld een tijdelijke richtingsverandering van de boogdruk is, leidt tot verandering in het bevochtigings- en stolpatroon en daarmee tot mogelijke fouten [6].

Voor het MIG/MAG-lassen wordt gewerkt met stroombronnen met een zogenoemde 'vlakke karakteristiek'. Dat betekent dat een kleine variatie in de spanning een grote variatie in de stroom als effect heeft, zie ook figuur 2.3. Door de karakteristiek van de stroombron blijft tijdens het lassen de booglengte in het MIG/MAG-lasproces constant, wanneer de draadsnelheid en de ingestelde lasspanning constant gehouden worden. Immers: een kortere boog betekent een kleinere weerstand over de boog. Dat heeft als gevolg dat er een grotere stroom gaat lopen ($V=IR$ en V is constant). Een grotere stroom betekent: meer warmte en dus zal er meer draad afsmelten. Wanneer er meer draad afsmelt, dan wordt de boog dus langer. Kortom, het systeem zelf zorgt voor een constante booglengte. Voor een goede werking van dit systeem is het noodzakelijk dat spanningsveranderingen die in de lasstroomkring optreden alleen maar afkomstig zijn van spanningsvariaties over de boog. Daarmee hangt dus de stabiliteit van een ingestelde boogspanning niet alleen af van de dynamische eigenschappen van de stroombron, maar ook in grote mate van de kwaliteit van de stroomoverdracht in de contactbuis [7].

De conclusie kan getrokken worden dat een goede stroomoverdracht noodzakelijk is voor het leggen van een las met constante kwaliteit.

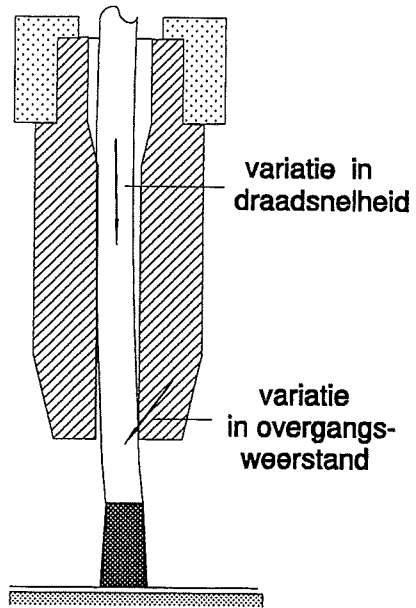
2.2 Storingen die kunnen optreden tijdens het MIG/MAG-lassen

Wanneer in de literatuur gesproken wordt over storingen tijdens het MIG/MAG-lassen wordt meestal gesproken over problemen met het transport van lasdraden door het draadaanvoersysteem. In paragraaf 2.1 werd gesteld dat een goede en een constante stroomdoorvoer vanaf de contactbuis via de lasdraad naar het lasbad, noodzakelijk is voor het verkrijgen van een stabiele boog. **In dit rapport wordt daarom aangehouden dat bij het MIG/MAG-lassen geldt, dat een storing optreedt wanneer die stroomdoorvoer niet constant is.**

Er zijn twee hoofdoorzaken aan te wijzen voor het optreden van een verstoring van een constante stroomdoorvoer.

In de eerste plaats is dat de belemmering van de stroomovergang naar de draad. Zo'n belemmering treedt bijvoorbeeld op wanneer de contactweerstand tussen de contactbuis en de draad plotseling groter wordt of wanneer het elektrisch contact tussen de twee onderdelen helemaal wordt verbroken.

De tweede hoofdoorzaak van storingen is de belemmering van een constante draadaanvoer vanaf de haspel naar de contactbuis. Wanneer de draadsnelheid verandert zal onmiddellijk de lasstroomsterkte ook veranderen. Een dergelijke verstoring treedt bijvoorbeeld op wanneer de weerstand die de draad bij het



Figuur 2.4: verstoring van de stroomdoorvoer.

transport door het draadaanvoersysteem toeneemt, de draad-aanvoerrollen hun grip op de draad voor een moment verliezen en de wieltjes langs de draad slippen.

Beide oorzaken zijn schematisch weergegeven in figuur 2.4.
Deze hoofdoorzaken zullen nu verder worden toegelicht.

ELEKTRISCH CONTACT

Voor een ongestoorde stroomoverdracht is het vereist dat er goed elektrisch contact is tussen de contactbuis en de lasdraad. De noodzaak van een goed elektrisch contact wordt door veel onderzoekers besproken. Met het oog op een ongestoorde stroomoverdracht is een groot deel van de in de handel verkrijgbare lasdraden voorzien van een koperen coating. Het idee achter het verkoperen van de draden is, dat de combinatie koper-koper altijd een goed elektrisch contact moet opleveren, met een lage contactweerstand. Bovendien helpt de koperlaag zeer effectief tegen de slijtage van de contactbuis. Echter, ook het lassen met deze verkoperde draden gaat niet altijd zonder problemen. Alleen het coaten van de lasdraden is blijkbaar niet voldoende voor het voorkomen van storingen.

Een oorzaak van het ontbreken van goed elektrisch contact tussen de contactbuis en de lasdraad is de aanwezigheid van **vervuiling** in de contactbuis. Over de oorzaken van de vervuiling is veel gepubliceerd.

In de meeste artikelen wordt de vervuiling als volgt uitgelegd: met de draad komen kleine metaaldeeltjes, spaantjes en vet de contactbuis in. Door de hoge temperatuur die in de contactbuis heerst en de aandrukkracht van de draad tegen de contactbuis, kunnen de spaantjes vastsinteren in de contactbuis [1, 2, 3, 5, 6, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23].

De **metaaldeeltjes** kunnen al op de draad zitten ten gevolge van het productieproces van de draad. Zo worden de lasdraden in het fabricageproces in diameter gereduceerd met hulp van trekstenen. Wanneer de reductiestappen te groot zijn, bestaat de kans op overtrekken. Op de draad ontstaan dan kleine splintertjes, spikes, die tijdens de draaddoorvoer los kunnen komen.

Een andere veel genoemde bron van metaalspaantjes is de kopercoating van de draad. Wanneer deze niet goed is aangebracht, kunnen er in de contactbuis kleine kopersnippers losraken. Vooral deze kopersnippers hechten zich gemakkelijk aan het koper van de contactbuis. Het verkoperen heeft op deze manier geen gunstige invloed op het elektrisch contact, maar juist een ongunstige [12].

Het **vet** dat als vervuiling in de contactbuis komt, is afkomstig van de draad zelf. Het betreft restanten trekzeep, nog overgebleven van de diameterreductie van de draad, of het is aan de draad toegevoegd smeermiddel.

Wanneer te veel smeermiddel op de draad is aangebracht of het smeermiddel niet goed over de draad is verdeeld, kan de draad smeermiddel afzetten in de contactbuis [18].

Een derde bron van vervuiling is het **systeem contactbuis-lasdraad** zelf. De stroomoverdracht van de contactbuis naar de lasdraad vindt plaats via kleine contactvlakjes. Het elektrisch contact tussen de contactbuis en de draad is een sleepcontact. De stroomoverdracht veroorzaakt in het contact een grote temperatuurverhoging. Daardoor kunnen zich tussen de contactbuis en de lasdraad kleine metaalbruggetjes vormen. Omdat de draad beweegt ten opzichte van de contactbuis, worden deze bruggetjes steeds weer verbroken. Bij het verbreken exploderen de bruggetjes en daarbij ontstaan kleine metaalspatten. Deze zogenaamde 'interne vervuiling' van de contactbuis is uitgebreid onderzocht en besproken door Hesse [23].

Na verloop van tijd vormt zich door het vaststsinteren van de metaaldeeltjes en door de vetafzetting een dikke korst van metaaldeeltjes en ander vuil in de tip van de contactbuis. Door de aanwezigheid van de vuilkorst, die een grote elektrische weerstand heeft, zal de stroomoverdracht naar de draad belemmerd worden.

Over verschillende factoren die invloed hebben op de stroomoverdracht is in de literatuur veel informatie voorhanden. In 1966 concludeerde J.F. Rudy al dat een grote aandrukkracht van de draad tegen de contactbuis gunstig is voor een goede stroomoverdracht [6]. Volgens Rudy blijft goed elektrisch contact gehandhaafd wanneer de vorming van een vuilkorst in de contactbuis voorkomen wordt. Maatregelen die hij noemt zijn: het schoonmaken van de draden voordat ze het draadaanvoersysteem ingaan, het verlagen van de temperatuur in de tip van de contactbuis en het periodiek schoonmaken van de contactbuis.

DRAADTRANSPORT

Ook de noodzaak om het transport van de lasdraad storingvrij te krijgen, wordt in een groot aantal artikelen besproken. Om verschillende lasdraden met elkaar te kunnen vergelijken is zelfs een grootheid bedacht die als maat gebruikt wordt om het gemak waarmee een draad kan worden aangevoerd weer te kunnen geven. Dit is de **doorvoerbaarheid**.

De doorvoerbaarheid van een draad is gedefinieerd als de hoeveelheid kracht die nodig is om de draad van de voorraadrol naar de contactbuis te transporteren. Daarbij geldt: hoe kleiner de benodigde kracht om de draad door te voeren, des te beter is zijn doorvoerbaarheid. De doorvoerbaarheid van de draad geldt als een belangrijk kwaliteitskenmerk. Een draad met een goede doorvoerbaarheid is makkelijker te verkopen.

Onderzoekers zijn er lange tijd vanuit gegaan dat een hoge wrijvingscoëfficiënt tussen de lasdraad en de contactbuis hét grote transportprobleem was. Om die reden worden veel draden voorzien van smeermiddelen om hun doorvoerbaarheid te verbeteren. Gevaar bij het gebruik van smeermiddelen is, dat het de kwaliteit van de las kan beïnvloeden. Een bekend smeermiddel is molybdeensulfide. Inmiddels is bekend dat de droge wrijving op zich, zonder dat er stroomdoorvoer plaatsvindt, niet alleen de oorzaak kan zijn van een verstoring van een goede

draadaanvoer. Testresultaten zijn gemeld van duurbeproevingen waaruit bleek dat zonder stroomdoorvoer draden zonder enig probleem doorgevoerd konden blijven worden [2, 13, 14].

In de literatuur worden twee mechanismen genoemd als oorzaak van problemen met het draadtransport. De eerste is de vervuiling van de contactbuis, zoals hierboven is beschreven. Wanneer de korst van vuil die zich vormt in de contactbuis dik genoeg is geworden, neemt de mechanische weerstand die de draad ondervindt in de contactbuis toe.

Onderzoek naar de invloed van de aanwezigheid van metaalspaantjes in het lassysteem op storingen in het draadtransport, is onder andere uitgevoerd door Pache. Bij de door hem uitgevoerde test bleek, dat draden die werden gereinigd vlak voor ze de contactbuis inkwamen inderdaad veel minder problemen met het draadtransport veroorzaakten [21].

De tweede oorzaak die in de literatuur genoemd wordt als oorzaak van het verstoren van de draaddoorvoer, is de vorming van kleine lasjes tussen de contactbuis en de lasdraad.

Het mechanisme is hier als volgt: door de hoge temperatuur die ontstaat tijdens de stroomdoorvoer treden er in het contactvlak draad-contactbuis smeltverschijnselen op. Dat betekent dat tussen de draad en de contactbuis metaalbruggetjes worden gevormd. Wanneer de bruggetjes vervolgens de kans krijgen om te stollen, dan zit de draad vast aan de contactbuis. Wanneer de kracht op de draad voldoende groot is dan breken de lasjes en is de draaddoorvoer alleen verstoord. Breken de lasjes niet dan is verdere doorvoer onmogelijk geworden.

Deze beschrijving lijkt een logische verklaring te geven van het vastlopen van lasdraden op een moment dat de contactbuis, door de korte inschakeltijd, nog lang niet dichtgeslibd kan zijn. Het aantonen van de kleine lasjes is echter erg moeilijk. Wanneer de draad namelijk vastraakt aan de contactbuis, zal de lasboog onmiddellijk omhoog schieten en zo de hele tip van de contactbuis laten wegsmelten. Alle bewijs voor de aanwezigheid van de lasjes is daarmee meteen verdwenen.

Het optreden van smeltverschijnselen in de contactbuis wordt wel in onderzoeksresultaten gemeld. In deze onderzoeken werden lassimulaties uitgevoerd [2, 6, 5, 13, 17, 24]. Bij deze simulaties werd de draad wel blootgesteld aan stroomdoorvoer, maar ging de draad zelf niet verloren. Bestudering van de beschadigingen op de lasdraden na afloop van de lassimulatie maakte duidelijk dat de draden in de contactbuis inderdaad plaatselijk gesmolten zijn.

Rudy constateerde dat op aluminiumdraden, vlak na het vastlopen, grote smeltplekken te vinden waren halverwege de contactbuis [6]. Dat duidt erop dat de stroomoverdracht halverwege de contactbuis heeft plaatsgevonden. Ook De Kanter constateerde smeltplekjes op door hem onderzochte aluminiumdraden [3].

2.3 Verzamelen van de storingen in een gebeurtenissenboom

Het in de bovenstaande paragraaf genoemde rijtje storingsoorzaken is niet compleet. Er zijn nog veel meer factoren die een rol spelen. Bovendien beïnvloeden deze factoren niet alleen de doorvoerbaarheid van de lasdraden, maar ook elkaar.

Om het probleem van storingen beter te kunnen overzien en om beter inzicht te krijgen in de mogelijkheden om die storingen te kunnen voorkomen, is aan het begin van dit onderzoek een gebeurtenissenboom opgesteld. Deze boom is gemaakt met een uit de veiligheidskunde bekende techniek.

GEBEURTENISSENBOOM

Ongelukken en gevaarlijke situaties ontstaan meestal door een onvoorziene samenloop van omstandigheden. Veiligheidsdeskundigen zijn eraan gewend om calamiteiten te analyseren door de vraag te stellen: "Aan welke voorwaarden moest worden voldaan om het ongeval te laten plaatsvinden?".

Een analysemodel uit de veiligheidskunde heeft dan ook vaak de vorm van een gebeurtenissenboom, die begint met één gebeurtenis (ongeval, calamiteit), die zich vervolgens vertakt in een groot aantal onderliggende oorzaken.

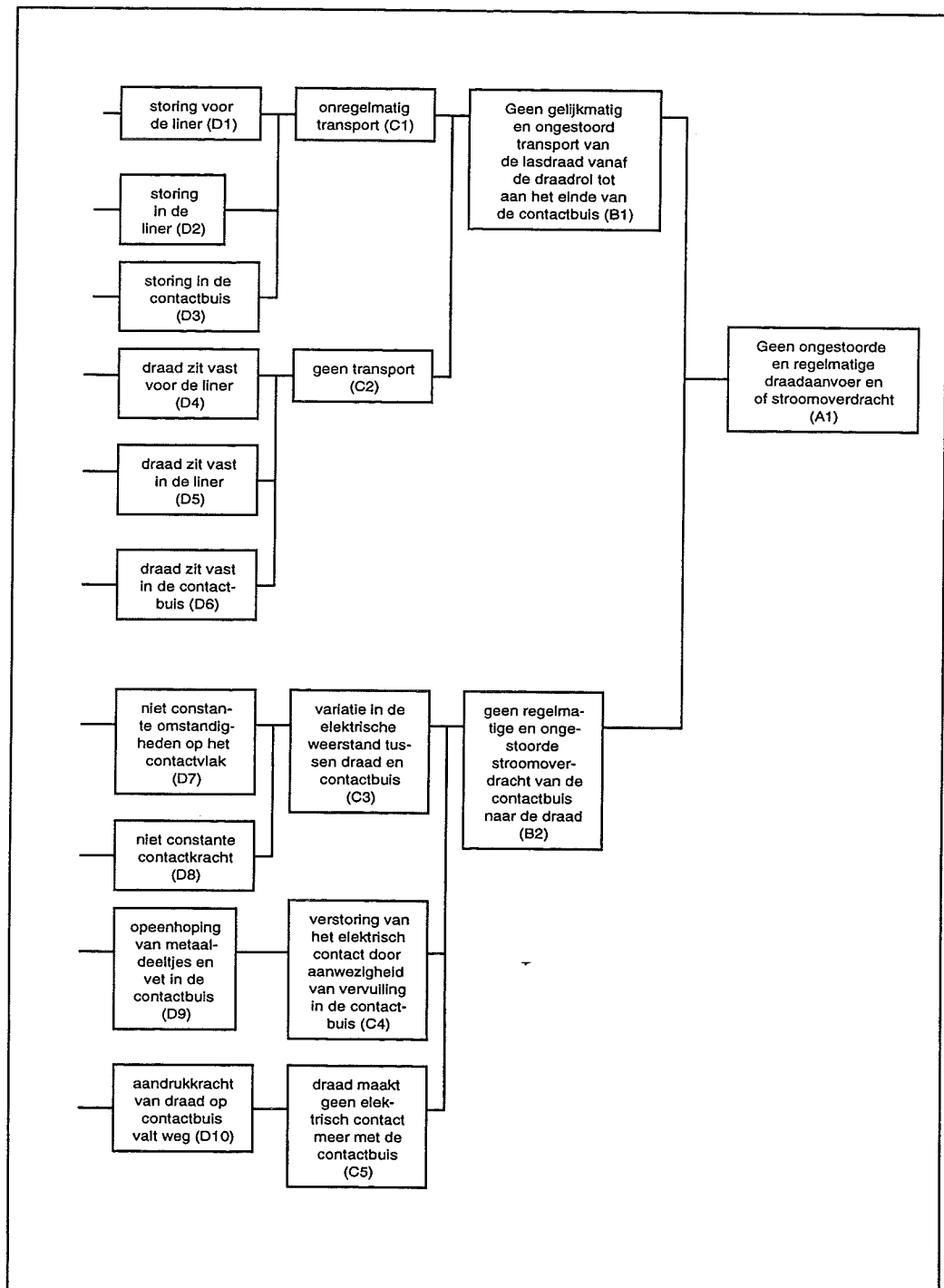
De methoden uit de veiligheidskunde kunnen ook voor de analyse van algemene technische problemen worden ingezet. Alleen staat nu niet een ongeval centraal, maar een ongewenste gebeurtenis (bijvoorbeeld een storing).

Eenvoudig van opzet, maar doeltreffend is het analysemodel van het Franse Institut de Recherche et de Sécurité (INRS). Het ongevalsmodel van het INRS is ook een gebeurtenissenboom.

Bij de uitsplitsing van een probleem in oorzaken wordt steeds de vraag beantwoord: welke gebeurtenissen en omstandigheden zijn noodzakelijk én voldoende om het probleem te laten optreden. Een uitgebreide beschrijving van het systeem is te vinden in de literatuur [25].

Voor het opstellen van een gebeurtenissenboom om de verstoringen van het MIG/MAG-systeem in kaart te brengen, is een aantal bronnen gebruikt. In de eerste plaats zijn dat wetenschappelijke artikelen geweest. In het model zijn ook op- en aanmerkingen van ervaren lasingenieurs verwerkt. De laatste aanpassing van het model is gedaan op advies van een aantal ervaren lassers. Per (genummerd) onderdeel van de boom is aangegeven wat de herkomst is van het stukje informatie. Het resultaat van de exercitie, de complete gebeurtenissenboom, is als los bijvoegsel aan dit rapport toegevoegd.

In het schema vormt de verstoring van een regelmatige en ongestoorde stroomdoorvoer vanaf de contactbuis naar de lasdraad het eerste niveau. Het tweede niveau wordt gevormd door de in 2.2 genoemde hoofdoorzaken: verstoring



Figuur 2.5: eerste vier niveaus van de gebeurtenissenboom.

van de stroomoverdracht en verstoring van het draadtransport. Het laatste niveau wordt gevormd door een op het oog oneindige hoeveelheid deelloorzaken. De eerste vier niveaus van de boom zijn weergegeven in figuur 2.5.

2.4 Verwerking van de gebeurtenissenboom

Hoe onoverzichtelijk een gebeurtenissenboom er door zijn omvang ook mag uitzien, tijdens het gebruik ervan blijkt de waarde van het model onmiddellijk.

Met behulp van de boom is het bijvoorbeeld mogelijk om de onderzoeksrichting, die verschillende onderzoekers hebben gevolgd aan te geven.

Zo heeft Hesse [23] onderzocht of door het simpelweg verhogen van de contactkracht tussen draad en contactbuis, storingen voorkomen kunnen worden. Het gebrek aan voldoende contactkracht staat in de boom vermeld op plaatsnummer (F 10). Uit het model blijkt meteen dat een verhoging van de contactkracht zeker nuttig is; echter alleen de contactkracht verhogen, is niet voldoende. De verhoging van de contactkracht kan de vervuiling van de liner (E4) of de vervuiling van de contactbuis (E6) niet voorkomen. De mechanische slijtage van de contactbuis (I29) wordt bij een verhoogde contactkracht nog groter. Er zijn blijkbaar nog een paar problemen die opgelost moeten worden. Dat was ook precies de uitkomst van het door Hesse uitgevoerde onderzoek.

Met behulp van de boom is ook de bijdrage van bedachte oplossingen en octrooien op waarde te schatten. Zwickert bijvoorbeeld heeft zijn ideale contactbuis beschreven [5]. In het artikel schrijft hij er zelf al bij dat het niet mogelijk is om de contactbuis ook daadwerkelijk te gaan fabriceren. De door hem beschreven contactbuis is namelijk niet compact genoeg is. In het schema is de noodzaak van beperkte buitenmaten van de contactbuis genoemd in (K 17).

Om een totaal beeld te krijgen van de ideeën die zijn uitgewerkt om het MIG/MAG-systeem te verbeteren, wordt in bijlage 1 een overzicht gegeven van de op dit moment bekende octrooien. Bij ieder octrooi staat in het kort vermeld welke storingsoorzaak de octrooiaanvrager met zijn vinding probeert te bestrijden.

De gebeurtenissenboom biedt nog een belangrijk voordeel. Het is mogelijk om vast te stellen van welke storingsoorzaken nog niet alles bekend is. En welke onderwerpen in aanmerking komen voor verder onderzoek.

De bovenste tak van de boom, die begint met het blok: *'geen gelijkmatig en ongestoord transport van de lasdraad vanaf de draadrol tot aan het einde van de contactbuis'*, is inmiddels uitgebreid onderzocht. Eén van de uitkomsten van dat onderzoek is, dat het doorvoeren van lasdraden zonder dat er stroomoverdracht plaatsvindt van de contactbuis naar de lasdraad gedurende lange tijd probleemloos kan worden uitgevoerd [13,14].

Op grond hiervan mag geconcludeerd worden dat zonder stroomoverdracht geen problemen met het draadtransport optreden. Het is de combinatie van

het doorvoeren van de draden en de stroomoverdracht die problemen met de draaddoorvoer veroorzaakt.

Het feit dat stroomoverdracht zo'n cruciale rol speelt voor het laten optreden van storingen volgt ook uit de gebeurtenissenboom: een verstoorde stroomoverdracht is niet alleen één van de twee hoofdoorzaken van storingen in het MIG/MAG-systeem (B2), maar veroorzaakt ook mede storingen in de draadaanvoer (B2). Zie daarvoor de blokken: (I41), (I44), (J19) en (L11). Een onregelmatige stroomoverdracht speelt dus een rol in beide hoofdtakken van de gebeurtenissenboom.

Het probleem van een verstoorde stroomoverdracht van de contactbuis naar de lasdraad is niet alleen een bron van storingen, in de literatuur wordt het mechanisme van de stroomoverdracht ook nog steeds niet geheel duidelijk gemaakt.

Daarom wordt, in de rest van dit onderzoek, de stroomoverdracht en de grootheden die van invloed zijn op de stroomoverdracht, onderwerp van studie.

HOOFDSTUK 3: Theorie

Het vorige hoofdstuk werd afgesloten met de constatering dat een verstoorde stroomoverdracht vanaf de contactbuis naar de lasdraad altijd een rol speelt bij een verstoring van de draaddoorvoer. Ook werd geconstateerd dat het mechanisme van de stroomoverdracht in de contactbuis nog steeds niet geheel duidelijk is. Om de verschillende manieren te kunnen begrijpen waarop de doorvoer van een lasdraad verstoord kan worden, is het dus allereerst van belang om te weten wat er gebeurt in de overgang contactbuis-lasdraad.

Gezien het belang van de stroomoverdracht in het systeem contactbuis-draad op het hele MIG/MAG-lasproces wordt dit hoofdstuk begonnen met een algemene inleiding over elektrische contacten. In **paragraaf 3.1** staat vermeld aan welke voorwaarden voldaan moet worden om elektrisch contact te maken. Verder staat beschreven welke grootheden invloed hebben op een elektrisch contact.

In **paragraaf 3.2** wordt de algemene theorie over elektrische contacten vertaald naar het specifieke geval van het elektrisch contact in een contactbuis. In deze paragraaf wordt ook gerekend aan de verschillende grootheden die het elektrisch contact beïnvloeden.

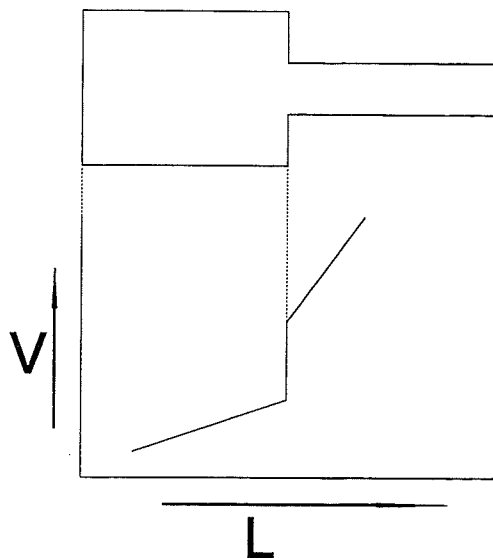
Zoals in de inleiding al werd vermeld, moet aangetoond worden of het door De Kanter voorgestelde model voor aluminium-lasdraden ook bruikbaar is voor het beschrijven van de doorvoerbaarheid van stalen lasdraden. Daarom wordt de bruikbaarheid van zijn model, op grond van de in de eerste twee paragrafen vermelde theorie, in **paragraaf 3.3** onderzocht.

In **paragraaf 3.4** staat de op dit hoofdstuk gebaseerde hypothese die in het vervolg van het onderzoek zal worden getoetst. In de paragraaf is een aantal vragen verzameld waarop voor de toetsing van de hypothese in dit onderzoek een antwoord gegeven moet worden.

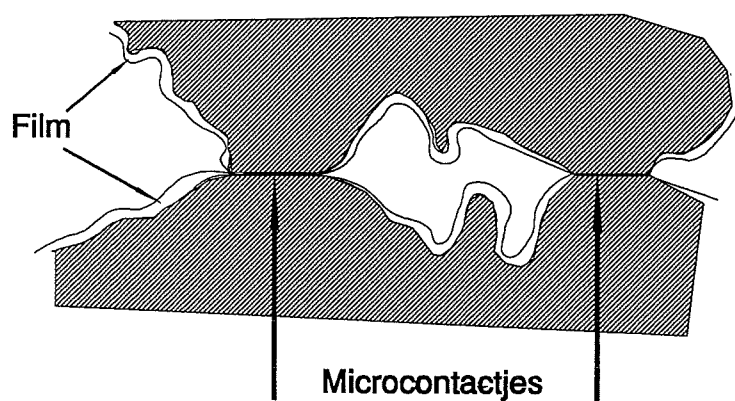
3.1 Grootheden die een rol spelen bij het maken van elektrisch contact

Het maken van elektrisch contact is iets anders dan het maken van mechanisch contact. Het is een misvatting om te denken dat 'raken' ook betekent 'stroomdoorgang mogelijk maken'. Voor het maken van een elektrisch contact is het nodig dat er metallisch contact bestaat tussen de contact-partners. Dat betekent dat de afstand tussen de twee contact-delen van dezelfde orde grootte moet zijn als de afstand tussen de atomen in het atoomrooster. Dat betekent een afstand van $\pm 10^{-10}$ m [26].

Op ieder metaaloppervlak, met als enige uitzondering goud, is altijd een oxydehuid aanwezig. Voor het maken van elektrisch contact is het dus een eerste vereiste om deze oxydehuid te doorbreken. Hieronder zal dieper worden ingegaan op de factoren die gezamenlijk het elektrisch contact bepalen.



Figuur 3.1: verandering van de doorsnede veroorzaakt verandering van de elektrische weerstand.



Figuur 3.2: micro-contactjes.

OXYDEHUID

Het maken van elektrisch contact begint met het doorbreken van de oxydehuid, die altijd op de contactpartners te vinden is. Voor het maken van elektrisch contact moet de oxydehuid scheuren. Het gemak waarmee een oxydehuid scheurt, hangt in de eerste plaats van de oxydehuid zelf af.

De oxydehuid is makkelijker te scheuren wanneer de huid niet te dik is. Bovendien speelt de vorm van het oppervlak van de oxyde een rol. Wanneer op een metaal een keurig vlakke oxydehuid zit, dan kan de oxyde bij het tegen elkaar drukken van de contactdelen gewoon tussen de twee delen platgedrukt worden, zonder te scheuren. Om deze reden is het beter voor het maken van elektrisch contact wanneer de oxydehuid in plaats van helemaal vlak, een zekere ruwheid heeft. Ook de mechanische eigenschappen van het materiaal waarop de oxydehuid zich bevindt is belangrijk. Voor het doorbreken van de oxydelag helpt het wanneer de ondergrond gemakkelijk deformeert. De deformatie van de ondergrond zal de oxydehuid laten scheuren. De ondergrond zal meer deformeren bij een toenemende kracht waarmee de contactdelen tegen elkaar worden gedrukt groter. Deformatie wordt ook gemakkelijker wanneer contactpartners een zacht oppervlak hebben [27].

CONTACTDOORSNEDE

De tweede grootte die een rol speelt bij elektrische contacten, is de grootte van de doorsnede van een stroomgeleider. Een verandering van de doorsnede betekent altijd een verandering van de elektrische weerstand (zie figuur 3.1). Zoals in de figuur te zien is, vindt op de overgang een spanningsprong plaats.

Wanneer twee cilinders tegen elkaar gedrukt worden, dan is de totale weerstand tussen de uiteinden A en B gelijk aan de weerstand van de cilinders zelf plus de weerstand van het contact. Er is sprake van een contactweerstand omdat, hoe goed de voorbereiding ook is, twee oppervlakken elkaar nooit helemaal raken. Onder een microscoop zal een oppervlak dat contact moet gaan maken er altijd als een soort berglandschap uitzien met micropieken en microdalen. Wanneer twee oppervlakken tegen elkaar worden gedrukt, vindt het eerste contact plaats tussen twee micropieken. Zelfs bij een geringe aandrukkracht is de mechanische spanning in zo'n microcontact erg hoog, zodat de pieken elastisch en plastisch deformeren. Deformatie vindt plaats net zolang totdat de kracht volledig door de ontstane contactvlakjes wordt gedragen (figuur 3.2).

Bij het tegen elkaar drukken van twee cilinders lijkt het contactoppervlak dat ontstaat, net zo groot te zijn als de totale doorsnede van de cilinders. Uit bovenstaande overweging blijkt, dat het contactoppervlak dat tussen twee cilinders ontstaat, altijd maar een fractie is van die totale doorsnede. In de tribologie wordt daarom een onderscheid gemaakt tussen het contactoppervlak dat lijkt te ontstaan, het schijnbare contactoppervlak (A_s), en het contactoppervlak dat daadwerkelijk ontstaat, het ware contactoppervlak (A_w) [28].

CONTACTHYPOTHESE VAN BOWDEN EN TABOR

De grootte van het ware contactoppervlak laat zich volgens de contacthypothese van Bowden en Tabor als volgt beschrijven [29]:

$$A_w = \frac{F}{H} \quad (1)$$

In deze vergelijking is F de aandrukkracht [N] en H is de Meyer-hardheid van de zachtste van de twee contactpartners. De Meyer-hardheid wordt bepaald met een Brinell hardheidsmeter en wordt gedefinieerd als: de proefbelasting gedeeld door het loodrecht op de belastingsrichting geprojecteerde oppervlak van de blijvende indrukking. De eenheid is: N/mm^2 .

De veronderstelling die aan de contacthypothese ten grondslag ligt, is dat zich in de microcontacten een toestand van volledige plasticiteit instelt. Gezien de bovenstaande overweging over de vorming van het ware contactoppervlak is dat alleszins aannemelijk.

Uit de vergelijking blijkt meteen dat de grootte van het contactoppervlak **niet** afhankelijk is van het schijnbare contactoppervlak, maar afhangt van de aandrukkracht en de fysische eigenschappen van het materiaal.

CONTACTSPANNING VOLGENS HERTZ

Een andere methode om de grootte van het contactoppervlak te berekenen volgt uit de toepassing van de vergelijkingen over de contactspanning volgens Hertz [30]. Deze vergelijkingen leiden niet alleen tot een uitspraak over de grootte van een contactoppervlak, maar geven als resultaat ook de vorm van het contactoppervlak dat ontstaat.

Als uitgangspunt wordt genomen een systeem van volledig gladde bollen van materialen 1 en 2, met kromtestralen r_1 en r_2 en elasticiteitsmoduli E_1 en E_2 . De bollen ondergaan onder een normaalkracht F_n , vanuit de positie dat de twee bollen elkaar juist raken (puntcontact), een toenadering δ . Er ontstaat door elastische deformatie een cirkelvormig contactvlak met een straal r waarvoor geldt:

$$r = \left[3 F_n \frac{R}{E} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

met:

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_1^2}{2 E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{2 E_2} \quad \text{en} \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad (3)$$

waarin ν_1 en ν_2 de coëfficiënten voor dwarscontractie zijn van de materialen 1 en 2. E wordt de 'gereduceerde' elasticiteitsmodulus en R de 'gereduceerde' kromtestraal genoemd.

In het algemeen geldt voor het contact tussen twee lichamen de volgende vergelijking voor de gereduceerde kromtestraal R uit vergelijking (2):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \quad (4)$$

De stralen r_{11} en r_{12} beschrijven de vorm van het eerste contactlichaam, r_{21} en r_{22} de vorm van het tweede contactlichaam. Voor het contact tussen twee bollen geldt nu: $r_{11} = r_{12} = r_1$ en $r_{21} = r_{22} = r_2$. Voor het contact van een bol op een plaat geldt: $r_{21} = r_{22} = \infty$.

Voor de vorm van het contactoppervlak geldt nu het volgende: wanneer voor de waarden uit vergelijking (4) geldt: $r_{11} = r_{12}$ en $r_{21} = r_{22}$, dan is het contactvlak cirkelvormig. Wanneer geldt $r_{11} \neq r_{12}$ of $r_{21} \neq r_{22}$ (bijvoorbeeld een bol op een cilinder) dan is het contactvlak ellipsvormig. Een uitzondering vormt nog het geval dat drie van de vier stralen oneindig groot zijn (voorbeeld cilinder op een plat vlak), het contactvlak is dan een rechthoek [29].

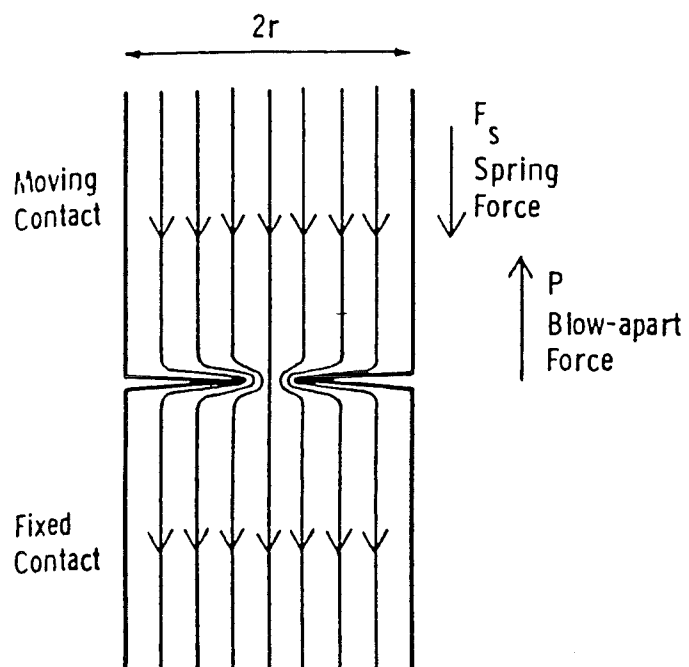
De grootte van de contactspanning die optreedt in een ellipsvormig contact wordt gegeven door [30]:

$$P_m = \frac{F_N}{\pi a b} \quad (5)$$

met: P_m = gemiddelde contactdruk
 F_n = normaalkracht
 a, b = de halve assen van het ellipsvormige contactvlak dat ontstaat tussen de contactpartners (in het geval van een cirkelvormig contactvlak geldt: $a = b = r$)

waarin a en b gegeven worden door:

$$a = m \sqrt[3]{\frac{3 F_N (k_1 + k_2)}{4 (B + A)}} \quad (6)$$



Figuur 3.3: stroom verloop dichtbij een elektrisch contact [28].

$$b = n \sqrt[3]{\frac{3 F_N (k_1 + k_2)}{4 (B + A)}} \quad (7)$$

De waarden van k_1 en k_2 worden bepaald door de elasticiteitsmoduli E_1 en E_2 en door de coëfficiënten voor de dwarscontractie ν_1 en ν_2 van beide materialen.

De waarden van m , n en $(B+A)$ uit de vergelijkingen hangen af van de vorm van de vorm van de twee contactlichamen (r_{11} , r_{12} , r_{21} , r_{22}). De vergelijkingen (6) en (7) worden uitgewerkt in bijlage 2.

De beschouwingen van Hertz zijn alleen van toepassing wanneer nergens in het materiaal van de contactdelen de elasticiteitsgrens wordt overschreden.

Welke van de twee hierboven genoemde methoden het beste resultaat geeft voor de beschrijving van het contactvlak dat ontstaat, moet per geval worden gezien. In paragraaf 3.2 zal de grootte van contactoppervlakken in contactbuizen zowel berekend worden met behulp van de wetten van Hertz, als met de contacthypothese van Bowden en Tabor.

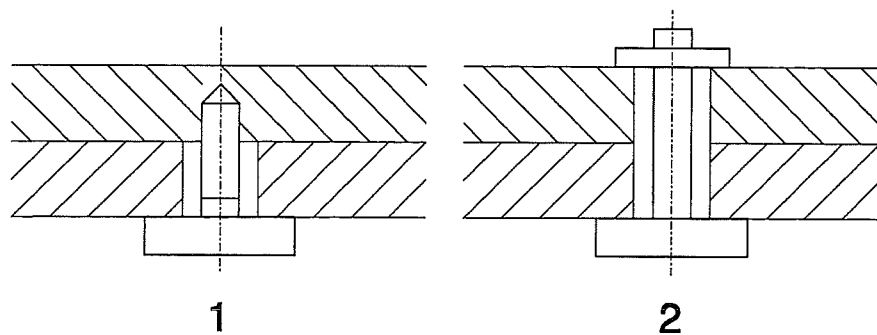
Vergelijking (1) is erg aantrekkelijk vanwege de eenvoud ervan. Ook in literatuur over elektrische contacten wordt de vergelijking gebruikt. Regelmatig wordt aan de vergelijking echter ten onrechte een factor ξ toegevoegd [28, 31, 32]. De factor ξ wordt genoemd als factor die de oppervlaktegesteldheid van de contactpartners in rekening moet brengen, of wordt gebruikt als correctiefactor wanneer de deformatie in het contact niet geheel plastisch is.

Het toevoegen van een correctiefactor zou zinvol kunnen zijn wanneer voor een groot aantal materialen en belastinggevallen tabelboeken zouden zijn opgesteld voor de waarde van de correctiefactor. Die boeken bestaan niet; in praktijk wordt voor de grootte van de waarde van ξ vaak een waarde genomen tussen 0 en 1, en meestal één die gezien de onderzoeksresultaten passend is. In afleidingen waarin de ξ wordt genoemd moet deze eigenlijk op 1 gesteld worden [33].

CONTACTKRACHT

Uit het voorgaande blijkt dat de grootte van het contactoppervlak voornamelijk wordt bepaald door de grootte van de kracht waarmee de contactpartners tegen elkaar worden geduwd. Door een hoge contactkracht zal de oxydehuid ook gemakkelijk worden doorbroken. De contactkracht moet tijdens het doorvoeren van stroom wel aanwezig blijven. Bij het afnemen van de contactkracht neemt ook het contactoppervlak af en dat leidt weer tot een hogere contactweerstand. Onderzoek naar de invloed van de contactkracht op de contactweerstand in elektrische contacten is onder andere beschreven door Y. Watanabe [34].

Bovendien moet tijdens de stroomdoorvoer rekening gehouden worden een afstotende kracht tussen de twee contactpartners. Figuur 3.3 toont schematisch de



Figuur 3.4: twee voorbeelden van een kracht-gesloten elektrisch contact [27].

vernuwing van de stroom in het contact. Dicht bij het contactoppervlak loopt een deel van de stroom in tegengestelde richting. Dit veroorzaakt een kracht F_r die de contactdelen uit elkaar wil duwen waarvoor geldt [28]:

$$F_r = \frac{\mu I^2}{4\pi} \ln \frac{r}{\bar{a}} \quad (8)$$

met: μ = permeabiliteit van lucht ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)
 I = stroomsterkte (A)
 r = straal van het schijnbare contactoppervlak (mm)
 $\bar{a}$ = gemiddelde straal van het werkelijke contactoppervlak (mm)

De vergelijking is opgenomen omdat het voor ieder elektrisch contact verstandig is om te controleren of deze kracht een rol van betekenis speelt. Om rekenwerk mogelijk maken wordt vergelijking (8) met behulp van vergelijking (1) en met de relatie: $\ln(r/\bar{a}) = \frac{1}{2} \ln (r/\bar{a})^2$ herleid tot:

$$F_r = \frac{\mu I^2}{8\pi} \ln \frac{HA}{F} \quad (9)$$

Aan het gebruik van vergelijking (9) is dezelfde beperking gesteld als aan vergelijking (1): de vergelijking geldt alleen in het geval van volledige plastische deformatie in het contactpunt. Mocht bij het berekenen van F_r in het specifieke geval lasdraad-contactbuis, blijken dat met de kracht inderdaad rekening gehouden moet worden, dan zal vergelijking (8) ook worden herschreven met behulp van de vergelijkingen van Hertz.

Om stroom door te kunnen voeren, moet er een contactkracht aanwezig blijven die groter is dan de afstotende kracht F_r . Bij het maken van een ontwerp voor een elektrische contactpunt moet hier dus rekening mee gehouden worden. Een elektrisch contactpunt is bij voorkeur kracht-gesloten en niet vorm-gesloten. Een voorbeeld is gegeven in figuur 3.4. Wanneer het elektrisch contact tussen bijvoorbeeld twee koperen platen gegarandeerd moet worden dan is oplossing 2 altijd beter dan oplossing 1. De contactdruk gaat in geval 1 snel verloren en voor een goed contact moet de bout van tijd tot tijd worden aangedraaid. Bij het verkeerde ontwerp 1 (gebruikt in een aantal elektriciteitscentrales) kunnen de platen uit elkaar gedrukt worden door het ontstaan van oxyden in het contact en het gebrek aan contactkracht om de oxyden weer te doorbreken. Met de toenemende dikte van de oxydehuid stijgt ook de contactweerstand. Dit leidt weer tot een temperatuur verhoging, met als gevolg versnelde oxydatie [28]. Door de ruimte die op deze manier tussen de platen ontstaat kan boogvorming optreden en daardoor brand ontstaan. Dit proces stopt niet uit zichzelf [27].

CONTACTWEERSTAND

Zoals hierboven al werd opgemerkt, heeft een doorsnede-verandering in een stroomgeleider altijd een verandering van de elektrische weerstand tot gevolg. Omdat het contactoppervlak altijd veel kleiner is dan de doorsnede van de contactpartners zelf, is de weerstand in het contact hoger dan in de contactpartners zelf. Naast deze constrictieweerstand, moet ook rekening gehouden worden met het feit dat de oppervlakken niet volledig schoon zijn. Tussen de materiaaloppervlakken zal een dunne laag vuil zitten, een film. Volgens Greenwood [35] geldt voor de elektrische weerstand tussen twee contactpartners de volgende relatie:

$$R_c = \{(\rho_1 + \rho_2) \left(\frac{1}{4na} + \alpha^{-1} \right)\} + \frac{\rho_f s}{A_w} \quad (10)$$

waarin:	n	=	aantal micro-contactjes tussen de twee contactpartners
	a	=	gemiddelde straal van de micro-contactjes
	ρ_1, ρ_2	=	de specifieke elektrische weerstand van de contactdelen
	ρ_f	=	de specifieke elektrische weerstand van de film van vuil
	s	=	dikte van de film
	A_w	=	werkelijke contactoppervlak ($= n\pi a^2$)
	α	=	straal volgens Holm, gedefinieerd als:

$$\alpha^{-1} = \frac{3\pi}{(32nL)} \quad (11)$$

In deze definitie geldt, dat $2L$ de gemiddelde afstand is tussen de middelpunten van de micro-contactjes.

Het eerste deel van vergelijking (10) beschrijft de constrictieweerstand. Uit de vergelijking blijkt dat de constrictieweerstand laag is wanneer er veel micro-contactjes zijn (waarde van n is groot), wanneer de micro-contactjes zelf groot zijn (waarde van a is groot) en wanneer de micro-contactjes verdeeld zijn over een groot gebied (waarde van L is groot).

Het tweede deel van de vergelijking komt op rekening van de film tussen de contactdelen.

Zoals uit de vergelijking zelf al blijkt, vereist de toepassing van vergelijking (10) veel kennis over het contact zelf. Wanneer gewerkt wordt onder speciale voorwaarden dan kan de vergelijking dienst doen. Voor het rekenen aan elektrische contacten wordt in praktijk de onderstaande, door Holm voorgestelde, vereenvoudiging gebruikt [36]:

$$R_k = \frac{\rho}{2a} \quad (12)$$

waarin: R_k = de constrictieweerstand van het contact (Ω)
 ρ = weerstand van het materiaal (Ωmm)
 a = de straal van het gevormde ware contactvlak A_w (mm)
 waarbij geldt: $A_w = \pi a^2$

Wanneer gerekend wordt aan een elektrisch contact tussen twee contactdelen met een verschillende elektrische weerstand, dan mag in vergelijking (12) gerekend worden met de gemiddelde waarde van die twee weerstanden.

Een mogelijkheid om het gebruik van vergelijking (12) te omzeilen, is het direct meten van de elektrische contactweerstand van een bepaalde materiaalcombinatie in een bepaalde geometrie. Een dergelijke meting voor een aantal staalsoorten wordt beschreven door Vogler [35]. Deze werkwijze is verre van ideaal, omdat het niet mogelijk is om de verkregen gegevens te generaliseren.

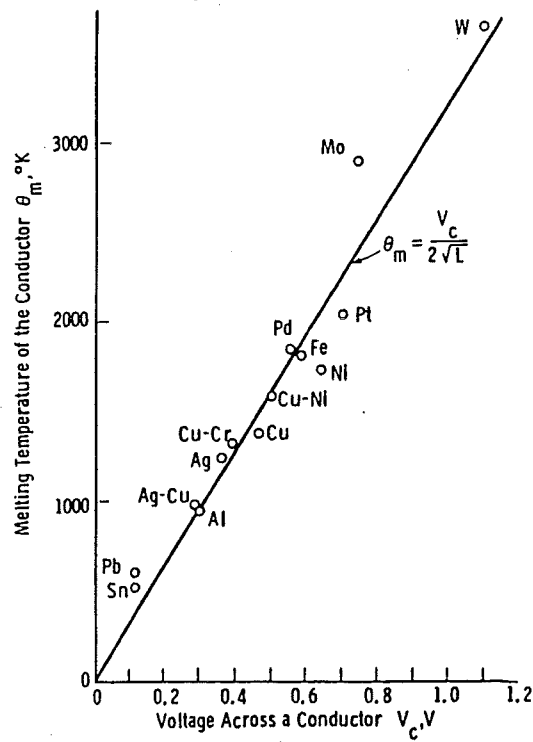
CONTACTTEMPERATUUR

De temperatuur heeft een grote invloed op de constrictieweerstand en daarmee op de contactweerstand. Vanwege het zeer kleine oppervlak van het ware contactoppervlak treedt er in het elektrische contact een zeer hoge stroomdichtheid op. Door deze grote stroomdichtheid wordt het contactmateriaal plaatselijk verwarmd. De van de temperatuur afhankelijke specifieke weerstand van het materiaal neemt op deze manier toe en verhoogt daarmee ook de contactweerstand.

Wanneer koudvervormd materiaal voor het contact gebruikt wordt, daalt de inmiddels hoger geworden constrictieweerstand vervolgens wanneer in het materiaal de verwekingstemperatuur wordt overschreden. Als gevolg van de verweking kan het contactoppervlak groeien door een grotere plastische vervorming van het contactmateriaal. Op deze manier stelt de constrictieweerstand zich in op het niveau van het materiaal in zachtgegloeide toestand.

Met het oplopen van de temperatuur stijgt de constrictieweerstand vervolgens weer. Wanneer de smelttemperatuur van het contactmateriaal vervolgens bereikt wordt, valt de constrictieweerstand plotseling sterk omlaag, door het samensmelten van de contactdelen [5].

Uit de literatuur is een methode bekend om de contacttemperatuur te kunnen berekenen [36]. De afleiding van de vergelijking is te vinden in bijlage 3. In deze vergelijking wordt verondersteld, dat de temperatuur die ontstaat in het contact veel hoger is dan de omgevingstemperatuur en wordt gegeven door:



Figuur 3.5: vergelijking van het berekende voltage waarbij smeltverschijnselen optreden, met gemeten waarden [28].

$$\theta_p = \frac{V}{2\sqrt{L}} \quad (13)$$

waarin: V = de spanningsval over het contact (V)
 Θ_p = de maximale temperatuurverhoging die in het contact bereikt wordt ($^{\circ}\text{C}$)
 L = de Lorentz-constante ($\text{W}\Omega^{\circ}\text{C}^2$)

L wordt gegeven door [37]:

$$L = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right) \quad (14)$$

In deze vergelijking is k de Boltzmann constante en e de lading van een elektron. Daarmee komt de waarde van L op $2,45 \cdot 10^{-8} \text{ (W}\Omega^{\circ}\text{C}^2)$. Deze waarde ingevuld in vergelijking (13) levert:

$$\theta_p = \frac{V}{2\sqrt{2,45 \cdot 10^{-8}}} = \frac{V}{3,13 \cdot 10^{-4}} \quad (15)$$

De betrouwbaarheid van de afgeleide vergelijking blijkt uit figuur 3.5. In de figuur is de smelttemperatuur van een aantal materialen en materiaalcombinaties die gebruikt worden in elektrische contacten uitgezet tegen de spanningsval die in het contact optreedt. De lijn in de figuur volgt vergelijking (13), de rondjes in de figuur zijn uitkomsten van metingen.

MATERIAALCOMBINATIES

Bij het ontwerpen van elektrische contacten is het van belang rekening te houden met de het gedrag van die materialen in het contact. Bij een aantal materiaalcombinaties doen zich onverwachte effecten voor. Bijvoorbeeld: tin levert met tin een prima contact. Tin levert lastige oxyden, maar zolang er tin onder die oxyden zit, gaat alles goed. Wordt nu één van de contactpunten vervangen door bijvoorbeeld goud, dan wordt het contact niet beter (zoals te verwachten was), maar veel slechter [27].

SMEERMIDDELEN

De kwaliteit van elektrische contacten wordt tegenwoordig in industriële toepassingen steeds belangrijker. In de micro-elektronica worden de gebruikte stroomsterktes lager. Bovendien worden de opdampmethoden beter en daarmee de contactlagen dunner. De slijtvastheid van de lagen wordt dus ook steeds belangrijker.

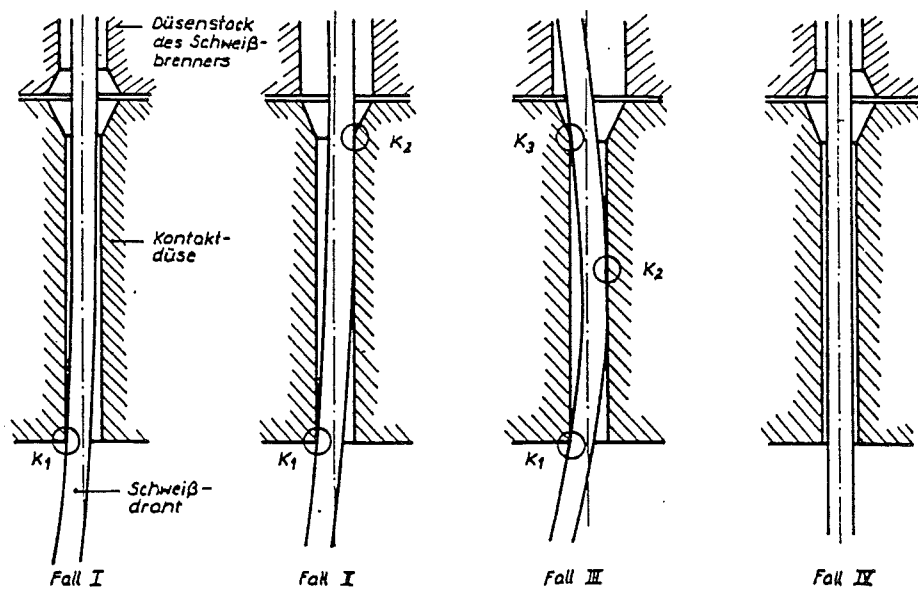
Een goede oplossing is het aanbrengen van een smeermiddel als paraffine of molybdeensulfide. Het smeermiddel voorkomt enerzijds de slijtage; anderzijds vormt het smeermiddel een soort beschermwalletje om het contactpunt heen. Een eenmaal gevormd contactpunt wordt daardoor minder snel verbroken [27].

FRETTING

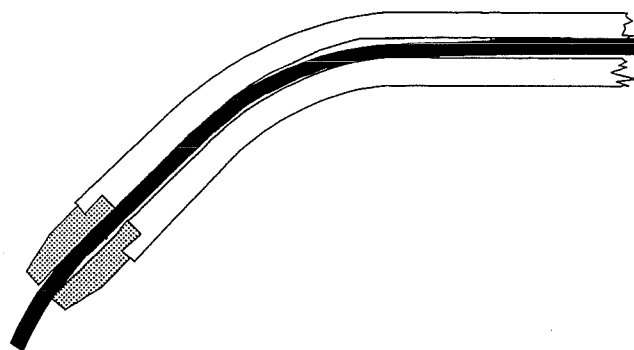
In de literatuur over elektrische contacten wordt regelmatig gesproken over fretting (Eng.) en Frittung (Dui.). Soms worden de termen door elkaar gebruikt. Beide begrippen slaan echter op totaal verschillende processen.

Fretting kan optreden wanneer de contactoppervlakken ten opzichte van elkaar kunnen bewegen. Door de bewegingen wordt de oxydehuid, die zich tussen de oppervlakken bevindt, afgebroken. Zo wordt er ruimte gemaakt voor nieuwe oxydevorming. Als gevolg van dit effect kunnen de oppervlakken van elkaar loskomen, kan de elektrische weerstand toenemen en het contact zelfs helemaal verbroken worden [27].

Met Frittung wordt bedoeld de doorslagspanning in een contact dat volledig met een isolerende laag (bijvoorbeeld oxyde) bedekt is (A-Frittung) of de toename van de contactdoorsnede door het verdwijnen van een isolerende laag als gevolg van stroomdoorvoer (B-Frittung).



Figuur 3.6: vier manieren waarop een lasdraad in een contactbuis kan liggen [5].



Figuur 3.7: ligging van de lasdraad in het kanaal van de lastoorts.

3.2 Elektrisch contact tussen MIG/MAG-contactbuis en lasdraad

In een MIG/MAG-lastoorts is de voor een elektrisch contact zo belangrijke contactkracht op geen enkele manier gedefinieerd vastgelegd, vervuiling van de contactpartners wordt op geen enkele manier bestreden en door de hoge stroomdichtheid in het contact lijkt het zo goed als onmogelijk te zijn smeltverschijnselen in de contactbuis te voorkomen.

Het zal duidelijk zijn dat de constructie van de toorts uit het oogpunt van elektrisch contact buitengewoon slecht is.

Wat de invloed is van de in paragraaf 3.1 genoemde grootheden op het elektrisch contact in een contactbuis zal hieronder uiteengezet worden.

OXYDEHUID

Voordat stroomoverdracht mogelijk is in de contactbuis zal eerst de oxydehuid op de contactdelen doorbroken moeten worden. Op de verschillende lasdraden zal een verschillende oxydehuid zitten. Uit de vorige paragraaf blijkt dat het voor het doorbreken van de laag helpt, wanneer de oxyde zich op een oppervlak bevindt dat gemakkelijk deformeerbaar is. Het is vanuit dit oogpunt dus een voordeel wanneer een lasdraad een zacht oppervlak heeft.

Op de contactbuis kan, naast de gewone oxydehuid, tijdens het lassen onder invloed van de hoge temperatuur en de aanwezigheid van zuurstof een extra dikke oxydehuid ontstaan [1, 6, 8]. Hoe groot de invloed is van de oxydehuid op de draad en de contactbuis is per geval verschillend.

CONTACTOPPERVLAK

Bij de doorvoer van de draad door de contactbuis, zal de draad de contactbuis op bepaalde plaatsen raken. Zwickert heeft een paar manieren beschreven waarop de draad in de buis kan liggen [5]. Zie hiervoor figuur 3.6.

Voor de verdere uitwerking van de theorie is het noodzakelijk om te weten op welke manier de draad in de contactbuis tegen de wand aanligt. Daarom is een test gedaan met een van perspex gebouwd model van de lastoorts. In het model bleek iedere lasdraad vanaf de bocht in de toorts tegen de bovenzijde van de toorts aan te liggen. Vlak voor (geval I van Zwickert) of in de contactbuis (geval II van Zwickert) buigt de draad naar beneden af en raakt de draad de contactbuis aan de onderzijde. Dit is getekend in figuur 3.7.

Deze simpele test maakt duidelijk dat wanneer gelast wordt met lasdraden die met een zekere kromming de contactbuis inkomen, zoals in dit onderzoek het geval is, alleen de gevallen I en II van Zwickert realistisch zijn. In veel artikelen over MIG/MAG-lasproces wordt ten onrechte de veronderstelling van Zwickert overgenomen en wordt rekening gehouden met vier mogelijkheden voor de ligging van de draad in de contactbuis.

Het werkelijke contactoppervlak tussen een contactbuis en een lasdraad is klein. Voor de berekening van de grootte van het contactvlak zijn in de vorige paragraaf

twee methoden genoemd. De eerste methode met behulp van de contacthypothese van Bowden en Tabor gaat uit van een geheel plastische deformatie van het oppervlak in het contactpunt. De vergelijkingen van Hertz over contactspanning zijn alleen geldig wanneer de elasticiteitsgrens in het materiaal niet wordt overschreden.

Welke van de twee benaderingen de beste is, moet van geval tot geval worden ingeschat. Het is verstandig om beide berekeningen uit te voeren.

BEREKENING VAN HET CONTACTOPPERVLAK MET BEHULP VAN DE CONTACTHYPOTHESE VAN BOWDEN EN TABOR

De contacthypothese van Bowden en Tabor geeft snel inzicht in de grootte van het contactoppervlak. De vergelijking wordt hieronder nogmaals gegeven:

$$A_w = F/H$$

In de vergelijking moet voor H de Meyer-hardheid van de zachtste contactpartner worden ingevuld. In het systeem lasdraad-contactbuis zal de zachtste van de twee contactpartners zonder uitzondering de koperen contactbuis zijn. In het geval van staaldraden is het verschil in hardheid aanzienlijk, bij aluminium lasdraden zal het verschil in hardheid minder groot zijn, maar ook daar is de contactbuis zachter dan de draad.

De contactkracht die in de vergelijking moet worden ingevuld, kan worden gemeten of berekend.

Het invullen van de waarden in vergelijking (1) geeft vervolgens de grootte van het gevormde contactoppervlak.

BEREKENING VAN HET CONTACTOPPERVLAK MET BEHULP VAN DE VERGELIJKINGEN VAN HERTZ

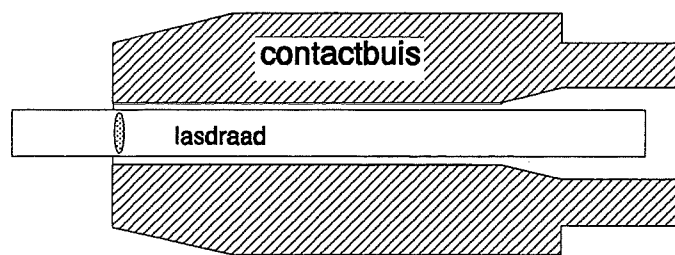
In paragraaf 3.1 werden de vergelijkingen van Hertz gegeven.

Voor de gemiddelde druk die optreedt in het contact geldt:

$$P_m = \frac{F_N}{\pi ab} \quad (16)$$

met: P_m = gemiddelde contactdruk
 F_N = normaalkracht
 a, b = de halve assen van het ellipsvormige contactvlak dat ontstaat tussen de contactpartners

De grootte van respectievelijk a en b volgt uit de volgende vergelijkingen:



Figuur 3.8: contactvlak tussen lasdraad en contactbuis.

$$a = m \sqrt[3]{\frac{3 F_N (k_1 + k_2)}{4 (B + A)}} \quad (17)$$

$$b = n \sqrt[3]{\frac{3 F_N (k_1 + k_2)}{4 (B + A)}} \quad (18)$$

De waarden van k_1 wordt bepaald door de elasticiteitsmodulus E_1 en door de coëfficiënt voor de dwarscontractie μ_1 van het koper van de contactbuis. De waarde van k_2 wordt bepaald door dezelfde coëfficiënten van het draadmateriaal.

De waarden van de m , n en $(B+A)$ uit de vergelijkingen hangen af van de vorm van de contactbuis en van de draad, die beschreven worden door:

r_{11} = straal van het gat in de contactbuis

r_{12} = straal van de afronding van de tip van de contactbuis

r_{21} = halve diameter van de draad

r_{22} = kromtestraal van de lasdraad

Het invulwerk is uitgevoerd in bijlage 2 en heeft als resultaat:

$$m = 5,85$$

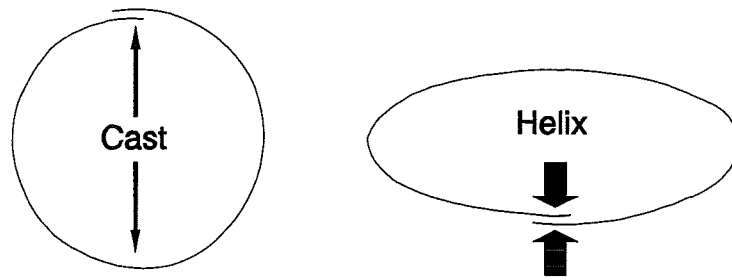
$$n = 0,39$$

Uit de berekening kan nu de volgende conclusie getrokken worden: wanneer de vergelijkingen van Hertz gebruikt kunnen worden voor het beschrijven van het contactvlak tussen een lasdraad en een contactbuis, wordt tussen de contactbuis en de draad een contactvlakje opgebouwd is met de vorm een ellips met een lengte-breedte verhouding van 5,85 : 0,39 (= 15 : 1). Dit is getekend in figuur 3.8.

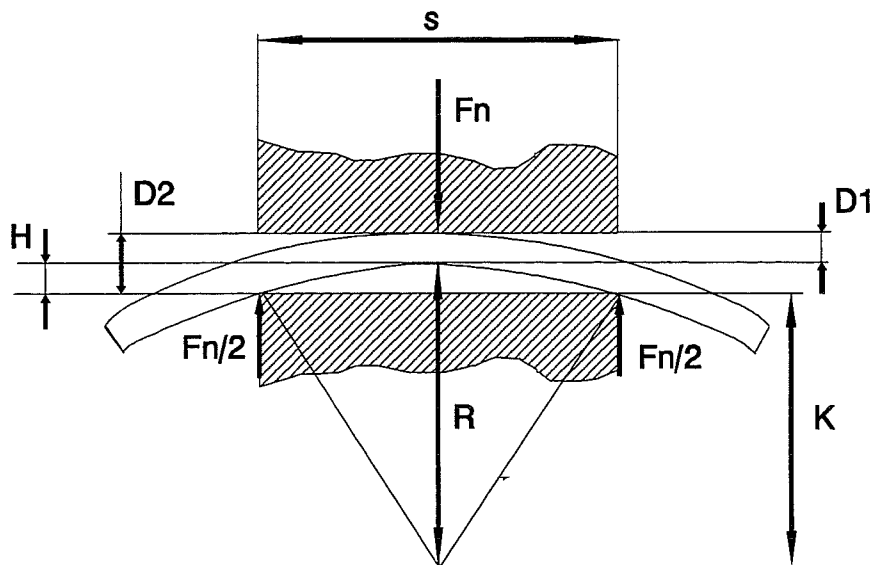
CONTACTKRACHT

De contactkracht bepaalt de grootte van het contactoppervlak dat ontstaat tussen de draad en de contactbuis en heeft daarmee invloed op de stroomoverdracht van contactbuis naar de lasdraad. De grootte van de contactkracht wordt bepaald door de eigenschappen van de lasdraad zelf. Naast de mechanische eigenschappen van de draad is vooral van belang met welke voorbuiging de lasdraad de contactbuis inkomt. In de contactbuis wordt de draad namelijk gestrekt en voor de contactkracht tussen de draad en de contactbuis geldt: hoe kleiner de voorbuiging is en des te stijver de draad, des te groter is de contactkracht in het contactpunt [6].

De voorbuiging van de draad, ook wel de **cast** genoemd, wordt op de volgende manier gemeten: van een rol lasdraad wordt een stuk afgeknipt en op een gladde



Figuur 3.9: cast en helix van een lasdraad.



Figuur 3.10: verbuiging van een lasdraad volgens Binzel [38].

vloer gelegd. Door plastische vervorming over de volledige doorsnede tijdens het fabricageproces, vormt de draad op de vloer een cirkel. De diameter van deze cirkel wordt de voorbuiging van de draad genoemd.

Wanneer het uiteinde van de draad van de grond loskomt, dan heeft de draad ook nog een voorbuiging in richting loodrecht op zijn lengte-as. Dit wordt in de literatuur de helix van de draad genoemd. Zie figuur 3.9.

De contactkracht tussen de draad en de contactkracht kan worden berekend of worden gemeten in een experiment. *Contactkrachtmetingen* worden onder andere gemeld door Zwickert [1]. In zijn artikel vermeldt hij waarden voor de contactkracht tussen de contactbuis en lasdraden met een diameter van 1,2 mm tussen de 1,32 N en 1,93 N. Ook Tschubakov heeft contactkracht-metingen uitgevoerd met draden met een diameter van 1,2 mm [39]. Hij meldt waarden tot 1,96 N.

Uit de literatuur is één *berekening van de contactkracht* bekend. Deze berekening berust op een bij de firma Binzel afgeleid model [38].

Uitgangspunt is de situatie zoals getekend in figuur 3.10. De belasting van de lasdraad wordt opgevat als een belasting van drie-punts buigbalk. In de tekening stelt het middelste raakpunt de inloop van de contactbuis voor; één van de andere raakpunten stelt het uiteinde van de contactbuis voor. In deze benadering wordt er vanuit gegaan dat de buitenste twee raakpunten op een afstand van elkaar liggen die gelijk is aan tweemaal de contactbuis lengte.

De grootte van de contactkracht F_n volgt uit onderstaande vergelijkingen.

Om te beginnen wordt de doorbuiging W van de draad berekend met:

$$W = H + D_1 - D_2 \quad (19)$$

waarin:

$$H = R - K \quad (20)$$

$$K = \sqrt{R^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} \quad (21)$$

De waarde van H en K volgt uit figuur 3.10: R is de halve voorbuiging van de draad en S stelt de virtuele contactbuislengte voor.

Wanneer de doorbuiging bekend is, wordt de contactkracht vervolgens berekend met:

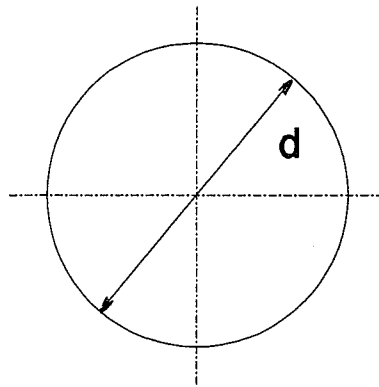
$$F_n = W \frac{48 E I}{s^3} \quad (22)$$

waarin: E = de elasticiteits-modulus van het draadmateriaal
 I = $(\pi D_1^4) / 32$ = het weerstandsmoment tegen buiging

Het bovenstaande rekenmodel kan de werkelijkheid niet beschrijven. Tegen het gebruik van het model zijn de volgende bezwaren te maken:

- 1: Zoals uit tekening 3.10 blijkt, is H per definitie gelijk aan het verschil in diameter van de draad en de contactbuis. Vergelijking (19) levert, wanneer de waarden uit de tekening gebruikt worden, dus altijd: $W = 0$. Bij het gebruik van de vergelijking kunnen na het invullen toch waarden voor W gevonden worden die ongelijk zijn aan 0. Dat gebeurt wanneer voor de waarde van R de gemeten waarde van de voorbuiging wordt genomen. Een waarde dus die niets met de tekening te maken heeft. Het verband tussen de vergelijking en de tekening is daarmee echter ook geheel verdwenen.
- 2: In de afleiding wordt op geen enkele manier rekening gehouden met het feit dat hoe kleiner de voorbuiging van de draad is, des te kleiner de afstand is tussen de punten waar de draad de contactbuis raakt. Per definitie is immers het gemak waarmee een draad zich schikt, een maat voor de weerstand van de draad tegen buiging. En deze weerstand tegen buiging levert nu juist de contactkracht. Door de afstand tussen de punten waarop de draad contact maakt constant te veronderstellen, is het niet mogelijk om verschillende draden met elkaar te vergelijken.
- 3: Bovendien wordt voor de in bovenstaande berekening als voorbuiging de kromming genomen van een stuk lasdraad dat van de draadrol is geknipt. Wanneer de draad in de lasmachine tijdens de doorvoer plastisch deformeert, dan verandert de voorbuiging tijdens het draadtransport. Dan moet ook met een andere voorbuiging gerekend worden bij de bepaling van de contactkracht. Om het mogelijk te maken deze beschouwing verder uit te bouwen is allereerst onderzocht of de lasdraden in het draadaanvoersysteem plastisch deformeren. Dit blijkt inderdaad het geval te zijn. De cast van de draad verandert op meerdere plaatsen in het draadaanvoersysteem. De uitvoering en de resultaten van het experiment staan vermeld in het volgende hoofdstuk.

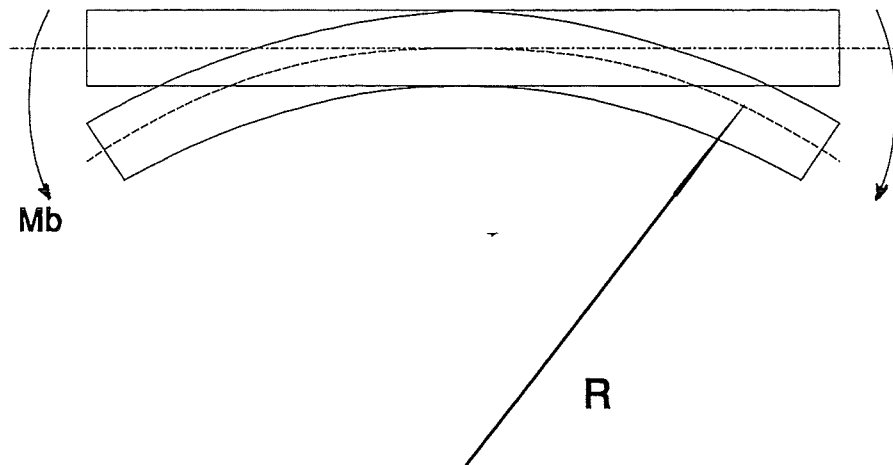
De voorbuiging waarmee de draad de contactbuis inloopt, hangt af van de plastische vervormingen die de draad ondergaat tijdens het transport door het draadaanvoersysteem. Meteen al bij de aanvoerrollen blijkt de lasdraad zich tussen deze rollen te strekken. Ook in het slangenpakket wordt de cast van de



$$I_b = \frac{\pi}{64} d^4$$

$$W_b = \frac{\pi}{32} d^3$$

Figuur 3.11: staaf met een ronde doorsnede.



Figuur 3.12: verbuiging van een staaf.

draad groter. In de lastoorts, vlak voordat de draad de contactbuis inloopt, wordt de draad door een bocht gedwongen. In deze bocht wordt de draad opnieuw plastisch gedeformeerd en op deze plaats ontstaat de cast waarmee de draad uiteindelijk de contactbuis ingeduwd wordt.

BEREKENING VAN DE CONTACTKRACHT TUSSEN DE LASDRAAD EN DE CONTACTBUIS

Aangezien er in de literatuur geen berekening voorhanden is voor de bepaling van de contactkracht, wordt in het nu volgende gedeelte een berekening voor de contactkracht afgeleid. In de afleiding zal worden bepaald wat het verband is tussen de voorbuiging van de draad, de elasticiteitsmodulus van draadmateriaal, het lineaire traagheidsmoment van de draad, de afmetingen van de contactbuis en contactkracht. Eerst worden de vergelijkingen die gelden bij het verbuigen van staven verzameld. Vervolgens worden de algemene vergelijkingen toegepast op het specifieke geval van de lasdraad die verbuigt in een contactbuis. In alle berekeningen wordt ideaal plastisch gedrag van het materiaal verondersteld.

BESCHRIJVING VAN HET VERBUIGEN VAN STAVEN

Voor het beschrijven van het verbuigings-mechanisme van lasdraden in de contactbuis wordt uitgegaan van staven met een ronde doorsnede (figuur 3.11).

Wanneer op een staaf een moment staat, is de grootte van de cirkel die de staaf beschrijft een maat voor de grootte van dat moment. Zie figuur 3.12.

Wanneer nu **elastische** vervorming optreedt, geldt:

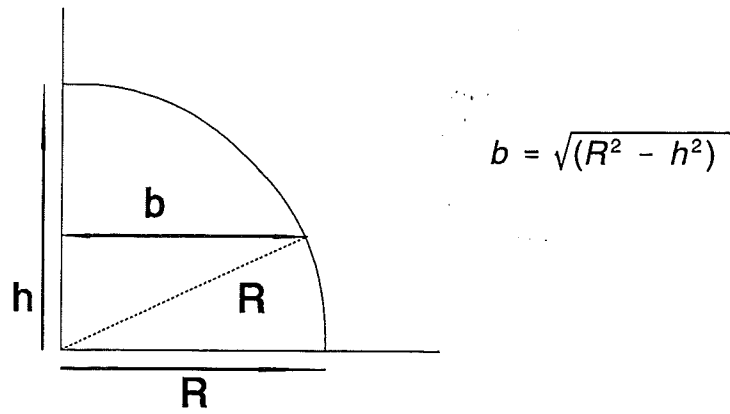
$$M_b = \sigma W_b = \sigma \frac{\pi}{32} d^3 \quad (23)$$

$$I_b = \frac{\pi}{64} d^4 \quad (24)$$

Zoals gezegd is de kromtestraal van de staaf een maat voor het moment dat op de staaf wordt uitgeoefend. Daarvoor geldt:

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{M_b}{EI_b} \quad (25)$$

$$\kappa = \frac{\sigma \frac{\pi}{32} d^3}{E \frac{\pi}{64} d^4} \quad (26)$$



Figuur 3.13: moment over de gehele doorsnede.

$$\kappa = \frac{\sigma}{E} 2 \frac{1}{d} \quad (27)$$

Op het moment dat plastische deformatie begint, geldt nu:

$$\kappa = \frac{\sigma_{0,2}}{E} 2 \frac{1}{d} \quad (28)$$

Vergelijking (28) is eenvoudig met behulp van een experiment te verifiëren. Wanneer met behulp van een trekproef de elasticiteitsmodulus en de elasticiteitsgrens van een materiaal bepaald zijn, moet het met de vergelijking mogelijk zijn om te voorspellen bij welke verbuiging een staaf plastisch begint te deformeren. Voor de lasdraden die in dit onderzoek worden beproefd zal de geldigheid van de vergelijking en daarmee de voorspelbaarheid van het elastische gedrag worden onderzocht.

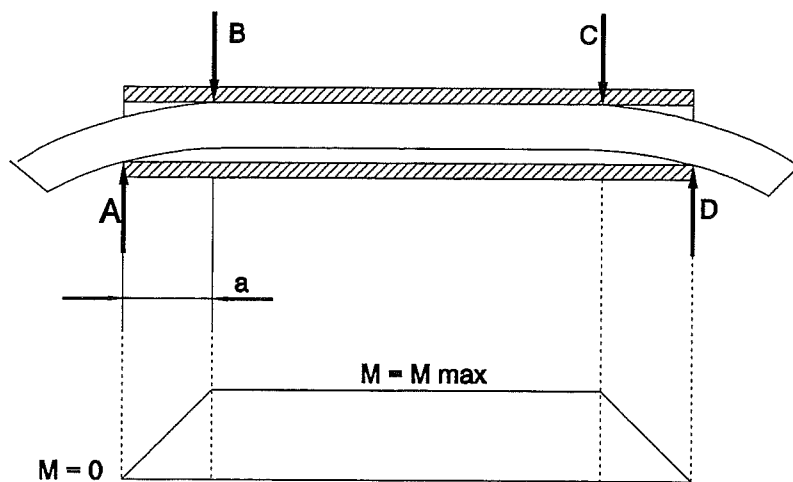
Wanneer verondersteld wordt, dat de draad over de gehele doorsnede **plastisch** vervormt, geldt (zie ook figuur 3.13):

$$M_b = 4 \int_0^R \sigma_{0,2} h \, dh \sqrt{R^2 - h^2} \quad (29)$$

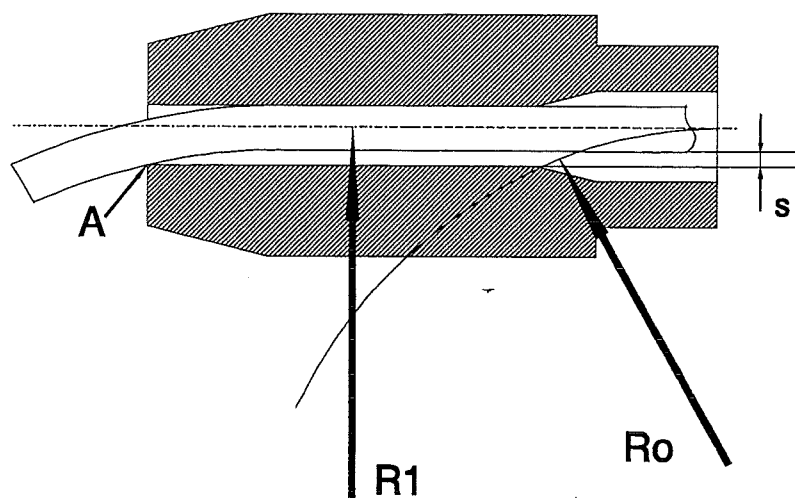
$$M_b = 4 \sigma_{0,2} \int_0^R h \sqrt{R^2 - h^2} \, dh \quad (30)$$

$$M_b = -2\sigma_{0,2} \int_0^R (R^2 - h^2)^{1/2} d(R^2 - h^2) \quad (31)$$

$$M_b = -2\sigma_{0,2} \frac{2}{3} (R^2 - h^2)^{3/2} \Big|_0^R \quad (32)$$



Figuur 3.14: vier-puntsbuiging van een lasdraad in een kanaal.



Figuur 3.15: voorbuiging van een lasdraad in een contactbuis.

$$M_b = \frac{4}{3} \sigma_{0,2} R^3 = \frac{1}{6} \sigma_{0,2} d^3 \quad (33)$$

Uit deze berekeningen kan een belangrijke conclusie worden getrokken: Het maximale moment dat bij elastische vervorming op een doorsnede kan staan, wordt gevonden door in vergelijking (23) voor de waarde van de spanning, $\sigma_{0,2}$ in te vullen. Het grootste moment (plastisch) dat op de doorsnede kan staan, volgt direct uit vergelijking (33).

Het is duidelijk dat dit laatste moment groter is dan het eerst genoemde. Het verschil tussen de beide waarden is echter niet erg groot ($\pi/32 \approx 1/10$). Zeker wanneer de doorsnede niet geheel plastisch vervormt, wordt maar een beperkte vereenvoudiging gemaakt wanneer bij zo'n vervorming de vergelijkingen van elastische vervormingen gebruikt worden.

VERBUIGING DRAAD IN CONTACTBUIS

In het geval van een lasdraad die door een contactbuis wordt gestrekt, moet niet gerekend worden aan rechte draden die krom gebogen worden, maar is het andersom: lasdraden met een zekere kromming worden recht geduwd.

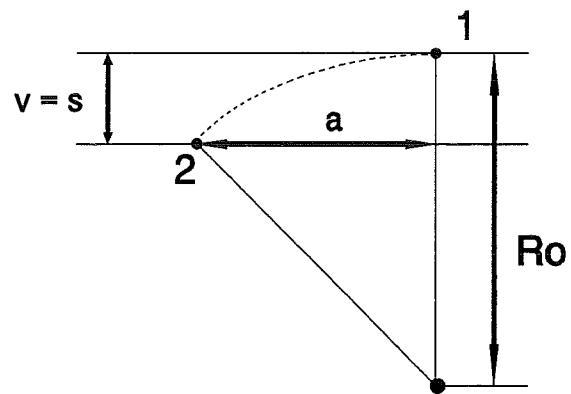
Wanneer een draad wordt rechtgebogen in een kanaal is de belastingvorm op de draad op dezelfde manier te beschrijven als een vier-puntsbuiging. Zie ook figuur 3.14.

Het is duidelijk dat het moment op de draad toeneemt van $M = 0$ bij de punten A en D tot een maximale waarde $M = M_{\max}$ in de punten B en C. De afstand tussen de punten A en B is gelijk aan a .

Tussen de punten B en C is het moment op de draad constant. Voor de berekening van de grootte van het moment op de draad geldt de volgende relatie:

$$\frac{M}{EI} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_1} \quad (34)$$

In deze vergelijking staat R_0 voor de cast waarmee de draad de contactbuis inkomt en R_1 voor de cast die aan de draad wordt opgedrongen in de contactbuis. In deze paragraaf werd al geconstateerd dat de draad vanaf de bocht in de toorts aanligt tegen de (rechte) wand van het kanaal in de toorts. De draad wordt in het kanaal blijkbaar rechtgebogen. Voor de bocht die de draad krijgt opgedrongen geldt daarom: $R_1 = \infty$ en daarmee: $1/R_1 = 0$. Zie ook figuur 3.15.



Figuur 3.16: verplaatsing van het vrije uiteinde van de draad.

Voor de berekening van de kracht die de draad uitoefent op de contactbuis is het voldoende om alleen de tip-zijde van de contactbuis in ogenschouw te nemen. Het moment dat over de doorsnede van de draad staat verandert niet over het gedeelte dat de draad tegen de wand van de contactbuis en de wand van het kanaal in de toorts aanligt.

Voor de verplaatsing van de draad aan de tip-zijde van de contactbuis kan het volgende berekend worden:

Wanneer er geen kracht werkt in punt A geldt voor de verplaatsing van de draad (zie tekening 3.16):

$$v = \frac{a^2}{2R_0} \quad (35)$$

Er werkt wel een kracht op de draad in punt A en die kracht is precies zo groot dat de doorbuiging in punt A gelijk is aan s , het verschil in diameter van het gat in de contactbuis en van de draad.

Dus:

$$v = s \quad (36)$$

$$v = (\text{doorbuiging zonder kracht}) - (\text{doorbuiging als gevolg van } F_c) \quad (37)$$

$$v = \frac{a^2}{2R_0} - \frac{F_c a^3}{3EI} = s \quad (38)$$

Er zijn nu twee vergelijkingen die F_c beschrijven. Uit vergelijking (38) volgt:

$$F_c = \left(\frac{a^2}{2R_0} - s \right) \frac{3EI}{a^3} = \frac{3EI}{2aR_0} - \frac{3sEI}{a^3} \quad (39)$$

De tweede vergelijking van F_c volgt uit:

$$F_c = \frac{M}{a} \quad (40)$$

Samen met (34) wordt dat:

$$F_c = \frac{EI}{a} \left(\frac{1}{R_0} \right) \quad (41)$$

De combinatie van de vergelijkingen (39) en (41) levert een vergelijking voor a:

$$a = \sqrt{6 s R_0} \quad (42)$$

Als uitkomst van deze berekeningen kan nu worden gegeven:

$$F_c = \frac{EI}{aR_0} \quad \text{met} \quad a = \sqrt{6 s R_0} \quad (43)$$

Vergelijking (43) heeft een aantal consequenties:

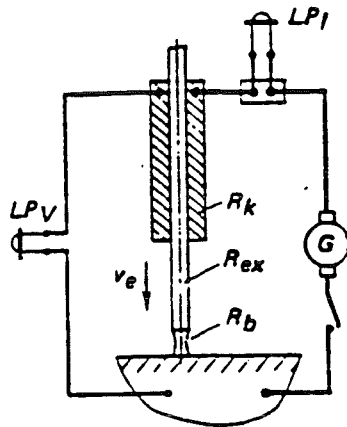
- 1: Het verschil in contactkracht, in het systeem draad-contactbuis tussen twee lasdraden met een gelijke diameter in combinatie met dezelfde contactbuis, wordt volledig bepaald door de E-modulus en de voorbuiging R_0 van beide draden. Hoe groter de E-modulus en hoe kleiner de voorbuiging des te groter de kracht. De invloed van de voorbuiging is zoals in de vergelijking te zien is, groter dan de invloed van de E-modulus.
- 2: De contactkracht in het systeem draad-contactbuis wordt groter, wanneer het verschil in diameter tussen draad en contactbuis afneemt (s wordt kleiner).

H. Zwickert heeft resultaten gemeld waarin hij stelt dat met toenemende diameter van het kanaal in de contactbuis en bij toenemende straal van de draad die de contactbuis inloopt, de contactkracht afneemt [1]. Die constatering is in overeenstemming met vergelijking (43).

Bovenstaand rekenwerk is niet compleet zonder een kanttekening over de mogelijkheden en de beperkingen van de afgeleide vergelijkingen.

Tijdens het rekenwerk is aangenomen dat het gedrag van het materiaal ideaal-plastisch. Dat lijkt een veilige aanname zolang er over staal gesproken wordt. In het rekenwerk is geen rekening gehouden met het optreden van versteviging in de lasdraden. Of deze vereenvoudiging gerechtvaardigd is moet blijken uit de resultaten.

Meer informatie over het verbuigen van lasdraden kan gevonden worden in een bijdrage van S. Flohr [40]. Hij vermeldt naast zijn onderzoeksresultaten een groot aantal titels van artikelen over het onderwerp.



Figuur 3.17: schema van de opstelling van Chubukov voor het meten van de contactweerstand [41]. (G = stroombron, LP = oscilloscoop)

Wire diameter, mm	Wire feed rate, m/hr*	Voltage in the circuit tip-wire, V	Resistance in contact between tip and wire, $\Omega \times 10^{-3}$
		During operating life of tip from 0.2 to 0.9 Trs	
1.2	650	1.90-6.00	8.00-26.10
	750	1.95-6.20	8.10-26.50
	900	1.97-6.60	8.20-27.60

Figuur 3.18: resultaten van Chubukov [41].

De contactkracht speelt nog een rol bij contactbuizen, namelijk bij de bevestiging van de contactbuis zelf. In paragraaf 3.1 is al betoogd dat krachtgesloten verbindingen altijd beter zijn voor de stroomoverdracht, dan vormgesloten verbindingen. De vlaktedruk tussen de oppervlakken in een schroefdraad verbinding is niet hoog. De contactbuis zit vastgeschroefd in de toorts. Tijdens het proces zal de toch al lage vlakke druk tussen de contactbuis en de toorts alleen maar kunnen afnemen. Ook bij de overgang toorts-contactbuis kunnen op deze manier verliezen optreden.

CONTACTWEERSTAND

In paragraaf 3.1 werd al duidelijk gemaakt dat het berekenen van de contactweerstand in het algemeen niet eenvoudig is. Ook het meten van deze weerstand gaat niet zonder moeite. Duidelijk is wel dat een grote contactkracht en een makkelijk te doorbreken oxydelaag ertoe bijdragen om de contactweerstand te verlagen. Het contact tussen draad en contactbuis wordt bemoeilijkt door de vervuiling van het contactpunt.

In de praktijk wordt in plaats van een meting meestal een berekening gebruikt voor de bepaling van de contactweerstand.

Een bekende manier voor de berekening van de grootte van de contactweerstand is door gebruik te maken van de in de vorige paragraaf geïntroduceerde vergelijking (12), die luidt:

$$R_k = \rho / 2a$$

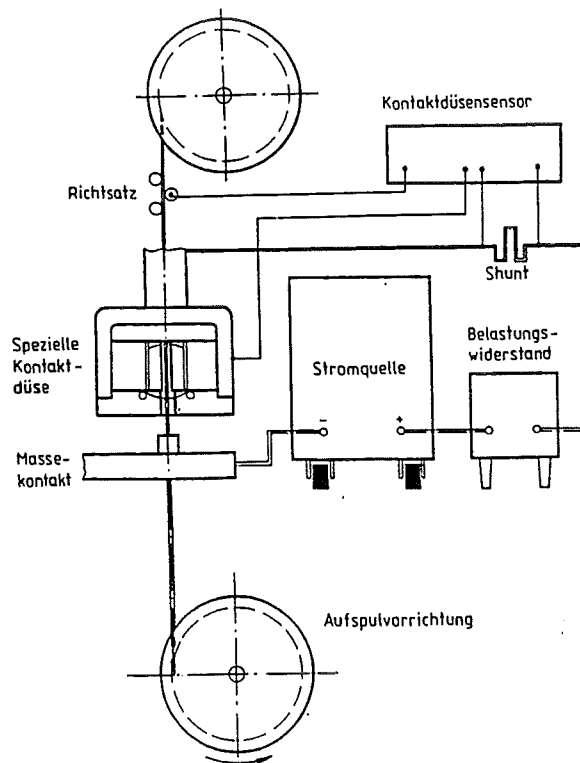
Voor de waarde van de weerstand over het contact kan het gemiddelde genomen worden van de elektrische weerstand van het draad- en van het contactbuismateriaal. De grootte van het contactvlak kan worden berekend met behulp van de contacthypothese van Bowden en Tabor of met behulp van de vergelijkingen van Hertz.

In de literatuur wordt een drietal experimenten beschreven waarin getracht is de waarde van de contactweerstand in een contactbuis daadwerkelijk te meten. Van de drie methodes wordt in het kort de werkwijze en de resultaten gegeven.

CONTACTWEERSTAND-METINGEN

De eerste methode om aan contactweerstand te meten, wordt voorgesteld door Chubukov [41]. In zijn model is de contactweerstand tussen draad en contactbuis afhankelijk gesteld van de draad-diameter, samenstelling en voortloopsnelheid. Het model levert niet één waarde voor de contactweerstand, maar levert de grenzen waartussen de contactweerstand zich volgens Chubukov bevindt.

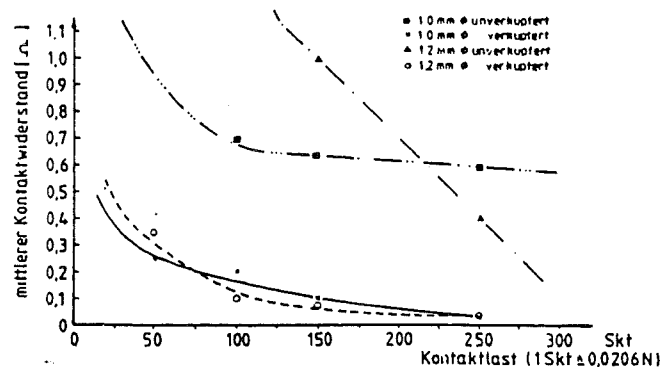
Chubukov maakte gebruik van het schema zoals getekend in figuur 3.17. Met behulp van de opstelling worden de stroom en spanning gemeten tussen de



Figuur 3.19: opstelling van Zwickert voor het meten van de contactweerstand [1].

Abmessungen des Elektrodenführungskanals (mm)										
I A	U V	1,5 × 1,5 × 20		U V	1,6 × 1,6 × 20		U V	1,8 × 1,8 × 20		S μΩ
		R _K μΩ	S μΩ		R _K μΩ	S μΩ		R _K μΩ	S μΩ	
50	7	96	8,8	7	96	10,6	7—10	138	16,8	
100	14	94	8,7	14	110	13,0	16—19	141	17,8	
150	21—22	101	10,2	20—22	120	14,8	21—23	156	16,3	
200	28—29	99	10,2	28—30	106	16,6	28—30	203	19,9	
250	34	99	16,3	—	—	—	—	—	—	

Figuur 3.20: resultaten van Zwickert [1].



Figuur 3.21: resultaten van Hauck [2].

tip van de contactbuis en het werkstuk tijdens **kortsluitbooglassen**. Hij gaat ervan uit dat de totale weerstand tussen de tip en het werkstuk, R_{tot} , tijdens het moment van kortsluiting bestaat uit een drietal bijdragen:

1: de contactweerstand tussen contactbuis en draad, R_c

2: de weerstand van het stuk lasdraad tussen de tip en het werkstuk, R_{ex}

3: de weerstand van de metaalbrug tussen draad en smeltbad, R_b

Daarmee volgt voor de vergelijking van de contactweerstand:

$$R_c = R_{tot} - (R_{ex} + R_b) \quad (44)$$

Chubukov stelt dat de weerstand over de vloeistofbrug, in verhouding met de andere twee factoren, te verwaarlozen is. Daarmee vereenvoudigd (44) tot:

$$R_c \approx R_{tot} - R_{ex} \quad (45)$$

De resultaten van het werk van Chubukov staan vermeld in figuur 3.18.

De tweede methode is beschreven door Zwickert [1]. Hij heeft de contactweerstand in een contactbuis direct gemeten door gebruik te maken van een installatie waarin wel stroom wordt doorgevoerd van een contactbuis naar een stroomdraad, maar waarin de lasdraad niet wegsmelt. De stroom wordt in deze opstelling niet via een lasboog naar een werkstuk, maar wordt door een tweede contactbuis van de draad afgeleid. Het schema wordt gegeven in figuur 3.19. De resultaten van het onderzoek staan vermeld in tabel 3.20.

De derde onderzoeker waarvan meetresultaten van de contactweerstand in de contactbuizen bekend zijn, is Hauck [2]. Ook hij gebruikte bij de bepaling ervan een lassimulatie. Zijn resultaten staan weergegeven in tabel 3.21. Niet alleen de waarde van de weerstand wordt gegeven, maar Hauck geeft ook aan wat de invloed is van de contactkracht.

Vergelijking van de uitkomsten van de drie onderzoeken maakt duidelijk dat er zeker geen overeenstemming tussen de waarden te vinden is. Zwickert vermeldt voor de contactweerstand tussen een contactbuis en een draad met een diameter van 1,2 mm een contactweerstand van ongeveer $1 \cdot 10^{-4} \Omega$. De waarden die Chubukov vermeldt, zijn een factor 100 groter. De waarden voor de contactweerstand die worden gemeld door Hauck zijn weer een factor 100 groter dan de waarden van Chubukov en daarmee 10.000 maal zo groot als de door Zwickert gemeten waarden. Bij de berekening die in dit onderzoek wordt uitgevoerd, wordt daarom de door Holm voorgestelde vergelijking (12) gebruikt. In de vergelijking moet voor ρ een gemiddelde ingevuld worden voor de soortelijke elektrische weerstand van het koper van de contactbuis en de soortelijke weerstand van het materiaal van de lasdraad. De grootte van het gevormde

contactoppervlak moet met de in deze paragraaf beschreven methode worden berekend.

CONTACTTEMPERATUUR

De hoogte van de temperatuur die in het contact ontstaat, volgt uit het simpelweg invullen van de in paragraaf 3.1 gegeven vergelijking:

$$\theta_p = \frac{V}{2\sqrt{2,45 * 10^{-8}}} \quad (46)$$

Met behulp van deze vergelijking kan berekend worden of de smelttemperaturen van de materialen in het contactpunt (koper van de contactbuis en staal van de lasdraad) worden overschreden.

Yamada heeft tijdens het MIG/MAG-lassen van stalen lasdraden met een diameter van 1,2 mm smeltplekjes op de lasdraden gevonden [13]. De smeltverschijnselen traden op tijdens het lassen met stroomsterktes van 200 A en hoger. Volgens vergelijking (46) wordt de smelttemperatuur van de stalen lasdraad tijdens het lassen overschreden (aangenomen smelttemperatuur staaldraad < 1500 °C) wanneer geldt:

$$V > 1500 * 2 \sqrt{2,45 * 10^{-8}} \approx 0,23 \text{ V}$$

Dus bij een spanningsval die groter is dan 0,23 V zijn smeltverschijnselen aan de draad te verwachten. Bij een stroomsterkte van 200 A levert dat via de Wet van Ohm een waarde voor de contactweerstand van $1 * 10^{-3} \Omega$. Dat is 10 maal zo groot als de hierboven gemelde waarden van Zwickert en een factor 10 maal kleiner dan door Chubukov vermelde waarden.

MATERIAALCOMBINATIES

De materiaalcombinatie in het contactpunt hangt af van het materiaal van de lasdraad zelf; in dit onderzoek dus van de staalsoort. De contactbuis zelf is immers zonder uitzondering van koper gemaakt. In het contact is sprake van een koper-koper contact wanneer de lasdraad voorzien is van een koperen coating. Deze coating is speciaal aangebracht in een poging om de elektrische weerstand te verlagen.

SMEERMIDDELEN

Op de lasdraad kan nog smeermiddel zitten uit één van de reductiestappen tijdens de fabricage van de draad. De aanwezigheid van deze trekzeep kan nadelig zijn voor de kwaliteit van de las, gezien het feit dat de zeep waterstof bevat. Op de lasdraad wordt soms ook speciaal smeermiddel aangebracht om de mechanische weerstand van de draad in de lasmachine te verlagen. Aan de draad worden geen

smeermiddelen toegevoegd met als doel het elektrisch contact te vergemakkelijken of te beschermen.

FRETTING

Fretting kan in het contact tussen lasdraad en contactbuis geen rol spelen. Fretting treedt alleen op bij kleine bewegingen tussen materiaaloppervlakken, niet wanneer het ene oppervlak, met hoge snelheid, langs het ander glijdt.

3.3 Het model van De Kanter

CONTACTOPPERVLAK

Bij de berekening van de grootte van het contactoppervlak gebruikt De Kanter vergelijking (1). Ook hij heeft aan de vergelijking ten onrechte de genoemde factor ξ toegevoegd [3]. Voor de grootte van de waarde kiest hij een waarde tussen 0,1 en 0,3. Hij kiest voor deze waarde omdat hiermee de berekeningen het beste overeenkomen met de verwachtingen.

Bovendien heeft hij bij het gebruik van de vergelijking niet de hardheid van de zachtste, maar juist de hardheid van de hardste contactpartner gekozen. Daarmee komt het uitgangspunt van zijn model op losse schroeven te staan.

CONTACTKRACHT

Voor de berekening van de contactkracht gebruikt De Kanter het in de vorige paragraaf genoemde model van de firma Binzel [38].

Een bewijs voor de onbruikbaarheid van het rekenmodel, geeft De Kanter zelf al in zijn verslag. In het model is verondersteld dat de afstand tussen de punten waar de draad contact maakt met de wand voor iedere draad gelijk is. Toch doet De Kanter op grond van het model een uitspraak over de invloed van de lengte van een contactbuis.

Hij komt tot de conclusie dat er een optimale contactbuislengte is voor het bereiken van de maximale contactkracht. Wanneer de contactbuis langer gemaakt wordt dan deze optimale lengte, dan neemt de contactkracht dus weer af. Hij verklaart dat met het optreden van plastische vervorming in de draad. Dat zou moeten betekenen dat het moment over de doorsnede bij plastische vervorming kleiner zou moeten zijn dan het moment over de doorsnede bij elastische vervorming, en dat is niet het geval.

De berekening uit paragraaf 3.2 maakt duidelijk dat het verlengen van de contactbuis de waarde van de contactkracht inderdaad kan laten toenemen. Vanaf een bepaalde lengte wordt de contactkracht niet meer hoger, maar blijft constant. Door het verlengen van de buis zal de contactkracht echter niet lager kunnen worden.

Zwicker spreekt in een van zijn artikelen ook over een optimale contactbuislengte [5]. Hij ondersteunt zijn idee met behulp van metingen. Bij het langer maken van de contactbuis tijdens een bepaalde lastest constateerde hij namelijk dat de

contactkracht terugliep. Gezien het voorgaande kan dat niet met behulp van de stijfheid en sterkte beredeneerd worden, maar moet dat een ander oorzaak gehad hebben.

Gezien de bovenstaande kritische opmerkingen over door De Kanter gebruikte model, ligt het voor de hand om aan de waarde van die conclusies van zijn rapport, die gebaseerd zijn op berekeningen met het model, te twijfelen.

3.4 Hypothese

Een storing treedt tijdens het MIG/MAG-lassen op wanneer de stroomdoorvoer van de contactbuis naar het lasbad verandert. Bij het optreden van een verstoring verandert de elektrische weerstand van het systeem contactbuis-lasdraad. De oorzaak van zo'n verandering van de weerstand is óf een verandering van de draadaanvoersnelheid van de draad óf een variatie van de overgangsweerstand tussen de contactbuis en de lasdraad.

Een variatie van de draadaanvoersnelheid treedt op wanneer de draadaanvoerrollen de draad niet met een constante kracht kan voortbewegen of wanneer de weerstand die de draad in het draadaanvoersysteem ondervindt varieert.

Het elektrisch contact tussen een schone contactbuis en een lasdraad wordt voornamelijk bepaald door de aandrukkracht van de draad tegen de wand van de contactbuis. Deze aandrukkracht wordt voornamelijk bepaald door de voorbuiging waarmee de draad de contactbuis inkomt.

Een variatie in de overgangsweerstand tussen de contactbuis en de lasdraad kan optreden wanneer de contactbuis vervuilt tijdens het lassen of wanneer de contactkracht die de draad tegen de contactbuis opbouwt te laag is om een goed elektrisch contact te garanderen.

Op grond van deze overweging wordt de volgende hypothese geformuleerd:

Storingen bij het MIG/MAG-lassen van staal zullen optreden bij die lasdraden die vanaf de start van het proces een hoge mechanische weerstand ondervinden en/of bij draden waarbij tijdens het lassen de contactbuis kan vervuilen waardoor de mechanische weerstand die de draad ondervindt toeneemt en het elektrisch contact tussen de contactbuis en de lasdraad verstoord wordt.

CONSEQUENTIES VAN DE HYPOTHESE

Wanneer de bovenstaande hypothese juist is, is voor het optreden van een storing een verandering nodig in het systeem contactbuis-lasdraad. Wanneer in een

MIG/MAG-systeem een storing wordt waargenomen, is óf de draadaanvoersnelheid van de draad (tijdelijk) veranderd óf de overgangsweerstand in het systeem contactbuis-lasdraad (tijdelijk) veranderd. Aangezien het vastlopen van de draad ook als storing geldt in het MIG/MAG-systeem kan, volgens de hypothese, een draad pas vastlopen wanneer in het systeem contactbuis-lasdraad de contactweerstand of de draadsnelheid verandert.

Een andere consequentie die uit de hypothese volgt geldt speciaal voor storingen die optreden kort na het opstarten van het MIG/MAG-systeem. Wanneer het systeem contactbuis-lasdraad niet verstoord is door vervuiling of slijtage moeten alle storingen veroorzaakt worden door óf het ontbreken van voldoende aandrukkracht voor het instandhouden van het elektrisch contact óf door een variatie van de draadsnelheid.

De aandrukkracht in het elektrisch contact tussen de contactbuis en de lasdraad wordt voornamelijk bepaald door de voorbuiging waarmee de lasdraad de contactbuis inloopt en deze voorbuiging zal tijdens het lassen niet veranderen. Storingen die niet verklaard kunnen worden door slijtage of vervuiling bij lasdraden waarbij de aandrukkracht bij de start van het lasproces voldoende groot is, moeten verklaard worden met een variatie van de draadsnelheid.

TOETSING VAN DE HYPOTHESE

Om de hypothese te kunnen toetsen zullen in dit onderzoek een aantal tests worden uitgevoerd.

In de eerste plaats zullen de draad-eigenschappen worden bepaald die nodig zijn om rekenwerk mogelijk te maken met de in paragraaf 3.2 afgeleide vergelijkingen voor de deformatie van de lasdraden (28), voor het berekenen van de contactkracht tussen lasdraad en contactbuis (43) en voor het berekenen van de contacttemperatuur in het elektrisch contact tussen lasdraad (46).

In de tweede plaats zal met de lasdraden een lastest worden uitgevoerd om te onderzoeken welke storingen zich tijdens het lassen de verschillende draden voordoen.

Om de invloed van de stroomoverdracht en het eventueel optreden van smeltverschijnselen in het elektrisch contact tussen de contactbuis en de lasdraad te kunnen onderzoeken wordt met de draden een test uitgevoerd waarbij de draad wel bloot staat aan stroomdoorvoer, maar de draad zelf niet in een lasboog opsmelt.

HOOFDSTUK 4: Experimenten

Het doel van dit onderzoek is om beter te kunnen begrijpen waarom lasdraden tijdens het doorvoeren problemen opleveren en hoe het verschil in doorvoergedrag tussen de verschillende draden te verklaren is. Om dit doel te kunnen bereiken is een aantal experimenten uitgevoerd. De experimenten zijn zo ingericht dat de bruikbaarheid van de theorie uit hoofdstuk 3 en de houdbaarheid van de hypothese getoetst kan worden.

Naast een beschrijving van de manier waarop de experimenten zijn uitgevoerd en een verantwoording van de werkwijze, staan in dit hoofdstuk ook alle proefresultaten vermeld.

Al voor het opstellen van de theorie was informatie nodig die niet zonder meer uit de literatuur kon worden overgenomen. In **paragraaf 4.1** worden de experimenten besproken die zijn uitgevoerd om het opstellen van een theoretisch model mogelijk te maken.

Voordat er in het onderzoek daadwerkelijk is gelast, zijn de specifieke eigenschappen van de in het onderzoek gebruikte lasdraden vastgelegd. In **paragraaf 4.2** wordt besproken op welke manier dat is gebeurd.

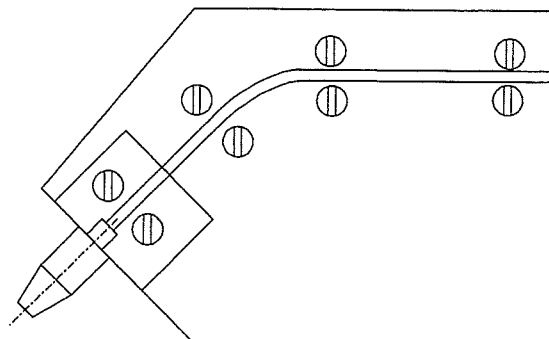
In het onderzoek zijn de lasdraden vervolgens aan een duurttest onderworpen. De lasmachine, de opzet van de tests en de resultaten komen aan bod in **paragraaf 4.3**.

Om het mechanisme van de stroomoverdracht beter te kunnen begrijpen is in dit onderzoek een aantal tests uitgevoerd waarin aan de draden wel stroom werd overgedragen, maar de lasdraad zelf niet verloren ging. De opzet, de gebruikte installatie en de resultaten van deze simulaties staan vermeld in **paragraaf 4.4**.

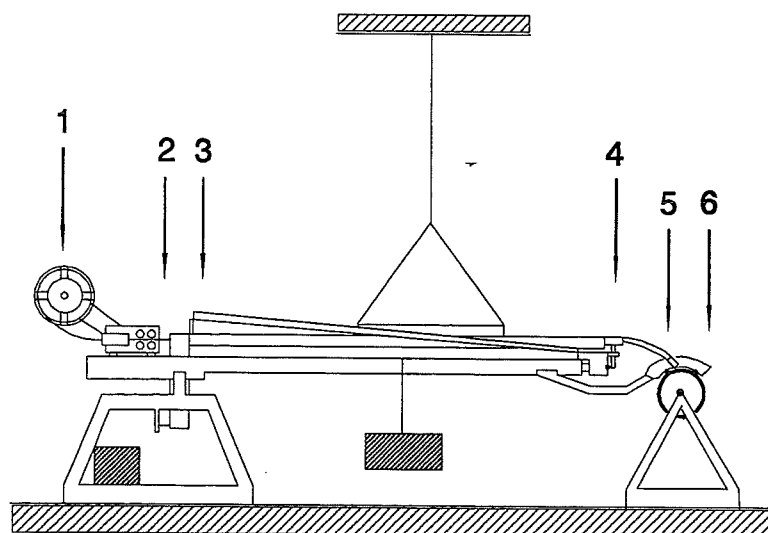
Het hoofdstuk wordt afgesloten met een aantal kanttekeningen over de bruikbaarheid van de gepresenteerde resultaten. Deze staan vermeld in **paragraaf 4.5**.

4.1 Experimenten voor het opstellen van de theorie

Bij het opstellen van de theorie bleek dat het voor de berekening van de vorm van het contactvlak met behulp van de vergelijkingen van Hertz, van belang was om te achterhalen op welke manier de draad in de toorts en in de contactbuis tegen de wand aanligt (paragraaf 3.2). Ook rees bij het opstellen van de theorie de vraag of de voorbuiging en de helix van de draad bij het doorvoeren in de machine constant blijven, of door plastische deformatie tijdens het doorvoeren veranderen.



Figuur 4.1: model van de toorts.



Figuur 4.2: het draad-aanvoersysteem met daarbij aangegeven de plaatsen waarop de cast en de helix van de draden bepaald zijn.

De meest eenvoudige manier om te weten te komen **op welke manier de draad aanligt tegen de wand van de toorts**, is het maken van een model van de toorts en de contactbuis van doorzichtig materiaal. Het gebouwde model is getekend in figuur 4.1.

In een plaat perspex met een dikte van 6 mm is een gleuf gefreesd met een breedte en diepte van 2 mm. De gleuf heeft de vorm van het kanaal in de lastoorts. Op deze plaat is vervolgens een tweede plaat perspex vastgeschroefd. Op deze manier ontstaat een vierkant gat in de vorm van de toorts. Aan het einde van het gat is schroefdraad aangebracht zodat hierin een normale contactbuis kon worden bevestigd.

Bij het doorvoeren van een stuk lasdraad door het model bleek dat de draad over de volle lengte van het kanaal vanaf de bocht tot in de contactbuis tegen de bovenzijde van het kanaal aanligt. Dat betekent dus dat de draad pas in de contactbuis zelf loskomt van deze wand. Dit resultaat is al in paragraaf 3.2 gemeld.

Om te kunnen vaststellen of de **voorbuiging van de draad verandert** tijdens het doorvoeren, is de draad stroomloos doorgevoerd op hetzelfde systeem dat in het onderzoek ook voor de duurtests is gebruikt. In de machine beweegt de draad zich tijdens het doorvoeren vanaf de draadrol, via de draad-aanvoerrollen, het slangenpakket en de toorts naar de contactbuis. Op die plaatsen waar de constructie het toelaat, is de doorvoer van de draad onderbroken en is de draad het systeem uitgeleid. Op deze manier kan de voorbuiging van de draden onderweg worden bepaald.

Het draad-aanvoersysteem is getekend in figuur 4.2. In de figuur zijn ook de plaatsen aangegeven waar de cast van de draden bepaald kan worden. De werking en de constructie van het systeem komen later bij de bespreking van de duurtests uitgebreid aan bod.

De resultaten van dit experiment zijn gegeven in tabel 4.3 en tabel 4.4.

Draad	Vanaf Rol (1)	Na wieltes (2)	Na inloop (3)	Voor de Toorts (4)	Voor CB (5)	Na CB (6)
PZ 6000	689	934	903	971	804	827
Fluxofil	629	3550	4200	2840	541	874
Lincoln	1082	1191	1265	1493	1039	1080
RVS 318	498	695	714	732	621	729
Kobelco	438	951	923	919	492	644
Meldra 1,0	1010	2163	2143	2148	1189	1387
Meldra 1,2	866	1766	1823	1415	766	867
Meldra 1,6	428	685	722	683	501	663

Tabel 4.3: cast van de lasdraden tijdens het doorvoeren in mm.

Draad	Vanaf Rol (1)	Na wieltes (2)	Na inloop (3)	Voor de Toorts (4)	Voor CB (5)	Na CB (6)
PZ 6000	9	94	44	29	38	39
Fluxofil	0	0	0	7	94	26
Lincoln	13	25	60	32	31	34
RVS 318	6	48	61	24	28	30
Kobelco	17	6	4	1	2	3
Meldra 1,0	10	30	30	30	28	34
Meldra 1,2	0	29	32	18	23	22
Meldra 1,6	10	4	50	12	20	12

Tabel 4.4: helix van de lasdraden tijdens het doorvoeren in mm.

In tabel 4.3 is te zien dat iedere draad tijdens het doorvoeren in het draad-aanvoersysteem plastisch deformeert. Duidelijk is ook dat de draad in de toorts de cast krijgt opgedrongen waarmee de draad de contactbuis inkomt.

Algemene uitspraken doen over de helix op grond van tabel 4.4 is veel moeilijker. Duidelijk is wel dat de helix van de twee metaalgevulde draden op een andere manier verandert in het draadaanvoersysteem, dan de helix van de massieve draden. De fluxofil draad heeft op de rol een helix van 0 mm; de helix wordt in de toorts veel groter. De helix van de Kobelco draad is klein op de rol en blijft klein tijdens het doorvoeren. Duidelijk is ook dat de helix van de vier massieve draden met een diameter van 1,2 mm ongeveer even groot is op het moment dat de draden de toorts inlopen. In de toorts en in de contactbuis verandert de helix van de draden nauwelijks. De helix van de hier onderzochte draden is sowieso klein, als bedacht wordt dat volgens de norm DIN 8559 geldt dat draden met een helix kleiner dan 100 mm 'helix-vrij' genoemd worden [18]. Volgens die norm zijn alle hier onderzochte draden, op het hele traject door het draadaanvoersysteem helix-vrij.

4.2 Vaststellen van de eigenschappen van de lasdraden

Om de invloed van verschillende draadeigenschappen op de doorvoerbaarheid te kunnen onderzoeken, moeten lasexperimenten worden uitgevoerd met draden die verschillende eigenschappen bezitten. Om zo'n set lasdraden te krijgen, zouden van één lasdraad de eigenschappen veranderd kunnen worden. Zo kan bijvoorbeeld de hardheid met een warmtebehandeling worden veranderd. Echter lang niet alle draadeigenschappen zijn zo gemakkelijk te beïnvloeden. In dit onderzoek is ervoor gekozen om als uitgangsmateriaal standaard lasdraden van verschillende fabrikanten te gebruiken. Doordat de fabrikanten bij de productie van hun draden gebruik maken van verschillende produktiemethoden zijn zowel de chemische als de mechanische eigenschappen van de draden niet gelijk. De verschillen die ontstaan in het productieproces, zijn daarmee de verschillen die gebruikt zijn als basis voor het doorvoerbaarheids onderzoek.

UITGANGSMATERIAAL

In de tests is een achttal staaldraden onderzocht. Dat zijn vijf massieve draden, twee metaal-gevulde draden en één roestvast-staaldraad. In tabel 4.5 staan de acht staaldraden genoemd, met daarbij aangegeven welke soort lasdraad het betreft.

Drie van de massieve draden zijn afkomstig van dezelfde leverancier, hebben dezelfde chemische samenstelling en verschillen alleen van elkaar in diameter.

Draad	Diameter	Staal	RVS	Massief	Metaal-gevuld	geöxy-deerd	koper gecoat	blank
PZ 6000	1,2 mm	X		X			X	
Fluxofil	1,2 mm	X			X		X	
Lincoln	1,2 mm	X		X				X
RVS 318	1,2 mm		X	X				X
Kobelco	1,2 mm	X			X			X
Meldra 1,0	1,0 mm	X		X		X		
Meldra 1,2	1,2 mm	X		X		X		
Meldra 1,6	1,6 mm	X		X		X		

Tabel 4.5: de onderzochte lasdraden en hun kenmerken.

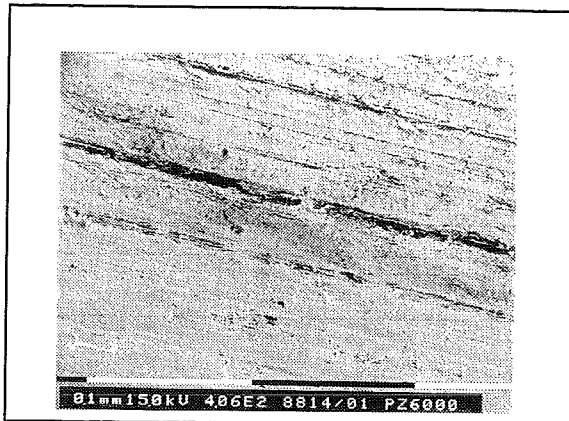


Foto 4.7: PZ 6000, oppervlakte 400 X vergroot.

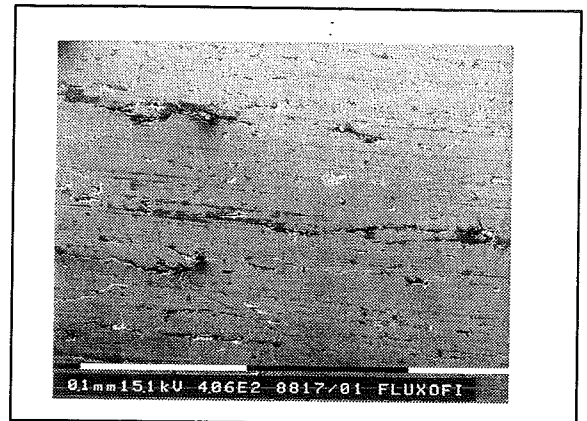


Foto 4.8: Fluxofil, oppervlakte 400 X vergroot.

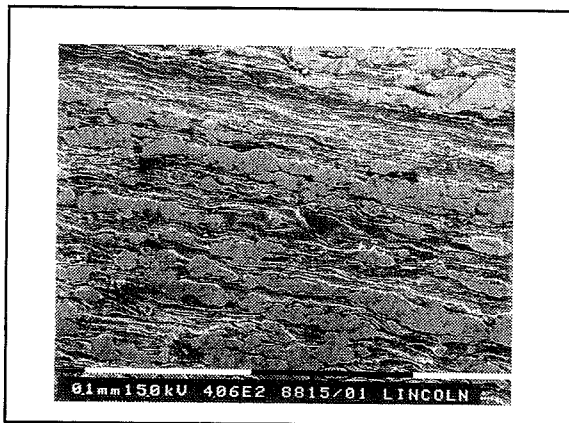


Foto 4.9: Lincoln, oppervlakte 400 X vergroot.

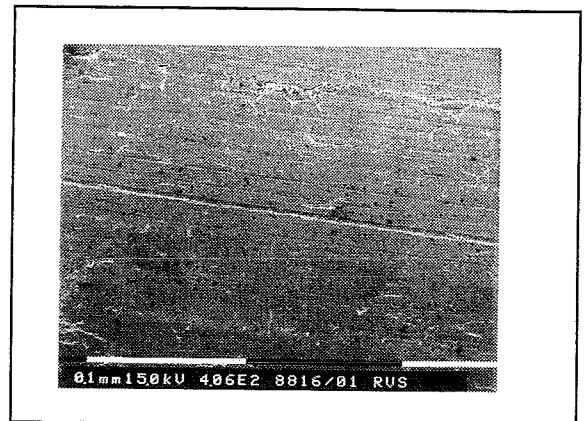


Foto 4.10: RVS 318, oppervlakte 400 X vergroot.

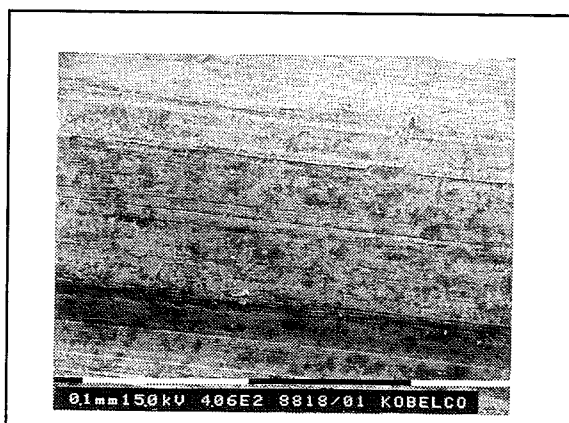


Foto 4.11: Kobelco, oppervlakte 400 X vergroot.

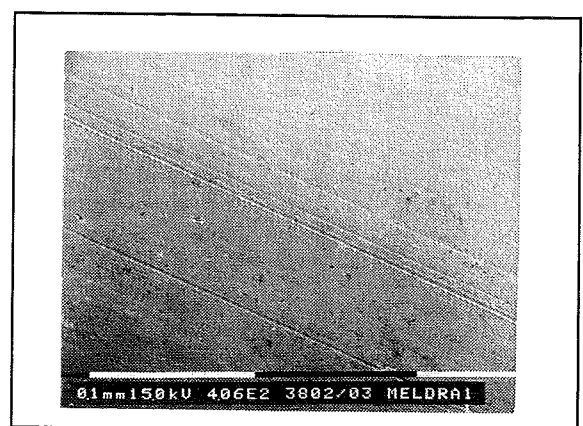


Foto 4.12: Meldra 1,0, oppervlakte 400 X vergroot.

CHEMISCHE SAMENSTELLING

Van de verschillende lasdraden is in de eerste plaats de chemische samenstelling bepaald met behulp van een EDAX-analyse. De resultaten van dit onderzoek staan vermeld in tabel 4.6. Van de gevulde draden is de samenstelling van de draden niet bepaald, omdat de samenstelling van deze draden niet constant is over de doorsnede.

Draad	% Fe	% Si	% Mn	% Cr	% Ni
PZ 6000	96,00	2,22	1,78		
Fluxofil					
Lincoln	97,37	1,31	1,32		
RVS 318	67,90	1,32	1,30	20,25	9,23
Kobelco					
Meldra 1,0	97,38	0,98	1,65		
Meldra 1,2	97,44	0,91	1,65		
Meldra 1,6	97,51	0,91	1,58		

Tabel 4.6: chemische samenstelling van de lasdraden.

OPPERVLAKTE VAN DE DRADEN

Met behulp van de REM zijn de oppervlakken van de draden gefotografeerd. In paragraaf 3.2 kwam al naar voren dat de oppervlaktegesteldheid van de draden invloed kan hebben op het gemak waarmee de oxydehuid doorbroken worden kan, en daarmee op het gemak van stroomoverdracht. De oppervlakken zijn te zien op foto 4.7 tot en met 4.14.

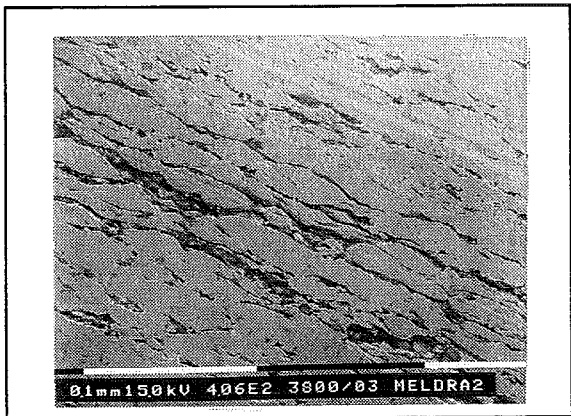


Foto 4.13: Meldra 1,2, oppervlakte 400 X vergroot.

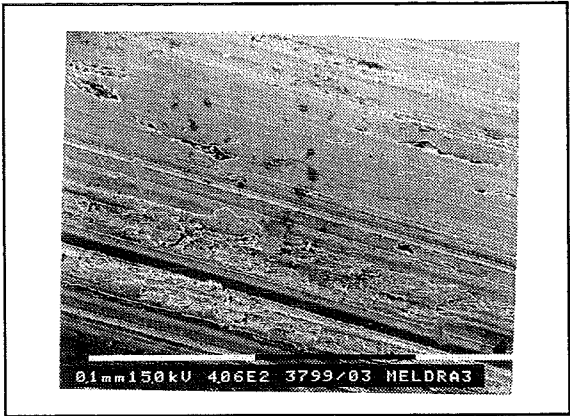


Foto 4.14: Meldra 1,6, oppervlakte 400 X vergroot.

MECHANISCHE BEPROEVING VAN DE LASDRADEN EN DE CONTACTBUIS

In hoofdstuk 3 is een vergelijking afgeleid voor het berekenen van de contactkracht (43). Om deze vergelijking te kunnen gebruiken is het nodig om de elasticiteitsmodulus en de exacte diameter van de draden te weten. Alle draden zijn daarom ook aan een trekproef onderworpen. De elasticiteitsmodulus van het contactbuis materiaal moet bekend zijn voor de toepassing van de vergelijkingen van Hertz bij de berekening van de vorm van het contactvlak tussen draad en contactbuis. Daarom is ook het contactbuis materiaal onderworpen aan een trekproef. De resultaten staan vermeld in tabel 4.15.

Draad	$R_{0,2}$ (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	E (kN/mm ²)
PZ 6000	1109	1386	195
Fluxofil	463	515	139
Lincoln	1109	1244	200
RVS 318	896	1111	194
Kobelco	555	624	144
Meldra 1,0	1104	1257	195
Meldra 1,2	978	1178	187
Meldra 1,6	880	1079	186
Contactbuis			110

Tabel 4.15: resultaten van het mechanisch beproeven van de draden en de contactbuis.

HARDHEID

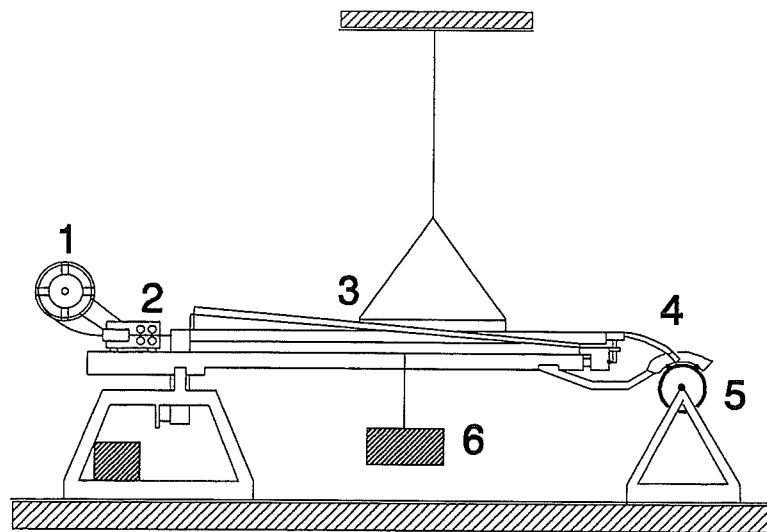
De hardheid van de contactbuis heeft, zoals gebleken is, invloed op de grootte van het contactvlak dat ontstaat tussen contactbuis en lasdraad. De hardheid van de draden kan invloed hebben op het doorbreken van de oxydehuid op de draden. Daarom is zowel van het contactbuismateriaal als van alle lasdraden de hardheid bepaald. De hardheidsmeting is uitgevoerd met een Vickers-Microhardheidsmeter, met een gewicht van 50 gram. De meting is uitgevoerd op het buitenoppervlak van de draden. Bij de met koper gecoate draden is, vanwege de geringe dikte ($\pm 5 \mu\text{m}$) van de koperlaag, in deze bepaling de hardheid van de staaldraad zelf gemeten. De resultaten van deze metingen staan in tabel 4.16.

Draad	Hardheid (Hv 0,05)
PZ 6000	351
Fluxofil	186
Lincoln	344
RVS 318	350
Kobelco	201
Meldra 1,0	282
Meldra 1,2	253
Meldra 1,6	271
Contactbuis	45

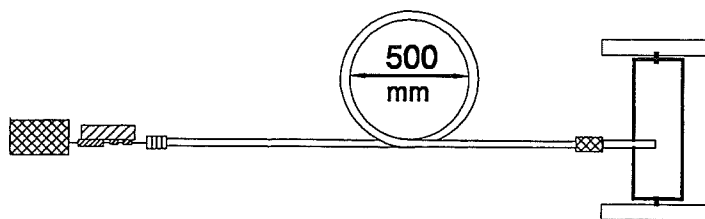
Tabel 4.16: hardheid van de draden en van de contactbuis.

In paragraaf 3.2 is vermeld dat er een mogelijkheid is om de bruikbaarheid van de vergelijkingen die het elastische buig-gedrag van de draden beschrijven, te kunnen controleren met behulp van de daar genoemde vergelijking (28). Om de vergelijking te kunnen gebruiken is van alle draden bepaald bij welke opgelegde voorbuiging de draden plastisch beginnen te deformeren.

Om de test te kunnen uitvoeren is een hoeveelheid ronde voorwerpen verzameld met verschillende diameters. De draden zijn met de hand om het voorwerp getrokken met de grootste diameter. Daarna is van de draden de cast gemeten. Alle draden die niet plastisch verbogen waren, zijn daarna het volgende voorwerp heen gelegd, net zolang tot voor de eerste keer plastische deformatie optrad. De resultaten van de tests zijn te vinden in tabel 4.17.



Figuur 4.18: draadaanvoersysteem voor het uitvoeren van duurtests.



Figuur 4.19: bovenaanzicht van het draadaanvoersysteem.

Draad	Straal waarbij plastische deformatie begint (mm):
PZ 6000	75
Fluxofil	120
Lincoln	90
RVS 318	90
Kobelco	95
Meldra 1,0	80
Meldra 1,2	90
Meldra 1,6	100

Tabel 4.17: de voorbuiging waarbij de draden plastisch beginnen te deformeren.

4.3 Duurtests doorvoerbaarheid

Echt gelast is er met de draden op de, al in paragraaf 4.1 genoemde en speciaal voor het onderzoek naar doorvoerbaarheid ontwikkelde, **draadaanvoersysteem**. Het systeem is nogmaals getekend in figuur 4.18.

In de opstelling is standaard MIG/MAG-apparatuur verwerkt. Dat betekent dat er standaard aanvoerrollen, slangenpakket en toorts in de installatie ingebouwd zijn. De stroom wordt geleverd door een conventionele stroombron. De draadrol (1), de draad-aanvoerrollen (2), het slangenpakket (3) en de toorts (4) zijn gemonteerd aan een stalen hengel. Deze hengel is zo geconstrueerd dat het mogelijk is om met behulp van twee krachtopnemers de kracht te meten die de draad op het slangenpakket en op de toorts uitoefent. De montage en constructie van deze krachtopnemers wordt toegelicht in bijlage 4.

De toorts hangt boven een watergekoelde buis (5) die tijdens het lassen ronddraait en zich zijdelings verplaatst. Op deze manier wordt op de buitenkant van de buis spiraalsgewijs één lange lasrups gelegd. De hengel wordt in balans gehouden door een gewicht dat onder aan de hengel bevestigd is.

In de praktijk ligt het slangenpakket tijdens het lassen nooit precies kaarsrecht in de lashal. Om de praktijksituatie te benaderen is het slangenpakket in de machine in een bocht gelegd met een diameter van 500 mm. Dat is te zien in het bovenaanzicht van de opstelling, figuur 4.19.

UITVOERING VAN DE DUURTESTS

Op deze installatie zijn duurproeven uitgevoerd om de doorvoerbaarheid van de draden gedurende één uur te bepalen. Tijdens de experimenten werden de stroom, de spanning, de temperatuur van de contactbuis, de kracht van de draden op het slangenpakket en de kracht van de draad tegen de contactbuis gemeten.

Tijdens deze duurproeven wordt de lasstroom zo hoog mogelijk ingesteld. Door de draden op deze manier zwaar te belasten, komen verschillen tussen de draden sneller boven water. Zo kan de lengte van de tests beperkt worden tot één uur.

Wanneer een draad tijdens de eerste poging vastloopt voordat een uur gelast is, volgt een tweede test. Wanneer ook tijdens de derde test het volle uur niet wordt gehaald, worden er met de draad verder geen pogingen ondernomen. De gegevens zijn tijdens de tests vastgelegd met een schrijver. In de tabellen zijn de gemiddelde, de minimale en de maximale waarde van de grootheden steeds gegeven van een testperiode van vijftien minuten.

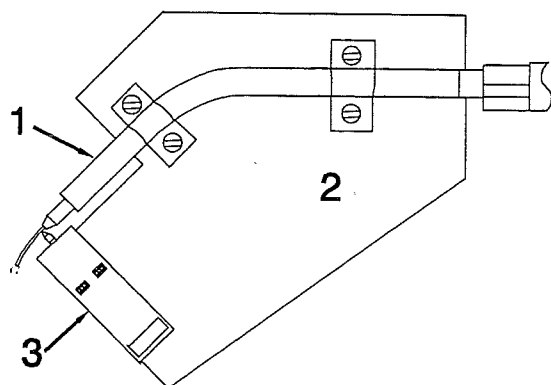
De tests zijn steeds na 30 minuten stilgelegd om de gascup te kunnen schoonmaken. Deze onderbreking is bij een aantal tests terug te vinden in de resultaten, door een sprongsgewijze verandering van één of meerdere grootheden. De resultaten van de duurtests staan vanaf pagina 52 per draad vermeld.

CONTACTBUIZEN

Na afloop van de tests zijn ook de contactbuizen onderzocht. Aan de hand van de contactbuizen kan een idee verkregen worden over het verloop van de stroomoverdracht tijdens de tests. Ook de slijtage die de draden veroorzaakt hebben tijdens de test, levert belangrijke informatie. De gemeten waarden van de slijtage van de contactbuizen zijn verzameld in tabel 4.20.

Draad	Lengte van de test (min)	Slijtage (toename van de diameter in %)
PZ 6000	60	11
Fluxofil	60	14
Lincoln	60	23
RVS 318	30	(dichtgesmolten)
Kobelco	60	13
Meldra 1,0	60	10
Meldra 1,2	60	17
Meldra 1,6	55	24

Tabel 4.20: slijtage van de contactbuizen na afloop van de duurtests.



Figuur 4.21: constructie voor het meten van de contactkracht van de draad op de contactbuis.

CONTACTKRACHTMETING

De in dit onderzoek gebruikte methode voor het vergelijken van het gedrag van de lasdraden in een duurttest wordt in de literatuur ook een aantal keer beschreven. Lyttle heeft met ongeveer dezelfde proefopstelling de invloed bekeken van de kopercoating en van smeermiddelen op de doorvoerbaarheid [15]. Ook Zwickert [1] en Tammi [38] beschrijven soortgelijke duurproeven. In deze experimenten wordt steeds de kracht die de draad uitoefent op het slangenpakket als één van de signalen gemeten. De kracht die de draad nodig heeft om de contactbuis te passeren wordt alleen gemeten in het onderzoek van Diltney [20].

Gezien de grote invloed die de contactkracht op de stroomoverdracht heeft, is ook in dit onderzoek een opstelling gebouwd om de contactkracht te kunnen meten. In figuur 4.21 is de gebruikte constructie getekend. Op de toorts (1) van het draad-aanvoersysteem is met behulp van een stijve perspex plaat (2) een veerunster (3) gemonteerd. De unster is voor de experimenten zo aangebracht dat het meetgedeelte van de unster de draad juist van de contactbuis aftilt. De proeven zijn uitgevoerd zonder dat stroomoverdracht op de draad plaatsvindt.

Het aanbrengen van de unster met een starre constructie op de toorts bleek essentieel. Eerder uitgevoerde experimenten met een losse opstelling met daarin de unster gaven uitkomsten die niet waren te reproduceren. Door de schokken op de machine bij het in en uitschakelen van de draadaanvoer werden de metingen te veel verstoord. Metingen met de constructie uit figuur 4.21 bleken wel goed te reproduceren. De metingen hebben een onnauwkeurigheid van ongeveer 0,1 N. Het resultaat van de metingen van de contactkracht is vermeld in tabel 4.22.

De gemeten waarden komen overeen met eerder gemelde resultaten van Zwickert [1] en Tschubakov [39]. Zwickert meld contactkrachten tussen 1,32 N en 1,93 N. Tschubakov meld contactkrachten tot 1,93 N.

Draad	Contactkracht tussen contactbuis en draad (N)
PZ 6000	3,19
Fluxofil	3,15
Lincoln	2,48
RVS 318	3,08
Kobelco	3,27
Meldra 1,0	1,02
Meldra 1,2	2,79
Meldra 1,6	9,20

Tabel 4.22: gemeten contactkracht tussen contactbuis en lasdraad.

RESULTATEN VAN DE DUURTESTS:

De resultaten van alle duurproeven worden hieronder per draad vermeld:

PZ 6000

Duurtest: Met deze draad kon een uur gelast worden zonder dat de draad vastliep. Meteen al vanaf het begin van de test fluctueert de pakketkracht tussen een vaste maximale en een vaste minimale waarde. Tussen twee opeenvolgende pieken ligt ongeveer twintig seconden. De andere grootheden zoals de temperatuur van de contactbuis, de spanning en de stroom zijn stabiel. Gedurende de test blijft dit patroon hetzelfde. Ook het niveau van de krachten ligt aan het einde van de test nog op hetzelfde niveau als aan het begin ervan. De resultaten van de duurtest van de PZ 6000 draad staan vermeld in tabel 4.23.

Draad: PZ 6000															
Poging No.: 1				Proef beëindigd na: 60 min											
	F - Pakket (N)			F - Toorts (N)			Stroom (A)			Spanning (V)			Temperatuur (°C)		
	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max
0 - 15 min	20	29	50	1,0	1,0	1,0	295	305	320	34	34	35	230	235	255
15 - 30 min	18	30	52	1,0	1,0	1,0	295	310	325	34	34	35	240	250	260
30 - 45 min	19	30	51	1,0	1,0	1,0	295	310	325	34	34	35	215	230	250
45 - 60 min	17	28	44	1,0	1,0	1,0	295	310	330	34	34	35	235	240	260

Tabel 4.23: PZ 6000, resultaten van de duurtest.

Contact buis: De contactbuis zit na de test vol met kleine metaalspatten, vermoedelijk uit het lasbad. Aan de buis is bijna geen slijtage te zien. Tijdens het lassen heeft de draad tegen één kant van de contactbuis aangelopen. Aan deze kant is duidelijk de opeenhoping van koperdeeltjes te zien aan het uiterste puntje van de contactbuis. Bij de inloop van de buis heeft zich een propje kopersnippers verzameld. Deze kopersnippers liggen los in de buis.

FLUXOFIL M10

Duurtest: De eerste test die met deze draad is uitgevoerd duurde precies 20 minuten. Al vanaf het begin fluctueert de pakketkracht. Ook de temperatuur in de contactbuis is meteen vanaf het begin niet constant. Na 19 minuten loopt opeens de pakketkracht omhoog en na een minuut zit de draad vast.

De resultaten van de eerste test met deze draad staan in tabel 4.24. Bij de maxima voor de pakketkracht en de toorts-kracht in de periode 15 - 30 minuten staat een *. Dit betekent dat de aangegeven waarden de hoogste waarden zijn die in deze periode konden worden gemeten, het vastlopen zelf uitgezonderd. Bij het vastlopen liep de pakketkracht op tot meer dan 100 N (de meter heeft een meetbereik van 100 N); de toortskracht liep op tot ongeveer 8 N.

Draad: Fluxofil															
Poging No.: 1				Proef beëindigd na: 20 min											
	F - Pakket (N)			F - Toorts (N)			Stroom (A)			Spanning (V)			Temperatuur (°C)		
	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max
0 - 15 min	19	32	79	0,5	1,0	2,6	270	300	330	28	28	30	180	210	255
15 - 30 min	22	40	54*	0,8	1,5	1,6*	280	300	325	28	29	29	180	210	240
30 - 45 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45 - 60 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 4.24: Fluxofil, resultaten van de duurtest, 1^e poging.

De tweede duurtest met deze draad verliep veel beter. In de test kon een vol uur zonder vastlopen gelast worden. Na de eerste test is alleen de contactbuis vervangen. De rest van de installatie is niet gewijzigd. De waarde van de pakketkracht is vanaf het begin stabiel. Af en toe loopt de kracht in de contactbuis een heël klein beetje op, maar komt na korte tijd weer terug op hetzelfde niveau.

De resultaten van deze proef zijn te zien in tabel 4.25.

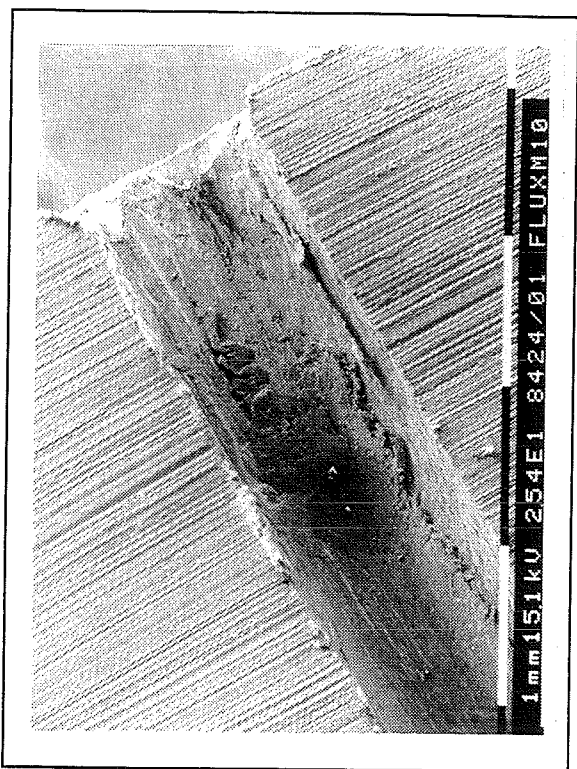


Foto 4.26: opname vervuiling in de contactbuis waarmee de lasdraad Fluxofil gelast is, 25 X vergroot.

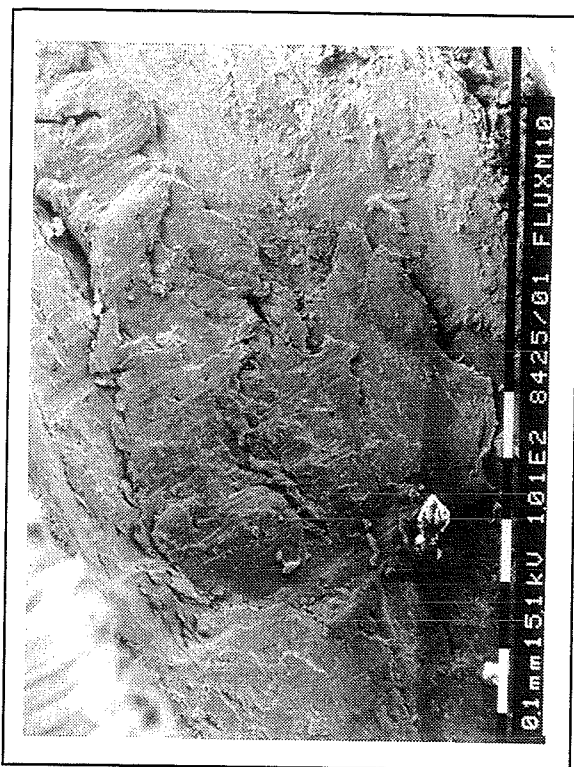


Foto 4.27: vervuiling in de contactbuis 100 X vergroot.

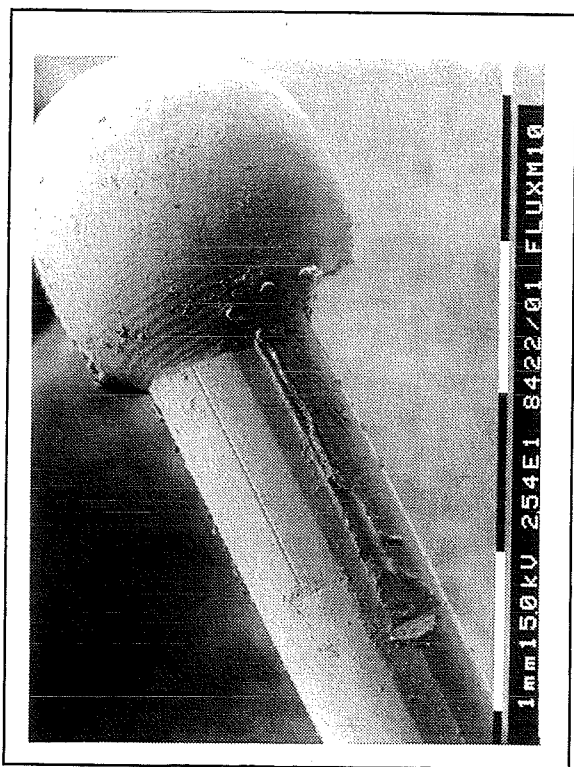


Foto 4.28: beschadiging op de lasdraad fluxofil, 25 X vergroot.

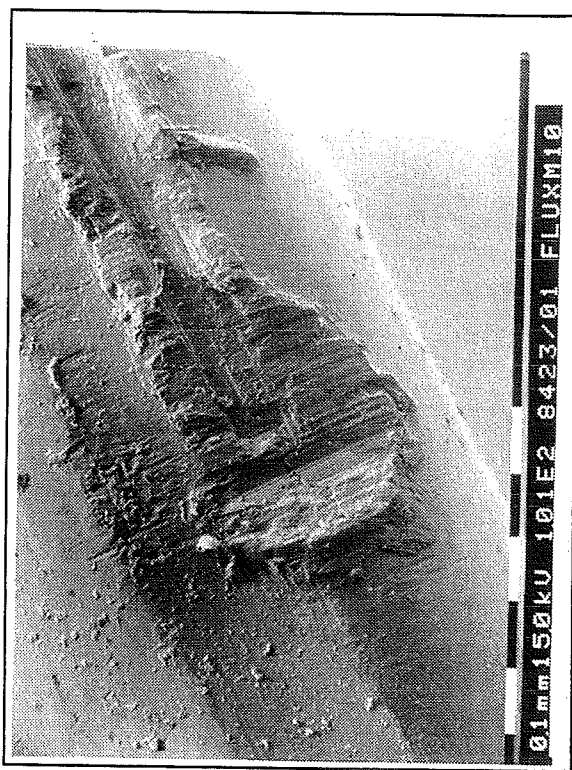


Foto 4.29: beschadiging op de lasdraad fluxofil, 100 X vergroot.

Draad: Fluxofil															
Poging No.: 2				Proef beëindigd na: 60 min											
	F - Pakket (N)			F - Toorts (N)			Stroom (A)			Spanning (V)			Temperatuur (°C)		
	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max
0 - 15 min	16	21	30	0,5	0,8	1,0	250	300	320	28	29	34	230	265	285
15 - 30 min	17	24	50	0,5	0,9	1,8	275	300	325	28	29	34	215	260	305
30 - 45 min	13	18	48	0,5	0,6	2,0	285	300	320	28	29	30	260	265	290
45 - 60 min	13	21	42	0,5	1,0	1,8	290	300	320	28	29	29	200	220	240

Tabel 4.25: Fluxofil, resultaten van de duurtest, 2^e poging.

Contact buis: De draad is tijdens de eerste test vastgelopen in de contactbuis. Na afloop is de contactbuis aan een kant opengeslepen om verder onderzocht te kunnen worden. In de eerste plaats is vastgesteld dat de draad daadwerkelijk vast zat aan de contactbuis. Met de hand is de draad daarna losgetrokken van de contactbuis.

De tip van de contactbuis bleek vervuild te zijn. Midden in de vervuiling is duidelijk een soort slangetje te zien. Het slangetje is te zien in de foto's 4.26 en 4.27. Met behulp van een analyse in de EDAX is vastgesteld dat het slangetje volledig uit staal bestaat. Het slangetje bestaat dus uit materiaal dat niet van de contactbuis afkomstig kan zijn. Het is of materiaal van de draad of een slijtage produkt dat door de draad de contactbuis ingetrokken is.

Ook op de draad zit een slangetje. Dit slangetje is te zien in de foto's 4.28 en 4.29. Ook van het slangetje op de draad is vastgesteld dat het staal is.

Vervolgens is de vraag gesteld op welke manier het slangetje in de contactbuis vast zit. De dwarsdoorsnedes van het slangetje zijn te zien op de foto's 4.30 tot en met 4.33. Op foto 4.31 is duidelijk te zien dat de vervuiling een sterk versmeerde structuur heeft. In het staal zitten hele smalle banen van koper. Op foto 4.32 is te zien dat in het gebied waar het staal aan het koper vast zit het koper beïnvloed is door warmte. In het gedeelte links op de foto zijn grote korrels te zien; dit gedeelte is waarschijnlijk maar weinig plastisch gedeformeerd, zodat er bij de rekristallisatie weinig kiemen aanwezig waren. Het gedeelte rechts vertoont veel kleinere korrels. Een vergroting van dit gedeelte is te zien in foto 4.33. In het gedeelte rechts is de deformatie waarschijnlijk groter geweest.

De contactbuis die tijdens de tweede test is gebruikt, vertoont na afloop weinig slijtage. In de tip van de contactbuis heeft zich aan de kant waar

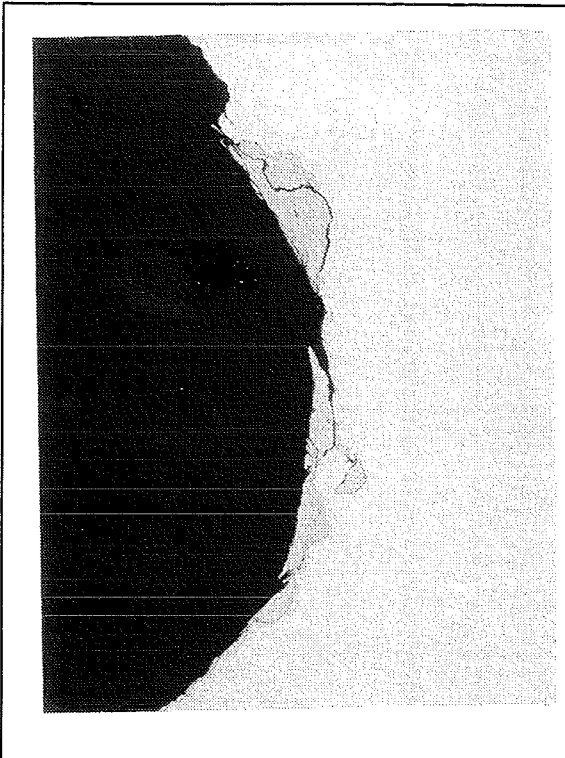


Foto 4.30: dwarsdoorsnede van de vuilkorst in de contactbuis, 100 X vergroot (ongeëtst).

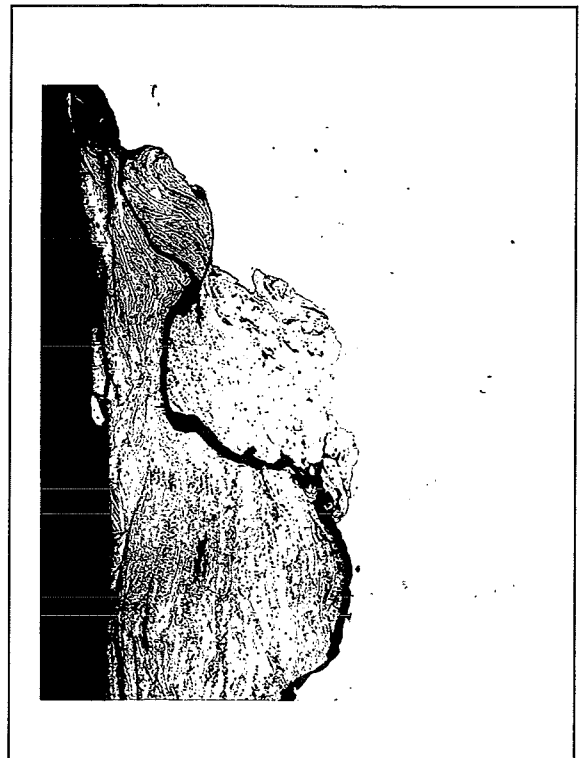


Foto 4.31: dwarsdoorsnede van de vuilkorst in de contactbuis, 500 X vergroot (ongeëtst).

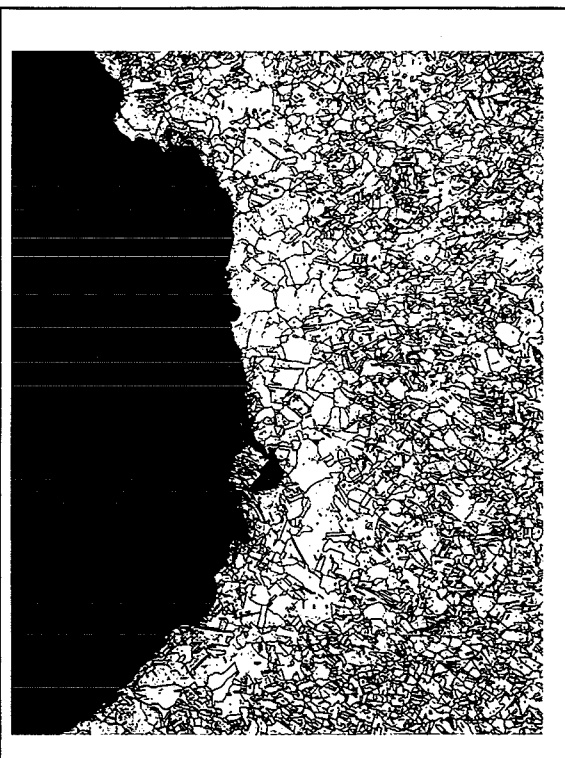


Foto 4.32: vervuiling in de contactbuis, 100 X vergroot (geëtst).

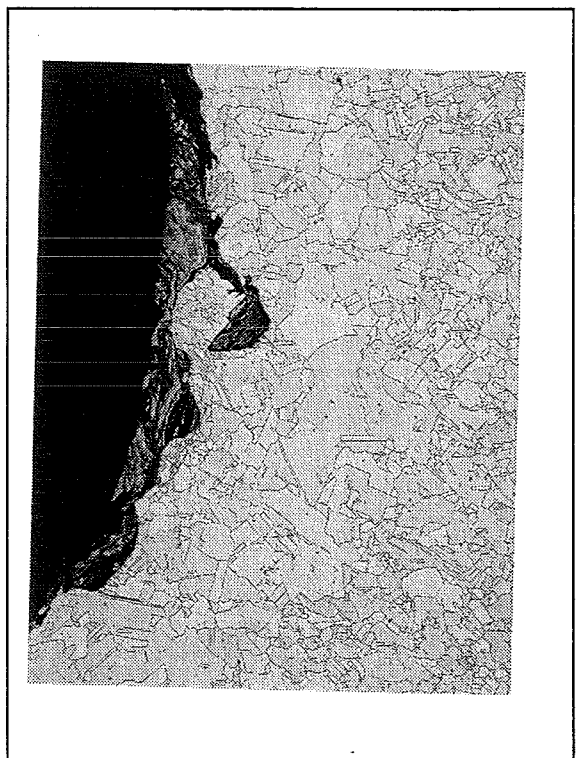


Foto 4.33: dwarsdoorsnede van de vuilkorst, 200 x vergroot (geëtst).

de draad tegen de wand van de contactbuis aanliep een schil van vervuiling opgebouwd. Ook bij de inloop heeft zich vervuiling opgebouwd. Ook hier op de plaats waar de draad tegen de wand aangelopen heeft.



Foto 4.35: beschadiging van het oppervlakte van het kanaal in de contactbuis, 50 x vergroot.

LINCOLN

Duurtest: Tijdens de test met deze draad valt het zeer stabiele gedrag van de draad op. De gemeten krachten nemen tijdens de proef niet toe, de temperatuur is stabiel en er zijn geen andere verstoringen. Alleen de gemeten stroom fluctueert tussen de in tabel 4.34 aangegeven waarden met een frequentie van twee pieken en dalen in 30 seconden. Alle gegevens van deze test staan in tabel 4.34.

Draad: Lincoln															
Poging No.: 1				Proef beëindigd na: 60 min											
	F - Pakket (N)			F - Toorts (N)			Stroom (A)			Spanning (V)			Temperatuur (°C)		
	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max
0 - 15 min	12	14	18	0,5	0,5	0,5	285	310	325	34	35	36	245	265	265
15 - 30 min	11	14	18	0,5	0,5	0,5	285	310	330	36	35	36	245	260	280
30 - 45 min	10	14	17	0,5	0,5	0,6	285	305	330	35	35	36	250	265	285
45 - 60 min	11	14	17	0,5	0,5	0,5	290	310	335	35	35	36	250	265	275

Tabel 4.34: Lincoln, resultaten van de duurttest.

Contact buis: De contactbuis die in deze test gebruikt is, is tijdens het proces heel duidelijk uitgesleten. De slijtage is veel groter dan bij de voorgaande tests met verkoperde draden (tabel 4.20). De tip van deze contactbuis is niet vervuild. Op de plaats waar de draad langs de contactbuis is gelopen, glimt het koper zelfs. Het enige verschil met het oppervlak van een nieuwe contactbuis is de aanwezigheid van een paar vlekjes, die het gevolg lijken te zijn van elektro-erosie. Plaatsen waar door het verbreken van het elektrisch contact met de draad dus materiaal verdwenen is. Dit is te zien in foto 4.35.

RVS 318LSI

Duurtest: De test met de RVS draad is uitgevoerd met een teflon liner. Tijdens de eerste proef is de pakketkracht vanaf de start langzaam maar zeker opgelopen. Aan het begin van de test fluctueert de pakketkracht een klein beetje, aan het einde zijn de fluctuaties zeer heftig. Na 30 minuten is de draad vastgelopen.

De resultaten van de proef zijn vastgelegd in tabel 4.36.

Draad: RVS 318															
Poging No.: 1				Proef beëindigd na: 30 min											
	F - Pakket (N)			F - Toorts (N)			Stroom (A)			Spanning (V)			Temperatuur (°C)		
	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max
0 - 15 min	24	36	79	0,5	1,0	2,0	290	300	320	32	33	33	285	315	400
15 - 30 min	27	46	98*	1,0	1,5	5,0*	265	300	315	32	33	34	350	380	410
30 - 45 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45 - 60 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 4.36: RVS 318, resultaten van de duurtest, 1^e poging.

De tweede test geeft hetzelfde beeld te zien als de eerste test. Na tien minuten waarin zonder storingen gelast kan worden, klimt de pakketkracht omhoog. De eerste grote piek is te vinden na 14 minuten. Na 20 minuten loopt de pakketkracht continu op en de draad zit na 22 minuten vast in de contactbuis.

De resultaten van deze proef staan in tabel 4.37.

Draad: RVS 318															
Poging No.: 2				Proef beëindigd na: 22 min											
	F - Pakket (N)			F - Toorts (N)			Stroom (A)			Spanning (V)			Temperatuur (°C)		
	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max
0 - 15 min	22	35	78	0,6	1,0	4,0	300	310	325	32	33	33	285	350	450
15 - 30 min	25	50	99'	0,4	1,5	1,4'	275	295	310	32	33	34	360	385	480
30 - 45 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45 - 60 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 4.37: RVS 318, resultaten van de duurtest, 2^e poging.

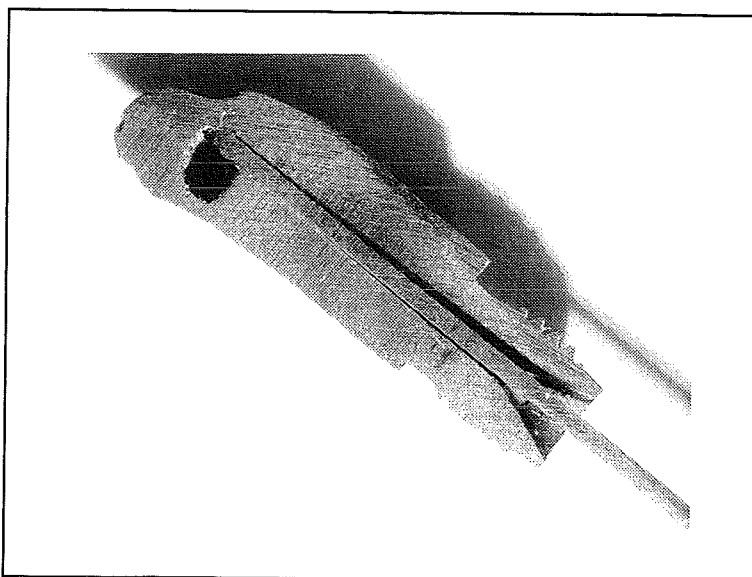


Foto 4.38: contactbuis uit de eerste duurtest met de RVS lasdraad, 3 X vergroot.

**Contact
buis:** De draad is tijdens de eerste test na 30 minuten in de contactbuis vastgelopen. De tip van de contactbuis is met een grote druppel staal dichtgesmolten. Na het open slijpen van de contactbuis bleek dat zich in de contactbuis ongeveer halverwege in de buis een grote prop met kleine staal splinters had opgestapeld. Deze splinters lagen los in de contactbuis. De draad raakte alleen bij de inloop van de contactbuis de bovenkant van het kanaal. Bij het losmaken van de draad van de contactbuis bleek dat de draad alleen vast zat in de staalklont bij de tip en niet ergens ander in het kanaal van de contactbuis.

Wat bij deze contactbuis nog meer opvalt is dat de buis op het gedeelte waar de schroefdraad vastzit duidelijk verkleurd is. De schroefdraad is helemaal paars geworden. Dit duidt op een hoge temperatuur waaraan de contactbuis heeft blootgestaan. Uit tabel 4.36 blijkt dat de temperatuur tijdens de test ook hoog is geweest.

De contactbuis is te zien in foto 4.38.

Tijdens de tweede test is de draad na 22 minuten in de contactbuis vastgelopen. De contactbuis zelf ziet er precies zo uit als na de eerste test. Ook in deze contactbuis blijkt een enorme hoeveelheid metaalsplinters te liggen. Ook in deze contactbuis zit de draad alleen vast aan de klont metaal in de tip van de buis en niet op nog een andere plaats. Tenslotte is ook deze contactbuis duidelijk verkleurd.

KOBELCO

Duurtest: Tijdens deze test loopt de draad niet vast. Het niveau van de krachten wordt tijdens de proef niet hoger, maar de pakketkracht is niet stabiel tijdens de test. Meteen in de eerste 15 minuten klimt de pakketkracht fors omhoog om na ongeveer 30 seconden weer op het oude niveau terug te keren. Dit patroon herhaalt zich in het uur 18 keer. Met de variaties in de pakketkracht, treden tegelijkertijd op met de variaties in de toortskracht. Wanneer de toortskracht groeit, groeit ook de pakketkracht. Met het toenemen van de krachten zakt de temperatuur in de contactbuis. Wanneer het niveau van de krachten weer zakt, stijgt de temperatuur weer.

De resultaten staan vermeld in tabel 4.39.

Draad: Kobelco															
Poging No.: 1				Proef beëindigd na: 60 min											
	F - Pakket (N)			F - Toorts (N)			Stroom (A)			Spanning (V)			Temperatuur (°C)		
	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max
0 - 15 min	22	26	58	0,7	1,0	2,2	280	295	315	34	35	35	265	310	330
15 - 30 min	20	24	52	0,8	1,0	1,5	285	300	315	34	35	35	255	295	315
30 - 45 min	18	24	43	1,0	1,0	1,6	280	290	315	34	35	36	235	275	290
45 - 60 min	20	25	77	1,0	1,0	3,5	280	295	315	34	35	36	235	275	395

Tabel 4.39: Kobelco, resultaten van de duurtest.

Contact buis: De contactbuis uit deze test zit vol met een dunne laag van hele kleine metaalspatten. De meeste spatjes zitten op de buitenkant van de buis, maar ook in het kanaal van de contactbuis zitten kleine metaalspatten. De slijtage van de tip van de contactbuis is niet groot (tabel 4.20). De inloop van de contactbuis is een heel klein beetje uitgesleten.

MELDRA 1,0

Duurtest: Tijdens de test met deze draad kan een vol uur gelast worden zonder dat de draad vastloopt. Vanaf de start is de pakket kracht zeer laag. Na 25 minuten loopt de toortskracht op en daarmee de pakketkracht ook. Aan het einde van de test is de pakketkracht erg hoog geworden. De resultaten zijn verzameld in tabel 4.40.

Draad: Meldra 1,0															
Poging No.: 1				Proef beëindigd na: 60 min											
	F - Pakket (N)			F - Toorts (N)			Stroom (A)			Spanning (V)			Temperatuur (°C)		
	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max
0 - 15 min	11	13	15	0,2	0,2	0,2	290	290	300	36	37	37	320	330	335
15 - 30 min	12	16	32	0,4	0,6	1,6	290	295	305	36	36	37	260	300	330
30 - 45 min	13	20	44	0,4	0,6	1,6	285	300	310	36	36	37	255	285	285
45 - 60 min	13	25	53	0,6	1,0	2,4	275	305	320	36	36	37	245	265	265

Tabel 4.40: Meldra 1,0, resultaten van de duurtest.

Contact buis: Tijdens de test is de draad niet in de contactbuis vastgelopen. Het kost wel moeite om na afloop van de test de draad uit de contactbuis los te trekken. Tussen de draad en de tip van de contactbuis zitten een groot aantal kleine druppeltjes metaal. Dit blijken kleine staal-spatten te zijn. Met de hand zijn de spatten te verwijderen. De inloop en de tip van de contactbuis zijn een klein beetje uitgesleten (tabel 4.20).

MELDRA 1,2

Duurtest: Meteen de eerste test met deze draad verloopt zeer voorspoedig. Vanaf het begin is de pakketkracht laag. Deze kracht loopt in het uur van de test een klein beetje op. Pas na 54 minuten is de pakketkracht voor de eerste keer hoger dan 20 N. Ook de andere grootheden blijven tijdens de test constant en er treden geen storingen op.
De resultaten van deze test staan vermeld in tabel 4.41.

Draad: Meldra 1,2															
Poging No.: 1				Proef beëindigd na: 60 min											
	F - Pakket (N)			F - Toorts (N)			Stroom (A)			Spanning (V)			Temperatuur (°C)		
	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max
0 - 15 min	13	15	17	0,6	0,6	0,6	295	300	315	35	35	35	250	290	300
15 - 30 min	12	15	17	0,6	0,6	0,6	295	305	315	35	35	35	265	280	295
30 - 45 min	15	17	20	0,7	0,7	0,8	295	305	315	35	35	35	255	260	275
45 - 60 min	15	17	20	0,7	0,8	0,8	300	305	320	35	35	35	250	255	275

Tabel 4.41: Meldra 1,2, resultaten van de duurtest.

Contact buis: Ondanks het feit dat de test met deze draad zeer voorspoedig verliep blijkt de contactbuis toch vol te zitten met een grote prop vuil in de inloop. De samenstelling van deze vervuiling is in de EDAX vastgesteld en het bleken staalsplinters te zijn. In dit geval had de aanwezigheid van de metaalsplinter dus blijkbaar geen negatieve invloed op de doorvoerbaarheid van de draad.

MELDRA 1,6

Duurtest: Bij eerste test met deze draad wordt meteen aan het begin van de test een hoge pakketkracht gemeten. Deze pakketkracht loopt tijdens de proef niet nog verder omhoog. Na 55 minuten loopt de draad vast, terwijl de krachten nog op hetzelfde niveau liggen als in het begin van de test. De resultaten van deze test staan vermeld in tabel 4.42.

Draad: Meldra 1,6															
Poging No.: 1				Proef beëindigd na: 55 min											
	F - Pakket (N)			F - Toorts (N)			Stroom (A)			Spanning (V)			Temperatuur (°C)		
	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max
0 - 15 min	41	52	75	2,4	2,6	4,0,	295	315	345	31	32	33	270	275	280
15 - 30 min	40	45	68	2,4	2,6	3,2	295	310	340	31	32	33	260	275	305
30 - 45 min	37	44	70	2,6	2,8	4,0	285	310	325	30	31	32	225	250	265
45 - 60 min	34	41	55*	2,4	2,6	3,2*	285	310	330	29	31	31	230	250	265

Tabel 4.42: Meldra 1,6, resultaten van de duurtest, 1^e poging.

De tweede test begint net zo als de eerste test. Na 19 minuten wordt de toortskracht opeens veel hoger en loopt de draad bijna onmiddellijk daarna vast.
Het resultaat van deze test is te vinden in tabel 4.43.

Draad: Meldra 1,6															
Poging No.: 2				Proef beëindigd na: 19 min											
	F - Pakket (N)			F - Toorts (N)			Stroom (A)			Spanning (V)			Temperatuur (°C)		
	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max
0 - 15 min	32	37	53	2,5	2,6	3,0	280	315	330	32	32	33	245	265	295
15 - 30 min	32	43	63*	2,4	2,6	3,9*	305	320	330	32	32	33	255	260	280
30 - 45 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45 - 60 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 4.43: Meldra 1,6, resultaten van de duurtest, 2^e poging.

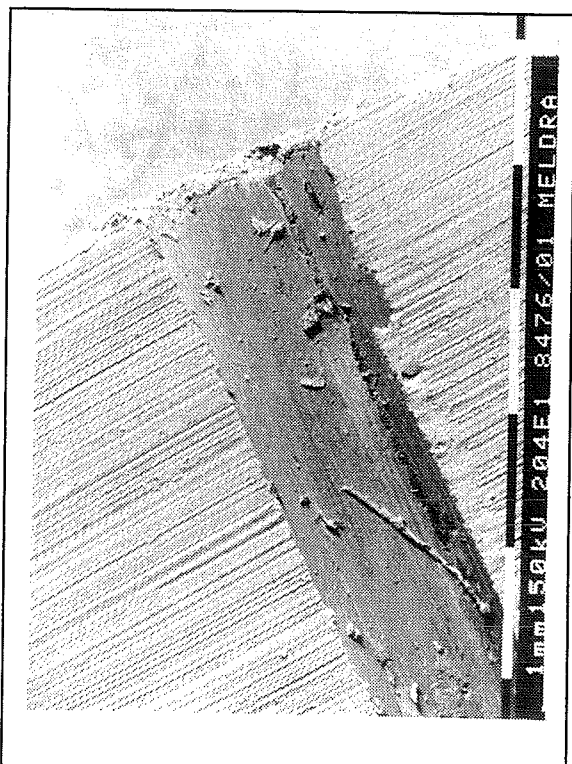


Foto 4.45: vuilkorst in de contactbuis
Meldra 1,6 eerste poging, 20 X
vergroot.

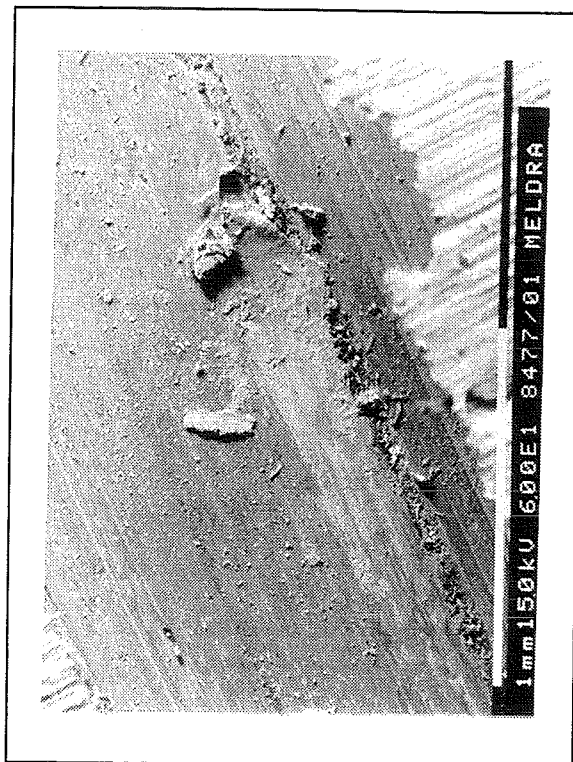


Foto 4.46: vuilkorst in de contactbuis
Meldra 1,6 eerste poging, 60 X
vergroot.

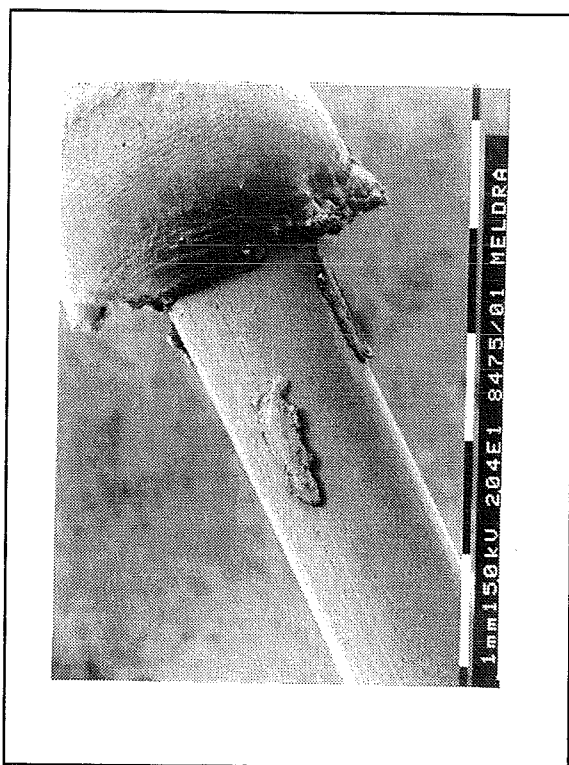


Foto 4.47: vuil deeltje op de lasdraad
Meldra 1,6, 20 X vergroot.

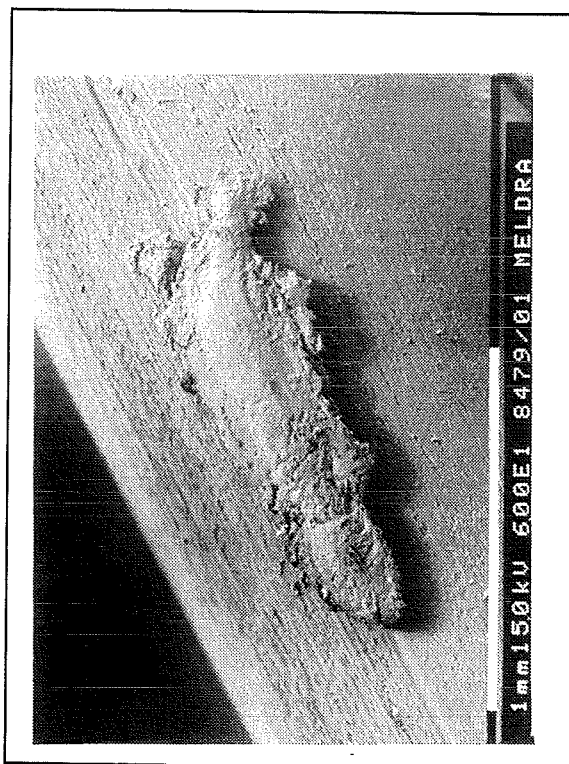


Foto 4.48: vuil deeltje op de lasdraad
Meldra 1,6, 60 x vergroot.

De derde test vertoont het zelfde beeld als de eerste twee. Na een regelmatig begin met van af het begin een hoge pakketkracht verschijnt na 25 minuten de eerste piek in de pakketkracht. De tweede piek volgt na 39 minuten meteen loopt de draad vast. Het niveau van de krachten ligt vlak voor het vastlopen op hetzelfde niveau als in het begin van de test.

De resultaten van deze test staan in tabel 4.44.

Draad: Meldra 1,6															
Poging No.: 3				Proef beëindigd na: 39 min											
	F - Pakket (N)			F - Toorts (N)			Stroom (A)			Spanning (V)			Temperatuur (°C)		
	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max
0 - 15 min	29	33	47	2,6	2,8	3,2	305	315	325	32	32	32	280	275	300
15 - 30 min	30	35	52	2,6	2,6	3,4	300	315	325	31	32	32	260	275	295
30 - 45 min	31	38	54*	2,4	2,8	3,4*	300	315	335	30	32	33	240	250	265
45 - 60 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

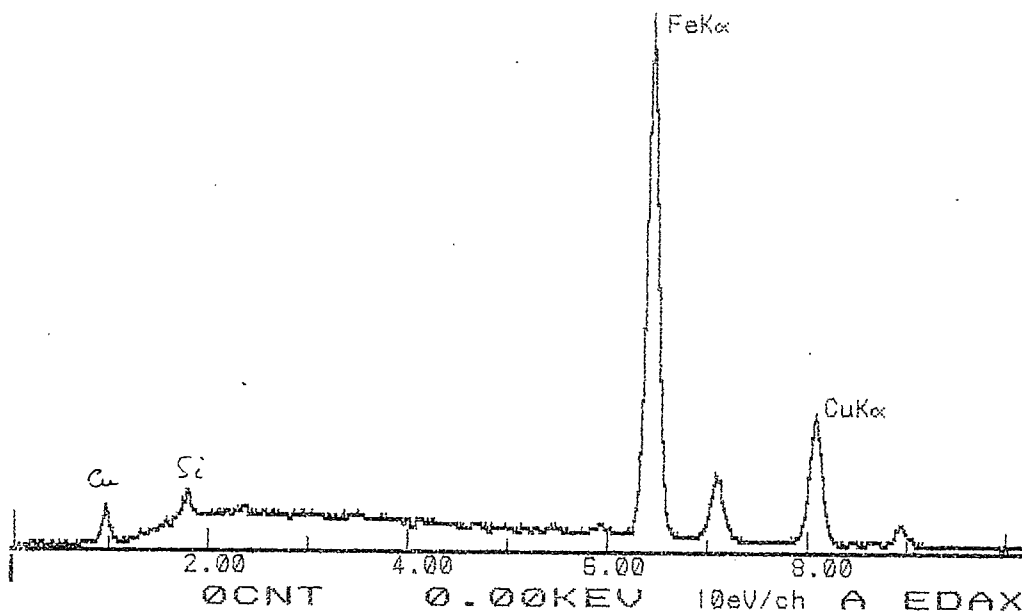
Tabel 4.44: Meldra 1,6, resultaten van de duurttest, 3° poging.

Contact buis: De contactbuis die de draad in de eerste proef deed vastlopen is na afloop uitgebreid onderzocht. De inloop van de contactbuis vertoont weinig sporen van slijtage. Ook is er geen vuil opeenhoping te vinden. Er steekt nog een klein stukje draad uit. Dit stukje is tot een grote staal druppel versmolten. Op de tip van de contactbuis zit aan de buitenkant een zwarte korst van aanslag. Na het openslijpen van de contactbuis bleek dat ook het einde van de buis zelf vervuild is. De korst op de contactbuis is erg bros; er kan met de hand een stukje van worden afgebroken.

Het restant van de lasdraad is uit de tip van de contactbuis losgetrokken. Met de draad bleek dat een stukje van de vervuiling, dat in het kanaal van de contactbuis gezeten had, aan de lasdraad vast te blijven zitten. Hoe dit stukje vervuiling precies vast zit op de draad is niet met het oog te zien. Daarom is over het stukje vuil een dwarsdoorsnede gemaakt van de draad.

De aanslag op en in de contactbuis is te zien in de foto's 4.45 en 4.46. Het restant van de lasdraad met daarop het stukje vuil is te zien op de foto's 4.47 en 4.48.

Na een analyse met de EDAX blijkt dat de vuilkorst in de contactbuis voornamelijk uit staal bestaan en een deel koper. Ook het vuildeeltje op de draad bestaat voornamelijk uit staal met daarin een beetje koper. De



Figuur 4.49: uitdraai van de EDAX na analyse van het vuildeeltje op de lasdraad.

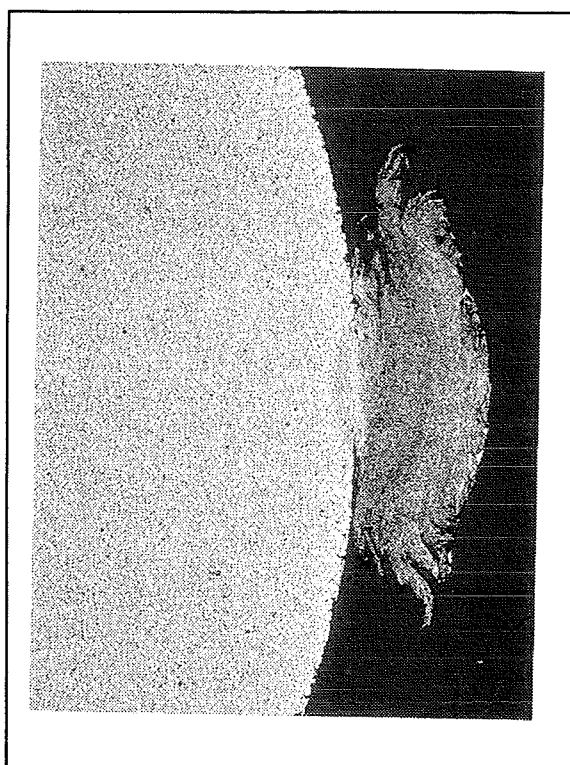


Foto 4.50: dwarsdoorsnede van het vuil deeltje op de lasdraad Meldra 1,6, 200 X vergroot.

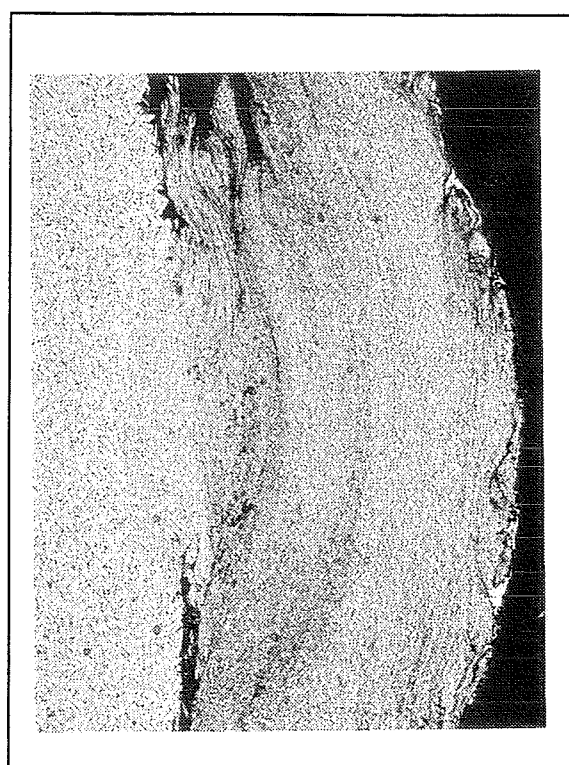


Foto 4.51: dwarsdoorsnede van het vuildeeltje op de lasdraad Meldra 1,6, 500 x vergroot.

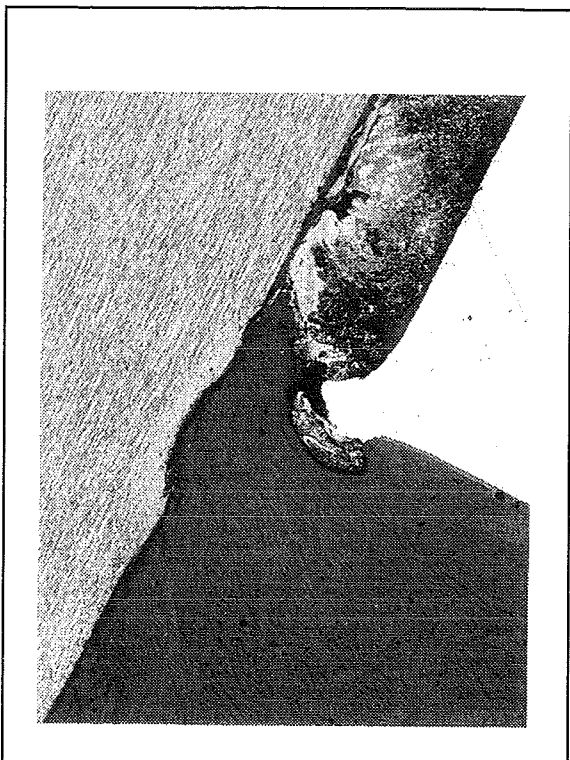


Foto 4.52: vervuiling van de contactbuis, Meldra 1,6 tweede poging, 100 X vergroot.

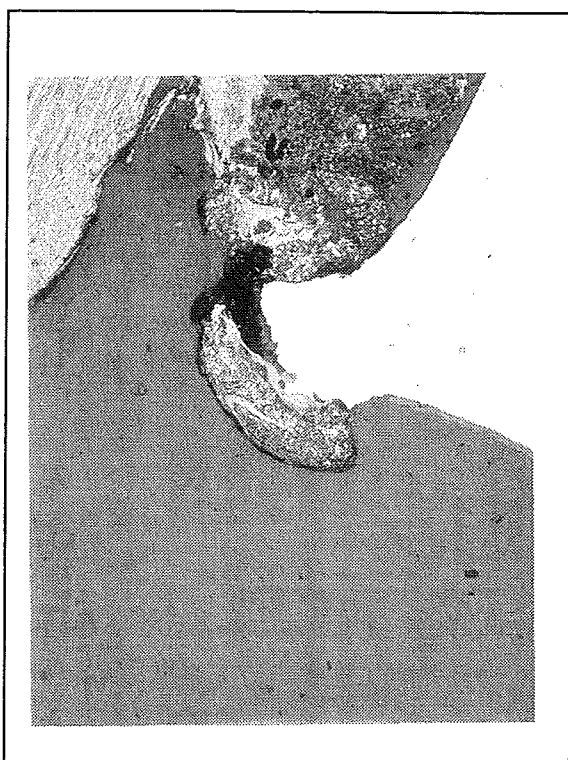


Foto 4.53: vervuiling contactbuis, Meldra 1,6 tweede poging, 200 X vergroot.

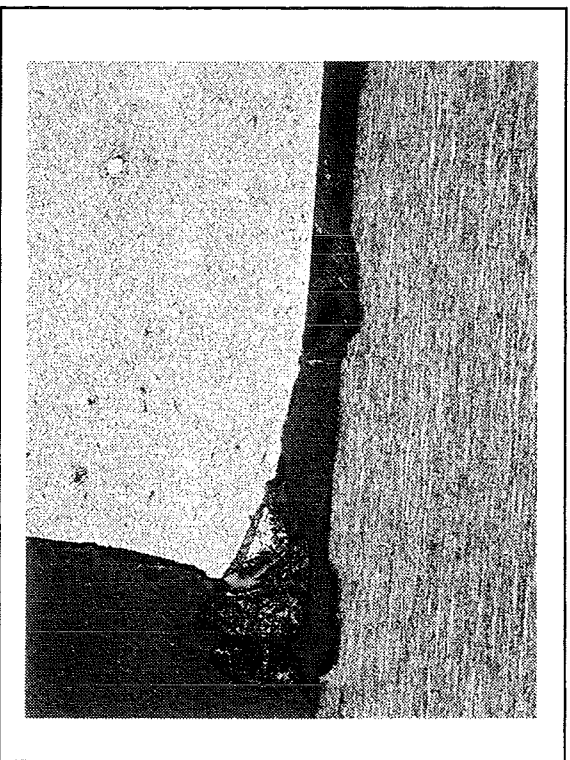


Foto 4.54: tip van de contactbuis, Meldra 1,6 derde poging, 100 X.



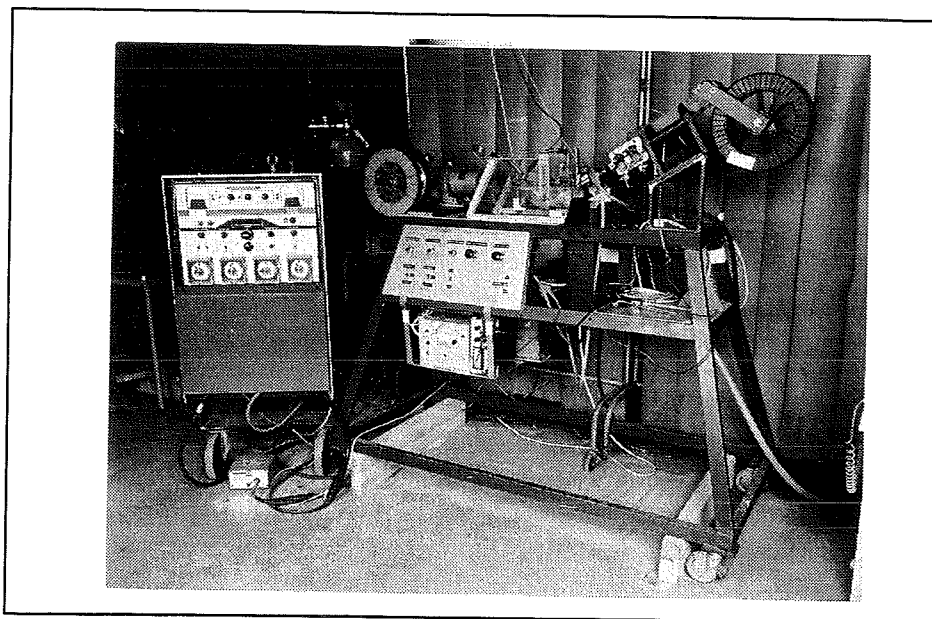
Foto 4.55: tip van de contactbuis, Meldra 1,6 derde poging, 200 X.

uitdraai van de EDAX (figuur 4.49) geeft een grote ijzer piek te zien en een klein koperpiekje.

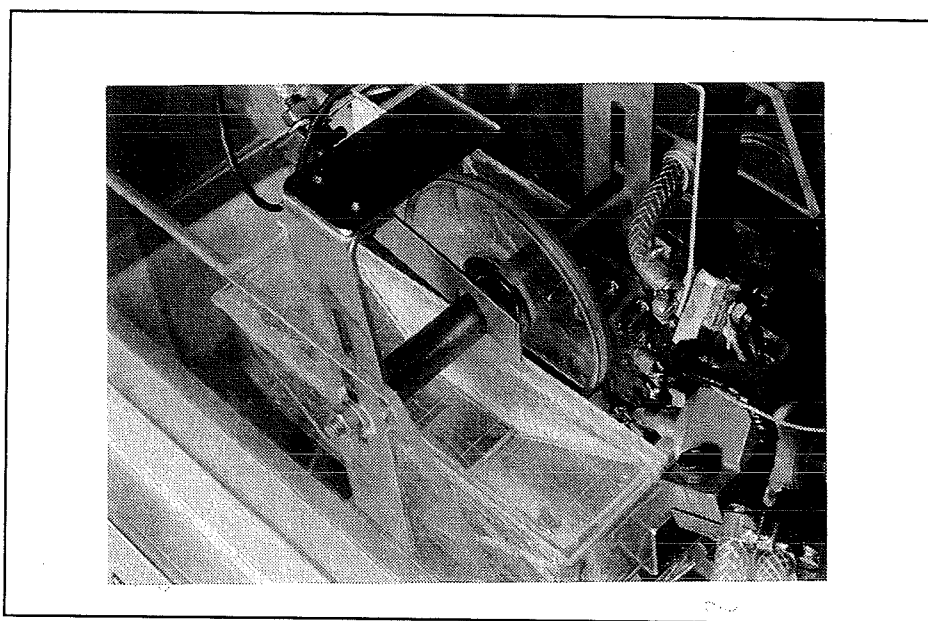
Op de foto's 4.50 en 4.51 is een doorsnede te zien van het stukje vuil op de draad. De lichte vlekken op beide foto's bovenin het vuildeeltje zijn stukjes koper. Beide foto's laten duidelijk de versmeerde structuur van het vuildeeltje. Het deeltje is opgebouwd uit dunne laagjes staal en koper. Op de foto's is ook duidelijk te zien dat het deeltje innig verbonden is met de draad.

Ook na afloop van de tweede test is de contactbuis opengeslepen. De tip van deze contactbuis is te zien in foto 4.52 en 4.53. Links op beide foto's is een stukje van de draad te zien met de herkenbare structuur van het getrokken materiaal. Het witte gedeelte rechts is het koper van de contactbuis. Op deze foto's is te zien dat ook hier in de tip van de contactbuis vuil verzameld is. Ook in deze contactbuis bestaat de vervuiling voornamelijk uit op elkaar gedrukte staalsplinters. Op foto 4.52 is op de draad een beschadiging te zien. Op deze plek is blijkbaar de stroom vanaf de contactbuis naar de draad gestroomd.

Ook bij de derde proef met deze draad is de draad tijdens de duurttest in de contactbuis vastgelopen. Tussen de draad en deze contactbuis zit in de tip duidelijk een grote hoeveelheid metaal. Het lijkt net alsof de draad is doorgevoerd door contactbuis met een te klein kanaal. Na het openslijpen is onderzocht hoe de vervuiling bij deze contactbuis aan de contactbuis vastzit. Op foto 4.54 is de contactbuis te zien links in het plaatje. Op de foto is ook de lasdraad te zien met daarin een aantal beschadigingen die duiden op stroomdoorvoer. De foto 4.55 is een vergroting van het uiterste puntje van de contactbuis. Het witte gedeelte links boven in het plaatje is het koper van de contactbuis te zien. Tussen het koper en het staal van de vervuiling is een hechte verbinding. Op het aangeëtste plaatje 4.55 is een gerekristalliseerde zone zichtbaar tussen het koper van de contactbuis en het stalen deeltje. In dit geval is er in de vervuiling niet veel koper terug te vinden.



Figuur 4.57: lassimulator.



Figuur 4.58: lassimulator, detail van het kwikreceiving.

4.4 Lassimulaties

Na het laswerk is een serie tests gedaan om het mechanisme van de stroomoverdracht van contactbuis naar de draden beter te kunnen begrijpen. De bestudering van gebruikte contactbuizen kan informatie opleveren over de stroomoverdracht die heeft plaatsgevonden. Een voorbeeld hiervan is gegeven in de vorige paragraaf (foto 4.35). Een nadeel van deze methode is echter dat alle informatie laag over laag in de contactbuis opgestapeld ligt. Bovendien slijt de contactbuis en veel informatie gaat zo weer verloren. Veel beter zou het zijn om de draad zelf na afloop van de test te kunnen onderzoeken. Die draad smelt tijdens het lassen echter weg.

Om dit probleem te omzeilen is bij TNO een installatie gebouwd waarin de draden wel stroom toegevoerd krijgen, maar zelf niet verloren gaan. Met de draden wordt dus niet gelast, maar het lassen wordt gesimuleerd. Bestudering van de draden die in de machine zijn doorgevoerd levert de beoogde informatie. De werking van de simulator staat hieronder vermeld.

In de **lassimulator** is een standaard aanvoer systeem ingebouwd, om de draad te kunnen doorvoeren. Een standaard stroombron levert de stroom en net als in iedere andere MIG/MAG-installatie zorgt een contactbuis voor de stroomoverdracht naar de lasdraad. Omdat in de machine alleen wordt gekeken naar de stroomoverdracht is het slangenpakket tussen de draadaanvoer en de contactbuis weggelaten. Hierdoor kunnen de afmetingen van de installatie beperkt blijven. De installatie is te zien op foto 4.57.

De contactbuis bevindt zich dus direct na het draadaanvoersysteem. De draad loopt vanuit de contactbuis in een kwikbad. De afstand tussen het uiteinde van de contactbuis en het oppervlak van het kwikbad is precies gelijk aan de uitsteeklengte die ingesteld is tijdens de eerder uitgevoerde duurtests.

De stroom wordt door het kwik direct van de draad afgenomen. In het kwikbad zelf hangt een roestvast-stalen koelspiraal. Deze spiraal zorgt voor de aarding en voor de koeling van het bad. In foto 4.58 is de constructie van het kwikbad te zien.

De draad smelt tijdens de stroomoverdracht niet af, maar kan aan het einde van het kwikreceptoir op een rol worden verzameld.

De draad, die dezelfde stroomoverdracht heeft moeten doorstaan als tijdens een reguliere lastest, kan vervolgens op eventueel aanwezige beschadigingen worden onderzocht.

De hierboven beschreven methode om de manier waarop stroomoverdracht plaatsvindt te kunnen beschrijven is niet nieuw. In 1966 heeft Rudy hetzelfde experiment uitgevoerd met aluminium draden [6]. Ook hij gebruikte een kwikbad om de stroom van de draden af te nemen. Rudy onderzocht de invloed van de contactkracht en de gebruiksduur van contactbuizen op de stroomoverdracht naar de draad. Hij stelde vast dat de stroomoverdracht slechter wordt naarmate de contactbuizen langer gebruikt worden. Ook stelde hij vast dat wanneer de stroomoverdracht naar de draad moeizaam verloopt

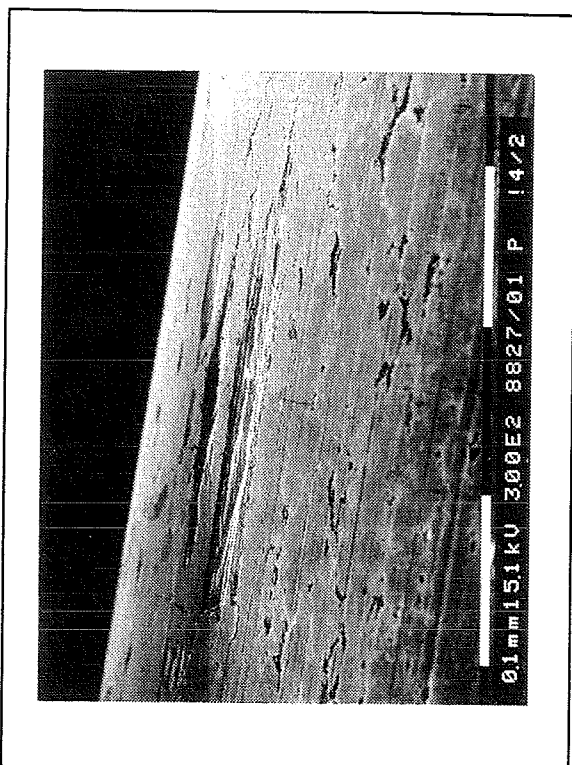


Foto 4.59: beschadiging kopercoating, PZ 6000, 300 X vergroot.

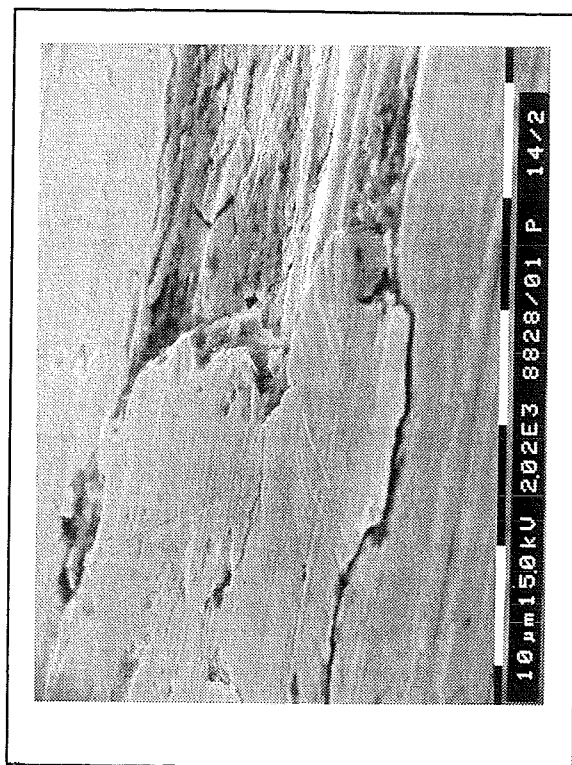


Foto 4.60: kopercoating ontbreekt op PZ 6000, 2000 X vergroot.

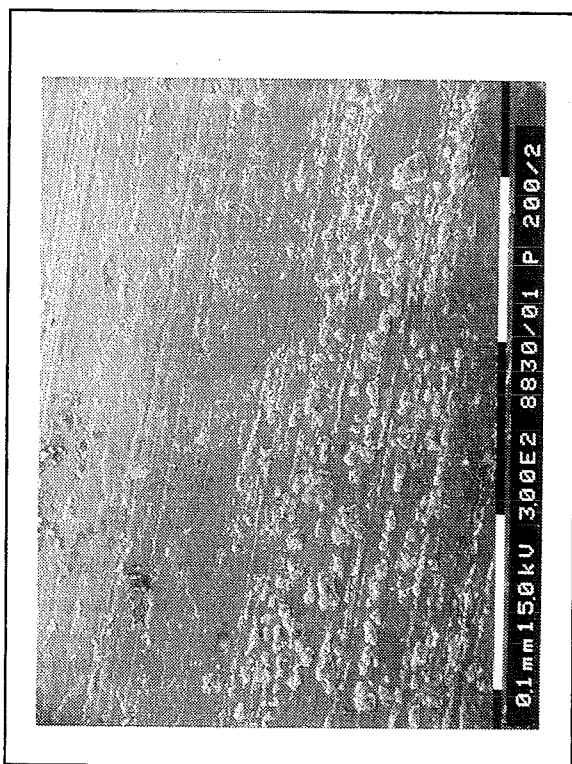


Foto 4.61: kwik op lasdraad PZ 6000, 300 X vergroot.

smeltplekken op de draad gevonden kunnen worden. De aanwezigheid van deze smeltplekken vormt volgens Rudy het bewijs dat er bij een slechte stroomoverdracht in de contactbuis kleine boogjes ontstaan tussen de contactbuis en de draad. Deze boogjes zorgen met hun plaatselijke verhitting van de draad voor de smeltverschijnselen.

Hetzelfde experiment, maar dan met een tweede contactbuis in plaats van een kwikbad, is uitgevoerd door Yamada [13]. Yamada heeft het experiment ontworpen op basis van de resultaten van Rudy. Ook hij toont in zijn artikel foto's van lasdraden die door de stroomoverdracht in de contactbuis beschadigd zijn en waarop smeltplekken zitten.

Vergelijkbaar onderzoek is ook uitgevoerd door Zwickert [5] en Degtyarev [17]. In beide onderzoeken werd niet met een standaard contactbuis gewerkt, maar met een opengewerkte constructie waarin de stroom werd overgedragen. In beide onderzoeken werd geconstateerd dat de stroomoverdracht naar de draad gepaard gaat met de ontwikkeling van een vonkenregen. De vonken ontstaan volgens de onderzoekers door het verbreken van vloeibare, stroomgeleidende contacten tussen de draad en de contactbuis.

RESULTATEN LASSIMULATIES

De resultaten van de lassimulatie in dit onderzoek worden hieronder per draad vermeldt.

PZ 6000

Tijdens de lassimulatie met deze draad is de stroomsterkte vanaf 100 A opgevoerd. De maximaal in te stellen stroomsterkte was 225 A. Vanaf die stroomsterkte vormde zich op de draad een dunne kwiklaag. De kwikfilm maakt analyse van de draad na afloop van de test onmogelijk. En omdat het kwik alle interessante plekken afdekt en omdat door het opnemen van het kwik de kans op blootstelling aan kwikdampen tijdens de analyse groter wordt.

Op de foto's 4.59 tot en met 4.61 is het resultaat te zien van deze test. Op foto 4.59 is een beschadiging te zien van de kopercoating van de draad. De beschadiging is opgetreden bij een stroomsterkte van 150 A. Op foto 4.60 is dezelfde beschadiging vergroot weergegeven. Deze foto laat zien dat de koperhuid niet alleen is vervormd, maar dat het koper op deze plaats ook daadwerkelijk verdwenen is.

Op foto 4.61 is een stuk lasdraad te zien met daarop kwik. Door dit stuk lasdraad heeft een stroom van 230 A gelopen.

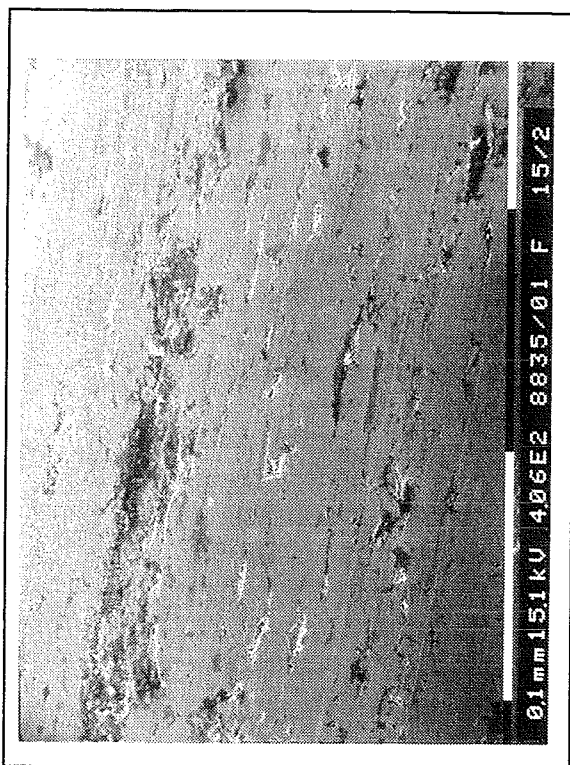


Foto 4.62: beschadiging koperhuid Fluxofil, 400 X vergroot.

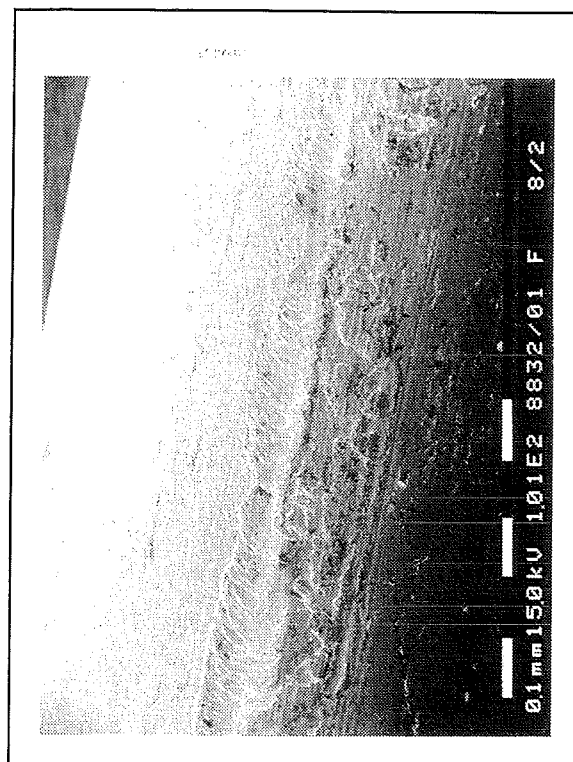


Foto 4.63: smeltspoor op Fluxofil-draad, 100 X vergroot.

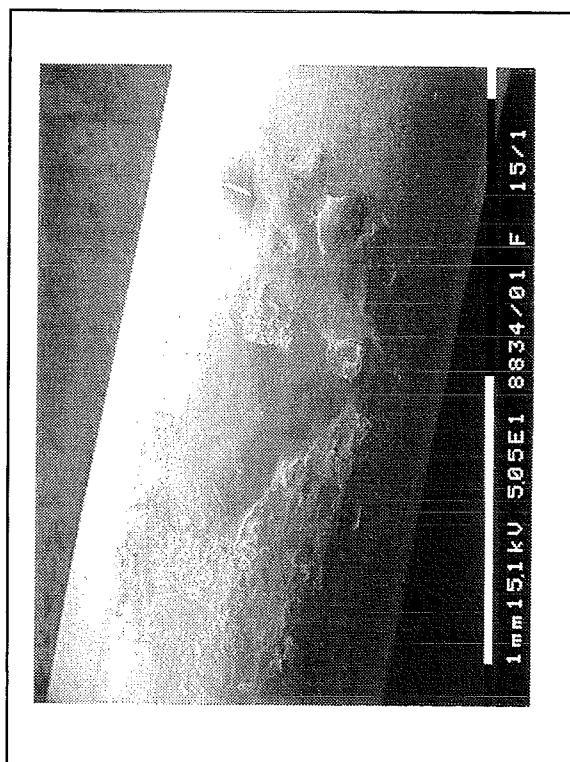


Foto 4.64: onderbreking van het smeltspoor Fluxofil, 50 X vergroot.

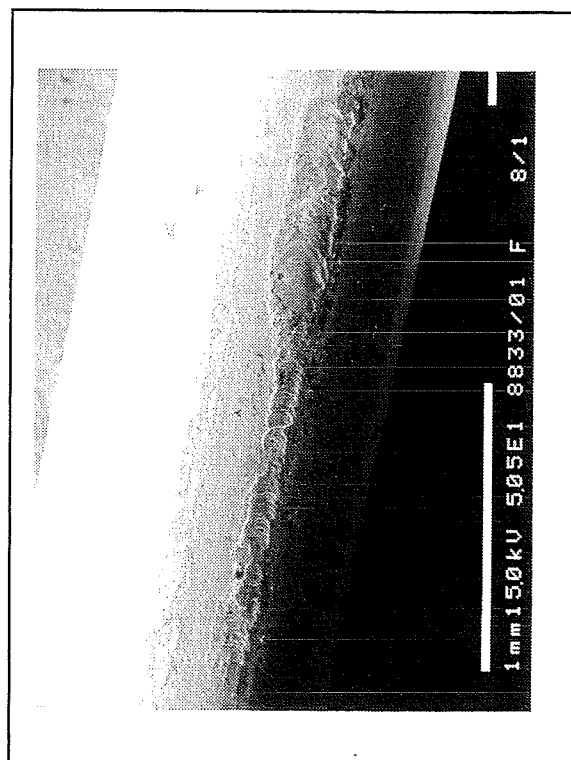


Foto 4.65: verandering van vorm smeltspoor op Fluxofil, 50 X vergroot.

FLUXOFIL M10

Deze draad is met dezelfde beperkingen getest als de eerste draad. Ook bij deze draad kon maximaal met 225 A doorgevoerd worden, omdat anders het gevaar bestond dat de draad met kwik bedekt werd.

Op de draad zijn na afloop beschadigingen van de koperhuid terug te vinden, zoals op foto 4.62. Op deze draad is echter nog meer te zien. Op het stuk draad dat door de machine is gevoerd bij een stroomsterkte van 200 A zit een lang recht smeltspoor. Dit spoor is te zien op foto 4.63. Het spoor wordt op een aantal plaatsen onderbroken door een grote smeltplek zoals te zien is op foto 4.64. Het feit dat er een smeltspoor op de draad zit zou moeten betekenen dat smeltverschijnselen niet alleen maar ontstaan bij kortstondige, plaatselijke, hoge stroomstoot (boogje), maar dat smeltverschijnselen bij een bepaalde stroomsterkte continu optreden.

Op de draad is ook een plek gevonden waar het smeltspoor van plaats en vorm verandert. Dit is te zien op foto 4.65. Het spoor verandert van een breed smeltspoor even in een dubbel, smal smeltspoor om vervolgens weer enkel en breed te worden.

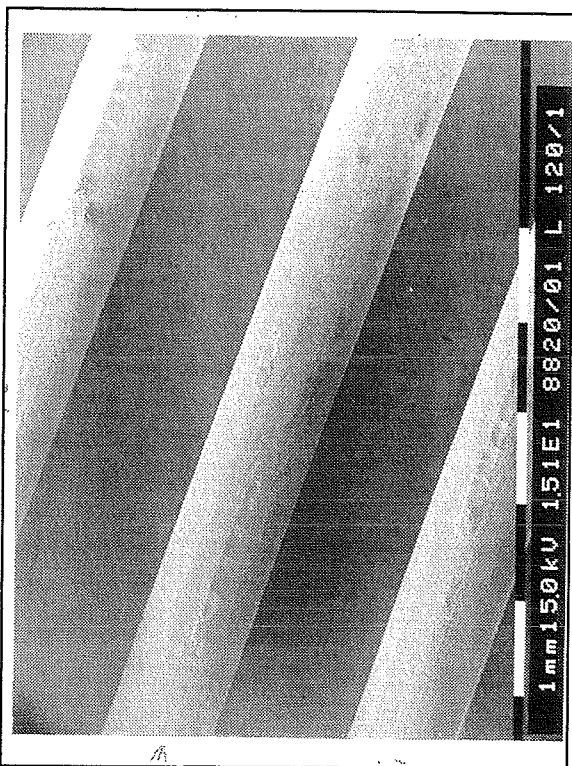


Foto 4.66: smelt plekjes op de Lincoln-draad, 15 X vergroot.

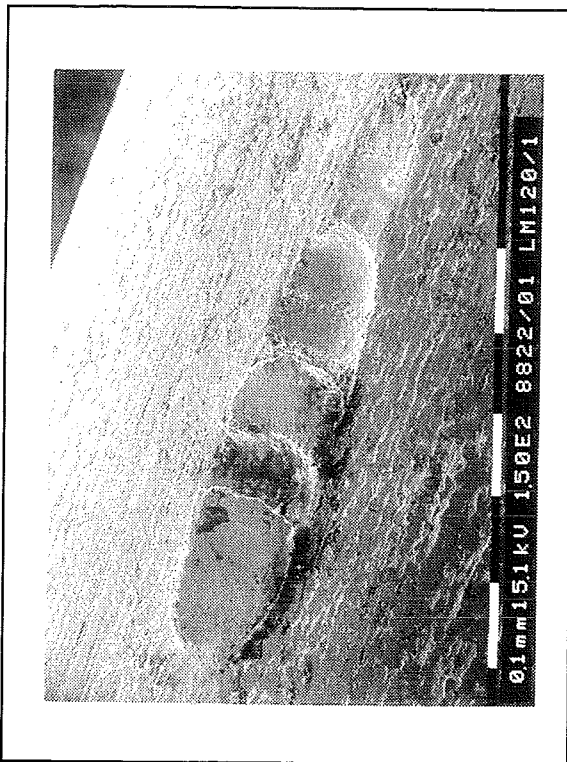


Foto 4.67: smeltplek op de Lincoln-draad, 150 X vergroot.

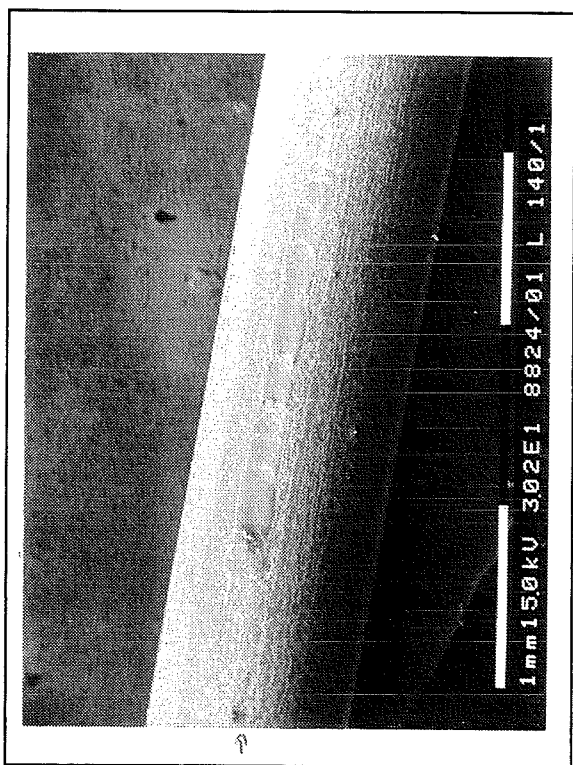


Foto 4.68: einde van een smeltspoor op de Lincoln-draad, 30 X vergroot.

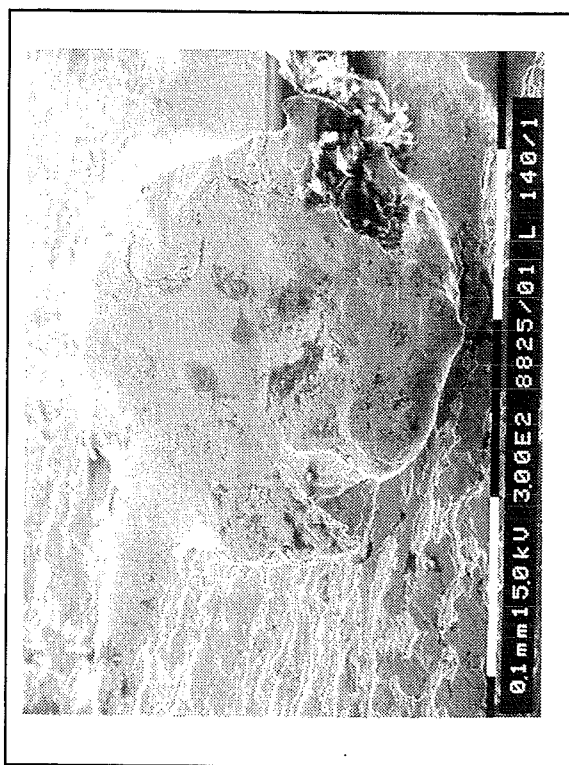


Foto 4.69: vergroting van de koperklodder op de Lincoln-draad, 30 X.

LINCOLN

De test met deze draad geeft weer een heel ander beeld te zien. Gezien de beschadigingen op de draad verloopt de stroomoverdracht naar de draad blijkbaar heel onregelmatig. Dit is te zien op foto 4.66. Op de stukjes lasdraad zitten smeltplekjes. Deze smeltplekjes vormen samen niet een lang smeltspoor; tussen de smeltplekken in is de draad onbeschadigd. De foto's lijken te duiden op een soort stick-slip proces. Het lijkt erop alsof de draad steeds even blijft steken en na een korte onderbreking weer doorschiet.

Op foto 4.67 is een vergroting te zien van het smeltplekje midden op de middelste draad van de eerste foto. Het materiaal dat op de draad ligt is staal en is dus afkomstig van de draad zelf.

Op foto 4.68 is het smeltspoor op de onderste draad van de eerste foto vergroot weergegeven. Het linker gedeelte van het stukje lasdraad heeft de contactbuis als laatste verlaten. Dat betekent dat de grote klodder die op de draad is te zien het einde is van het smeltspoor. Deze klodder is nog een keer te zien op foto 4.69. De samenstelling van het materiaal is onderzocht in de EDAX. De EDAX geeft naast een sterke ijzer piek een grote koperpiek te zien. Het bijzondere van deze plek is dus de klodder niet alleen uit materiaal bestaat dat afkomstig is van de draad, maar dat er ook koper van de contactbuis in terug te vinden is.

Overdracht van koper van de contactbuis naar de draad wordt ook gemeld door Chubukov [24]. Het optreden van het stick-slip proces wordt ook gemeld door Pache [21].

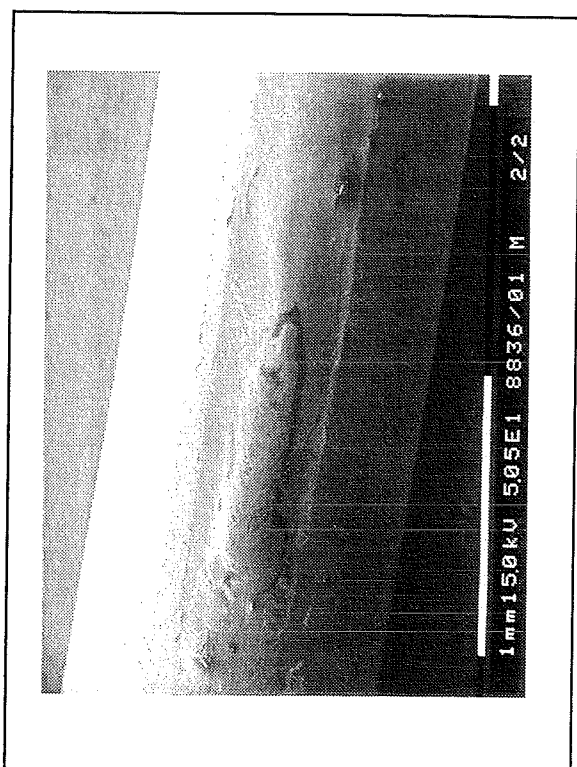


Foto 4.70: begin van een smeltspoor op de Meldra 1,2, 100 X vergroot.

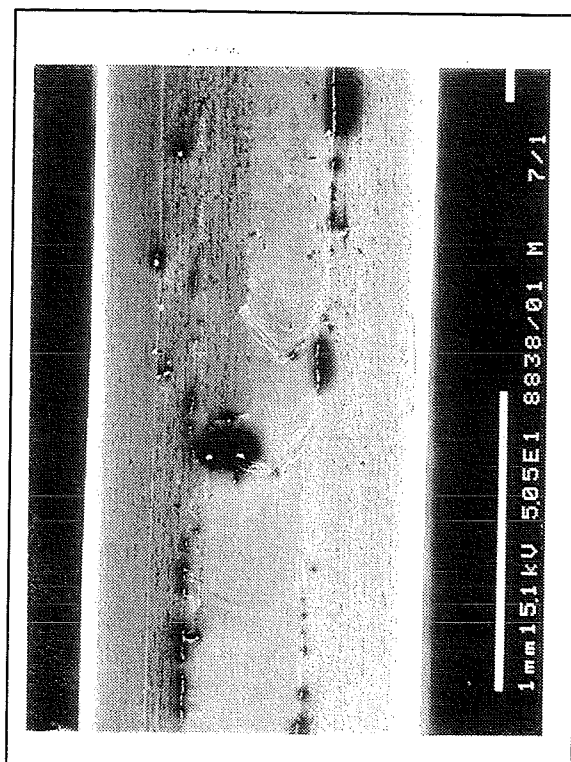


Foto 4.71: breed smeltspoor wordt smal smeltspoor, Meldra 1,2, 50 X vergroot.

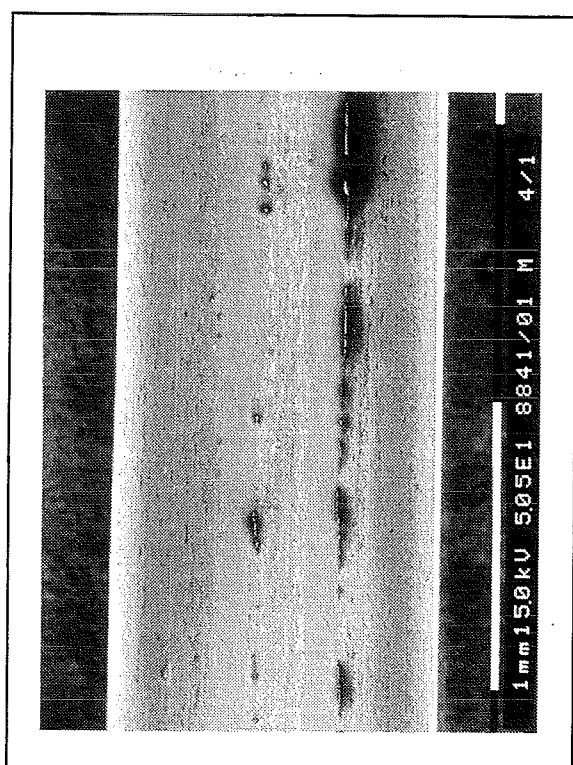


Foto 4.72: dubbel smeltspoor op de Meldra 1,2, 50 X vergroot.

MELDRA 1,2

Weer een totaal ander beeld geven de resultaten van de test met deze draad. Na een test met een stroomsterkte van 200 A ligt op de draad over de gehele lengte een smeltspoor. Het begin van zo'n spoor is te zien op foto 4.70. Het smeltspoor verandert op een aantal plaatsen van vorm en plaats. Op foto 4.71 is te zien dat het brede smeltspoor verandert in een veel smaller spoor. De witte stippen op de foto, met daaromheen een zwarte vlek, worden veroorzaakt door oxyden. Aan de rand van dit smeltspoor liggen dus grote klonten oxyde. Foto 4.72 toont een heel verrassend beeld. Op de draad ligt over een lang stuk een dubbel lasspoor. De stroomoverdracht heeft dus over een lange periode op twee plaatsen tegelijkertijd gelopen.

Hauck heeft bij het testen van massieve staaldraden vergelijkbare smeltsporen op lasdraden aangetroffen [2]. In zijn artikel spreekt Hauck over 'tijdelijke verstoringen' van het elektrisch contact als oorzaak van het smeltspoor. Bij de hier onderzochte Meldra-1,2 draad lijkt het allerm minst 'tijdelijke verstoringen' betreffen aangezien het smeltspoor over de volle lengte van de draad terug te vinden is.

ANDERE DRADEN

De test met alle nog niet genoemde draden zijn niet succesvol geweest. Zonder uitzondering was in de test de ohmse verhitting van het draadstuk tussen de contactbuis en het kwikbad te hoog om het experiment uit te kunnen voeren. Bij het inschakelen op de laagst mogelijke stroomsterkte van het apparaat, 100 A, brandde de draad weg.

4.5 Bruikbaarheid van de resultaten belicht.

In dit hoofdstuk is een groot aantal proefresultaten gepresenteerd. Voordat deze resultaten verder verwerkt worden in berekeningen wordt in deze paragraaf eerst de vraag gesteld of alle uitkomsten wel evenveel waarde hebben.

CAST/HELIX

Het bepalen van de cast en de helix is gebeurd op dezelfde lasmachine waarmee ook de duurtests zijn uitgevoerd. Als enige vereenvoudiging is het bepalen van de waarden gebeurd tijdens het stroomloos doorvoeren van de kracht. Wat de invloed is op de grootte van de cast en de helix op het moment dat het doorvoeren meer kracht kost, zoals tijdens het lassen het geval is, is dus niet bekend.

EIGENSCHAPPEN VAN DE LASDRADEN

Bij het bepalen van de eigenschappen van de draden is van een aantal vereenvoudigingen gebruik gemaakt.

In de eerste plaats is bij het bepalen van de hardheid van de met koper gecoate draden gewoon de hardheid bepaald van het materiaal waarop de koperlaag is bevestigd. De koperlaag heeft een dikte van ongeveer 0,5 μm . Bij de berekeningen wordt met dit dunne, zachte laagje dus geen rekening gehouden.

In de tweede plaats is bij de mechanische beproeving van alle draden gerekend alsof het massieve draden betrof. Dat betekent dat bij de gevulde draden geen rekening is gehouden met het feit dat de kern van deze draden gevuld is met poeder. Deze vereenvoudiging moet het rekenwerk eenvoudig houden. In werkelijkheid is het namelijk nog ingewikkelder: een van de gevulde draden is tijdens het productieproces ontstaan uit bandstaal dat met behulp van walsrolletjes is dichtgevouwen. Rekening houden met de naad in de wand van de draad, zeker wanneer het elastisch-plastisch rekenwerk betreft, maakt rekenen zo goed als onmogelijk.

Wanneer de uitkomst van de berekeningen er aanleiding toegeeft, zal de invloed van de deze vereenvoudigingen worden aangegeven.

DUURTESTS

Het grote pluspunt van de uitgevoerde las-experimenten is, dat de werkelijkheid zonder enige vereenvoudiging is nagebootst. Aan de standaard MIG/MAG-installatie zelf is immers niets veranderd. De uitkomsten van deze experimenten zijn dus zonder enig voorbehoud verder te gebruiken.

LASSIMULATIES

Het interpreteren van de resultaten van de lassimulaties moet met de nodige voorzichtigheid gebeuren.

Bij het meten van de cast en de helix van de lasdraden tijdens het transport van de draden door de machine, is al gebleken dat deze beide veranderen. In de lassimulator is een gedeelte van de standaard MIG/MAG-installatie weggelaten. Dat betekent dus dat de draad in de lassimulator met een andere cast en helix in de contactbuis aankomt dan in een gewone MIG/MAG-lasmachine. De

contactkracht van de draad is dus anders dan bij gewoon lassen. Aangezien de contactkracht juist van grote invloed is op de stroomoverdracht en de stroomoverdracht in de lassimulator de stroomoverdracht de meeste aandacht krijgt, komt daarmee de waarde van het experiment in gevaar.

De uitkomsten van de experimenten met de lassimulator kunnen dus niet zomaar naast de uitkomsten van de experimenten van de lasmachine gelegd worden om de draden met elkaar te kunnen vergelijken. Wat wel kan aan de hand van de resultaten, is het vaststellen van een aantal fenomenen in de contactbuis. De beschadigingen op de lasdraden geven meer inzicht in wat er precies kan gebeuren met het elektrisch contact in de contactbuis. Het is dus niet gezegd dat dezelfde contact-verschijnselen op de draden terug te vinden zijn op de draden tijdens echt lassen.

HOOFDSTUK 5: Berekeningen

In dit hoofdstuk wordt met de in het voorgaande hoofdstuk gepresenteerde resultaten het rekenmodel uit hoofdstuk 3 verder verwerkt.

Allereerst wordt in **paragraaf 5.1** de grootte van de contactkracht berekend. Met behulp van deze contactkracht wordt in **paragraaf 5.2** de grootte van het contactvlak bepaald.

In **paragraaf 5.3** wordt met de grootte van het contactvlak de grootte van de contactweerstand berekend.

In **paragraaf 5.4** wordt met behulp van de berekende contactweerstand de temperatuur die ontstaat in het contactvlak berekend.

5.1 Berekening van de contactkracht

Bij het opstellen van het rekenmodel bleek de contactkracht uit twee termen te bestaan. Door de verbuiging van de lasdraad in de contactbuis is er een contactkracht tussen de draad en de wand van de contactbuis. Deze kracht is afhankelijk van een combinatie van eigenschappen van de draad zelf (voorbuiging, elasticiteitsmodulus en dergelijke). Om de contactkracht te berekenen moet deze kracht vervolgens verminderd worden met de afstotende kracht die in het contact ontstaat als gevolg van stroomdoorvoer.

VERBUIGING VAN LASDRADEN

Bij het opstellen van het rekenmodel voor de contactkracht is aangenomen dat het rekenwerk beperkt kan worden tot elastische gedrag. Of de vergelijkingen die opgesteld zijn om het buigen van de draden te beschrijven, ook daadwerkelijk kloppen kan, zoals in paragraaf 3.2 al werd beweerd, eenvoudig getest worden met behulp van vergelijking (28) uit die paragraaf. De vergelijking staat hier nogmaals gegeven:

$$\kappa = \frac{\sigma_{0,2}}{E} 2 \frac{1}{d} \quad (47)$$

Wanneer het gedrag van de lasdraden te beschrijven is met bovenstaande vergelijking, is het mogelijk om te voorspellen bij welke voorbuiging de lasdraden plastisch gaan verbuigen. In het vorige hoofdstuk zijn alle gegevens te vinden om de vergelijking te kunnen gebruiken. Bij het invullen van de vergelijking moet wel met één ding rekening gehouden worden: vergelijking (47) is opgesteld voor het verbuigen van **rechte** staven. In het geval van de lasdraad wordt een al kromme lasdraad nog krommer gebogen. In vergelijking (47) moet daarom de gereduceerde κ worden ingevuld waarbij plastische deformatie optreedt.

Daarvoor geldt:

$$\kappa = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{\text{beginplast.}}}$$

(48)

Het resultaat van het invullen van de vergelijking is te vinden in tabel 5.1.

Draad	d (mm)	R _{0,2} (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	R ₀ (mm)	R _{begin plast.} (mm)	R _{begin plast.} (berekend) (mm)	R _{begin plast.} (gemeten, gereduceerd) (mm)
PZ 6000	1,17	1109	195	344,5	75	103	96
Fluxofil	1,21	463	139	314,5	120	182	194
Lincoln	1,18	1109	200	541	90	106	108
RVS 318	1,17	896	194	249	90	127	141
Kobelco	1,18	555	144	219	95	154	168
Meldra 1,0	0,99	1104	195	505	80	87	95
Meldra 1,2	1,19	978	187	433	90	114	114
Meldra 1,6	1,58	880	186	214	100	167	188

Tabel 5.1: rekenen aan de plastische deformatie van de lasdraden.

Uit de tabel blijkt dat: **van alle draden massief en metaal-gevuld, is het elastische buiggedrag nauwkeurig te voorspellen.**

Hoewel de vergelijking is opgesteld voor draden met een massieve doorsnede, voldoen blijkbaar ook de gevulde draden aan de vergelijking. Dat is te verklaren door in ogenschouw te nemen dat bij buiging van een staaf de meeste kracht wordt opgenomen door de buitenste wand van de staaf. Een rekenvoorbeeld over de invloed van de vorm van de doorsnede is te vinden in bijlage 5.

KRACHT DOOR VERBUIGING VAN DE LASDRAAD

Voor het berekenen van de contactkracht is in paragraaf 3.2 de volgende vergelijking afgeleid.

$$F_c = \frac{EI}{aR_0} \quad \text{met } a = \sqrt{6sR_0} \tag{49}$$

Alle waarden die bekend moeten zijn om de vergelijking te kunnen invullen, zijn te vinden in hoofdstuk 4, behalve de waarden voor s. Voor het lassen van staal-draden geldt in het algemeen s = 0,2 mm. De waarde s is hier niet steeds gelijk aan 0,2 mm, omdat er kleine afwijkingen zitten in de diameters van de draden. De waarden van s en het resultaat van het invullen van vergelijking (49) staan vermeld in tabel 5.2.

Draad	E (N/mm ²)	d (mm)	I (mm ⁴)	R ₀ (mm)	M = EI/R ₀ (Nmm)	a = √6sR ₀ (mm)	F _c = EI/R ₀ a (N)
PZ 6000	195	1,17	0,092	402	44,55	23,6	1,89
Fluxofil	139	1,21	0,105	271	53,86	17,6	3,06
Lincoln	200	1,18	0,095	520	36,54	26,2	1,39
RVS 318	194	1,17	0,092	311	57,39	20,7	2,77
Kobelco	144	1,18	0,095	246	55,61	18,0	3,09
Meldra 1,0	195	0,99	0,047	595	15,40	24,6	0,63
Meldra 1,2	187	1,19	0,098	383	47,85	22,0	2,18
Meldra 1,6	186	1,58	0,306	251	226,76	17,4	13,0

Tabel 5.2: contactkracht tussen de lasdraad en de contactbuis berekend met behulp van hoofdstuk 3.

AFSTOTENDE KRACHT ALS GEVOLG VAN STROOMDOORVOER

Zoals in hoofdstuk 3 werd betoogd is het verstandig om rekening te houden met een afstotende kracht, als gevolg van de stroomdoorvoer. Deze kracht is per draad natuurlijk verschillend. Om een idee te krijgen van de grootte van de kracht in het systeem draad-contactbuis wordt de berekening voor één van de draden uitgevoerd.

Volgens vergelijking (8) uit hoofdstuk 3 is de afstotende kracht afhankelijk van de stroomsterkte en een verhouding tussen het schijnbare en het werkelijk contactoppervlak. De vergelijking wordt nogmaals gegeven:

$$F_r = \frac{\mu I^2}{8\pi} \ln \frac{HA_s}{F}$$

(50)

Vergelijking (50) wordt nu ingevuld voor de lincoln-draad. Stel dat de draad met een kracht van 2 N (aandrukkraft is in werkelijkheid groter) tegen de contactbuis duwt en stel dat het schijnbaar contactoppervlak een grootte heeft van 1 mm² (in werkelijkheid is het kleiner), dan is de uitkomst voor F_r altijd groter dan de werkelijke afstotende kracht die ontstaat in het contact. De vergelijking wordt ingevuld voor het geval er gelast wordt met een stroomsterkte van 300 A. Invullen levert een berekende waarde van F_r van 0,033 N. Op een contactkracht van 2 N is dat een bijdrage van 1,65 %.

TOTALE CONTACTKRACHT

Gezien de geringe invloed van F_r wordt deze term in het vervolg van de berekeningen verwaarloosd. Als berekende contactkracht worden de in tabel 5.2 gegeven waarden gebruikt.

VERGELIJKING VAN DE GEMETEN EN DE BEREKENDE CONTACTKRACHT

De grootte van de contactkracht is in dit onderzoek ook gemeten. De resultaten van die meting staan nogmaals vermeld in tabel 5.3. In de tabel staan ook de zojuist berekende waarden van de contactkracht vermeld.

Draad	Contactkracht tussen contactbuis en draad (N)	
	Berekend (Tabel 5.2)	Gemeten (Tabel 4.22)
PZ 6000	1,89	3,19
Fluxofil	3,06	3,15
Lincoln	1,39	2,48
RVS 318	2,77	3,08
Kobelco	3,09	3,27
Meldra 1,0	0,63	1,02
Meldra 1,2	2,18	2,79
Meldra 1,6	13,0	9,20

Tabel 5.3: contactkracht lasdraad-contactbuis gemeten.

Uit de vergelijking van tabel 5.2 en tabel 5.3 kan de volgende belangrijke conclusie getrokken worden: **voor 5 van de 8 draden komt de berekende waarde van de contactkracht overeen met de gemeten waarde van de contactkracht.** Voor drie draden is de gemeten waarden beduidend hoger dan de berekende waarde. Dit is als volgt te verklaren. Bij de afleiding is geen rekening gehouden met

verstevinging. De drie draden die tijdens de meting een hogere waarde van de contactkracht te zien geven zijn alle drie koudvervormde materialen, die na de vervorming geen warmte-behandeling meer hebben ondergaan. Deze drie draden gedragen zich duidelijk niet ideaal-plastisch en bij deze draden moet wel degelijk met verstevinging rekening gehouden worden.

Gezien het feit dat verstevinging in het materiaal leidt tot een hogere contactkracht, kan wel voor alle draden de volgende bewering worden uitgesproken:

de werkelijke contactkracht is groter of gelijk aan de berekende waarde die volgt uit vergelijking (49).

5.2 Berekening van het contactoppervlak tussen draad en contactbuis

Bij de berekening van de grootte van het contactoppervlak tussen de draad en de contactbuis speelt de contactkracht een beslissende rol. Hierboven bleek dat er een verschil is tussen de gemeten waarden en de berekende waarden voor de contactkracht.

In het vervolg zal verder gerekend worden met de gemeten waarden van de contactkracht.

Uit de theorie van hoofdstuk 3 blijkt dat er twee methoden zijn voor het berekenen van het contactoppervlak.

CONTACTHYPOTHESE VOLGENS BOWDEN EN TABOR

Om te beginnen wordt de grootte van het contactoppervlak berekend volgens de contacthypothese van Bowden en Tabor. In paragraaf 3.1 is afgeleid dat de berekening als uitkomst de verhouding tussen de Meyer-hardheid van de koperen contactbuis en de aandrukkraft van de lasdraad tegen de contactbuis geeft. Het resultaat van de berekening is te vinden in tabel 5.4.

Draad	Hardheid Contactbuis (Hv 0,05)	Hardheid Contactbuis (Meyer)	Fa (N) (gemeten)	A _w (mm²)
PZ 6000	45	441	3,19	0,0072
Fluxofil	45	441	3,15	0,0071
Lincoln	45	441	2,48	0,0056
RVS	45	441	3,09	0,0070
Kobelco	45	441	3,27	0,0074
Meldra 1,0	45	441	1,02	0,0023
Meldra 1,2	45	441	2,79	0,0063
Meldra 1,6	45	441	9,20	0,0209

Tabel 5.4: grootte van het contactoppervlak tussen contactbuis en lasdraad berekend volgens de contacthypothese van Bowden en Tabor.

CONTACTOPPERVLAK MET DE VERGELIJKINGEN VAN HERTZ

In paragraaf 3.1 is een vergelijking afgeleid voor de berekening van de grootte van het contactoppervlak volgens Hertz. De vergelijking staat hieronder nogmaals gegeven:

$$P_m = \frac{F_N}{\pi ab}$$

(51)

Het resultaat van de berekening met behulp van vergelijking (51) staat in tabel 5.5.

Draad	F _n (N)	E-CB (N/mm ²)	k1	E-draad (N/mm ²)	k2	(B+A)	m	n	a	b	A _w (mm ²)	P _o (N/m ²)
PZ 6000	3,19	110 10 ³	8,3 10 ⁻⁶	195 10 ³	4,66 10 ⁻⁶	5,12	5,85	0,39	0,111	0,007	0,0024	1,3 10 ⁹
Fluxofil	3,15	110 10 ³	8,3 10 ⁻⁶	139 10 ³	6,54 10 ⁻⁶	5,12	5,85	0,39	0,116	0,008	0,0029	1,1 10 ⁹
Lincoln	2,48	110 10 ³	8,3 10 ⁻⁶	200 10 ³	4,55 10 ⁻⁶	5,12	5,85	0,39	0,102	0,007	0,0022	1,1 10 ⁹
RVS	3,09	110 10 ³	8,3 10 ⁻⁶	194 10 ³	4,69 10 ⁻⁶	5,12	5,85	0,39	0,110	0,007	0,0024	1,3 10 ⁹
Kobelco	3,27	110 10 ³	8,3 10 ⁻⁶	144 10 ³	6,30 10 ⁻⁶	5,12	5,85	0,39	0,116	0,008	0,0029	1,1 10 ⁹
Meldra 1,0	1,02	110 10 ³	8,3 10 ⁻⁶	195 10 ³	4,67 10 ⁻⁶	5,12	5,85	0,39	0,076	0,005	0,0012	0,9 10 ⁹
Meldra 1,2	2,79	110 10 ³	8,3 10 ⁻⁶	187 10 ³	4,87 10 ⁻⁶	5,12	5,85	0,39	0,107	0,007	0,0024	1,2 10 ⁹
Meldra 1,6	9,20	110 10 ³	8,3 10 ⁻⁶	186 10 ³	4,89 10 ⁻⁶	5,12	5,85	0,39	0,158	0,011	0,0055	1,7 10 ⁹

Tabel 5.5: berekening van de grootte van het contactvlak tussen lasdraad en contactbuis met behulp van de vergelijkingen van Hertz.

VERGELIJKING VAN DE TWEE BEREKENDE WAARDEN

Zoals voorspeld is, is er duidelijk een verschil in grootte tussen de uitkomst van de berekening volgens Bowden en Tabor en de berekening volgens Hertz. Dat is logisch omdat voor de berekeningen verschillende randvoorwaarden gelden. Bowden en Tabor geldt alleen in het geval van volledige plasticiteit, Hertz geldt alleen als in het materiaal nergens de elasticiteitsgrens wordt overschreden. De laatste kolom in tabel 5.5 geeft aan hoe groot de contactspanning in het contactpunt wordt volgens Hertz. In de tabel is te zien dat bij alle draden de contactspanning erg groot is, zo groot dat van elastische vervorming niet meer gesproken mag worden. In dit geval zijn de vergelijkingen van Hertz dus niet geschikt voor de beschrijving van het contactoppervlak tussen de contactbuis en de

lasdraad. Daarom wordt alleen verder gerekend met het contactoppervlak zoals berekend met de hypothese van Bowden en Tabor.
De vergelijkingen van Hertz zijn wellicht wel geschikt wanneer gelast wordt met een hard-metalen contactbuis in combinatie met harde lasdraden.

5.3 Berekening van de contactweerstand

Met behulp van de berekende contactoppervlakken kan nu de waarde van de contactweerstand worden berekend. Voor de berekening wordt de vergelijking van Holm uit paragraaf 3.1 gebruikt. Die vergelijking luidt:

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

(52)

In paragraaf 3.1 werd al vermeld dat voor de contactweerstand tussen twee materialen met een verschillende ρ de gemiddelde waarde van de twee ρ 's gebruikt mag worden in de vergelijking.
In tabel 5.6 staat het resultaat van de berekening met behulp van het contactvlak volgens Bowden en Tabor.

Draad	Aw (mm²)	a (mm)	ρ -CB (Ωmm)	ρ -draad (Ωmm)	ρ -gemiddeld (Ωmm)	Rk (Ω)
PZ 6000	0,0072	0,0479	1,68 10 ⁻⁵	3,0 10 ⁻⁴	16 10 ⁻⁵	0,0017
Fluxofil	0,0071	0,0475	1,68 10 ⁻⁵	3,0 10 ⁻⁴	16 10 ⁻⁵	0,0017
Lincoln	0,0056	0,0422	1,68 10 ⁻⁵	3,0 10 ⁻⁴	16 10 ⁻⁵	0,0019
RVS	0,0070	0,0472	1,68 10 ⁻⁵	7,4 10 ⁻⁴	38 10 ⁻⁵	0,0040
Kobelco	0,0074	0,0485	1,68 10 ⁻⁵	3,0 10 ⁻⁴	16 10 ⁻⁵	0,0016
Meldra 1,0	0,0023	0,0271	1,68 10 ⁻⁵	3,0 10 ⁻⁴	16 10 ⁻⁵	0,0029
Meldra 1,2	0,0063	0,0448	1,68 10 ⁻⁵	3,0 10 ⁻⁴	16 10 ⁻⁵	0,0018
Meldra 1,6	0,209	0,2579	1,68 10 ⁻⁵	3,0 10 ⁻⁴	16 10 ⁻⁵	0,0003

Tabel 5.6:-berekening van de contactweerstand met behulp van het contactvlak volgens Bowden en Tabor.

5.4 Berekening van de contacttemperatuur

Voor de berekening van de contacttemperatuur wordt gebruikt gemaakt van vergelijking (13) uit hoofdstuk 3, die luidt:

$$\theta = \frac{V}{2\sqrt{L}} \quad \text{met } L = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{graad}^2$$

(53)

Per draad moet het spanningsverschil *V* over het contact bekend zijn om de vergelijking te kunnen gebruiken. Dat spanningsverschil wordt bepaald door gebruik te maken van de Wet van Ohm:

$$V = I \cdot R$$

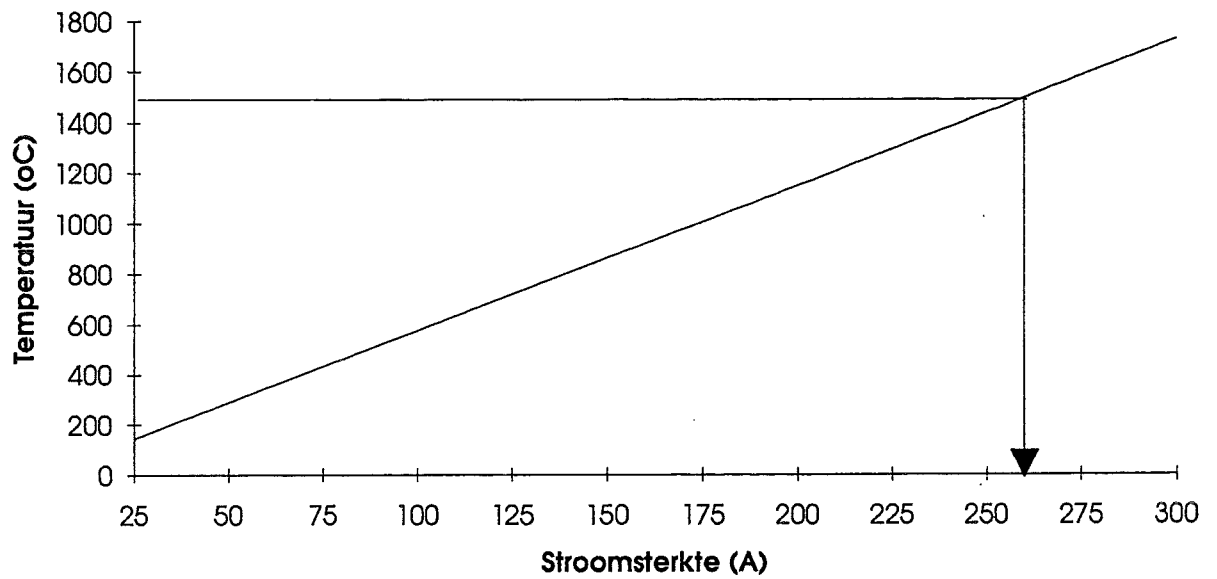
(54)

De contactweerstand is berekend in paragraaf 5.3. De uitkomst van de berekening van de contacttemperatuur, op basis van het contactvlak berekend met Bowden en Tabor, is te vinden in tabel 5.7.

Draad	Rk (Ω)	Stroom (A)	Spanning, V = I·Rk (V)	Tmax (°C)
PZ 6000	0,0017	300	0,51	1629
Fluxofil	0,0017	300	0,51	1629
Lincoln	0,0019	300	0,57	1821
RVS	0,0040	300	1,20	3833
Kobelco	0,0016	300	0,48	1533
Meldra 1,0	0,0029	300	0,87	2779
Meldra 1,2	0,0018	300	0,54	1725
Meldra 1,6	0,0003	300	0,09	287

Tabel 5.7: berekening van de contacttemperatuur op basis van het contactvlak volgens Bowden en Tabor.

Temperatuur volgens Bowden en Tabor



Figuur 5.8: verband tussen de contacttemperatuur en de stroomsterkte Meldra 1,2 (contactweerstand berekend met behulp van de contacthypothese van Bowden en Tabor)

De uitkomst van de berekening leert het volgende:

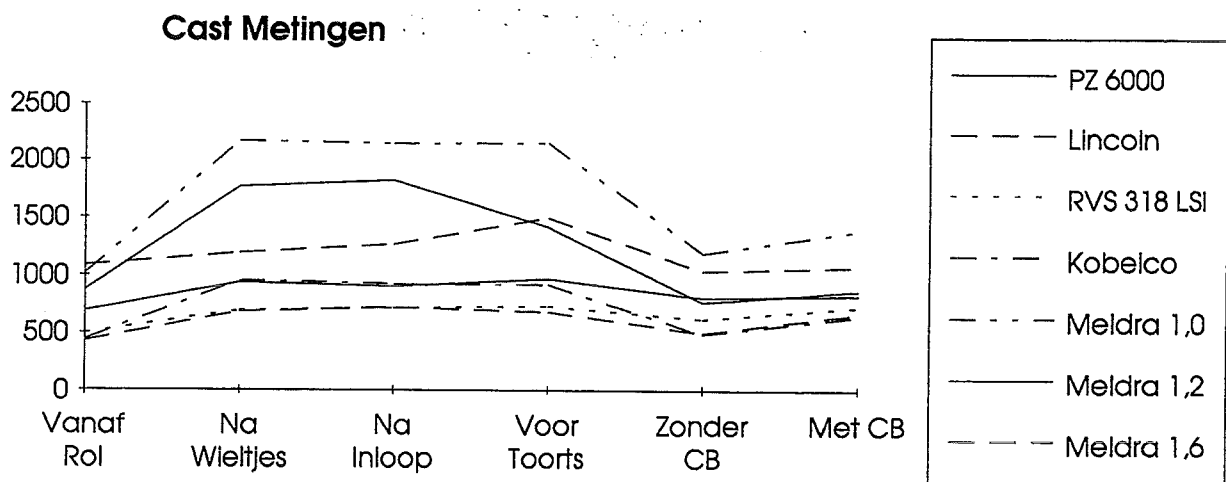
De temperatuur in het contact zal tijdens het lassen met 300 A bij de meeste draden oplopen tot boven de smelttemperatuur van de lasdraden. De lasdraad zal tijdens het transport in de contactbuis aan het oppervlak plaatselijk smelten.

De temperatuur die maximaal bereikt wordt, komt niet precies overeen met de in de tabel 5.7 gegeven waarden. Wanneer in het contact de smelttemperatuur wordt overschreden en het elektrisch contact gevormd wordt door vloeibaar metaal, dan zal de weerstand over het contact afnemen. De temperatuur-stijging na het bereiken van de smelttemperatuur zal dan ook minder hoog zijn dan de hier berekende waarden.

Als voorbeeld wordt in figuur 5.8 het verband gegeven tussen de las-stroomsterkte en de temperatuur van het contactpunt wanneer gelast wordt met een Meldra 1,2 mm draad. Als contactweerstand is in figuur 5.8 gebruikt 0.0018Ω (berekening volgens Bowden en Tabor).

Volgens de berekening van Bowden en Tabor begint de Meldra-draad bij een stroomsterkte van **260 A** smeltverschijnselen te vertonen.

In de experimenten beschreven in paragraaf 4.4 is vastgesteld dat op de draad tijdens het lassen met een stroomsterkte van **200 A** inderdaad smeltverschijnselen op de draad te vinden waren.



Figuur 6.1: verandering van de cast van de lasdraden tijdens het transport door het draadaanvoersysteem.

HOOFDSTUK 6: Bespreking van de proefresultaten

In de voorgaande hoofdstukken is gesproken over de oorzaken die storingen veroorzaken bij het MIG/MAG-lassen. Na het rekenmodel uit hoofdstuk 3, de experimenten van hoofdstuk 4 en het rekenwerk uit hoofdstuk 5 wordt in dit hoofdstuk de resultaten verzameld en toegelicht.

In **paragraaf 6.1** worden de resultaten van de tests besproken die vooraf gingen aan het feitelijke lasonderzoek.

In **paragraaf 6.2** worden de resultaten van de duurttest toegelicht

In **paragraaf 6.3** worden de resultaten van de lassimulaties besproken.

Het hoofdstuk wordt afgesloten met **paragraaf 6.4** waarin op grond van de uitkomst van de berekeningen de houdbaarheid van de geformuleerde hypothesen wordt onderzocht.

6.1 bespreking van de tests voorafgaande aan de lasexperimenten

Uit de experimenten blijkt dat het gangbare idee over de ligging van de draad in het kanaal in de toorts moet worden bijgesteld. De draad blijkt vanaf de bocht in de toorts aan één zijde van het kanaal aan te liggen. Op grond van deze vaststelling kan de conclusie getrokken worden dat uit oogpunt van een optimaal elektrisch contact, een contactbuis nooit te lang kan zijn. De vaststelling dat er een optimale lengte zou bestaan voor een zo groot mogelijke aandrukkracht in het contactpunt is niet juist [1, 3].

In hoofdstuk 4 bleek ook dat de cast van de draden tijdens het doorvoeren verandert. De draad krijgt in de hier uitgevoerde tests (waarin een toorts is gebruik met daarin een bocht) in de toorts de cast opgedrongen waarmee de draad de contactbuis inkomt. Dat wil niet zeggen dat er geen enkel verband bestaat tussen de voorbuiging die de draad heeft op de draad rol en de voorbuiging waarmee de draad de contactbuis bereikt. In figuur 6.1 is voor de onderzochte draden het verloop van de voorbuiging uitgezet tijdens het doorvoeren. In de figuur is de Fluxofil draad weggelaten omdat de enorme cast van de draad in het traject het beeld verstoort.

In figuur 6.1 is te zien dat de cast van de draden na de toorts weer in de buurt komt van de waarden aan begin van het draadaanvoersysteem. Het niveau van de voorbuiging is hoger dan aan het begin van het traject, de volgorde tussen de verschillende draden is niet ingrijpend veranderd.

Het rekenwerk met behulp van de in dit onderzoek afgeleide vergelijking voor het berekenen van de contactkracht maakt duidelijk dat de uitkomsten van de berekening een minimum aangeven van de contactkracht die werkelijk in het contact ontstaat.

Rekenen aan de temperatuurverhoging in het contactpunt maakt duidelijk dat smeltverschijnselen in de contactbuis meer regel dan uitzondering zouden moeten zijn.

6.2 bespreking van de duurtest

Uit de resultaten van de duurtest blijkt dat de niet-verkoperde stalen draden met een massieve doorsnede en een diameter van 1,2 mm het beste lasgedrag vertonen. Vooral de Meldra 1,2 mm draad last uitstekend. De weerstand die de draad opbouwt in het pakket is en blijft laag tijdens de test. De slijtage van de van de contactbuis is groot, maar de slijtage is niet zo groot dat het lasgedrag van de draad wordt beïnvloedt. Ook de Lincoln draad last tijdens de test erg goed. De slijtage die deze draad veroorzaakt is nog groter dan bij de Meldra 1,2 draad en de stroomvariaties zijn groter. Bij beide lasdraden is na afloop van de test de contactbuis wel voor een deel weggesleten, maar niet vervuild. Tijdens het lassen reinigt het systeem lasdraad-contactbuis blijkbaar zichzelf.

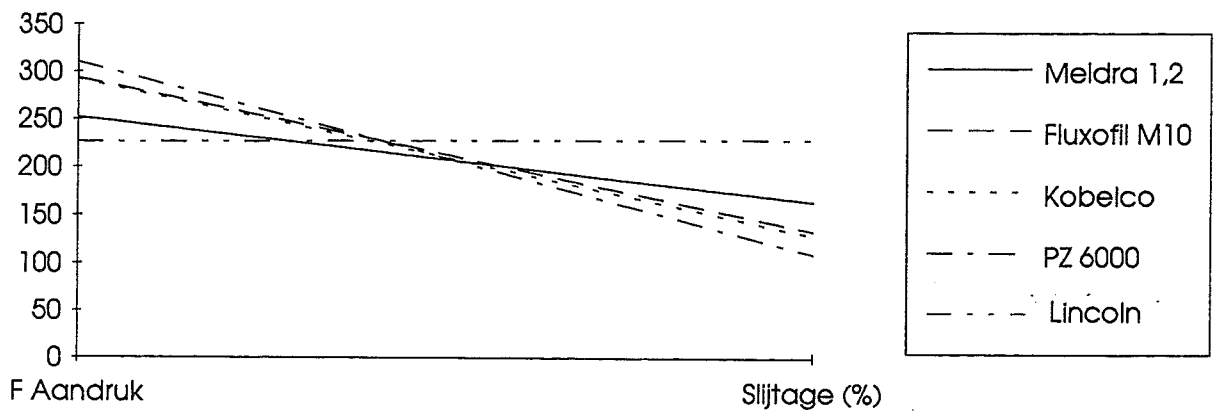
Dat schoonmaak-proces lijkt ook op te treden tijdens het lassen met de Kobelco draad. De mechanische weerstand die deze draad in het pakket ondervindt is tijdens het lassen hoger dan bij de Lincoln en de Meldra 1,2 draad. De weerstand loopt steeds langzaam op, om vervolgens naar het oude niveau terug te vallen. Blijkbaar werkt de draad zelf de in de contactbuis aanwezige vervuiling naar buiten.

Het lasgedrag van de twee verkoperde draden is minder goed dan van de Meldra 1,2 en de Lincoln draad. Het niveau van de weerstand in het slangenpakket ligt hoger dan bij de niet verkoperde draden en de variatie in de gemeten stroomsterkte is vanaf het begin van de test meteen groter. Opvallend verschil met de twee niet verkoperde draden is dat contactbuis tijdens het lassen niet slijt. De kopercoating blijkt een goede remedie tegen slijtage, maar veroorzaakt tegelijkertijd vervuiling van de contactbuis.

De meeste problemen traden op tijdens het lassen met de RVS 318 draad. Meteen vanaf het begin is de gemeten weerstand bij deze draad hoger dan bij de andere draden. Omdat de storingen zich meteen bij het begin van de lastest voordoen kan in dit geval vervuiling niet de storingsoorzaak oorzaak zijn.

Het verschil tussen de RVS-draad en de ander lasdraden is de enorme weerstand die de RVS-draad in het draadaanvoersysteem ondervindt. De RVS draad is dan ook niet te lassen met een gewone stalen liner. De tests met de RVS draad zijn uitgevoerd met een teflon liner. De diameter van deze liner is groter dan de diameter van een stalen liner. Bovendien kan een teflon liner de draad niet net zo goed 'leiden' als een stalen liner. De draad heeft om deze reden in het draad aanvoersysteem meer speling. De variatie van de draadsnelheid van deze draad is daarmee groter dan van de andere draden. Wellicht is dat de oorzaak van de opgetreden storingen.

Verband F Aandruk en Slijtage



Figuur 6.2: relatie tussen de contactkracht en de slijtage van de contactbuis.

De tests met de Meldra draden met een afwijkende doorsnede leveren interessante informatie op.

De Meldra 1,0 draad last bij het begin van de proef zonder problemen. Langzaam maar zeker loopt tijdens de proef de weerstand die de draad in het draadaanvoersysteem ondervindt op. Vervuiling van de contactbuis blijkt de oorzaak van de verhoogde weerstand. De draad is blijkbaar niet in staat om de contactbuis zelf schoon te houden.

Het meest opzienbarende resultaat leveren de lastest met de Meldra 1,6 mm draden. De aandrukkracht die de draad in de contactbuis opbouwt is vele malen hoger die de contactkracht bij de draden met een kleinere diameter. De overgangsweerstand is laag en toch lopen de draden gedurende de test vast. De oorzaak van de storingen die bij deze draden optreden moeten gezocht worden in de zeer hoge weerstand die de draden meteen vanaf de start van de test in het draadaanvoersysteem ondervinden. De hoge weerstand maakt de draden gevoelig voor verstoring van de voortloopsnelheid van de draden.

Van de draden is bepaald wat de relatie is tussen de aandrukkracht en de slijtage die de draden veroorzaken. In figuur 6.2 is voor draden met een diameter van 1,2 mm te zien dat hoe groter de aandrukkracht is, des te lager de slijtage van de contactbuizen is. Bij de onderzochte draden is de invloed van de elektro-erosie blijkbaar groter dan van de mechanische weerstand.

6.3 bespreking van de lassimulaties

De resultaten van de test waarbij de draden wel werden blootgesteld aan stroomdoorvoer, maar zelf niet verloren gingen maken veel duidelijk.

In de eerste plaats is met de experimenten duidelijk gemaakt dat bij alle onderzochte draden de temperatuur die in het elektrisch contact ontstaat zo hoog is dat de smelttemperatuur van het draadmateriaal wordt overschreden. Bij de presentatie van de resultaten van deze tests is al een opmerking gemaakt over de bruikbaarheid van de resultaten. De cast waarmee de draden in het draadaanvoersysteem de contactbuis bereiken is niet gelijk aan de cast waarmee de draden in de simulator de contactbuis bereiken. Dat doet echter niets af aan de vaststelling dat tijdens de experimenten op de simulator de draden geen draaddoorvoerproblemen vertoonden.

Ook op de Meldra 1,2 draad, veruit de beste draad tijdens de duurttests, werden na afloop van de simulatie smeltsporen gevonden. Deze draad last dus goed ondanks het feit dat in het contact de smelttemperatuur van de draad is overschreden.

Kortom smeltverschijnselen alleen is niet voldoende voor het doen vastlopen van een lasdraad in een contactbuis.

6.4 Bespreking van de hypothese.

Uit de resultaten die in dit onderzoek zijn gepresenteerd blijkt dat de beste lasresultaten met stalen lasdraden worden bereikt wanneer tijdens het lassen een lasdraad goed elektrisch contact maakt met de contactbuis, de contactbuis zelf niet vervuilt tijdens het lassen en er geen verstoring optreedt in de voortloopsnelheid van de draad (Lincoln, Kobelco, Meldra 1,2).

De storingen die in dit onderzoek met de lasdraden optraden, hadden als oorzaak:

- 1: het vervuilen van de contactbuis tijdens het lassen (PZ 6000, Fluxofil)
- 2: een grote variatie van de voortloopsnelheid van de lasdraad door een grote weerstand van de draad in het draadaanvoersysteem (RVS, Meldra 1,6).

Het optreden van de genoemde storingsoorzaken komt overeen met de consequenties van de hypothese. Met behulp van de in dit onderzoek uitgevoerde experimenten kan de hypothese dan ook niet worden weerlegd.

HOOFDSTUK 7: Conclusies

Tijdens het MIG/MAG-lassen is een verstoring van de stroomdoorvoer van de contactbuis via de lasdraad naar het lasbad ongewenst. Door zo'n verstoring verandert namelijk de afsmeltsnelheid van de lasdraad en daardoor worden de eigenschappen van de las beïnvloed.

Een verstoring van de stroomdoorvoer treedt op wanneer in het systeem contactbuis-lasdraad óf de contactweerstand tussen de contactbuis en de lasdraad verandert óf wanneer de voortloopsnelheid van de draad varieert.

Om storingen in een MIG/MAG-systeem te voorkomen is goed elektrisch contact tussen de lasdraad en de contactbuis én een regelmatige voortloopsnelheid van de draad vereist.

De kans op een verstoring van de voortloopsnelheid van de draad neemt toe met een toenemende mechanische weerstand die de draad in het draadaanvoersysteem ondervindt. Die weerstand kan het gevolg zijn van een grote wrijvingscoëfficiënt tussen de draad en de liner, de aanwezigheid van bochten in de liner of van vervuiling van het systeem.

Goed elektrisch contact tussen de contactbuis en de lasdraad wordt bereikt door een grote aandrukkraft van de lasdraad tegen de contactbuis en door een lage contactweerstand in de overgang contactbuis-lasdraad.

Goed elektrisch contact wordt belemmerd wanneer in de contactbuis een laag met een hoge elektrische weerstand het elektrisch contact tussen de contactbuis en de lasdraad verstoort. In de contactbuis afgezet vuil kan zo'n hoge weerstand tot gevolg hebben. Draden waarbij tijdens het lassen de contactbuis niet vervuild, leveren minder kans op storingen.

Bij draden die voldoende slijtage veroorzaken kan geen opbouw van een vuilkorst optreden en ook bij deze draden treden minder storingen op.

De contactweerstand op zich (schone contactbuis - lasdraad) is blijkbaar geen bron van storingen.

De contactkracht tussen de lasdraad en de contactbuis kan worden beschreven met een in dit onderzoek afgeleide vergelijking. In de vergelijking staan de elasticiteitsmodulus van de draad, het lineaire traagheidsmoment van de draad, de voorbuiging waarmee de draad de contactbuis inloopt en het verschil in doorsnede tussen de lasdraad en het kanaal van de contactbuis. De voorbuiging van de draad heeft van deze factoren de grootste invloed.

De uitkomst van de vergelijking levert een minimum waarde van de contactkracht die in het contact ontstaat.

De voorbuiging waarmee een lasdraad de contactbuis inloopt, ontstaat door plastische deformatie van de draad in de bocht van de toorts. Daarbij geldt: hoe kleiner de weerstand tegen buiging van de draad, des te groter is de plastische deformatie en des te kleiner wordt de voorbuiging van de draad.

De stroomoverdracht van de contactbuis naar de stalen lasdraden veroorzaakt een grote warmte-ontwikkeling in het contactpunt. In het contactpunt kan de temperatuur tot boven de smelttemperatuur van de draad oplopen.

Het optreden van smeltverschijnselen in de contactbuis alleen, is niet voldoende voor het laten vastlopen van een lasdraad in een contactbuis.

Om storingvrij te kunnen lassen moet voor de lasdraden een compromis gekozen worden tussen:

- 1: een hoge aandrukkraft van de draad tegen de contactbuis, voor een goed elektrisch contact (en daarmee een hoge mechanische weerstand van de draad in de contactbuis).
- 2: een lage mechanische weerstand van de draad in het draadaanvoersysteem, om de kans op een verstoring van de draadsnelheid te verkleinen.

REFERENTIES

- [1] H. Zwickert,
Untersuchungen zur Klärung einiger Vorgänge bei der Stromübertragung im
Gleitkontakt Kontaktdüse-Schweißdraht.
ZIS-Mitteilungen, Halle 29 (1987) 11, pag 1159-1169.
- [2] G. Hauck,
Qualitätsanforderungen an Drahtelektroden beim Schutzgasschweißen mit
Robotern.
DVS Bericht 118, DVS-Verlag Düsseldorf 1989, pag 71-76.
- [3] M.C.L.F. de Kanter,
Storingen in de draadaanvoer tijdens het MIG-lassen van Aluminium.
Afstudeerverslag, TU Delft, 1993.
- [4] W.P. van den Blink,
Lastechniek.
Teleac Utrecht, 1979.
- [5] H. Zwickert,
Untersuchungen der Kontaktverhältnisse bei der Stromübertragung auf den
Schweißdraht.
Wiss. Z. Techn. Univ. Magdeburg 31 (1987) 4, pag 96-102.
- [6] J.F. Rudy, D.C. Brown, W.G. Growth,
Study of Current Contact Tubes for Gas Metal-Arc Welding.
Welding Journal, 45 (1966) 8, pag 374_s-378_s.
- [7] J. Ruge,
Handbuch der Schweißtechnik Bd. II: Verfahren und Fertigung.
Berlin, Springer Verlag, pag 61.
- [8] P. Scheibner,
Prozeßeinflüsse beim automatischen MAG-Kehlnahtschweißen.
ZIS-Mitteilungen, Halle 23 (1981) 6, pag 649 - 659.
- [9] H. Killing,
Was bringt uns die neue DIN 8559 ?.
Der Praktiker, 10 (1977).
- [10] J. Grosse-Wortmann,
Auswahl der Zusatzwerkstoffe für das Schutzgasschweißen.
Zeitschrift für Schweißtechnik, Basel 4 (1979).

-
- [11] H.U. Pomaska,
Application and range of welding processes in the construction of important structures.
DVS, 36 (1975), pag 87 - 95.
- [12] B. Lundqvist und K. Olsson,
Wichtige Eigenschaften der Zusatzwerkstoffe für das Metall-Inertgasschweißen von nichtrostenden Stählen.
Schweißen und Schneiden, 32 (1980) 7, pag 255-258.
- [13] T. Yamada, O. Tanaka,
A fluctuation of wire feed rate in gas shielded arc welding.
Welding and Metal Fabrication (1986) 6, pag 358-365.
- [14] T. Yamada,
Variation of wire feeding rate in CO₂ arc welding.
Quarterly Journal of the Japanese Welding Society 2 (1984), pag. 228.
- [15] K.A. Lyttle,
Reliable GMAW Means Understanding Wire Quality, Equipment and Process Variables.
Welding Journal, 61 (1982) 3, pag 43-48.
- [16] R. Knoch,
Verbesserung der Zünd- und Anlaufphase beim Metall-Aktivgasschweißen.
Schweißen und Schneiden, 37 (1985) 8, pag 370-376.
- [17] V.G. Degtyarev, M.P. Novikov, N.M. Voropai,
Improving the working conditions of the electrode wire-contact tip pair.
Paton Welding Journal, 1991 3 (4), pag 290-294.
- [18] G. Aichele,
Massivdrahtelektroden für das MAG-Schweißen unlegierter und niedriglegierter Stähle.
Schweißtechnik, (1983) 4, pag 66-70.
- [19] P. Baas e.a.,
Storingvrije draadaanvoer, een voorwaarde voor betrouwbaar MIG/MAG lassen.
Lastechniek, 55 (1989) 6, pag 209-213.
- [20] U. Dilthey, U. Hahrestedt,
Untersuchungen an Stromkontaktdüsen für das Metall-Schutzgasschweißen.
Schweißen und Schneiden 43 (1991) 6, pag 315-319.
-

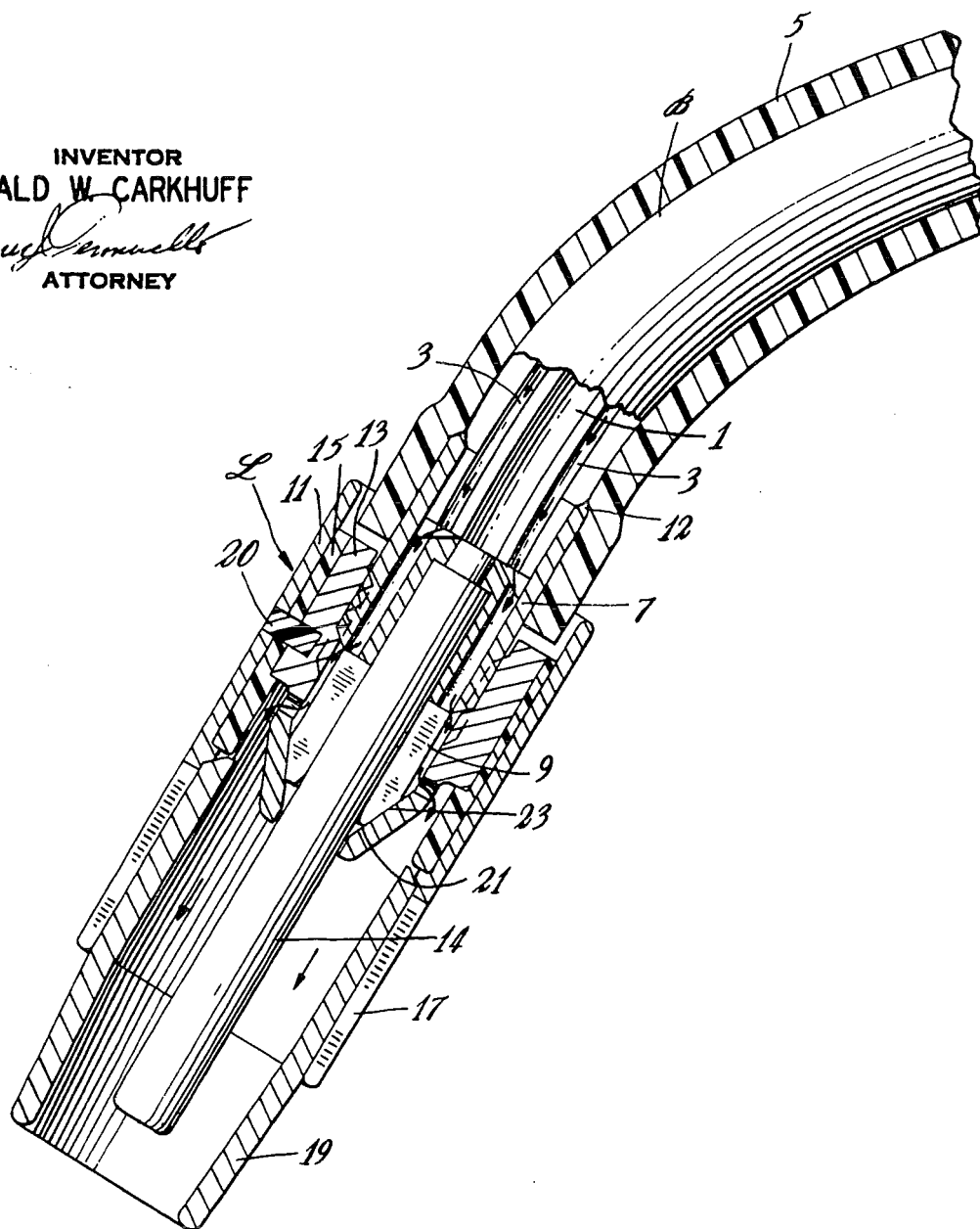
-
- [21] N. Pache,
Mit Drahtreiniger ist das Metall-Schutzgas-Schweißen wesentlich billiger.
Der Praktiker, (1988) 6, pag 289-292.
- [22] P. Baas, L. Brantsma, E. Moolhuijsen, M. Sipkes,
Störungsfreier Drahtvorschub - eine Voraussetzung zum wirtschaftlichen
MIG/MAG-Schweißen.
DVS Bericht 131, DVS-Verlag Düsseldorf 1986, pag 167-170.
- [23] G. Hesse, W. Bahn,
Untersuchungen an mehrteiligen Stromkontaktdüsen.
ZIS-Mitteilungen, 29 (1987) 11, pag 1152-1159.
- [24] A.A. Chubukov,
The effect of the wear of the current-conducting tip on the welding conditions.
Svar. Proiz., 51 (1980) 1, pag 26-27.
- [25] A.R. Hale,
Inleiding algemene veiligheidskunde.
TU Delft, 1991.
- [26] W. Brigidin,
Über die Arbeit der stromführenden Spitzen beim Lichtbogenschweißen.
Svar. Proiz., 50 (1979) 8, pag. 20 - 21.
- [27] A. Steinmetz,
Interview met ir. A. Steinmetz,
Steinmetz Consultancy, Hollandsche Rading.
- [28] T. Brown e.a.,
Circuit Interruption.
Uitgeverij Marcel Dekker, New York, 1987, pag 565-605.
- [29] D. Landheer, A.W.J. de Gee,
Tribotechniek.
TU Delft en Universiteit Twente, 3e druk, maart 1989.
- [30] K. Habig,
Verschleiß und Härte van Werkstoffen.
Hanser Verlag, Wien, 1980, pag 24-28

-
- [31] P. Barkan,
A new formulation of the elektromagnetic repulsion phenomenon in electric contacts at very high currents.
Proceedings of the 11th International Conference Electric Phenomenon, june 1982, pag 185 - 188
- [32] R. Holm,
Electric Contacts: Theory and Application.
Springer-Verlag, New York, 1967, hfdst. 1 en 2.
- [33] A.W.J. de Gee,
Interview met Prof. ir. A.W.J. de Gee, Hoogleraar Tribologie, Tu Delft.
- [34] Y. Watanabe,
Sliding Contact Characteristics Between Self-Lubricating Composite Materials and Copper.
IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, VOL. 1, No.4, june 1993.
- [35] M. Vogler, S. Sheppard,
Electrical contact resistance under high loads and elevated temperatures.
Welding Journal, 65 (1986) 6, pag 231_s-238_s.
- [36] R. Holm,
Electric Contacts: Theory and Application.
Springer-Verlag New York, 1967, hfst. 13-19.
- [37] A.H. Wilson,
The Theory of Metals 2nd edition.
Cambridge University Press, Cambrigde, 1953.
- [38] V. Tammi, M. Dios,
Reibkraftmessungen in Schutzgas-Schweißbrennern,
Uitgave firma Binzel ter gelegenheid van 'SCHWEIßEN UND SCHNEIDEN 1989'.
- [39] A.A. Tschubakov,
Widerstand im Kontakt Düse - Schweißdraht beim CO₂-Schweißen.
Svar. Proiz., 51 (1980) 12, pag. 31-32.
- [40]: S. Flohr,
Richten von Schweißdraht.
Fertigungstechnik und Betrieb, 26 (1976) 8, pag 484-488.
-

-
- [41] A.A. Chubukov,
Resistance of the contact between the tip and the welding wire in CO₂
welding.
Svar. Proiz., (1980) 12, pag 31-33.
- [42] D.W. Carkhuff,
US Patent No. 3541298, September 1968.
- [43] M. Yoshinaka,
Method of producing contact tip.
European Patent Application, Publication Number: 0 399 334 A2.
- [44] N.P. Vorob'ev,
A nozzle for welding heads and torches.
Priority Certificate No. 278916,
Byul. izobret., 1970, No. 26.
- [45] A.V. Bobrovskii,
Improving arrangements for contact in automatic and semi-automatic welding.
Weld. Prod., (1968) 9, pag 77.
- [46] Electrical Engineering Standard 5AA, No. 57900N68, 1968.
- [47] M. Rausal,
Hvlavice svarovaciko automatu.
Czechoslovakian Patent No. 128954, 1968.
- [48] B.M. Zil'bershtein,
Constructional Features of the Current Inputs in Welding Apparatus.
Avt. Svarka, 1976, no. 6, pag 56-60.
- [49] V.V. Evseev,
A contact tip for arc welding.
Priority certificate No. 386730.
Byul. izobret, 1973, No.27.
- [50] K. Müller,
Mehrteilige Stromführungsdüse in Schweißköpfen oder Schweißpistolen für
das Lichtbogenschweißen.
East German Patent No. 66236.
- [51] F. Pospisil,
Svarovaci hubice, zeiména svarování automaty pod tavidlem.
Czechoslovakian Patent No. 133446.
-

-
- [52] K. Nagy,
Portable welding tip.
US patent No. 3230343, Jan. 1964.
- [53] S. L. Andersen,
Welding apparatus coated with spatter resistant and electrically conductive film.
European Patent Application, Publication Number: 0 417 468 A1.
- [54] A. Neubauer, H.J. Angrabeit, W. Böttcher,
Stelleinrichtung für kombinierte Drahtvorschub- und Drahtrichteinrichtungen.
Patentschrift 147 827, DDR Amt für Erfindungs- und Patentwesen.
- [55] N.M. Mikhin, N.K. Myshkin, N.A. Valueva, V.B. Pevsner,
Wear of low current electrical sliding contacts.
Proceedings of Wear Of Materials, Dearborn, Mich., 16-18 April 1979, pag 175-180.

INVENTOR
DONALD W. CARKHUFF
BY *Amesbury*
ATTORNEY



Figuur A.1: eenvoudig monteerbare contactbuis [42].

BIJLAGE 1: Octrooien Contactbuis

In de loop der jaren is er niet alleen veel onderzoek verricht naar de werking van contactbuizen, maar er is ook een groot aantal nieuwe contactbuizen en nieuwe produktie methoden ontworpen. In deze bijlage wordt een aantal van deze ontwerpen gepresenteerd en toegelicht.

Het is niet de bedoeling om een compleet overzicht te geven van alle op dit moment bekende vindingen. Deze bijlage is opgenomen omdat de verschillende varianten laten zien in welke richting oplossingen gezocht zijn en oplossingen gezocht kunnen worden om storingen te voorkomen.

Tijdens het lassen staan contactbuizen bloot aan slijtage. Na een zekere inschakelduur wordt de contactbuis daardoor onbruikbaar. Een aantal ontwerpers heeft gedacht: "wanneer contactbuizen regelmatig vervangen moet worden, dan moet er voor gezorgd worden dat de contactbuizen zelf niet veel geld hebben gekost". De **ontwerp 1, 2 en 3** beschrijven allemaal een methode om de kosten van de contactbuizen laag te houden.

Ontwerp 1: Kostenbesparing door snel wisselen van goedkope contactbuis

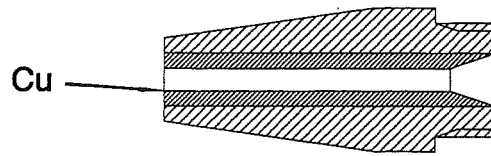
D.W. Carkhuff, US Patent No. 3541298, September, 1968 [42].

Het ontwerp van de toorts is erop gericht om het vervangen van de contactbuis zo snel mogelijk te laten verlopen.

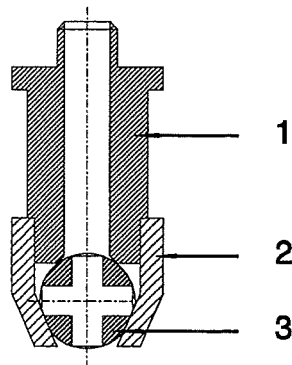
In een normale toorts moeten voor het vervangen van de contactbuis twee handelingen worden verricht. De gascup moet worden weggenomen om vervolgens de contactbuis met een tang los te kunnen draaien. In deze nieuwe toorts gaat het vervangen sneller om twee redenen: In de eerste plaats kan de gascup tijdens het vervangen van de contactbuis blijven zitten. In de tweede plaats zit op de contactbuis zelf geen schroefdraad en er is voor de bevestiging/verwijdering van de buis geen instrument nodig.

De toorts is te zien in tekening A.1. Voor het vervangen van de contactbuis (14) moet de hele gascup (L) worden verdraaid. Door het draaien vermindert de druk van een conisch gedeelte van de gascup (23) op de aandruklichaam (9) waarmee de contactbuis in bedwang wordt gehouden. Door de drukvermindering komt de contactbuis los te zitten en valt uit de toorts. Het mechanisme is te vergelijken met de bevestiging van een boor in de boorkop van een boormachine.

De toorts is op twee manieren kostenbesparend. In de eerste plaats is de contactbuis zelf eenvoudig van vorm en dus goedkoop te produceren. In de tweede plaats is het mogelijk om de contactbuis snel te vervangen, en dat zorgt voor een minder groot verlies aan werktijd.



Figuur A.2: contactbuis gemaakt uit twee pijpen [43].



Figuur A.3: contactbuis met wisselplaatje [44].

Ontwerp 2: Goedkope produktiemethode van contactbuizen

M. Yoshinaka, European Patent Application No. 0399334 A2, April 1990 [43].

De produktie van een contactbuis uit een stuk gerold koper verloopt normaal gesproken via drie stappen. In de eerste stap wordt een markering aangebracht aan de buitenkant. De markering geeft aan voor welke diameters de contactbuis geschikt is. Vervolgens wordt het staafje voorzien van schroefdraad. Tenslotte wordt in het stukje koper nog een kanaal geperst. De contactbuis die zo ontstaat, bestaat helemaal uit koper.

De in het octrooi beschreven contactbuis bestaat uit twee delen. De buitenkant is van een goedkoop metaal waaraan geen eisen worden gesteld wat elektrische geleidbaarheid betreft. Tijdens het rollen van dit stuk wordt meteen een markering op de buitenkant en een kanaal in de staaf aangebracht. Bovendien wordt al tijdens het rollen schroefdraad aangebracht op de buis.

In het buitenste gedeelte wordt vervolgens een koperen buisje geperst. Een voorbeeld is te zien in figuur A.2.

De eerste besparing volgt uit het goedkopere produktieproces, waarin een aantal bewerkingsstappen is samengevoegd. Bovendien wordt bespaard op de materiaalkosten van de contactbuis; alleen de kern is immers van koper.

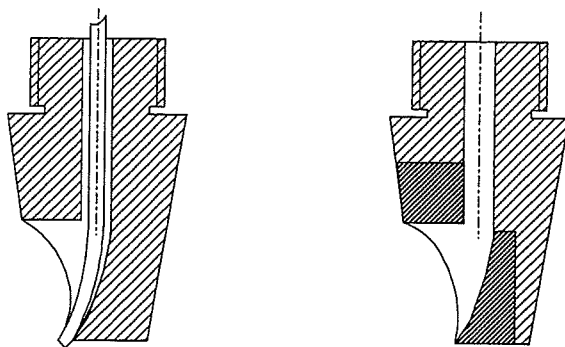
Dit octrooi levert een kostenbesparing. Storingen worden er niet mee opgelost.

Ontwerp 3: Kostenbesparing door wisselplaatje in de tip van de contactbuis

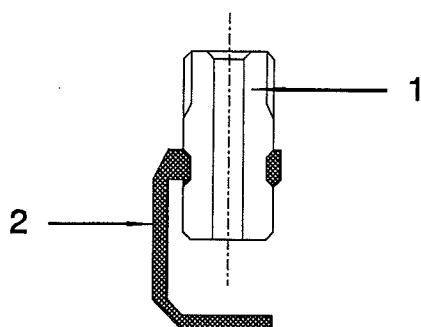
A.A. Bernard, US Patent No. 3514750 [44].

Tijdens het gebruik van een contactbuis staat vooral de tip van de contactbuis bloot aan zowel mechanische slijtage als elektro-erosie. Het zou ideaal zijn wanneer tijdens het lassen steeds de tip van contactbuis vervangen zou kunnen worden. Het octrooi van Bernard biedt een oplossing die in de buurt komt.

Het principe is getekend in figuur A.3. De koperen buis (1) is aan beide zijden voorzien van schroefdraad. Het schroefdraad aan de bovenzijde is bestemd voor de bevestiging van de buis in de toorts. Op het schroefdraad aan de onderzijde wordt een conische bus (2) gedraaid. Tussen de conische bus en de buis zit een koperen bal geklemd die voorzien is van twee gaten. Wanneer de tip van de contactbuis tijdens het lassen versleten is, hoeft in dit ontwerp niet de hele contactbuis weggegooid te worden. Door het draaien van de koperen bal verschijnt er in dit ontwerp een nieuwe 'tip' op de contactbuis. De bal kan drie keer worden verdraaid voordat de bal vervangen moet worden.



Figuur A.4: contactbuis met een gebogen kanaal [45].



Figuur A.5: contactbuis met hulpstuk [46].

Het belang van een goede aandrukkracht tussen de lasdraad en de contactbuis blijkt wel uit de grote variatie aan ontwerpen waarin de contactkracht wordt vergroot. In de **ontwerpen 4 en 5** worden contactbuizen beschreven die door hun vorm zorgen voor een grote aandrukkracht tussen de contactbuis en de draad. Met toenemende slijtage neemt de contactkracht weer af.

Ontwerp 4: Verbetering van het elektrisch contact door de vorm het kanaal in de contactbuis

A.V. Bobrovskii, Improving arrangements for contacts in automatic and semi-automatic welding, Svar. Proiz. 1968 (9) [45].

In dit ontwerp wordt het elektrisch contact verbeterd door de contactkracht van de draad tegen de buis te vergroten.

Om de aandrukkracht van de draad tegen de contactbuis te verhogen kan in een contactbuis een kanaal worden aangebracht dat niet recht is. Een voorbeeld wordt gegeven in figuur A.4. Een contactbuis met een gebogen kanaal wordt Shoe-Type genoemd.

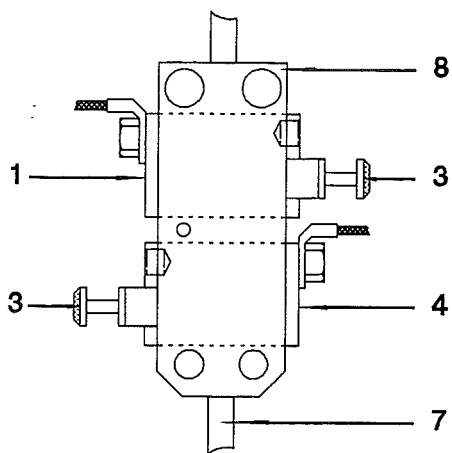
Het zal duidelijk zijn dat de aandrukkracht tussen de draad en de contactbuis tijdens het proces zal afnemen met toenemende slijtage van de contactbuis zelf. In dit ontwerp wordt voorgesteld, om die onderdelen van de contactbuis waar de slijtage het grootst is te vervangen door een koperlegering met een grotere slijtvastheid dan zuiver koper.

Ontwerp 5: Verhoogde contactkracht door een extra hulpstuk buiten de contactbuis

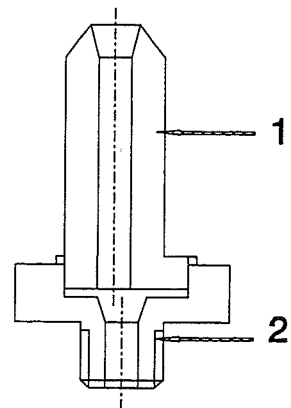
Electrical Engineering Standard 5AA, No. 57900N68, 1968 [46].

Om de contactkracht te verhogen wordt in dit ontwerp de draad tegen het uiteinde van de tip geduwd met behulp van een haakje dat vastgemaakt is aan de contactbuis. Het ontwerp is te zien in figuur A.5. Aan een koperen buisje (1) zit een L-vormig haakje (2) bevestigd. Volgens het octrooi is de enige eis die gesteld wordt aan het materiaal van het haakje, dat de elektrische weerstand over het haakje groter is dan over de uitsteeklengte van de draad tussen de tip en het haakje.

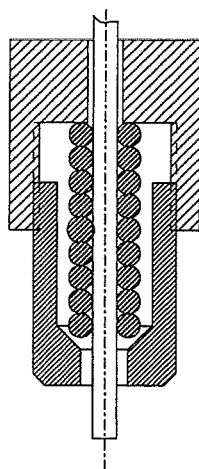
De **ontwerpen 6,7 en 8** beschrijven ook ontwerpen waarvan een grotere aandrukkracht tussen draad en contactbuis het doel is. In deze ontwerpen kan de contactkracht met de hand worden ingesteld. Neemt de contactkracht door slijtage tijdens het proces af, dan kan dat door een betere afstelling weer worden gecompenseerd.



Figuur A.6: contactbuis met instelbare vorm van het kanaal [47].



Figuur A.7: contactbuis met een instelbare vorm van het kanaal [48].



Figuur A.8: contactbuis met een instelbare vorm van het kanaal [49].

Ontwerp 6: Beter elektrisch contact door een instelbare vorm van het kanaal in de contactbuis (1)
M. Rausal, Czechoslovakian Patent, No. 128954, september 1968 [47].

In dit patent wordt een contactbuis beschreven waarin met stelschroeven de contactkracht van de draad tegen de contactbuis kan worden ingesteld. Het ontwerp is te zien in figuur A.6. De contactbuis bestaat uit een huis (8) waarin twee contacthelften (1), (4) bevestigd zijn. Met behulp van een stelschroef (3) kunnen de contacthelften verplaats worden, zodat het kanaal in het tweede stuk (4) niet langer in het verlengde ligt van het kanaal van het eerste stuk (1). Op deze manier is de contactkracht van de draad tegen de contactbuis instelbaar gemaakt.

Ook in dit ontwerp wordt het probleem van een niet gedefinieerde contactkracht bestreden. Meteen uit de tekening blijkt, dat ondanks de goede achterliggende gedachte, dit ontwerp geen waarde heeft door de zeer complexe vorm van het ontwerp.

Ontwerp 7: Beter elektrisch contact door een instelbare vorm van het kanaal in de contactbuis (2)
Zil'bershtein, TS-17 Travelling Welding Machine, 1976 [48].

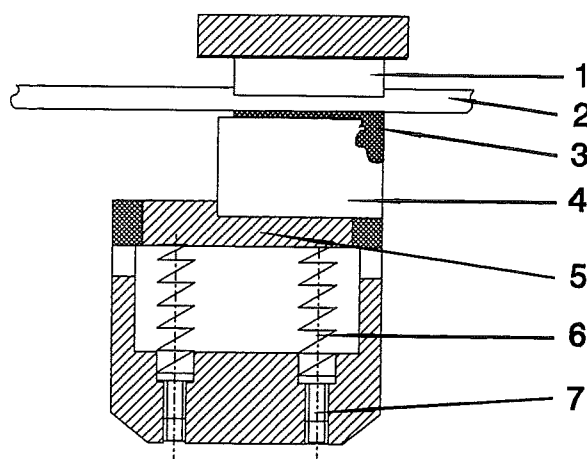
Ook in dit ontwerp kan de grote van de contactdruk van de draad tegen de contactbuis worden ingesteld door de vorm van het kanaal in de contactbuis te veranderen.

In figuur A.7 is te zien dat het bovenste gedeelte (1) met schroefdraad asymmetrische verbonden is met het onderste gedeelte. Door nu de delen verder of minder ver in elkaar te draaien ontstaat een kanaal in de buis met een instelbare bocht.

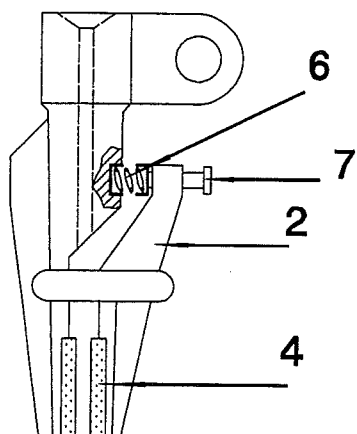
Ook deze oplossing concentreert zich dus geheel op het verhogen van de contactkracht tussen de draad en de contactbuis.

Ontwerp 8: Beter elektrisch contact door een instelbare vorm van het kanaal in de contactbuis (3)
V. Evseev, A contact tip for arc welding, Priority certificate No. 386730 [49].

In dit ontwerp is aandacht besteed aan de vorm van het kanaal in de contactbuis. De contactbuis is te zien in figuur A.8. Het kanaal van de contactbuis is voor het grootste deel zo groot, dat ook de liner in het kanaal past. De diameter neemt aan het einde van de buis af. Door het vastdraaien van de contactbuis komt er spanning te staan op het stukje liner, dat in de contactbuis steekt. Variaties in de aandrukkracht leiden tot variaties in de stand en vorm van het stukje liner. Daarmee verandert dus de loop van de draad door de contactbuis. Met een hogere



Figuur A.9: meerdelige contactbuis [50]



Figuur A.10: contactbuis met ingebouwde veer [51]

aandrukkraft wordt de liner krommer en hoe krommer de liner, des te hoger is de aandrukkraft van de liner tegen de tip van de contactbuis.

Ook dit ontwerp probeert de aandrukkraft van de draad tegen de contactbuis te vergroten. De vorm van de contactbuis is in dit geval bijzonder eenvoudig.

De **ontwerpen 9 en 10** compenseren zelf eventueel optredende slijtage. Een grote contactkracht is in deze ontwerpen tijdens het proces gegarandeerd.

Ontwerp 9: Meerdelige contactbuis voor MIG/MAG-lassen
K. Müller, Patentschrift DDR, No. 66236, April 1969 [50].

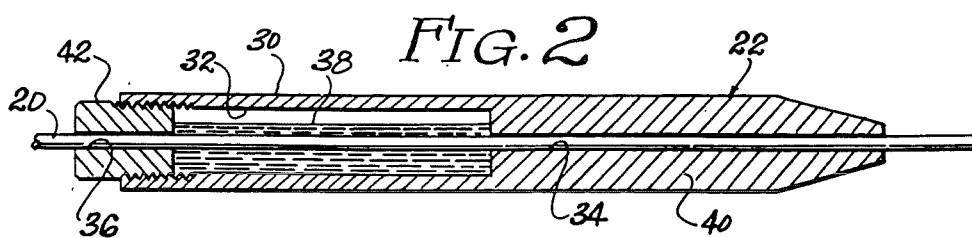
In het ontwerp zijn twee functies die de contactbuis moet uitvoeren gescheiden. Het sturen van de draad wordt uitgevoerd door een V-vormig kanaal van niet geleidend materiaal. De stroomoverdracht vindt plaats door een onderdeel van koper dat tegen de draad geduwd wordt. Een en ander is getekend in figuur A.9. In de figuur loopt de lasdraad (2) langs het niet geleidende onderdeel (1), dat de draad alleen stuurt. De stroom wordt aan de draad geleverd door een koperen blokje (3) dat tussen twee houders (4) op en neer kan bewegen en tegen de draad wordt aangedrukt. De stroom wordt geleverd via blokje (5) dat is verbonden met de stroombron. De drukkracht wordt geleverd door twee veren (6). De grootte van de veerkracht kan worden ingesteld door twee stelschroeven (7).

Door de vorm van het stroomvoerende element, kan slijtage de stroomoverdracht niet verstoren. Zolang het koperen blokje niet geheel is weggesleten en zolang de veerkracht nog voldoende groot is, functioneert het element in principe goed. Ook van dit ontwerp is duidelijk dat de complexiteit en het grote aantal onderdelen de constructie duur en groot maken.

Ontwerp 10: Contactbuis met gedefinieerde aandrukkraft
F. Pospisil, Czechoslovaaks Patent, No. 133446, Oktober 1969 [51].

Dit octrooi beschrijft een contactbuis die tegelijkertijd twee oplossingen: door middel van een veer worden twee contactvlakken tegen elkaar gedrukt, dat levert contactkracht voor een goede stroomoverdracht en het zorgt ervoor dat door slijtage van de contactlaag de stroomoverdracht niet verandert tijdens het proces. Het principe is getekend in figuur A.10. Door middel van een veer (6) wordt een stroomgeleidend onderdeel (4) dat bevestigd is aan een hefboom (2) tegen de lasdraad gedrukt. De aandrukkraft is in te stellen met behulp van een stelschroef (7) die in de hefboom is bevestigd.

INVENTOR
Kalman Nagy
by *Combs, McDougall & Hersh*
Att'ys



Figuur A.11: contactbuis gevuld met kwik [52].

Zoals gezegd levert dit ontwerp de oplossing van twee problemen. De tekening maakt echter duidelijk dat de oplossing zoals deze in de tekening is weergegeven door de omvang geen reële oplossing kan zijn.

In **ontwerp 11** wordt geprobeerd om met behulp van kwik goed elektrisch contact in de contactbuis te waarborgen.

Ontwerp 11: Verbetering elektrisch contact met behulp van kwik
Y. Nagy, Portable welding tip, US patent No. 3230343, Januari 1966 [52].

Het principe van dit octrooi is getekend in figuur A.11. In het huis van de contactbuis (22) zit over de volle lengte een kanaal. Na een inloopstuk (42) is het kanaal breed (32). In dit brede stuk zit een hoeveelheid kwik (38). Het brede gedeelte gaat over in een kanaal met een diameter die net iets groter is dan de diameter van de lasdraad (34).

Tijdens het transport neemt de draad een kleine hoeveelheid kwik mee het smalle gedeelte van de contactbuis in. Door de kwik is het elektrisch contact tussen de draad en de contactbuis over een grote lengte gewaarborgd. Volgens de beschrijving van het octrooi werkt de contactbuis optimaal wanneer dit gedeelte voor 7/8 gevuld is met kwik.

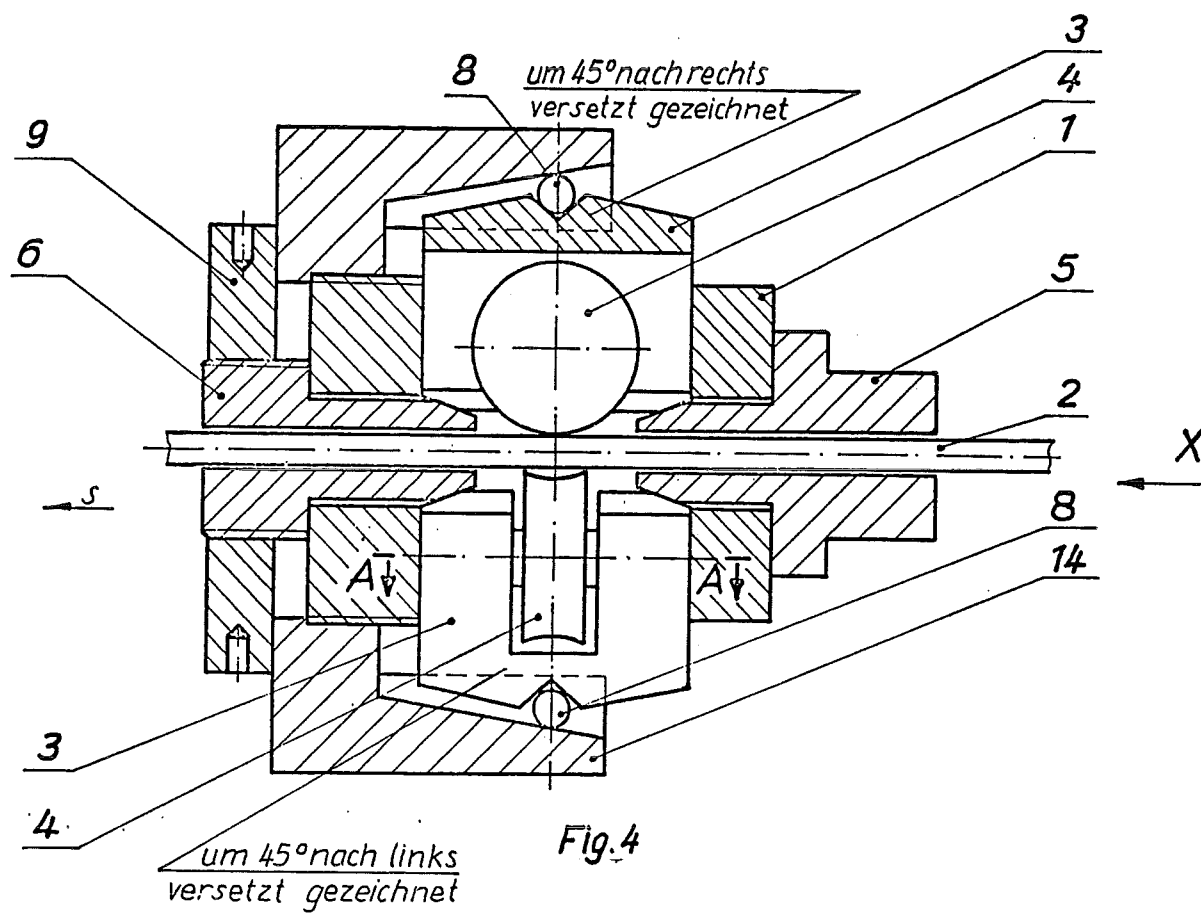
Door de aangedragen oplossing is het elektrisch contact tussen de draad en de contactbuis ongetwijfeld erg goed. Wat de invloed is van het kwik op de las en wat de gevaren zijn voor de lasser tijdens het gebruik van de contactbuis is echter onbekend.

Een bekende manier om de doorvoerbaarheid van lasdraden te vergroten is het aanbrengen van een smeermiddel op de draad. De mechanische weerstand die de draad ondervindt in de contactbuis kan ook omlaag worden gebracht door op de binnenkant van de contactbuis een coating aan te brengen.

Ontwerp 12 bespreekt een middel dat ook de buitenkant van de contactbuis kan beschermen.

Ontwerp 12: Coating van de contactbuis en de gascup
S.L. Anderson, European Patent Application No. 0417468 A1, Augustus 1990 [53].

Het octrooi beschrijft de werking van Wolfraamdisulfide als coating van de contactbuis om de wrijving te laten afnemen en om het gevaar van vastlassen in de contactbuis te voorkomen. Dezelfde coating wordt ook gebruikt voor de gascup. Een gascup met een WS₂-coating vergemakkelijkt het reinigen van de gascup.



Figuur A.13: draadaandrijfsysteem waarmee lasdraden kunnen worden gericht [54].

Het voordeel van de coating is de lage elektrische weerstand en het vermogen van de laag om warmte af te voeren.

Het richten van een lasdraad in het draadaanvoer systeem is een methode om de doorvoerbaarheid te kunnen verhogen en de mechanische weerstand van de lasdraad in het slangenpakket te laten afnemen.

In **ontwerp 13** staat een voorbeeld van zo'n "aanvoer-richt-apparaat.

Ontwerp 13: Richten van staaldraden

A. Neubauer, Patentschrift DDR No. 147827, April 1981 [54].

Dit ontwerp is een draad aanvoersysteem waarin de lasdraden gericht kunnen worden. De constructie is getekend in figuur A.13. In dit draadaanvoersysteem maken de aandrijfwieltjes (1) en (4) een hoek van 45° met de voortlooprichting van de draad en een hoek van 90° met elkaar. Door de constructie kunnen de wieltjes een grote drukkracht uitoefenen op de draad en de draad op die manier richten.

BIJLAGE 2: Contactspanning volgens Hertz

INVULLEN VAN DE VERGELIJKINGEN VAN HERTZ VOOR HET SYSTEEM CONTACTBUIS-LASDRAAD

Voor de gemiddelde druk die optreedt in het contact geldt volgens Hertz:

$$P_m = \frac{F_N}{\pi a b} \quad (55)$$

met: P_m = gemiddelde contactdruk
 F_N = normaalkracht
 a, b = de halve assen van het ellipsvormige contactvlak dat ontstaat tussen de contactpartners

De grootte van respectievelijk a en b volgt uit de volgende vergelijkingen:

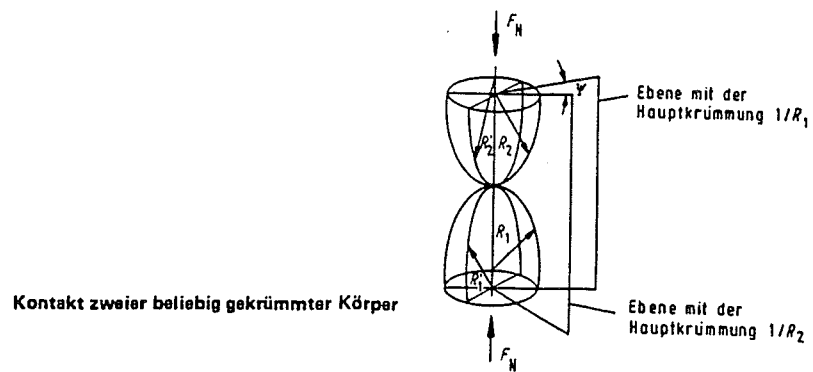
$$a = m \sqrt[3]{\frac{3 F_N (k_1 + k_2)}{4 (B + A)}} \quad (56)$$

$$b = n \sqrt[3]{\frac{3 F_N (k_1 + k_2)}{4 (B + A)}} \quad (57)$$

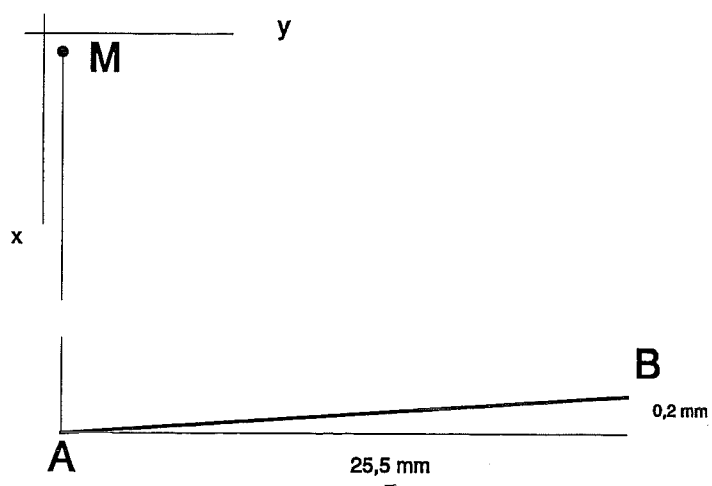
De waarden van k_1 en k_2 zijn afhankelijk van de fysische eigenschappen van het materiaal volgens:

$$k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \quad (58)$$

$$k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (59)$$



Figuur B.1: contact tussen twee gekromde oppervlakken [30].



Figuur B.2: berekening van de kromtestraal van de lasdraad in de contactbuis.

E_1 en E_2 zijn respectievelijk de elasticiteitsmoduli van het materiaal van de contactbuis en van de draad; μ_1 en μ_2 zijn de coëfficiënten voor de dwarscontractie.

De waarden m , n en $(B+A)$ uit de twee vergelijkingen hangen af van de vorm van de twee contactlichamen volgens:

$$\cos \theta = \frac{(B - A)}{(B + A)} \quad (60)$$

waarin:

$$(B - A) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} \right)^2 + \left(\frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} \right) \left(\frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}} \right) \cos 2\psi \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (61)$$

$$(B + A) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \right) \quad (62)$$

De waarden van r_{11} , r_{12} , r_{21} en ψ volgen uit figuur B.1.

Daarbij moet rekening gehouden worden met het feit dat r_{12} en r_{22} in de figuur worden aangeduid als R_1 en R_2 .

r_{11} = de straal van het gat in de contactbuis	= -0,7mm
r_{12} = straal van de afronding van de opening in de contactbuis (bepaald met behulp van een profiel projector)	= 0,1 mm
r_{21} = straal van de doorsnede van de lasdraad	= 0,6 mm
ψ = hoek tussen vlak door R_{11} en R_{22}	= 0°

De waarde van r_{22} , de kromtestraal van de lasdraad in de contactbuis, volgt niet simpelweg uit figuur B.1, maar moet worden berekend

Berekening van R_{22} , de kromtestraal van de lasdraad in de contactbuis

Bij de berekening van de kromtestraal waarmee de lasdraad in de contactbuis ligt, wordt aangenomen dat:

- 1: de lasdraad bij de ingang van de contactbuis tegen de wand aanligt
- 2 de draad de tip van de contactbuis raakt

$\cos \theta$	m	n
0,1000	1,070	0,9362
0,2000	1,150	0,8777
0,3000	1,241	0,8224
0,4000	1,351	0,7694
0,5000	1,486	0,7171
0,6000	1,660	0,6642
0,7000	1,905	0,6080
0,8000	2,292	0,5444
0,9000	3,092	0,4607
0,9900	7,772	0,2866
0,9990	18,54	0,1854
0,9999	39,93	0,1263

Figuur B.3: Tabel van Bayer en Ku [30].

Verder gelden de volgende waarden (zie ook figuur B.2):

Lengte kanaal van de contactbuis	=	25,5 mm
Diameter van het kanaal in de contactbuis	=	1,4 mm
Diameter van de lasdraad	=	1,2 mm

Stel, dat de punten A en B uit figuur B.2 liggen op een cirkelboog met een straal van R, om het middelpunt M.

Voor de cirkel geldt: $x^2 + y^2 = c^2$

In punt A geldt: $x = R$

$$y = 0$$

$$\text{dus: } c^2 = R^2$$

In punt B geldt: $x = (R - 0,2)$

$$y = 25,5$$

$$\text{dus: } (R - 0,2)^2 + 25,5^2 = 0$$

$$R = 1626 \text{ mm}$$

In de berekening van de vorm van het contactoppervlak volgens Hertz moet nu gebruikt worden: $r_{22} = -1626 \text{ mm}$.

INVULLEN VAN DE GEVONDEN WAARDEN

De waarden van r_{11} , r_{12} , r_{21} , r_{22} en ψ moeten nu worden ingevuld in de vergelijkingen (61) en (62). Dat levert als resultaat:

$$(B-A) = 4,88$$

$$(B+A) = 5,12$$

Met behulp van vergelijking (60) wordt vervolgens voor $\cos \theta$ gevonden:

$$\cos \theta = 0,95$$

Met behulp van de Tabel van Bayer en Ku (figuur B.3) zijn vervolgens de waarden van m en n te bepalen [30]. Dat levert als resultaat:

$$m = 5,85$$

$$n = 0,39$$

Bij het gebruik van vergelijking (55) voor de volledigheid nog de volgende opmerking: bij het afleiden van de waarden die in de vergelijking worden ingevuld is voor de berekening van r_{22} aangenomen dat de lasdraad in de contactbuis aanligt bij zowel de tip als de inloop van de contactbuis. Uit metingen bleek inmiddels dat iedere draad op een verschillende manier in de contactbuis aanligt. Wanneer voor alle draden een vaste waarde voor r_{22} wordt gebruikt, wordt maar een kleine fout gemaakt. Deze waarde komt namelijk alleen maar voor in de term $1/r_{22}$. De uitkomst van deze breuk is klein vergeleken met de andere waarden in de vergelijking.

BIJLAGE 3: Afleiding van de vergelijking die de temperatuurstijging in een elektrisch contact beschrijft.

In deze afleiding wordt verondersteld, dat in een elektrisch contact op die plaatsen waar het spanningsverschil tussen de contactpartners gelijk is, de temperatuur ook gelijk zal zijn. Als bovendien wordt aangenomen dat er geen warmteverlies optreedt door straling geldt de volgende relatie [36]:

$$V^2 = 8 \int_{\theta_0}^{\theta_p} \rho \lambda d\theta \quad (63)$$

waarin: V = de spanningsval over het contact (V)
 θ_0 = de omgevingstemperatuur (K)
 θ_p = de maximale temperatuur die in het contact bereikt wordt
 ρ = de elektrische weerstand (Ω)
 λ = de warmtegeleidings-coëfficiënt

Volgens de Wiedemann-Franz wet geldt:

$$\rho \lambda = L\theta \quad (64)$$

waarin L de Lorentz constante is, die op zijn beurt gegeven wordt door [37]:

$$L = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right) \quad (65)$$

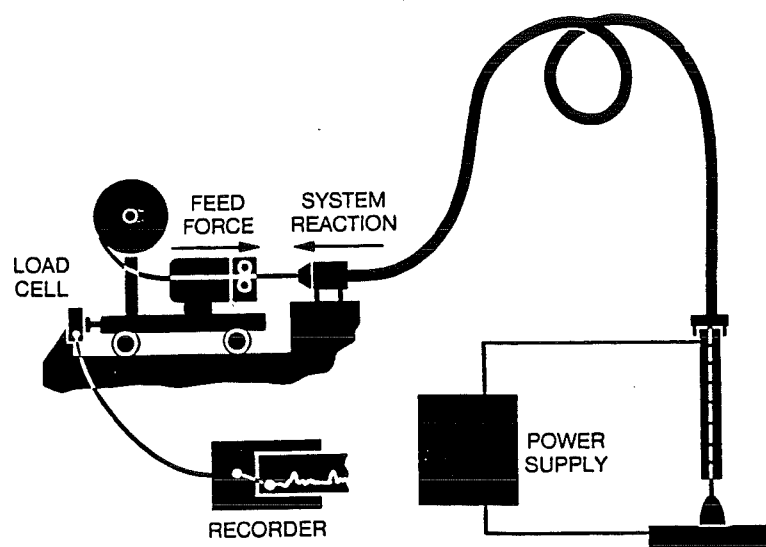
In deze vergelijking is k de Boltzmann constante en e de lading van een elektron. Daarmee komt de waarde van L op $2,45 \cdot 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{graad}^2$.

De uitwerking van bovenstaande vergelijkingen leidt tot:

$$V = [4L(\theta_p^2 - \theta_0^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (66)$$

Wanneer nu wordt aangenomen dat $\theta_p \gg \theta_0$ dan kan dit vereenvoudigd worden tot:

$$\theta_p = \frac{V}{2\sqrt{L}} \quad (67)$$



Figuur C.1: principe van de montage van de loadcel voor het meten van de mechanische weerstand die een lasdraad bij het doorlopen van het slangenpakket ondervindt

BIJLAGE 4: De constructie van de meetopnemers van de reactiekracht in het draadaanvoersysteem.

Op de hengel van het in paragraaf genoemde draadaanvoersysteem is een tweetal load-cellen gemonteerd om de weerstand die de lasdraad ondervindt bij het transport door aanvoersysteem te kunnen meten.

Eén van de cellen is zo gemonteerd dat alleen de weerstand die de draad ondervindt bij het passeren van de toorts wordt geregistreerd. De andere is zo gemonteerd dat zowel de weerstand in het slangenpakket als de weerstand in de toorts worden gemeten.

Het principe van de plaatsing van de meters is weergegeven in figuur C.1. Tijdens de doorvoer van de draad levert het slangenpakket een reactiekracht op de draad deze reactiekracht wordt gemeten met behulp van een load-cel, die is aangesloten op een recorder.

BIJLAGE 5: Rekenen aan draden met een niet massieve doorsnede

Voor het geval wanneer een staaf met een massieve doorsnede volledig plastisch vervormt, geldt voor het moment dat over de doorsnede staat:

$$M_b = \frac{1}{6} \sigma_{0,2} D^3 \quad (68)$$

Wanneer de doorsnede niet massief is, maar de draad een wanddikte heeft van d waarbij geldt: $d = D_1 - D_2$

Dan is het moment over deze niet massieve doorsnede in het geval van volledige plastische deformatie te beschrijven als:

$$M_b = \frac{1}{6} \sigma_{0,2} (D_1^3 - D_2^3) \quad (69)$$

Stel dat de diameter van de buis (D_1) 1,2 mm en de wanddikte van de buis (d) 0,2 mm bedraagt, dan geldt:

$$D_1 = 1,2 \text{ mm}$$

$$D_2 = 0,8 \text{ mm}$$

Deze waarden ingevuld in vergelijking (69) levert als resultaat:

$$M_b = \frac{1}{6} \sigma_{0,2} \left(\frac{19}{27} D_1^3 \right) \quad (70)$$

Dat betekent dus dat in vergelijking met een massieve doorsnede 19/27 van de doorsnede meewerkt om het moment dat op de staaf is aangelegd op te vangen. Dat betekent **70%** van de oorspronkelijke doorsnede de deformatie kan opvangen.

