

**MATERIAALTRANSPORT EN SPATGEDRAG
TIJDENS HET
KORTSLUITBOOGLASSEN**

R.J.A. VAN KAMPEN

Afstudeerverslag

TU Delft

Faculteit der Scheikundige Technologie en der Materiaalkunde

Sectie Lastechnologie en NDO

April 1992

Afstudeerhoogleraar: Prof. Dr. G. den Ouden

Begeleider: Ir. M.J.M. Hermans

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	i
SUMMARY	ii
SYMBOLENLIJST	iii
1. INLEIDING	1
2. THEORETISCHE ACHTERGRONDEN VAN HET MIG/MAG LASSEN	3
2.1 De werkgebieden bij het MIG/MAG lassen	3
2.2 Het materiaaltransport en spatverlies	4
2.3 Het verloop van de stroom en spanning tijdens het kortsluitbooglassen	6
2.4 De karakteristiek van de stroombron en de lasboog	8
2.4.1 De instellingen van de stroombron	8
2.4.2 De invloed van de werkafstand	11
2.5 Modelleren van het materiaaltransport	12
2.5.1 Materiaaltransport zonder invloed van de elektrische stroom	12
2.5.2 Materiaaltransport onder invloed van de elektrische stroomsterkte	14
2.6 De beweging van het lasbad	15
2.7 De invloed van de chemische samenstelling van de lasdraad	17
3. EXPERIMENTEEL	19
3.1 Meetopstelling	19
3.2 De meting van stroom en spanning	20
3.3 Experimenten	22
4. MEETRESULTATEN	24
4.1 De stroomsterkte en spanning	24
4.1.1 De kortsluitfrequentie en het spatverlies	24
4.1.2 De piekstroom en -spanning	26
4.1.3 De boog- en kortsluittijd	26
4.1.4 Het kengetal	27
4.1.5 De standaardafwijking	27

4.1.6 Het kortsluitvermogen	27
4.2 De verschillende instellingen van de stroombron	29
4.2.1 De zelfinductie	29
4.2.2 De instelling van de U-I karakteristiek	31
4.3 De invloed van de werkafstand	32
4.4 De instelling van de stroombron buiten de maximale kortsluitfrequentieband	33
5. DISCUSSIE	34
5.1 De lengte van de vloeistofbrug en de lasboog	34
5.2 De invloed van de vloeistofbruglengte op het materiaaltransport	36
5.2.1 De vloeistofbruglengte bij verschillende spanningen en stroomsterktes	36
5.2.2 De invloed van de zelfinductie en de U-I karakteristiek	37
5.2.3 De vloeistofbruglengte bij verschillende werkafstanden	38
5.2.4 De lengte van de vloeistofbrug buiten de maximale kortsluitfrequentieband	38
5.3 De invloed van de oscillatiebeweging van het lasbad	39
5.3.1 De geometrie van het lasbad	39
5.3.2 De invloed van de U-I karakteristiek en de zelfinductie op de oscillatiebeweging	41
5.4 De invloed van de chemische samenstelling van de lasdraad	43
5.5 Beschrijving werkgebieden	45
6. CONCLUSIES	47
7. AANBEVELINGEN	48
LITERATUUR	49

SAMENVATTING

Experimenten zijn uitgevoerd om het materiaalverlies tijdens het kortsluitbooglassen te bestuderen. Metingen zijn gedaan met het lassen van constructiestaal onder het beschermgas 85% Ar 15% CO₂. In eerste instantie zijn de ingestelde stroom en spanning gevarieerd. Uit experimenten is gebleken dat het laagste spatverlies optreedt bij een korte boogtijd en maximale kortsluitfrequentie. Met toenemen van de boogspanning wordt de maximale kortsluitfrequentie bereikt bij hogere waarden van de stroomsterkte. In een stroom-spanning diagram kunnen de optimale procescondities worden weergegeven d.m.v. een monotoon stijgende band.

Vervolgens is gekeken naar de invloed van instelling van zelfinductie en de U-I karakteristiek op het proces.

Tenslotte is de invloed van de werkafstand op het kortsluitboogproces bestudeerd.

Wanneer de werkafstand vergroot wordt neemt de kortsluitfrequentie toe en het spatverlies af, totdat de gasbescherming niet meer voldoende is, het spatverlies neemt dan weer toe.

Voor een regelmatig proces met een laag spatverlies is het van belang dat de vloeistofbrug niet te krachtig verbroken wordt. De kracht nodig om de vloeistofbrug te verbreken is gerelateerd aan de lengte van de vloeistofbrug en de oppervlaktespanning van het vloeibare metaal. Als de lengte van de vloeistofbrug afneemt of als de oppervlaktespanning toeneemt, moet de kracht voor het verbreken van de vloeistofbrug ook toenemen.

Wanneer de kracht die de vloeistofbrug moet verbreken te groot is, zal dit gepaard gaan met een toename van het spatverlies. Als de kracht te klein wordt is de vloeistofbrug stabiel en neemt de kortsluittijd toe, het proces wordt onregelmatig.

De kortsluitfrequentie is tevens afhankelijk van de natuurlijke oscillatiebeweging van het lasbad. De oscillatiefrequentie is gerelateerd aan de geometrie van het lasbad en de oppervlaktespanning van het vloeibare metaal. In de band van maximale kortsluitfrequentie is de oscillatiefrequentie ongeveer gelijk aan de kortsluitfrequentie.

Omdat de oppervlaktespanning van het vloeibare metaal zowel invloed heeft op de oscillatiefrequentie als op de stabiliteit van de vloeistofbrug is het voor de regelmaat van het proces van belang dat deze constant blijft. Aangezien de chemische samenstelling de oppervlaktespanning beïnvloedt, mag de chemische samenstelling van de lasdraad niet te veel variëren.

SUMMARY

Experiments were carried out in order to investigate material loss during short circuiting welding. Bead on plate welds were made on mild steel Fe 360 with 85% Ar 15% CO₂ shielding gas. First spatter loss and process regulations were determined for several values of welding current and voltage. From the results of the experiments it seemed that a short arcing time and maximum of the short circuiting frequency is associated with the lowest spatter loss. When the voltage is increased the current has to be raised in order to reach the maximal short circuiting frequency. In a current-voltage diagram the optimal welding conditions can be displayed by a continuous rising zone.

Secondly the influence of the choke and the U-I characteristic of the power source on the short circuiting process were investigated.

Furthermore the influence of the working distance on the short circuiting process was studied. When the working distance increases the short circuiting frequency will increase and the spatter loss will reduce until the protection of the shielding gas becomes insufficient so that the spatter loss will increase.

For a stable process it is important that the liquid bridge formed during the short circuit will not break in an explosive way. The force needed to break the bridge depends on the length of the bridge and the surface tension of the liquid metal.

When the length of the bridge decreases or the surface tension increases, a larger force is needed to break the liquid bridge. When the force is too excessive, the breakup of the liquid bridge will result in an increasing spatter loss. In case the force is too small the liquid bridge will be stable and the short circuiting time will increase. The process is unstable and the spatter loss is high.

Another important feature of the short circuiting GMAW process is the oscillation of the weld pool. A relation is found to exist between the oscillation frequency and the weld pool geometry. In the zone of lowest spatter loss, the short circuiting frequency is equal to the oscillation frequency of the weld pool.

The surface tension of the metal influences the oscillation frequency of the weld pool and the stability of the liquid bridge. Surface tension has to be constant to give a stable process. Because the chemical composition influences the surface tension, variations in chemical compositions should be avoided over the length of the wire.

SYMBOLENLIJST

B	magnetische inductie
c	constante
d	diameter
D	diameter
f	frequentie
F	kracht
g	gravitatie versnelling
H_R	weerstandsverhitting
I	stroom
I_B	boogstroom
I_{gem}	gemiddelde stroom
I_P	piekstroom
J	stroomdichtheid
KF	kortsluitfrequentie
KG	kengetal
L	lengte
L_b, L_b^*	specifieke lengte vloeistofbrug
L_d	specifieke lengte druppel
L_w	werkafstand
L_z	zelfinductie
P	druk
PK	kortsluitvermogen
R	straal, weerstand
Rb	specifieke straal
SV	spatverlies
t	tijd
t_B	boogtijd
t_K	kortsluittijd
U	spanning
U_B	boogspanning
U_{gem}	gemiddelde spanning
U_M	minimale spanning

α	constante
γ	oppervlaktespanning
ρ	dichtheid
μ	magnetische permeabiliteit

1. INLEIDING

Het MIG/MAG lassen wordt in de industrie steeds meer toegepast voor het lassen van staal en non-ferrometalen. Dit gaat ten koste van de andere lasprocessen zoals het lassen met beklede elektroden. Het MIG/MAG lassen is een booglasproces, het metaal wordt tot smelten gebracht door een elektrische boogontlading. Om een lasverbinding van een goede kwaliteit te verkrijgen, wordt het gesmolten materiaal door een beschermgas van de omgevingslucht afgeschermd. Dit gas kan inert zijn: argon, helium of een mengsel van beide. In dit geval spreekt men van MIG (metal inert gas) lassen. Aan het inerte gas kunnen actieve componenten toegevoegd worden zoals, CO_2 , H_2 of O_2 . Ook kan zuiver CO_2 gebruikt worden, in deze gevallen spreekt men van MAG (metal active gas) lassen.

Bij het MIG/MAG lassen zijn verschillende varianten te onderscheiden.

Bij het open booglassen wordt een constante stroomsterkte gebruikt en een constante lasspanning. De druppels gaan over van elektrode naar het lasbad zonder dat er kortsluiting plaatsvindt.

Bij het pulserend lassen wordt gebruik gemaakt van een variërende gelijkstroom. Per stroompuls kunnen één of meerdere druppels afgesplitst worden, de warmte-inbreng is laag.

Bij het kortsluitbooglassen maakt de elektrode regelmatig contact met het lasbad. Hierbij dooft de lasboog en loopt de lasstroom via een vloeistofbrug van de elektrode naar het lasbad. Na het verbreken van de vloeistofbrug zal de lasboog weer ontsteken en zal het hele proces zich herhalen.

Het kortsluitbooglassen blijkt zeer geschikt voor het lassen van dunne platen door de lage warmte-inbreng. Verder is het mogelijk om dikkere platen in positie te lassen. De zwaartekracht is niet de dominante kracht die het materiaaltransport bepaald, bovendien is het volume van het smeltbad gering.

Met het kortsluitbooglassen kunnen hoge lassnelheden bereikt worden. Verder is het proces geschikt voor automatisering. Het kortsluitbooglassen wordt gekenmerkt door een relatief hoog percentage spatten. Spatten zijn nadelig omdat ze materiaalverlies opleveren en kunnen leiden tot onderbrekingen in het lasproces. Spatten kunnen zich afzetten in het mondstuk, waardoor poreusheid optreedt door gasturbulenties. Daarnaast kunnen spatten hechten op het werkstuk en de lasapparatuur.

Om het materiaaltransport tijdens het kortsluitbooglassen te karakteriseren en inzicht te krijgen in het spatgedrag is in het kader van de afstudeeropdracht het kortsluitboogproces bestudeerd bij het lassen van constructiestaal.

In hoofdstuk 2 zullen eerst de theoretische achtergronden van het MIG/MAG lassen aan de orde komen. In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan het materiaaltransport en de eigenschappen van het kortsluitboogproces. Omdat bij dit laatste onderwerp de stroombron van belang is zal hierop verder worden ingegaan. Vervolgens wordt de beweging van het lasbad besproken en de invloed van de chemische samenstelling op het materiaaltransport. In hoofdstuk 3 worden de gebruikte meetopstelling en de meetprocedures beschreven. In hoofdstuk 4 worden de meetresultaten weergegeven, met aansluitend in hoofdstuk 5 de discussie. Besloten wordt met een aantal conclusies en aanbevelingen.

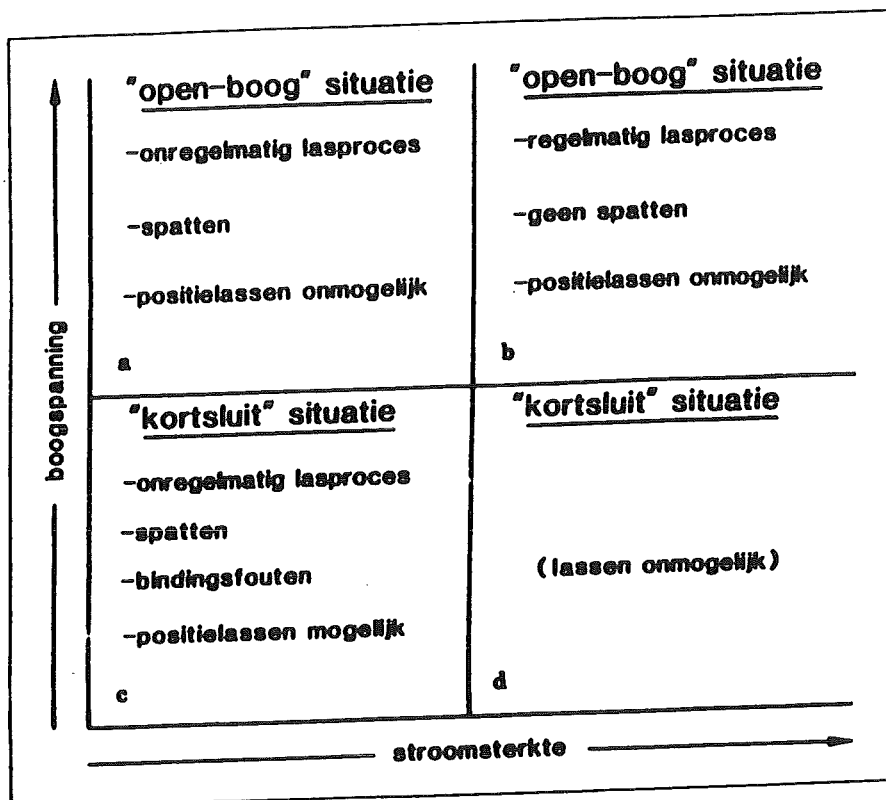


Fig. 1 Schematische weergave van de werkgebieden bij het MIG/MAG lassen (ref. 1).

2. THEORETISCHE ACHTERGRONDEN VAN HET MIG/MAG LASSEN

Omdat bij het MIG/MAG lassen verschillende varianten mogelijk zijn zullen deze eerst kort beschreven worden.

Bij ieder proces zijn krachten werkzaam die het materiaaltransport bepalen, de dominante krachten zijn echter in ieder proces verschillend. Omdat de stroombron en de instellingen van de stroombron bepalend zijn voor het materiaaltransport en de spatverliezen, worden deze hier eveneens besproken.

2.1 De werkgebieden bij het MIG/MAG lassen

Afhankelijk van de ingestelde stroom en spanning is het lasproces een open boog- of een kortsluitboogproces.

Bij het kortsluitbooglassen vindt kortsluiting plaats tussen draad en werkstuk, bij het open booglassen gebeurt dit niet.

Bij een hoge boogspanning vindt geen kortsluiting plaats, afhankelijk van de stroom zal het materiaaltransport van het "globular" of van het "spray-transfer" type zijn. Bij lage stroomsterkte is de overgang globulair. Dit zijn grove druppels die onregelmatig overgaan van de lasdraad naar het lasbad. Als de stroomsterkte verhoogd wordt zal bij een bepaalde kritische stroomsterkte het materiaaltransport overgaan naar spray-transfer, kleine goed gerichte druppels gaan regelmatig over van de draad naar het lasbad. Boven de kritische stroomsterkte neemt de druppelfrequentie ook sterk toe. De kritische stroomsterkte is afhankelijk van de uitsteeklengte, de diameter en de chemische samenstelling van de lasdraad.

Bij verlaging van de spanning zal op een gegeven moment het open booglassen overgaan in het kortsluitbooglassen. Tijdens het kortsluitbooglassen dooft de boog op het moment van kortsluiting en zal de boog na het verbreken van de kortsluiting weer ontsteken. De warmte-inbreng is door het regelmatig doven van de boog vrij laag. Hierdoor is de kans op bindingsfouten bij het kortsluitbooglassen ook groter.

Bij veel hogere stroomsterkte kan "stubbing" optreden als de draadsnelheid groter wordt dan de neersmeltsnelheid. Bij "stubbing" stoot de lasdraad regelmatig op de bodem van het lasbad.

In figuur 1 zijn de verschillende gebieden aangegeven met de daarbij behorende kenmerken (ref. 1).

2.2 Het materiaaltransport en spatverlies

Bij het MIG/MAG lassen wordt onder spatten verstaan: metaal dat niet terecht komt in het lasbad door verlies van gesmolten metaal van de elektrode of uit het smeltbad.

De oorzaken van spatten kunnen ruwweg ingedeeld worden in (ref. 2):

1. explosieve gasontwikkelingen;
2. elektromagnetische krachten;
3. herontsteking van de boog na kortsluiting;
4. impact van de druppel.

Het spatverlies bij het MIG/MAG lassen hangt sterk af van de krachten die het materiaaltransport bepalen.

Bij het open booglassen is de belangrijkste oorzaak van het spatten, de vorming van CO in de druppel. Door deze gasvorming kunnen explosies optreden waarbij fijne spatten vrijkomen. Daarnaast kunnen spatten ontstaan bij de globulaire overgang wanneer grote druppels in het smeltbad plonzen.

Bij het kortsluitbooglassen ontstaan fijne spatten, als de vloeistofbrug tussen elektrode en druppel verbroken wordt. Daarnaast ontstaan grote druppels wanneer een gedeelte van de draad weggeworpen wordt door grote explosieve krachten die de vloeistofbrug verbreken. Als laatste kunnen nog de spatten genoemd worden die ontstaan bij het starten van het lasproces, in dit geval is nog geen smeltbad aanwezig en maakt de nog niet vloeibare draad kortsluiting met het werkstuk. Tijdens deze kortsluiting ontstaan draadvormige spatten.

Omdat tijdens de uitgevoerde experimenten alleen het kortsluitboogproces bekeken is, zal verder hoofdzakelijk op dit proces ingegaan worden.

Tijdens het kortsluitbooglassen zijn twee fasen aan te geven: de kortsluitfase en de boogfase. Tijdens de boogfase zal aan het draaduiteinde druppelgroei optreden. De groei van deze druppel gaat door totdat de druppel contact maakt met het lasbad. Op het moment van kortsluiting tussen lasbad en draad begint de tweede fase, de kortsluitfase. Bij het kortsluitbooglassen zal tijdens de boogfase geen materiaaltransport optreden van de lasdraad naar het lasbad. Dit gebeurt alleen tijdens de kortsluitfase. Gedurende het lassen zijn verschillende krachten werkzaam die het materiaaltransport bevorderen en tegenwerken. Deze krachten zijn:

a. De gravitatiekracht.

Ten gevolge van de gravitatiekracht zal de druppelafsplitsing bevorderd worden wanneer onder de

hand gelast wordt. In positie werkt de zwaartekracht de druppelafplitsing natuurlijk tegen.

b. De oppervlaktespanning.

Het streven naar een zo laag mogelijke oppervlakte-energie zal de druppelafplitsing tegenwerken zolang de druppel geen contact maakt met het lasbad. Als het contact tussen druppel en lasbad optreedt zal de oppervlaktespanning de vloeistofbrug verbreken. Dit is echter alleen het geval als de lengte van de vloeistofbrug niet te klein is.

c. Elektromagnetische krachten.

Door de interactie tussen de elektrische stroom en het hierdoor geïnduceerde magnetische veld wordt op een druppel of een vloeistofbrug met een volume V een kracht uitgeoefend ter grootte van:

$$\vec{F} = \int_V \vec{J} \times \vec{B} dV \quad (1)$$

waarin B de magnetische inductie en J de elektrische stroomdichtheid is.

De elektromagnetische kracht, ook wel Lorentzkracht genoemd, heeft een horizontale (pinchkracht) en een verticale component. De Lorentzkracht is evenredig met het kwadraat van de stroomsterkte en zal pas van invloed worden boven 200A. Bij het kortsluitbooglassen zal de Lorentzkracht niet van grote invloed zijn tijdens de boogfase omdat de stroomsterkte vrij laag is (50-100A). De Lorentzkracht wordt groter op het moment van kortsluiting omdat de stroomsterkte exponentieel toeneemt (300-400A).

d. De plasmastroming.

De contractie van de lasboog die optreedt t.g.v. de Lorentzkracht kan aanleiding geven tot drukverschillen. Door dit drukverschil kan een plasmastroming ontstaan van het gecomprimeerde naar het niet gecomprimeerde deel van de lasboog. Omdat, zoals al eerder vermeld, de stroomsterkte tijdens de boogfase vrij laag is, zal de plasmastroming geen grote invloed op het materiaaltransport uitoefenen tijdens het kortsluitbooglassen.

e. Gasuitbarstingen.

Tijdens het lassen kunnen reacties optreden waarbij gassen vrijkomen (CO). Het vrijkomen van deze gassen verloopt vaak vrij explosief.

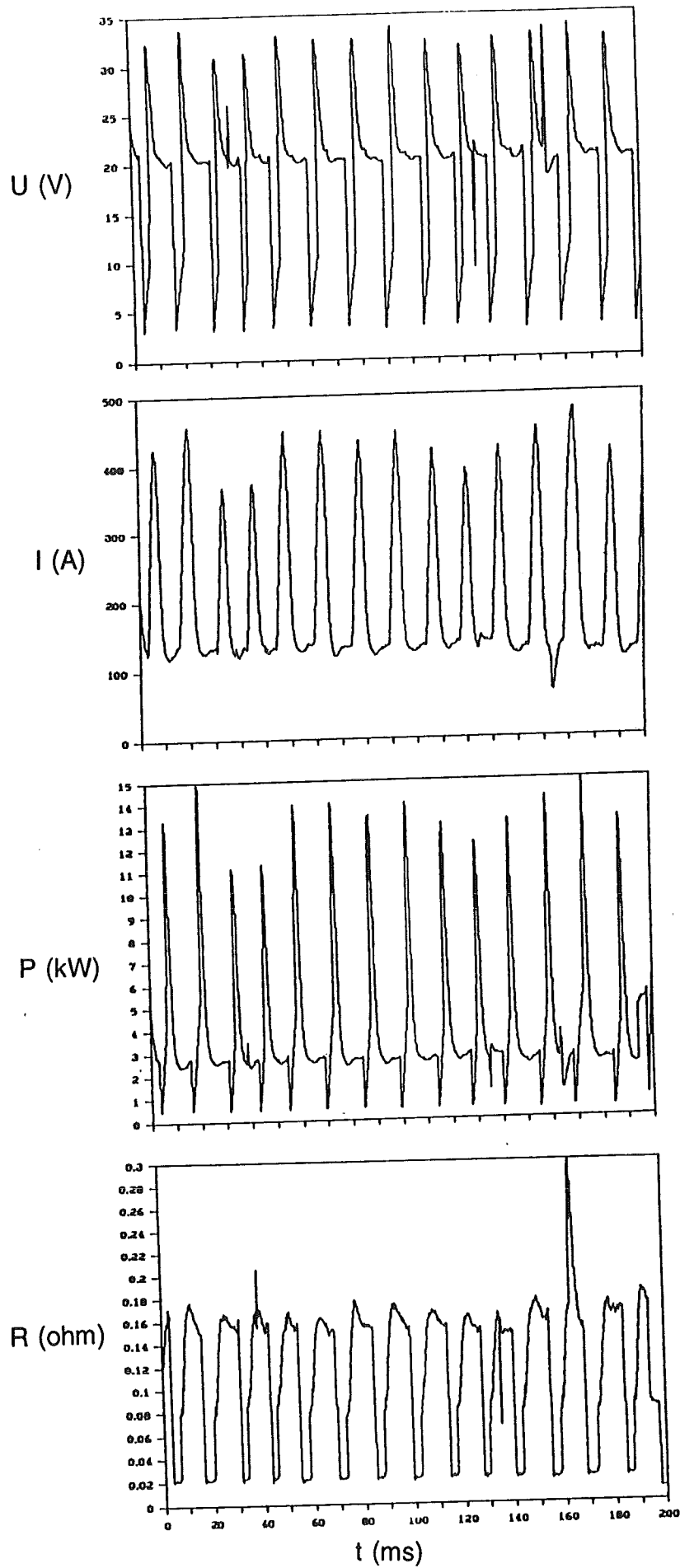


Fig. 2 Het verloop van de spanning, stroom, vermogen en weerstand tijdens het kortsluitbooglassen.

2.3 Het verloop van stroom en spanning tijdens het kortsluitbooglassen

Het stroom- en spanningsverloop tijdens het kortsluitbooglassen is weergegeven in figuur 2. Op het moment dat de lasdraad kortsluiting maakt met het lasbad, zal de spanning abrupt afnemen terwijl de stroom aanzienlijk toeneemt. De stroom neemt op het moment van kortsluiting sterk toe omdat de afname van de weerstand zeer groot is. De afname van de weerstand is ook weergegeven in de figuur. De weerstand neemt af omdat de lasboog, waarbij de geleiding afhangt van het aantal vrije elektronen en de ionisatiegraad in de lasboog, een veel grotere weerstand heeft dan de vloeibare lasdraad. Op het moment dat de vloeistofbrug verbroken wordt zal de lasboog weer ontsteken. Hierbij neemt de spanning weer toe.

De stroom neemt tijdens de boogperiode af, de snelheid waarmee dit gebeurt hangt af van de inductie van de stroombron.

Het verloop van het vermogen ($P=U \times I$), is ook gegeven in figuur 2. Zoals uit de figuur blijkt is het toegevoerde vermogen maximaal op het moment dat de vloeistofbrug verbroken wordt. Het toegevoerde vermogen is tijdens de kortsluiting minimaal. De warmte-inbreng die afhangt van het toegevoerde vermogen, is daarom tijdens de boogfase hoger dan gedurende de kortsluitfase.

De maximale temperatuur van het lasbad ligt rond de 1900 K. In het insnoeringsgebied van de vloeistofbrug wordt de stroomdichtheid erg hoog. Hierdoor kan de temperatuur plaatselijk oplopen tot 8500 K (ref. 3).

Figuur 3 a geeft nogmaals schematisch het verloop van de stroom en spanning als functie van de tijd met hierin:

- t_1 = einde van de kortsluittijd;
- t_2 = begin van de boogperiode;
- t_3 = einde van de boogperiode;
- t_4 = begin van de kortsluittijd.

De stroom en spanning kunnen ook tegen elkaar uitgezet worden, de vierhoek die door de stroom en spanning doorlopen wordt is gegeven in figuur 3b, de verschillende tijden die bij de punten horen (t_1 , t_2 , t_3 en t_4) zijn in deze figuur ook aangegeven.

Als het proces een regelmatig verloop heeft dan doorloopt de stroom en spanning de vierhoek tegen de wijzers van de klok in, zoals in figuur 4a.

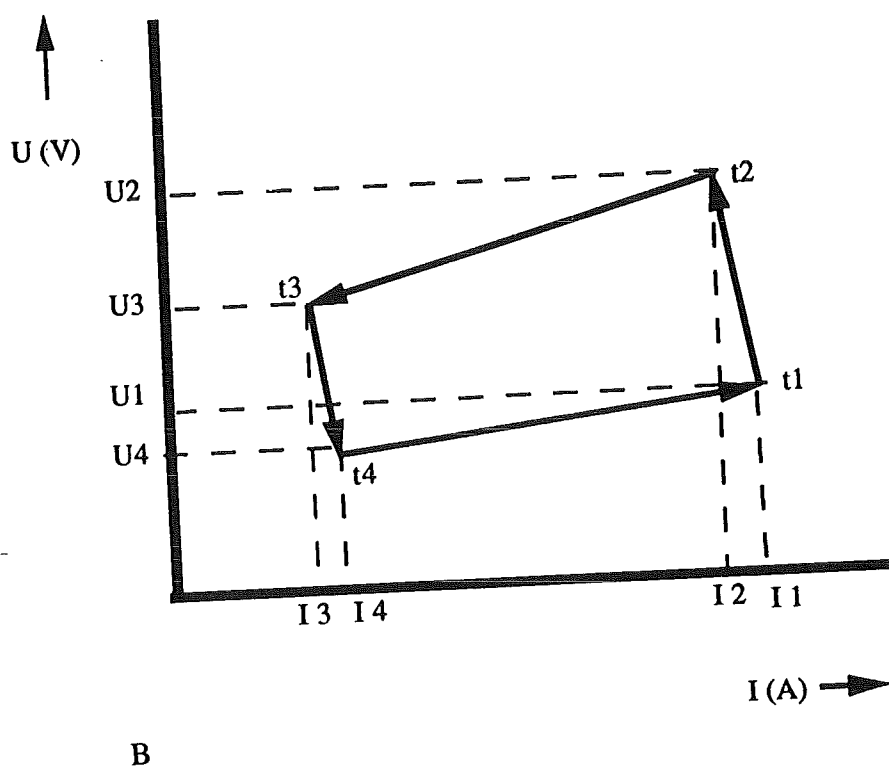
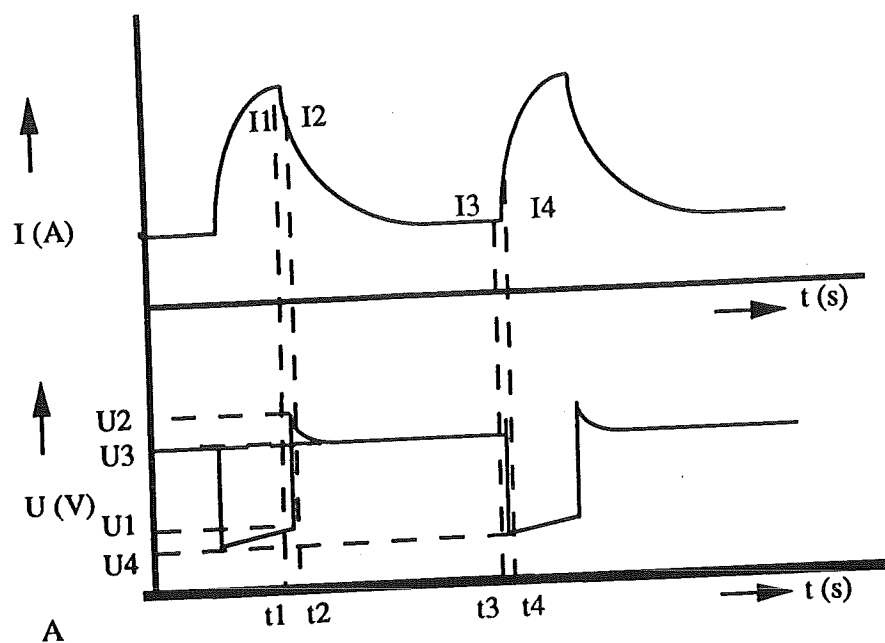


Fig. 3 a) Schematische weergave van de stroom en spanning bij het kortsluitbooglassen.
b) De spanning uitgezet tegen de stroom.

Treden onregelmatigheden in het proces op dan zal het verloop er uitzien zoals gegeven in figuur 4b. De lijnen volgen niet altijd de vierhoek, aan de lijnen die over $I=0$ lopen is te zien dat de lasboog niet meer ontstoken is. Uit de spreiding van de lijnen bij de maximale I blijkt of er grote verschillen in de piekstroom optreden.

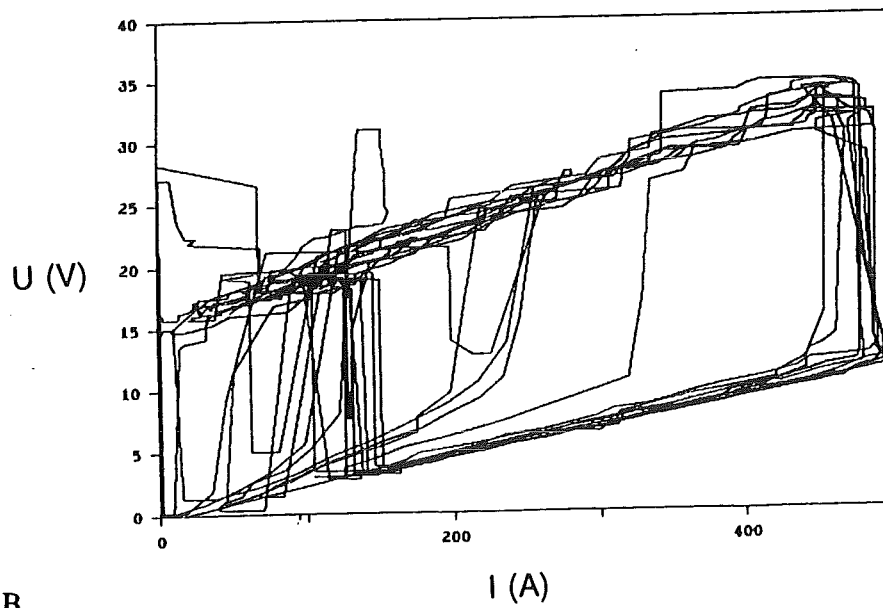
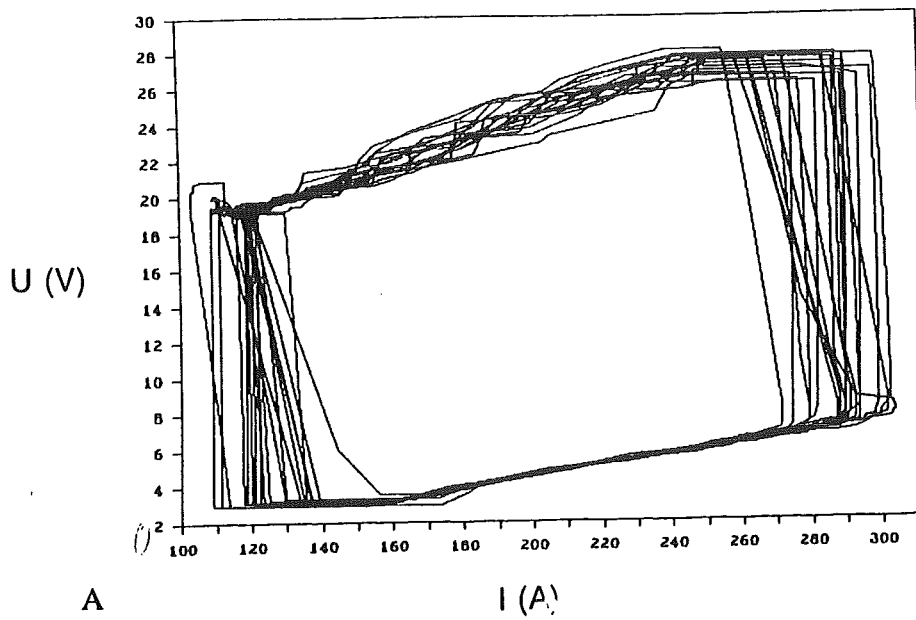


Fig. 4 a) De spanning tegen de stroom bij een regelmatig proces.
b) De spanning tegen de stroom bij een onregelmatig proces.

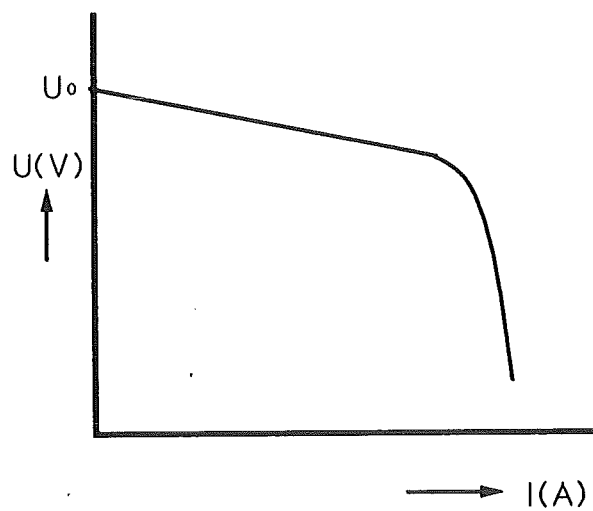


Fig. 5 De karakteristieke lijn van de stroombron.

2.4 De karakteristiek van de stroombron en de lasboog

Voor het kortsluitbooglassen wordt altijd gelijkstroom gebruikt. De stroombron heeft een vlakke U-I karakteristiek; de stroom kan variëren over een groot gebied terwijl de ingestelde spanning vrijwel gelijk blijft. Deze stroombron is zeer geschikt voor het kortsluitbooglassen omdat een sterke terugval in spanning op het moment van kortsluiting zorgt voor een grote toename van de stroom. Hierdoor wordt de vloeistofbrug verbroken en zal de boog sneller ontsteken na het verbreken van de kortsluiting. De karakteristiek van de stroombron is in werkelijkheid niet recht maar zal er meer uitzien zoals gegeven in figuur 5. Dit komt onder andere omdat de maximale stroom die een stroombron kan leveren beperkt is.

Bij het kortsluitbooglassen wordt een bepaalde open spanning op de lasbron ingesteld, de lasstroom wordt geregeld door de draadaanvoersnelheid. De draadaanvoersnelheid is gedurende het kortsluitbooglassen constant. Om de draad met dezelfde snelheid aan te voeren als neer te smelten is een bepaalde stroomsterkte nodig. De draadsnelheid wordt ingesteld en de stroomsterkte past zich automatisch aan.

Bij een stabiele boog van een bepaalde lengte L (zie fig. 6) hoort een karakteristieke lijn van de spanning en stroom. Dit wordt de boogkarakteristiek genoemd. Voor het stabiel branden van de lasboog moet de stroombron de stroom en spanning leveren die bij de karakteristiek van de lasboog horen. Het snijpunt van de werklijn van de stroombron en de lasboog wordt het werkpunt genoemd (zie fig. 6).

De boogkarakteristiek verschuift als de booglengte verandert. Bij een grotere booglengte zal de lijn naar boven verschuiven en bij een kleinere afstand zal de lijn naar beneden verschuiven.

Door de vlakke karakteristiek van de stroombron is het proces in hoge mate zelfregelend gedurende de boogfase. Als de booglengte om een of andere reden groter zou worden, zal de stroom hierdoor gaan dalen en neemt de neersmeltsnelheid af. De booglengte zal nu door de lagere neersmeltsnelheid kleiner worden. In het geval dat de booglengte afneemt zal precies het omgekeerde gebeuren. De spanning zal afnemen, de stroomsterkte neemt toe en door de toenemende neersmeltsnelheid zal de booglengte weer toenemen.

2.4.1 De instellingen van de stroombron

De toename van de stroom en het maximum van de stroom aan het einde de kortsluitfase bepaalt de manier van verbreken van de vloeistofbrug. Als de toename van de stroom zeer groot is en de stroompiek hoog ligt, kan de verbreking van de vloeistofbrug zeer explosief verlopen. Deze explosieve verbreking kan een groot spatverlies veroorzaken.

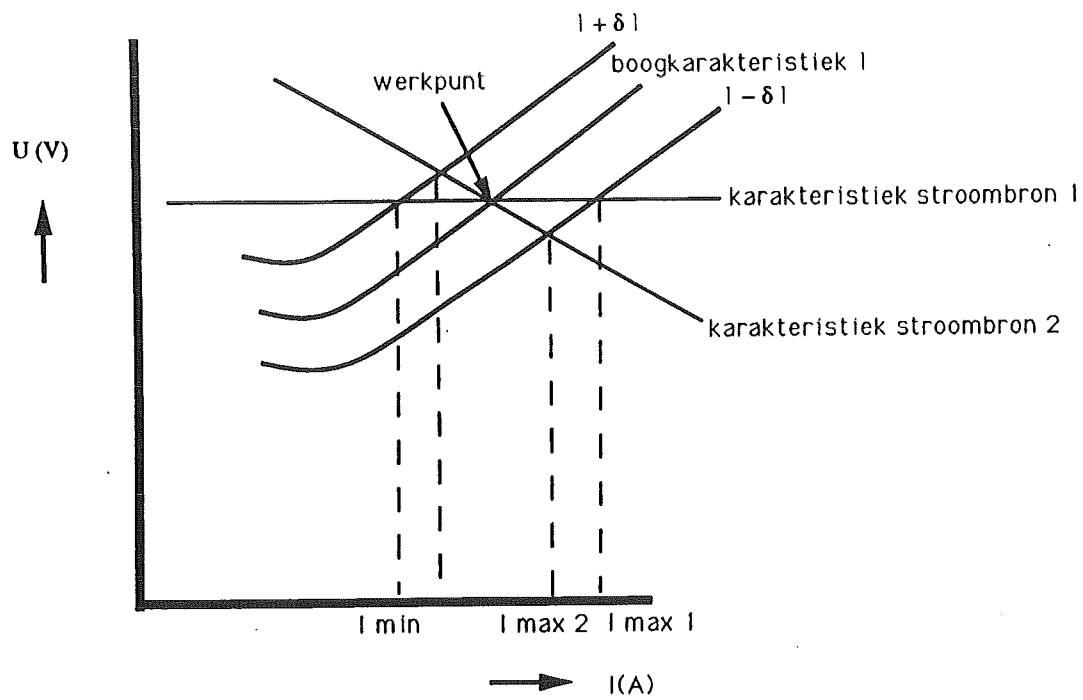


Fig. 6 De boogkarakteristiek bij verschillende booglengtes en twee karakteristieke lijnen van de stroombron.

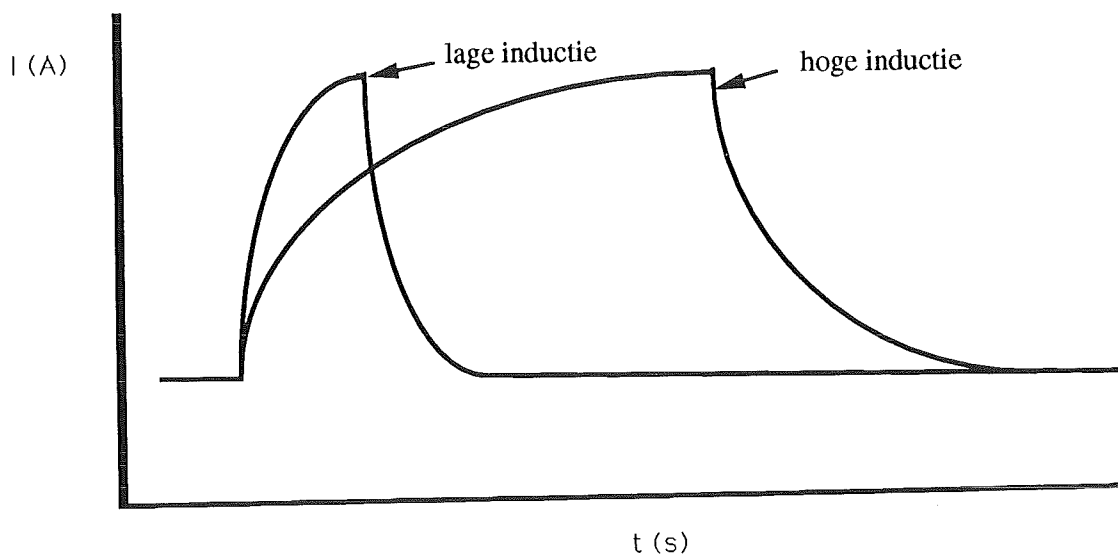


Fig. 7 Het verloop van de stroom bij kortsluiting met een lage en hoge inductie.

Om het maximum van de stroompiek te kunnen beperken heeft de stroombron een instelling voor de helling, ook wel slope-instelling genoemd. Met deze instelling kan de helling van de karakteristieke lijn van de stroombron veranderd worden. De helling van de stroombronkarakteristiek heeft de dimensie van de elektrische weerstand. Bij de meeste stroombronnen wordt de spanningsval per 100A als maat voor de helling opgegeven.

Alle onderdelen in het circuit die impedantie toevoegen, zoals stroomkabels en vuile contacten, zorgen in feite voor een toename van de helling.

In figuur 6 is de invloed van de helling op de karakteristiek van de stroombron aangegeven. Uit de figuur blijkt dat de maximale stroom op het moment van de kortsluiting bij een grotere helling lager zal zijn.

Om nu de toename van de stroom als functie van de tijd te kunnen regelen is de stroombron naast de instelling van de helling voorzien van een smoorspoelinstelling, ook wel de choke-instelling genoemd. De zelfinductie is in te stellen van 0 tot 100 %. Bij een lage zelfinductie zal de toename van de stroom groot zijn op het moment van de kortsluiting. Bij een hoge zelfinductie zal de toename van de stroom minder groot zijn (zie figuur 7). Als de belasting van de stroombron verandert door b.v. een kortsluiting, zal de stroom een eindige tijd nodig hebben om het nieuwe niveau te bereiken. Deze toename wordt vooral bepaald door de inductie L_z van de smoorspoel maar tevens door de weerstand R van het stroomcircuit. De tijd t om een bepaalde waarde van de stroom te bereiken is de karakteristieke tijd van het circuit en deze wordt gedefinieerd

als: $t = (L_z/R)$

In figuur 8 is het stroomcircuit voor het kortsluitbooglassen schematisch weergegeven. Hierin is R_1 de weerstand van de stroombron en de rest van het circuit. L_z stelt de inductie voor van de smoorspoel, R_3 de weerstand van de lasboog tijdens de boogfase en R_2 de weerstand van de uitstekende draad. Na het inschakelen van de stroom geldt op ieder tijdstip:

$$V_{\text{bron}} - V_{z,\text{ind},t} = V_{\text{ohm}} \quad (2)$$

met V_{bron} de bronspanning, $V_{z,\text{ind},t}$ de spanning door de inductie en V_{ohm} de spanning over de weerstand.

Dit kan herschreven worden als:

$$V_{\text{bron}} - L_z \frac{di}{dt} = i(t)R \quad (3)$$

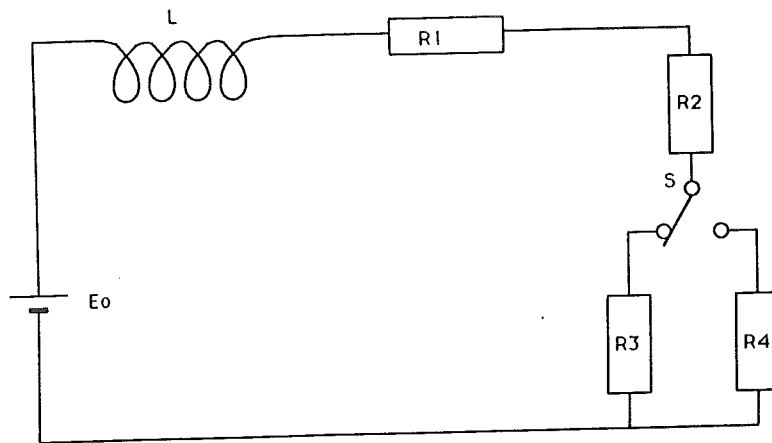


Fig. 8 Schematische weergave van het stroomcircuit tijdens het kortsluitbooglassen.

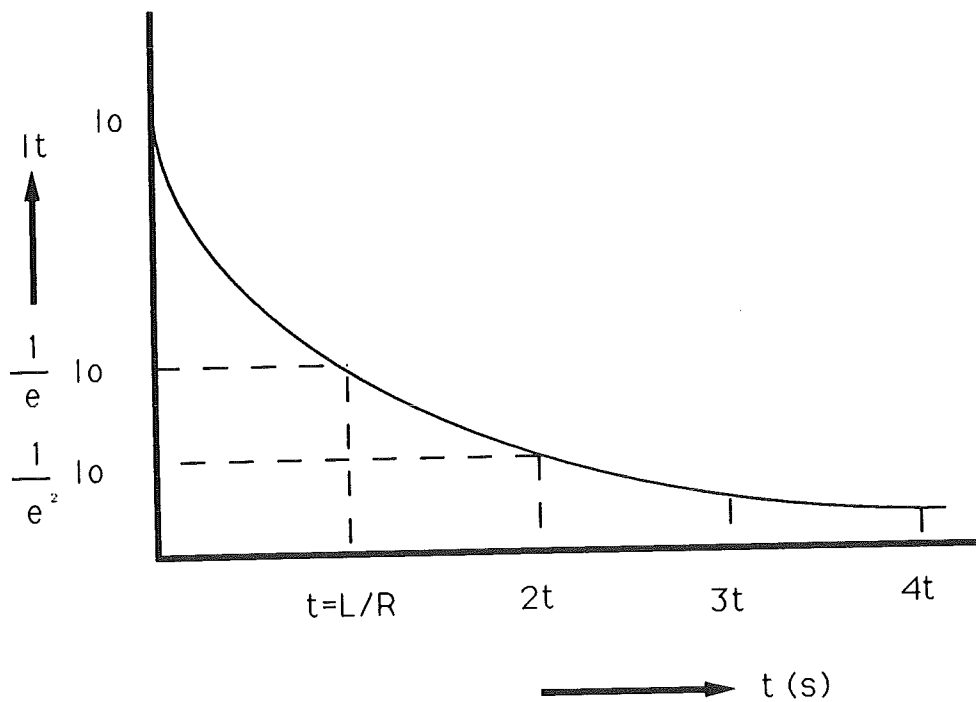


Fig. 9 De geleidelijke afname van de stroom door de inductie.

met R de totale weerstand ($R=R_1+R_2+R_3$).

Op het moment van kortsluiting $t=0$ gaat de denkbeeldige schakelaar S om en wordt de stroomsterkte gelijk aan de boogstroom I_b . De stroom zal toenemen volgens:

$$I(t) = \frac{V_{\text{bron}}}{R} (1 - e^{-\frac{R \cdot t}{L_z}}) + I_b \quad (4)$$

met $R=R_1+R_2+R_4$, R_4 de weerstand van de draad en $R_4 \ll R_3$.

Uit vergelijking 4 blijkt dat de toename van de stroom afhangt van de inductie L_z .

Evenals de toename van de stroom op het moment van kortsluiting is de afname van de stroom na beëindiging van de kortsluiting afhankelijk van de karakteristieke tijd t zoals gegeven is in figuur 9. Kort samengevat wordt met de zelfinductie de stijgsnelheid van de stroom bij kortsluiting geregeld oftewel de snelheid waarmee de pinchkracht in de vloeistofbrug toeneemt. De zelfinductie bepaalt ook de afnamesnelheid van de stroom na het verbreken van de kortsluiting. Met de instelling van de U - I karakteristiek wordt de maximale stroom oftewel de maximale pinchkracht geregeld.

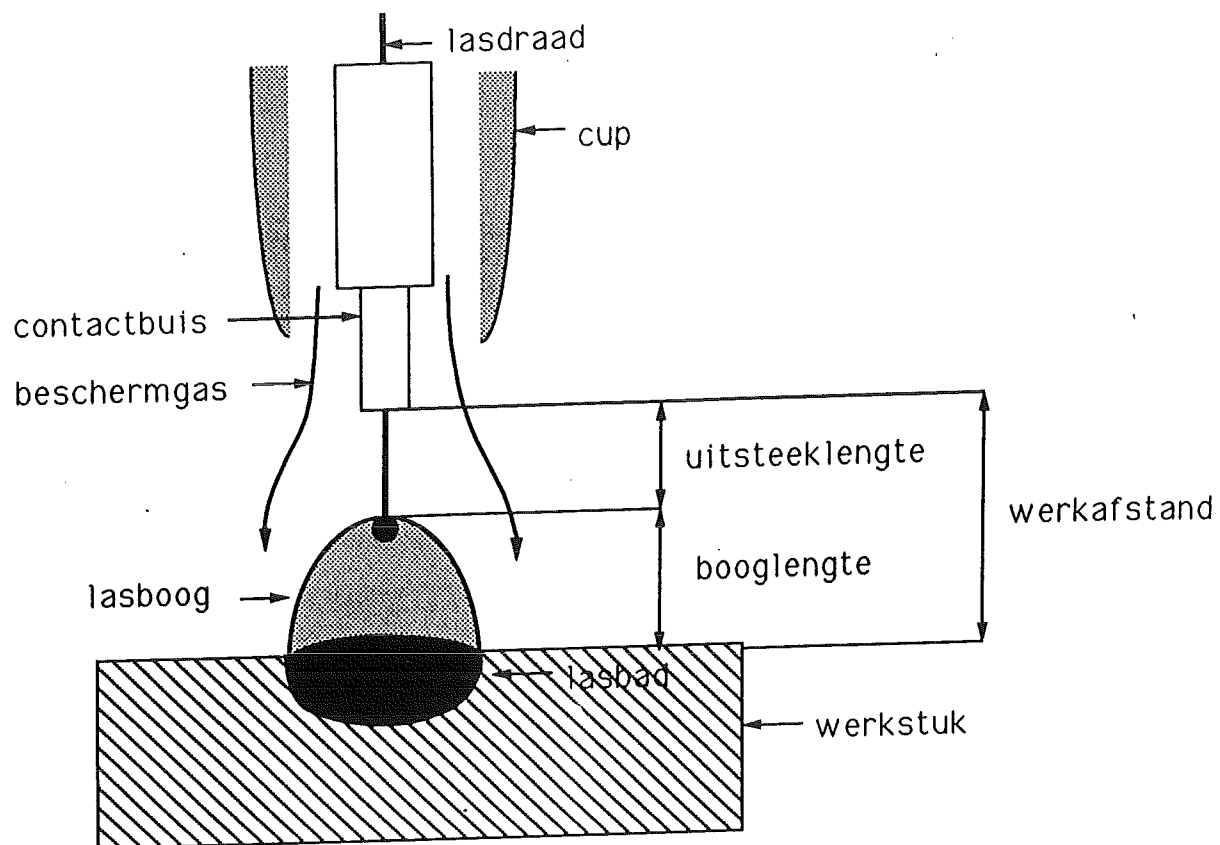


Fig. 10 Weergave van karakteristieke afstanden.

2.4.2 De invloed van de werkafstand

Als de werkafstand wordt veranderd, zal dit invloed hebben op de lengte van de draad die uitsteekt en de lengte van de lasboog (zie fig. 10).

De stroomsterkte I door een draad hangt af van de elektrische soortelijke weerstand ρ (afhankelijk van de temperatuur), de diameter d , de lengte L van de draad en de spanning volgens:

$$I = \frac{1}{4} \frac{\pi d^2}{\rho L} V_R \quad (5)$$

De weerstandsverhitting H_R wordt dan als volgt gegeven :

$$H_R = \rho \frac{L}{\frac{1}{4} \pi d^2} I^2 \quad (6)$$

Hieruit volgt dat de weerstandsverhitting toeneemt als de diameter van de lasdraad afneemt of als de uitsteeklengte van de lasdraad toeneemt.

De weerstand van de lasboog hangt af van de ionisatiegraad en de lengte van de lasboog. De weerstand neemt toe als de ionisatiegraad afneemt (afhankelijk van de temperatuur), of als de lengte van de lasboog toeneemt.

Als een spanningsverschil gemeten wordt gebeurt dit meestal tussen de lastoorts en het werkstuk. Dit is in feite het spanningsverschil over de weerstand van de uitstekende draad en de in serie staande weerstand van de lasboog. Als de werkafstand groter wordt en de ingestelde spanning en boogstroom gelijk blijven, zal de som van de weerstand van de uitstekende draad en de lasboog gelijk moeten blijven. Aangezien de weerstand van de lasboog per lengte-eenheid veel groter is dan de weerstand van de uitstekende draad, moet de weerstand van de lasboog afnemen. De lengte van de lasboog neemt dus af. Omdat de totale lengte toeneemt wordt de lengte van de uitstekende draad groter.

De weerstand van de uitstekende draad neemt toe en de weerstand van de lasboog neemt bij een grotere werkafstand af. De warmte-inbreng door de lasboog in het lasbad is bij grotere werkafstand dus lager.

Omdat de weerstandsverhitting van de uitstekende draad toeneemt zal bij grotere werkafstand in de boog minder warmte nodig zijn om de draad te smelten. De draadsnelheid wordt bij grotere werkafstand hoger.

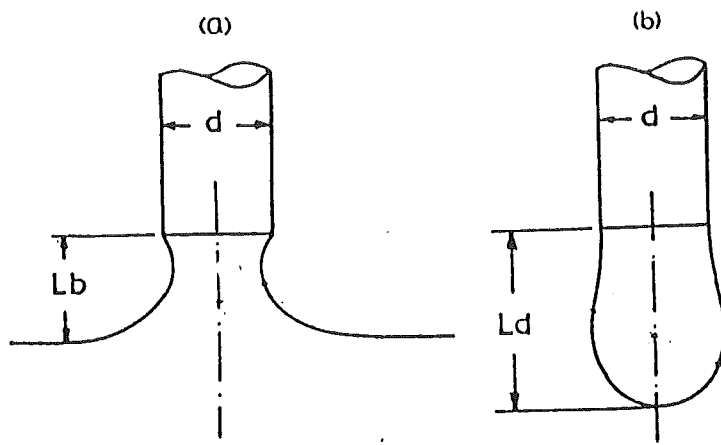


Fig. 11 Schematische weergave van de vloeistofbrug en de druppel aan het draaduiteinde (ref. 4).

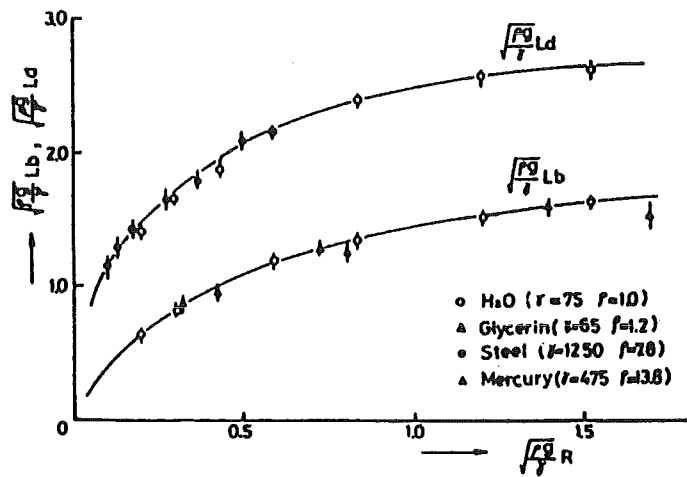


Fig. 12 De lengte L_b en L_d bepaald als functie van R (ref. 4).

2.5 Modelleren van het materiaaltransport

2.5.1 Materiaaltransport zonder invloed van de elektrische stroom

Tijdens de boogfase en de kortsluitfase zullen de zwaartekracht en de oppervlaktespanning het materiaaltransport beïnvloeden. De oppervlaktespanning γ zal in de boogfase de druppelafsplitsing tegenwerken, de zwaartekracht zal, onder de hand lassend, meewerken.

De zwaartekracht zal bij een vloeistofbrug de brug willen verbreken. De oppervlaktespanning zal afhankelijk van de configuratie en lengte van de vloeistofbrug tegen- of meewerken bij het verbreken van de vloeistofbrug.

De zwaartekracht zal van de volgende grootte zijn:

$$F = \rho V g \quad (7)$$

met V het volume van de druppel of de vloeistofbrug, ρ de dichtheid en g de gravitatieversnelling.

Een gekromd oppervlak zal volgens Laplace door de oppervlaktespanning γ een drukverschil P geven:

$$P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (8)$$

met R_1 en R_2 de kromtestralen van het vloeistofoppervlak.

Hierbij geldt dat $P > 0$ voor een convex oppervlak en $P < 0$ voor een concaaf oppervlak.

De vorm van een stabiele druppel of brug kan op de volgende manier beschreven worden (ref. 4):

$$\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \rho g z \quad (9)$$

z is de afstand t.o.v. de vaste lasdraad.

Er is een lengte L_d aan te geven waarboven de druppel afgesplitst wordt. (zie figuur 11). Als de druppel deze kritische lengte overschrijdt, zal het evenwicht niet meer bestaan en zal de druppel zich afsplitsen.

Voor een vloeistofbrug is ook een lengte aan te geven waarboven de brug niet meer stabiel zal zijn en in zal snoeren. Dit is de lengte L_b (zie figuur 11). De relatie tussen L_b , L_d en de straal van de

lasdraad R , kan voor verschillende vloeistoffen experimenteel bepaald worden (ref. 4).

Het blijkt dat met toenemende R , L_b en L_d toenemen en dat deze waarden bij een grote R naderen tot een constante waarde (zie figuur 12). Voor alle waarden van R is L_d groter dan L_b . Dit houdt in dat elke kolom met een lengte $L_b < L < L_d$ onstabiel zal zijn en door de oppervlaktespanning verbroken wordt. Als de lengte L groter wordt dan L_d , zal de druppel afsplitsen voordat kortsluiting gemaakt wordt.

Uit simulatieproeven met water (ref. 4) is gebleken dat de contacttijd, die vergelijkbaar is met de kortsluittijd tijdens het kortsluitbooglassen, ongeveer gelijk blijft over een groot gebied tussen L_b en L_d . Als L kleiner wordt en L_b begint te naderen, neemt de contacttijd echter toe. Verder is gebleken dat de contacttijd toeneemt als de viscositeit of de draaddiameter toeneemt.

Wanneer L kleiner wordt dan L_b zal de vloeistofbrug stabiel zijn en niet meer verbroken worden.

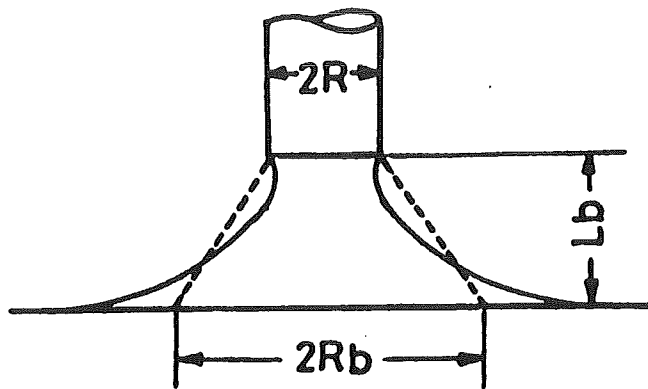


Fig. 13 De configuratie van de vloeistofbrug tussen de draad en een vrij oppervlak (ref. 4).

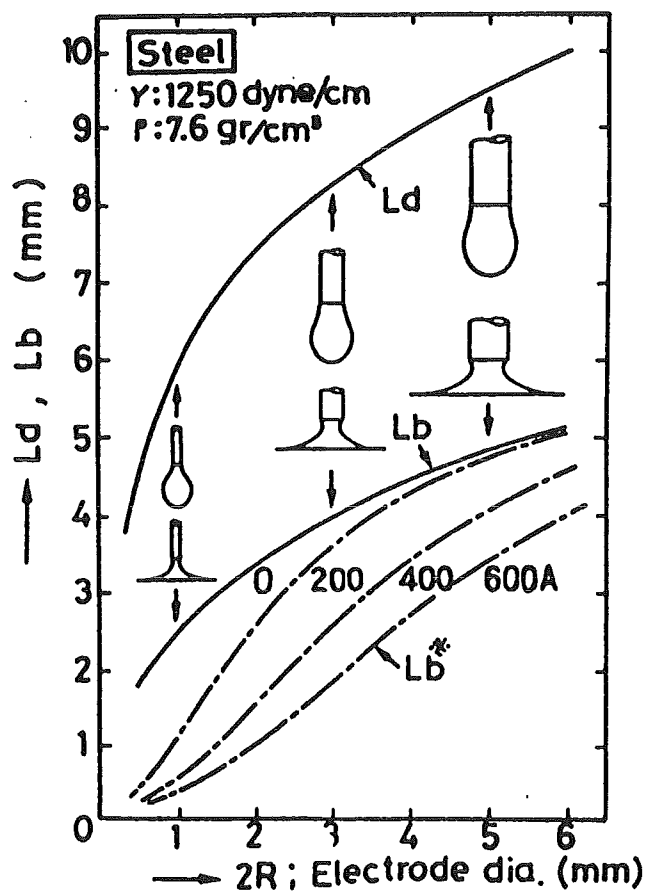


Fig. 14 De vloeistofbruglengte die nog verbroken kan worden (L_b^*), als functie van de elektrodediameter, bij verschillende piekstromen (ref. 4).

2.5.2 Materiaaltransport onder invloed van de elektrische stroomsterkte

In het voorgaande is het materiaaltransport besproken zonder rekening te houden met de krachten die ontstaan door de elektrische stroom. Bij het kortsluitbooglassen zal op het moment van kortsluiting echter een extra kracht gaan werken als de stroom door de vloeistofbrug gaat lopen.

Dit is de elektromagnetische pinchkracht die geschreven kan worden als (ref. 5):

$$F = \frac{I^2 \mu}{4\pi} \ln\left(\frac{Rb}{R}\right) \quad (10)$$

met Rb de straal zoals gegeven in figuur 13, I de stroomsterkte en μ de magnetische permeabiliteit. De kritische lengte L_b zal door de pinchkracht kleiner worden. De kritische lengte onder invloed van de pinchkracht zal verder aangegeven worden als L_b^* .

Voor een stabiel kortsluitboogproces moet de lengte nu dus voldoen aan de eis: $L_b^* < L < L_d$.

In figuur 14 is L_b^* gegeven voor verschillende waarden van de piekstroom I_p en de straal van de draad (ref. 4). Naarmate de piekstroom hoger wordt neemt de lengte van L_b^* af.

Als de lengte van de vloeistofbrug kleiner wordt kan deze nog verbroken worden door de toenemende pinchkracht (piekstroom neemt toe). Als de ingestelde stroom hoger is zal de draadaanvoersnelheid ook toenemen omdat deze gekoppeld is aan de ingestelde stroom. Door de hogere draadaanvoersnelheid zal de lengte L afnemen. Wanneer de afname van L groter is dan de afname van L_b^* , kan L kleiner worden dan L_b^* . Op het moment dat L kleiner wordt dan L_b^* zal de pinchkracht door de stroom niet meer groot genoeg zijn om de vloeistofbrug te verbreken waardoor de kortsluittijd toe zal nemen. De draad die uitsteekt zal wel op een gegeven moment door de Joulse verhitting smelten waardoor L groter wordt en de vloeistofbrug op een gegeven moment weer onstabiel wordt.

Als de straal van de lasdraad groot is en de pinchkracht veel groter is dan de zwaartekracht, kan voor L_b^*/R de volgende relatie gegeven worden (ref. 4):

$$\frac{L_b^*}{R} = \frac{4\gamma R}{\alpha I^2 \mu} \quad (11)$$

α is een constante.

Hieruit blijkt dat L_b^* omgekeerd evenredig is met I^2 .

De oppervlaktespanning heeft ook invloed op de lengte L_b^* . Wanneer de oppervlaktespanning toeneemt zal de lengte L_b^* ook toenemen. Als de lengte L constant blijft en L_b^* door toename van de oppervlaktespanning kleiner wordt dan L , zal een hogere piekstroom nodig zijn om de vloeistofbrug te verbreken.

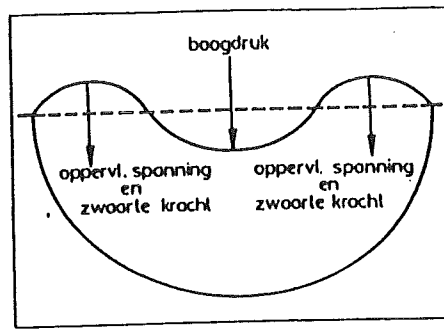


Fig. 15 De krachten werkzaam op het lasbad.

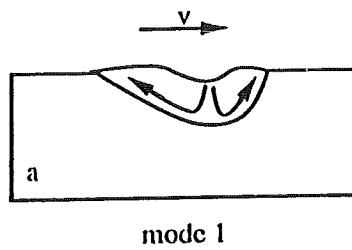


Fig. 16 Schematische weergave van oscillatie mode 1 (ref. 8).

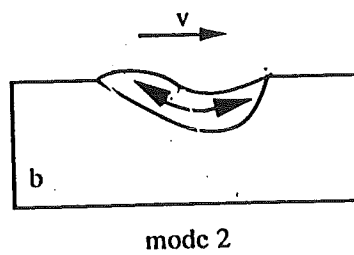


Fig. 17 Schematische weergave van oscillatie mode 2 (ref. 8).

2.6 De beweging van het lasbad

De beweging van het lasbad heeft een grote invloed op het materiaaltransport bij het kortsluitbooglassen. De golfbeweging in het lasbad ontstaat bij het kortsluitbooglassen op de volgende manier.

Na iedere kortsluiting zal de lasboog ontsteken. De stroom is hoog op het moment dat de lasboog ontsteekt. De stroom neemt geleidelijk af tot een constante boogstroom bereikt wordt. Op het moment dat de boog ontsteekt zal de boogdruk het hoogst zijn omdat deze afhankelijk is van de stroomsterkte. Door deze extra druk zal het oppervlak worden ingedrukt totdat de boogdruk in evenwicht is met de tegenwerkende druk die het gevolg is van de oppervlaktespanning en de zwaartekracht (zie fig. 15). De boogdruk neemt vervolgens geleidelijk af totdat deze een constante waarde bereikt. Door de oppervlaktespanning en de zwaartekracht zal het lasbad weer in de oorspronkelijke stand willen terugkeren, waardoor het lasbad in natuurlijke oscillatie wordt gebracht.

Naar het oscillatiegedrag van het lasbad bij het TIG lassen is veel onderzoek gedaan (ref. 6,7,8), waarbij het lasbad in natuurlijke oscillatie werd gebracht door het toepassen van een kortstondige, op de normale lasstroom gesuperponeerde, stroompuls van rechthoekige vorm.

De oscillatie van het lasbad is voor het kortsluitbooglassen van groot belang, omdat de frequentie en de amplitude van de oscillatie, mede de frequentie bepaalt waarmee de draad wordt aangetikt (kortsluitfrequentie).

Tussen de oscillatie zoals die ontstaat bij het TIG lassen en het kortsluitproces bij het kortsluitbooglassen zal dus een verband bestaan. In beide gevallen is namelijk sprake van een kortstondige drukverhoging van de lasboog.

De oscillatiefrequentie tijdens het TIG lassen kan worden bepaald door de boogspanningsvariatie te meten. Deze spanningsvariatie ontstaat door een veranderende boogafstand t.g.v de golfbeweging van het lasbad.

De frequentie van de oscillatie gedurende het kortsluitbooglassen wordt echter via de spanningsval tijdens de kortsluiting gemeten. De frequentie die bepaald wordt kan in dit geval lager zijn dan de oscillatiefrequentie van het lasbad als de golf het draaduiteinde mist.

Tijdens het TIG lassen werden verschillende vormen van oscillatie waargenomen. De frequentie bij volledige doorlassing bleek veel lager te zijn dan de frequentie bij onvolledige doorlassing. Omdat de doorlassing tijdens de experimenten met het kortsluitbooglassen niet volledig is, zal op de volledige doorlassing niet verder ingegaan worden.

Bij de onvolledige doorlassing werden twee modes gevonden voor de oscillatie van het lasbad (ref. 6). Mode 1 (zie fig. 16) wordt gekarakteriseerd door een hoge oscillatiefrequentie en een

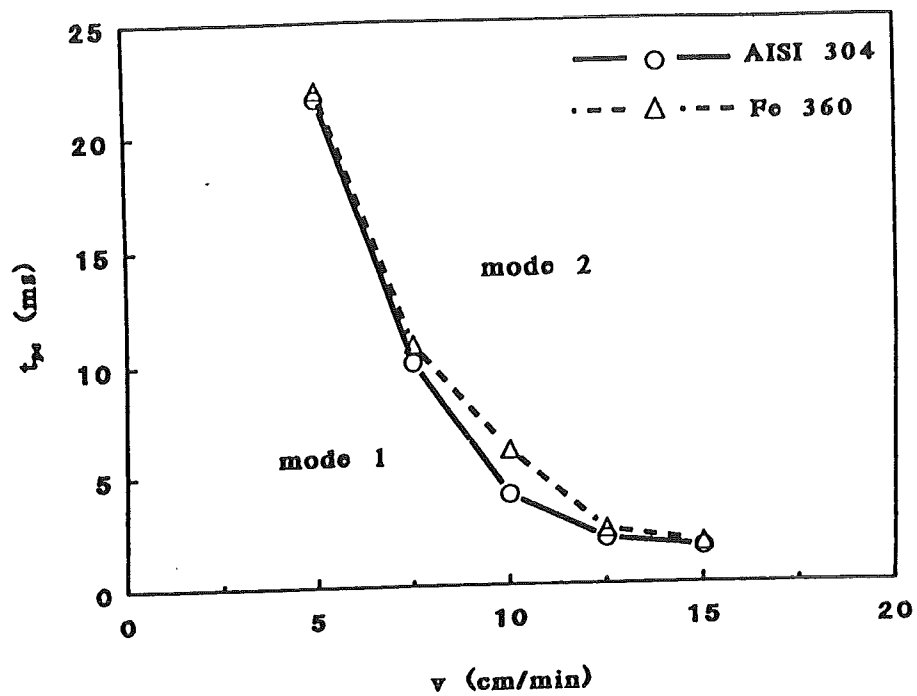


Fig. 18 De invloed van de voortloopsnelheid op de oscillatie mode (ref. 7).

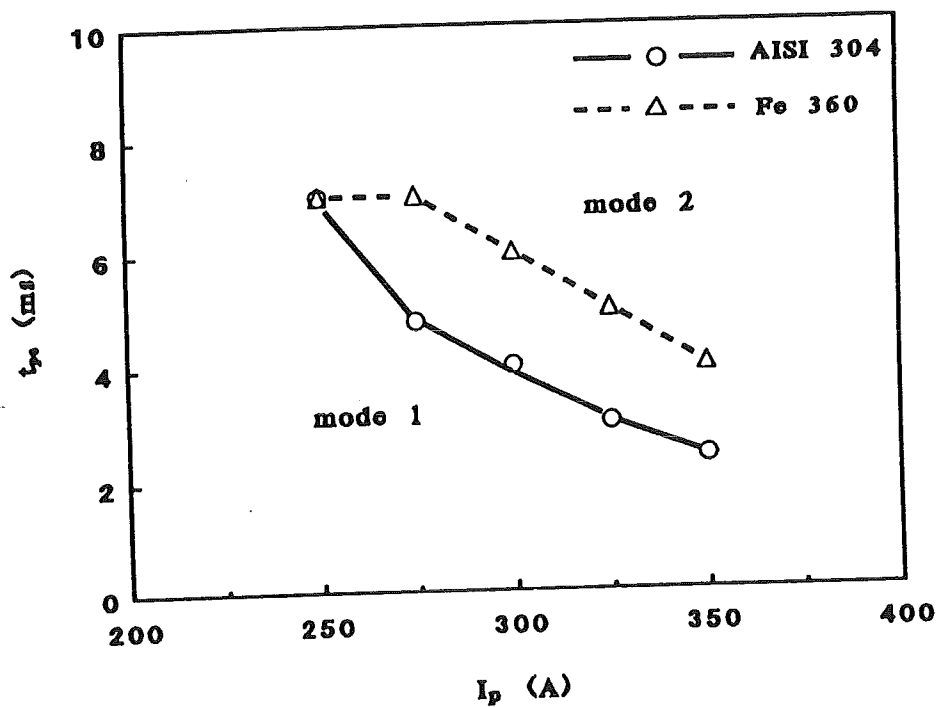


Fig. 19 De invloed van de piekstroom op de oscillatie mode (ref. 7).

kleine amplitude. Oscillatie mode 2 (zie fig. 17) wordt gekarakteriseerd door een lage oscillatiefrequentie en een grote amplitude. Welke oscillatie mode optreedt hangt af van de pulsduur, de piekstroom en de voortloopsnelheid.

Als de voortloopsnelheid verhoogd wordt gaat oscillatie mode 1 op een gegeven moment over in oscillatie mode 2. De pulsduur heeft de volgende invloed. Een korte pulsduur geeft oscillatie mode 1, een lange pulsduur oscillatie mode 2. Evenzo geeft een hoge piekstroom oscillatie mode 2 en een lage piekstroom oscillatie mode 1. Daarnaast beïnvloeden de variabelen elkaar onderling. In figuur 18 en 19 is aangegeven waar oscillatie mode 1 overgaat in oscillatie mode 2.

Uit verschillende experimenten is gebleken dat een relatie bestaat tussen de breedte van het lasbad en de frequentie van de oscillatie. De diepte van het lasbad lijkt geen invloed te hebben op de frequentie, zolang geen doorlassing ontstaat.

Voor de oscillatiefrequentie f wordt de volgende relatie met betrekking tot de diameter D van het lasbad gegeven (ref. 7):

$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\gamma c^3}{\rho D^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

met γ de oppervlaktespanning en ρ de dichtheid. Afhankelijk van de oscillatie mode heeft c een constante waarde van 11.04 voor mode 1 respectievelijk 7.06 voor mode 2.

Uit vergelijking 12 blijkt dat de oppervlaktespanning naast de breedte van het lasbad invloed heeft op de oscillatiefrequentie van het lasbad.

Tabel 1 De samenstelling van de draden SG1,SG2 en SG3 voor het lassen van ongelegeerd staal (DIN 8559).

type	Werk stof nr.	Chemische samenstelling in gew. %						toelaatbare bijmengsels	
		C	Si	Mn	P <	S <	Cu ¹⁾ <		
SG1	1.5112	0,07-0,12	0,5-0,7	1,0-1,3	0,025	0,025	0,30	Cr	0,15
								V	0,05
SG2	1.5125	0,07-0,14	0,7-1,0	1,3-1,6	0,025	0,025	0,30	Zr+Ti	0,15
								Al	0,02
								Ni	0,15
SG3	1.5130	0,07-0,14	0,8-1,20	1,6-1,9	0,025	0,025	0,30	Mo	0,15

2.7 De invloed van de chemische samenstelling van de lasdraad

Er zijn enkele draden beschikbaar die qua chemische samenstelling geschikt zijn voor het lassen van ongelegeerd constructiestaal. De chemische samenstelling van deze draden is gegeven in tabel 1 (ref. 9). De legeringselementen die deze draden bevatten hebben verschillende doelen. Het koolstofgehalte in de lasdraad moet beperkt worden gehouden ($<0,012\%$) om scheurvorming te voorkomen die kan ontstaan door een te hoge hardheid. Een te laag koolstofgehalte ($<0,06\%$) kan leiden tot een te lage sterkte van de las. De lasdraden bevatten naast koolstof, mangaan en silicium. Deze elementen worden aan de lasdraad toegevoegd om de nadelige effecten van de zuurstof in het lasmetaal te beperken. De zuurstof wordt door mangaan en silicium gebonden tot mangaan- en siliciumoxyde. De oxydes vormen slakeilandjes op het oppervlak van het lasmetaal. Zuurstof dat niet gebonden wordt door mangaan en silicium kan aanleiding geven tot poreusheid. De zuurstof bindt zich namelijk aan de aanwezige koolstof en vormt het gasvormige koolmonoxyde. Te hoge waarden van mangaan en silicium ($Mn > 1,6\%$, $Si > 0,7\%$) zijn nadelig voor de mechanische eigenschappen van lasmetaal. Het lasmetaal kan hierdoor bros en scheurgevoelig worden. Het fosfor en zwavelgehalte zijn nadelig voor de mechanische eigenschappen en dienen daarom zo laag mogelijk gehouden te worden ($<0,025\%$).

Op de lasdraden bevindt zich een dun laagje koper om de lasdraad voor de oxyderende werking van de omgevingslucht te beschermen. Daarnaast dient het als smeermiddel bij de geleiding van de draad en voor een beter elektrisch contact tussen draad en lastoorts. Het gehalte van koper mag echter niet te groot worden ($<0,5\%$) omdat dit verbrossing van het lasmetaal kan veroorzaken.

De draden gegeven in tabel 1 bevatten een verschillende hoeveelheid mangaan en silicium. Naarmate de oxyderende werking van het beschermgas toeneemt komen respectievelijk de draden SG1, SG2 en SG3 in aanmerking. Het zuurstofpercentage in de draad moet zo laag mogelijk gehouden worden. Door de zuurstof kan in de druppel die zich aan het draaduiteinde bevindt een explosieve reactie plaatsvinden waardoor de druppel uiteenbarst. De neiging hiertoe vermindert door een toenemende hoeveelheid desoxyderende middelen, de oppervlaktespanning wordt door deze elementen verlaagd (ref. 10).

De legeringselementen hebben naast de invloed op de mechanische eigenschappen ook een grote invloed op de oppervlaktespanning van het lasmetaal (ref. 10). Vooral oppervlakte-actieve elementen zoals zwavel beïnvloeden de oppervlaktespanning zeer sterk. In tabel 2 zijn enige samenstellingen gegeven van verschillende lasdraden met de daarbij behorende oppervlaktespanning. Uit de tabel blijkt dat een kleine verandering van de oppervlakte-actieve elementen S en

Tabel 2 De chemische samenstelling en de oppervlaktespanning van verschillende lasdraden (ref. 10).

chemische samenstelling (massa %)						
DRAAD	C	Si	Mn	S+Se	Ti	$\gamma \cdot 10^{-3} \text{N/m}$
A	0,05	0,86	1,31	0,020	-	1240
B	0,03	0,87	1,42	0,019	-	1200
E	0,04	0,87	1,34	0,005	-	1080
F	0,04	0,79	1,36	0,005	0,03	1010
I	0,05	0,84	1,33	0,054	-	850
J	0,03	0,84	1,33	0,100	0,04	800

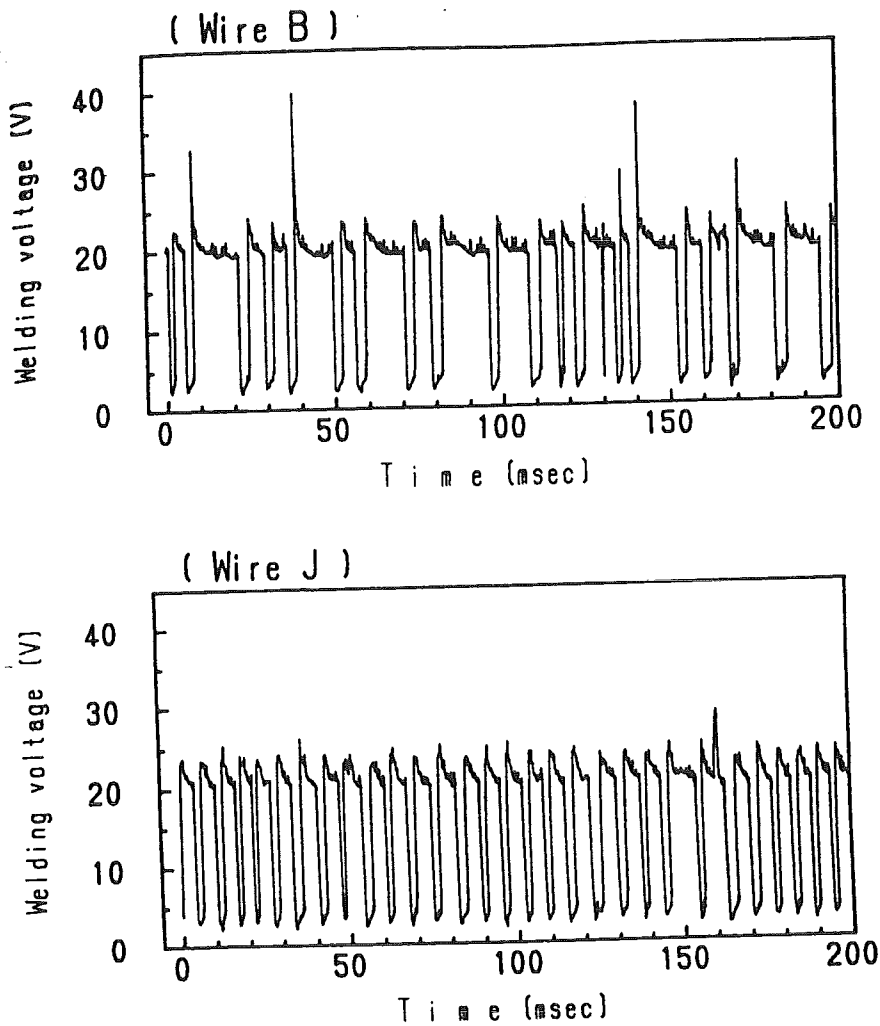


Fig. 20 Het spanningsverloop van een draad met een hoge oppervlaktespanning (B) en een lage oppervlaktespanning (J) (ref. 10).

Se een grote invloed heeft op de oppervlaktespanning.

Uit vergelijking 11 volgt, dat de lengte L_b^* waarbij de brug nog verbroken kan worden afhangt van de stroomsterkte maar ook, zij het in mindere mate van de oppervlaktespanning. Naarmate de oppervlaktespanning toeneemt zal de lengte L_b^* waarbij de brug nog verbroken kan worden toenemen.

In figuur 20 (ref. 10) is het spanningsverloop te zien dat optreedt bij twee draden met een verschillende oppervlaktespanning (B $\gamma=1,2\text{N/m}$, J $\gamma=0,8\text{N/m}$) en gelijke instelling van de stroombron. De ingestelde waarden van de stroom en de spanning zijn in beide gevallen gelijk. De draad met de lage oppervlaktespanning geeft een regelmatig verloop te zien met een hoge frequentie. De draad met de hoge oppervlaktespanning geeft een onregelmatig verloop met een lage frequentie. Het verschil tussen beide draden ontstaat waarschijnlijk door de veranderde lengte van L_b^* waardoor de brug bij de draad met een lage oppervlaktespanning probleemloos verbroken zal worden, terwijl bij de draad met de hoge oppervlaktespanning de vloeistofbrug waarschijnlijk stabiel is.

De chemische samenstelling van de plaat zal ook invloed hebben op het materiaaltransport.

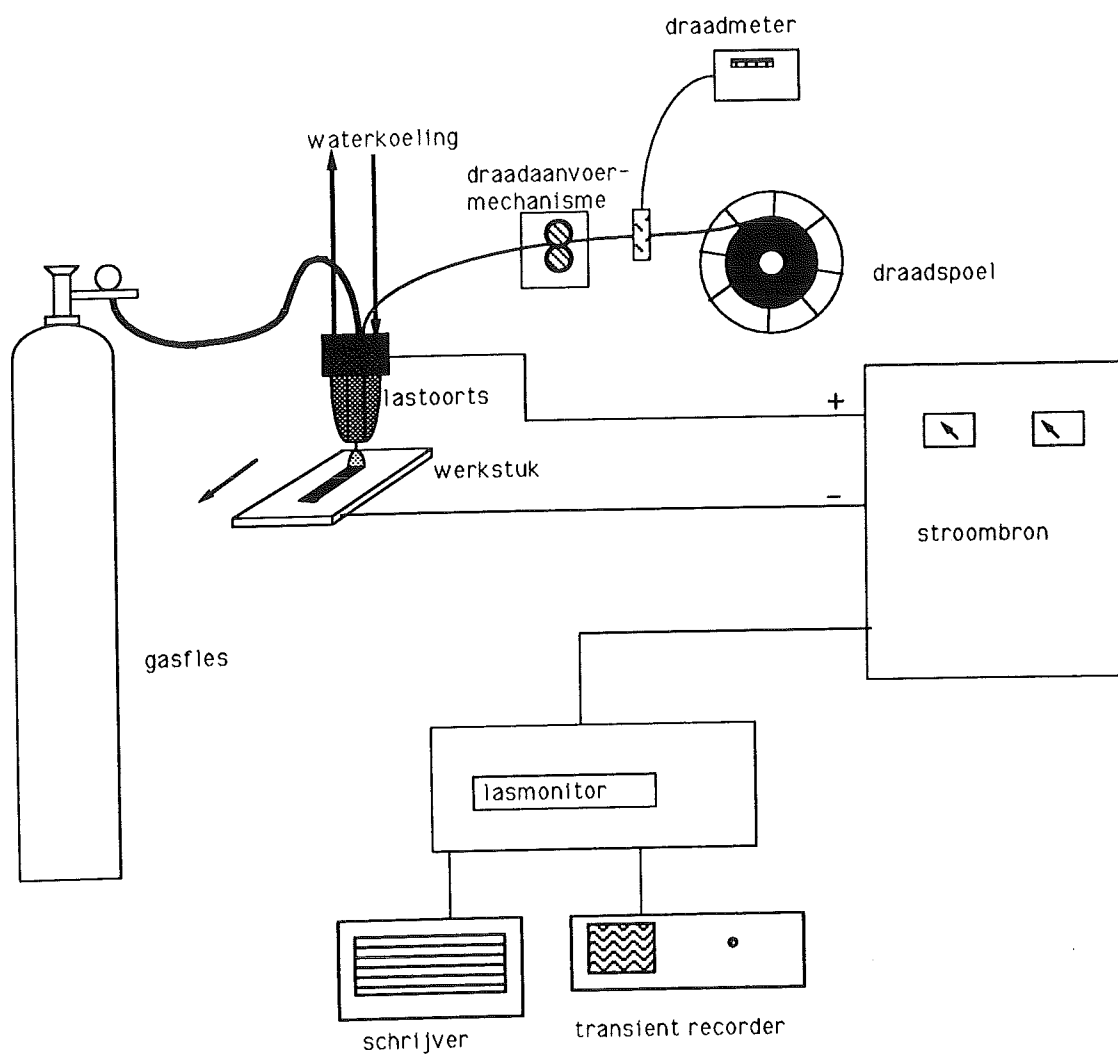


Fig. 21 Schematische weergave van de meetopstelling die gebruikt is voor de metingen.

Tabel 3 De chemische samenstelling van de platen.

	C	Si	Mn	P	S	O	N	Cr	Ni
Fe 360	0.0074	0.13	0.45	0.012	0.0653	0.028	0.012	0.10	0.12

3. EXPERIMENTEEL

3.1 Meetopstelling

Voor de metingen is de opstelling gebruikt zoals schematisch weergegeven in figuur 21. De toorts bevindt zich op een vaste plaats, deze is alleen in hoogte en naar de zijkant verstelbaar. Onder de toorts wordt de te lassen plaat gelegd op een plateau dat zich horizontaal onder de toorts beweegt. De voortloopsnelheid is gedurende alle proeven constant gehouden (30 cm/min).

Als beschermgas is 85% Ar 15% CO₂ gebruikt; aan argon is CO₂ toegevoegd om het materiaaltransport te verbeteren. De oppervlaktespanning wordt namelijk verlaagd als CO₂ aan argon toegevoegd wordt. De gashoeveelheid is ook constant gehouden gedurende alle metingen. Het gasdebiet was 18 l/min.

Iedere meting is drie keer uitgevoerd op een plaat van 250 bij 200 mm met een dikte van 10 mm. Drie lassen zijn gelegd op gelijke afstand van elkaar aan één kant van een plaat. De platen gebruikt voor het lassen zijn van ongelegeerd constructiestaal (Fe 360). De chemische samenstelling van het plaatmateriaal is gegeven in tabel 3. Voor de experimenten zijn de platen ontvet.

De draad PZ 6000 (SG2) is gebruikt voor de lasproeven met een diameter van 1 mm, de chemische samenstelling is gegeven in tabel 1.

De lengte van de draad, gebruikt voor één las, is gemeten met een Strunk draadmeter. Met de lengte, diameter en dichtheid van de draad is vervolgens het gewicht van het materiaal berekend dat is toegevoegd tijdens één las. Van iedere plaat is het gewicht bepaald met een Mettler weegschaal voordat de las gelegd werd. Na iedere las is de plaat opnieuw gewogen, nadat de spatten met behulp van een beitel van de plaat waren verwijderd. Het spatverlies is vervolgens bepaald aan de hand van het verschil in het gewicht van de plaat voor en na het lassen en het gewicht van de gebruikte hoeveelheid draad.



Fig. 22 De stroom gemeten met de transiënt recorder.
 a) Het ongefilterde signaal.
 b) Het gefilterde signaal.

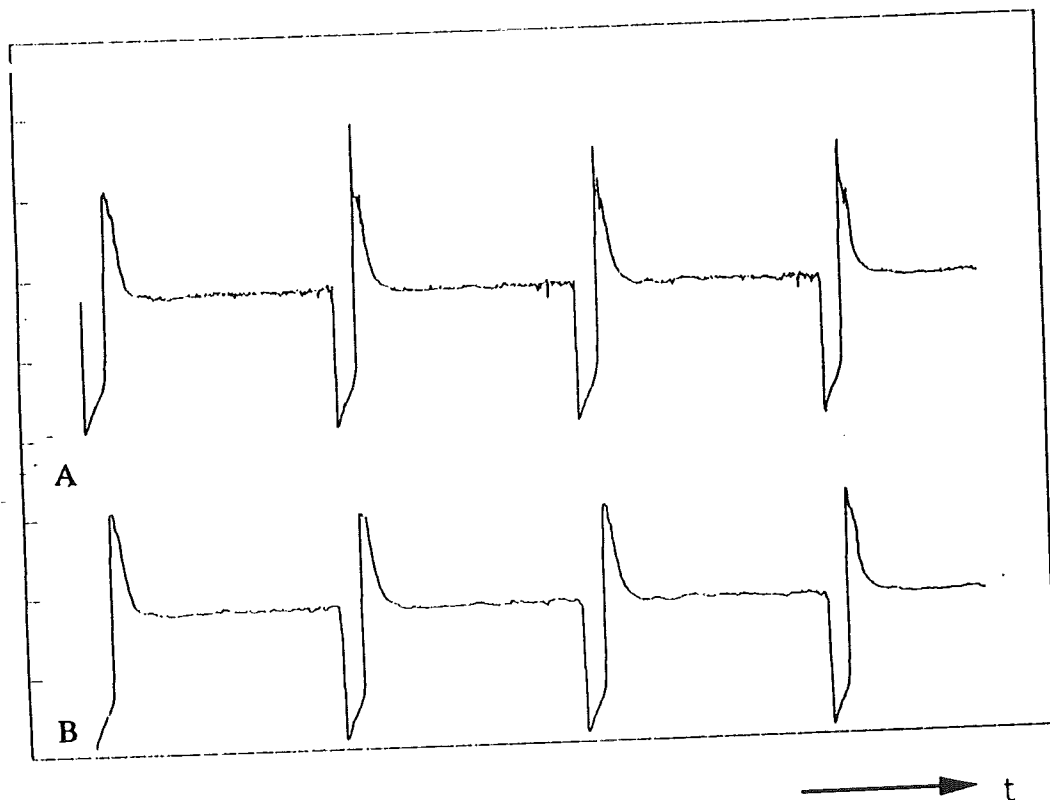


Fig. 23 De spanning gemeten met de transiënt recorder.
 a) Het ongefilterde signaal.
 b) Het gefilterde signaal.

3.2 De meting van stroom en spanning

Het spanningsverschil tussen lastoorts en werkstuk en de stroom is geregistreerd door een (Kipp) schrijver. Hierbij wordt gedurende het gehele lasproces de rms waarde gemeten van de stroom en de spanning. Bij iedere las is ook een momentane opname van 400 ms gemaakt met de transiënt recorder (Nicolet). Uit deze opnamen kan het verloop van de stroom en de spanning bekeken worden gedurende de kortsluit- en de boogperiodes, tevens kan de gemiddelde waarde van de stroom en spanning bepaald worden. Deze waarden zijn afhankelijk van het moment waarop de opname gemaakt wordt. Uit de waarden gemeten met de transiënt recorder zijn de specifieke waarden van het kortsluitboogproces bepaald, zoals de boogtijd, kortsluittijd, kortsluitfrequentie en de piekstroom.

Als in dit verslag gesproken wordt over de ingestelde waarden van de stroom en de spanning dan worden hiermee de stroom en spanning bedoeld, die ingesteld werden aan de hand van de schrijver (rms waarden).

De waarden van de stroom en spanning die ingesteld worden met de schrijver liggen hoger dan de gemiddelde waarden gemeten met de transiënt recorder. De stroom is over het algemeen 20 A lager en de spanning 1 tot 2 V. Als een onregelmatigheid optreedt in het lasproces, waardoor de boog niet ontsteekt, dan is het verschil tussen de gemiddelde en de rms waarde veel groter.

In figuur 22 a is de stroom als functie van de tijd gegeven, die gemeten is met de transiënt recorder. In het signaal zijn uitschieters te zien van de stroom, die geen reële betekenis hebben. Daarom zijn deze ruisbijdragen met behulp van een computerprogramma verwijderd (mediaanfilter, ref. 11).

Het signaal dat verkregen wordt na het filteren is gegeven in figuur 22 b. Het venster gebruikt bij het filteren van het signaal bestaat uit vijf meetpunten. Evenals voor de stroom is het mediaanfilter toegepast op de spanning. In figuur 23 a is het ongefilterde signaal gegeven en in figuur 23 b het gefilterde signaal. Uit de signalen gegeven in figuur 22 b en 23 b zijn vele grootheden te bepalen die belangrijk zijn voor het kortsluitbooglassen. Voor dit doel is een computerprogramma geschreven dat verschillende waarden met standaardafwijking berekent uit het gefilterde signaal.

De waarden bepaald voor de stroom zijn: de boogstroom I_b , dit is de stroom gedurende het branden van de lasboog; de piekstroom I_p , dit is de maximale stroom op het moment dat de vloeistofbrug verbroken wordt. Deze waarden zijn grafisch weergegeven in figuur 24.

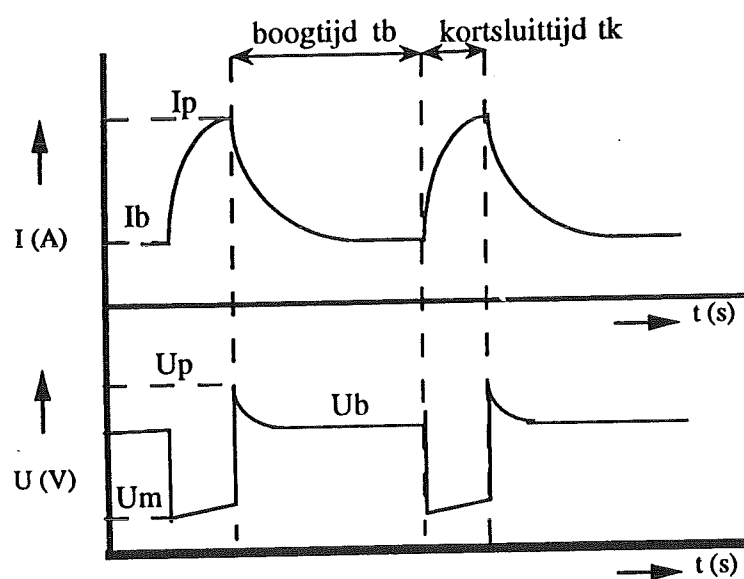


Fig. 24 De karakteristieke parameters van de stroom, spanning en tijd.

Voor de spanning zijn de volgende waarden bepaald: de spanning gedurende het branden van de lasboog U_b , de minimale spanning op het moment dat de kortsluiting plaatsvindt U_m en de piekspanning op het moment dat de vloeistofbrug verbroken wordt U_p (zie figuur 24).

Een spanningsval groter dan 8V is gedefiniëerd als een kortsluiting (ref. 12).

De berekende karakteristieke tijden zijn ook gegeven in figuur 24. Dit zijn de kortsluittijd t_K en de boogtijd t_B . De kortsluittijd en de boogtijd vormen samen de cyclustijd, de reciproke waarde van de cyclustijd geeft de kortsluitfrequentie.

3.3 Experimenten

- A) Om de invloed van de stroom en de spanning op het spatverlies en het verloop van het lasproces te bepalen zijn experimenten uitgevoerd met de volgende parameterinstellingen:

zelfinductie: 6 (75%)

U-I karakteristiek: -2V/100A

werkafstand: 19 mm

U: 16 V I: 100, 125, 150, 175 A

U: 18 V I: 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250 A

U: 20 V I: 125, 150, 175, 200, 225, 250 A

U: 22 V I: 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300 A

U: 24 V I: 175, 200, 225, 250, 275, 300 A

- B) Om de invloed van de zelfinductie en de instelling van de U-I karakteristiek te bekijken zijn de volgende metingen uitgevoerd bij twee instellingen van de stroom en de spanning die een laag spatverlies gaven.

werkafstand: 19 mm

U: 18 V I: 175 A

U: 20 V I: 225 A

zelfinductie: 0 (0%), 2 (25%), 4 (50%), 6 (75%), 8 (100%) ; bij een U-I karakteristiek van -2 V/100A

U-I karakteristiek: horizontaal, -2, -4, -6V/100A ; bij zelfinductie 4 en 6

- C) Enkele instellingen van de stroom en de spanning gaven een erg hoog spatverlies. Bij deze instellingen is gekeken of door de zelfinductie of de U-I karakteristiek te veranderen een lager spatverlies verkregen kon worden. De zelfinductie en de instelling van de U-I karakteristiek zijn bij de instellingen van stroom en spanning met een hoog spatverlies veranderd totdat de hoogste kortsluitfrequentie hoorbaar werd.

werkafstand: 19 mm

U: 16 V I: 175 A zelfinductie: 4 helling: horizontaal

U: 18 V I: 225 A zelfinductie: 6 helling: horizontaal

U: 18 V I: 120 A zelfinductie: 6 helling: -6V/100A

U: 24 V I: 175 A zelfinductie: 6 helling: -6V/100A

D) Tenslotte is de invloed van de werkafstand op het verloop van het lasproces en de spatverliezen bekeken.

U: 20 V I: 225 A

zelfinductie: 6 helling: -2V/100A

werkafstand: 7, 11, 13, 15, 17, 19, 21 mm

U: 18 V I: 175 A

zelfinductie: 4 helling: -2V/100A

werkafstand: 15, 17, 19, 21 mm

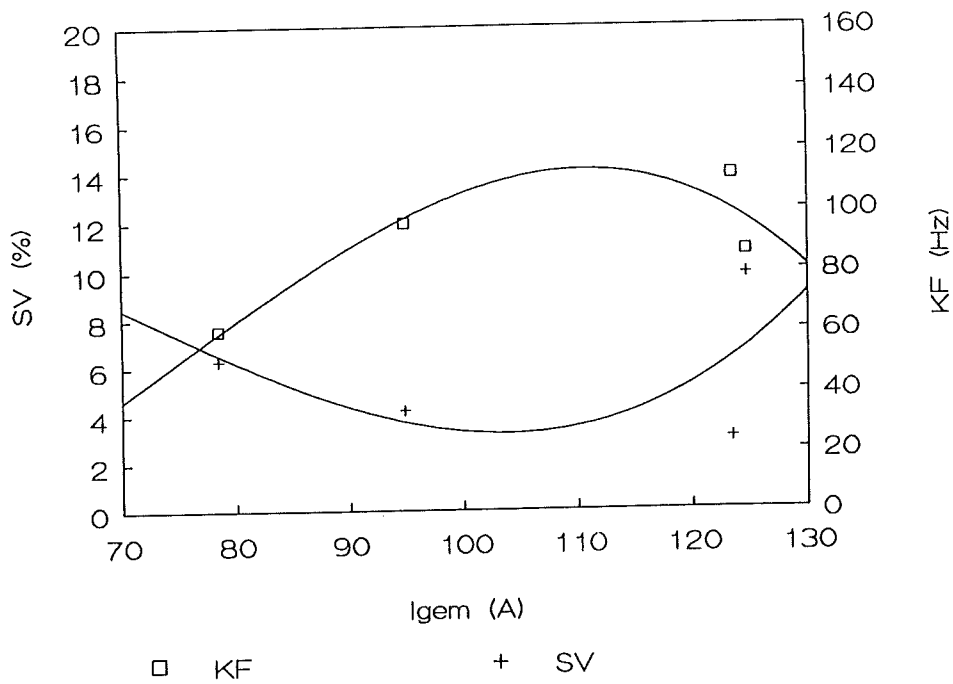


Fig. 25 De kortsluitfrequentie en het spatverlies tegen de gemiddelde stroom bij een ingestelde spanning van 16V, helling $-2V/100A$ en smoorspoel instelling 6 (75%).

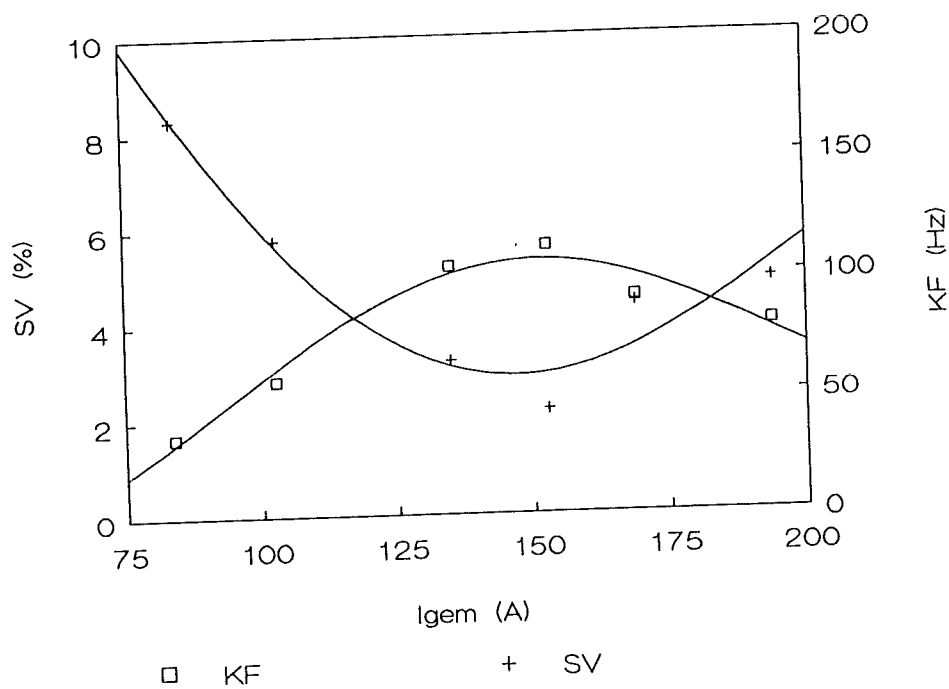


Fig. 26 De kortsluitfrequentie en het spatverlies tegen de gemiddelde stroom bij een ingestelde spanning van 18V, helling $-2V/100A$ en smoorspoel instelling 6 (75%).

4. MEETRESULTATEN

Het kortsluitboogproces wordt uitgevoerd bij een lage boogspanning en stroom. In eerste instantie is de invloed van de spanning en stroom bestudeerd. Hieruit kunnen de ideale lasomstandigheden worden afgeleid (par. 4.1). In dit werkgebied is getracht om het proces verder te optimaliseren d.m.v. het variëren van de zelfinductie (par. 4.2.1), de U-I karakteristiek (par. 4.2.2) en de werkafstand (par. 4.3).

Daarnaast is getracht buiten het optimale gebied van de stroom en spanning het lasproces te verbeteren door de zelfinductie en de U-I karakteristiek aan te passen (par. 4.4).

4.1 De stroomsterkte en spanning

Allereerst is gekeken naar de invloed van de stroom en spanning op het spatverlies bij een vaste instelling van de helling en de zelfinductie. Bij deze metingen is voor de zelfinductie 6 (75%) gebruikt en voor de instelling van de helling $-2V/100A$. Deze instellingen gaven bij eerder onderzoek redelijke resultaten. Bij een bepaalde spanning werd de stroom in stappen verhoogd. De resultaten van de data-analyse bij verschillende instellingen van spanning en stroomsterkte staan gegeven in Appendix 1.

De waarden weergegeven in de figuren zijn gemiddelden over drie metingen.

4.1.1 De kortsluitfrequentie en het spatverlies

In figuren 25 t/m 29 is het spatverlies en de kortsluitfrequentie uitgezet tegen de gemiddelde stroom bij verschillende waarden van de spanning. Bij gelijke spanning en toenemende stroom neemt de kortsluitfrequentie eerst toe en vervolgens weer af. Het spatverlies daarentegen wordt eerst kleiner en neemt op een gegeven moment weer toe. Er blijkt een duidelijk verband te bestaan tussen de kortsluitfrequentie en het spatverlies. Het laagste spatverlies wordt steeds waargenomen bij de maximale kortsluitfrequentie.

Opgemerkt moet worden dat bij lage spanning enkele meetwaarden een afwijkend gedrag vertonen. Bij deze waarden ligt de gemiddelde stroom lager dan verwacht en is het spatverlies hoger. De instellingen van de verschillende parameters zijn bij deze punten zeer kritisch. Hierdoor is het lasproces bij dezelfde instellingen de ene keer stabiel en de andere keer onstabiel. De instabiliteit van het lasproces wordt in deze gevallen veroorzaakt door het niet herontsteken van de lasboog. De vloeistofbrug wordt zodanig verbroken dat de afstand tussen de lasdraad en het lasbad te groot

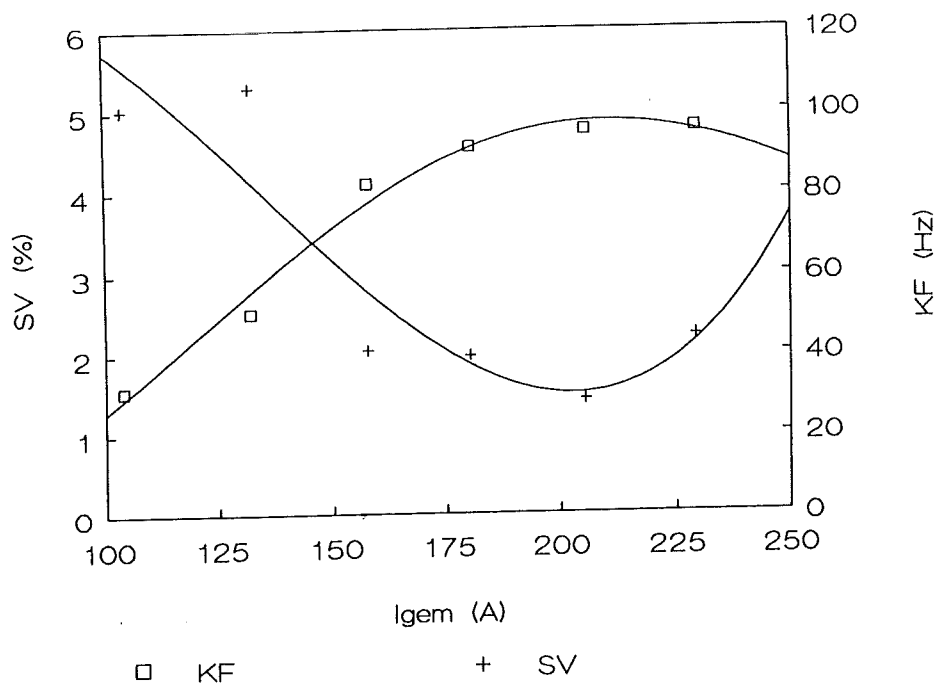


Fig. 27 De kortsluitfrequentie en het spatverlies tegen de gemiddelde stroom bij een ingestelde spanning van 20V, helling -2V/100A en smoorspoel instelling 6 (75%).

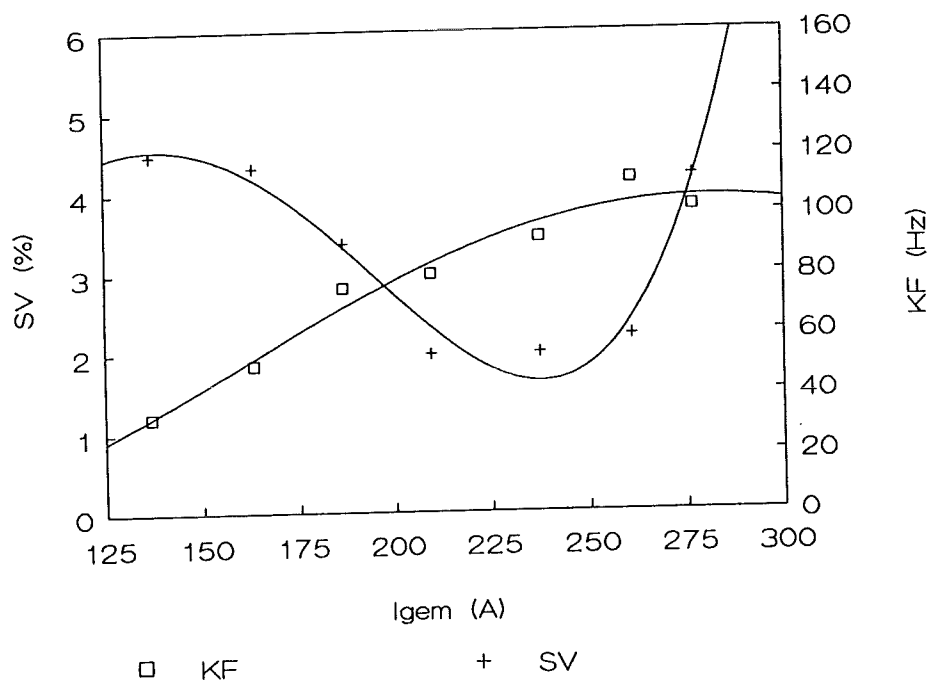


Fig. 28 De kortsluitfrequentie en het spatverlies tegen de gemiddelde stroom bij een ingestelde spanning van 22V, helling -2V/100A en smoorspoel instelling 6 (75%).

wordt, hierdoor kan de lasboog niet meer ontsteken. Een nieuwe kortsluiting is in dit geval nodig om de boog weer opnieuw te ontsteken.

Als de spanning verhoogd wordt, neemt de lasstroom waarbij een minimaal spatverlies wordt bereikt toe, zoals blijkt uit figuren 25 t/m 29.

De waarden van de spanning en de stroom met een minimaal spatverlies, zijn uitgezet in figuur 30. Het blijkt dat deze punten op een rechte lijn liggen. Deze lijn komt overeen met de lijn waarbij de maximale kortsluitfrequentie optreedt.

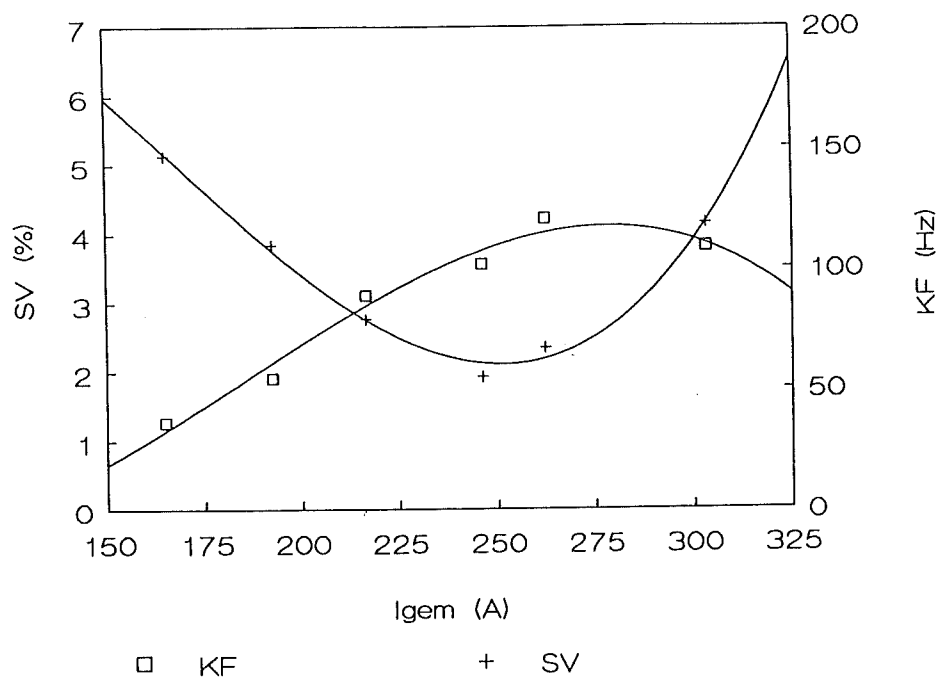


Fig. 29 De kortsluitfrequentie en het spatverlies tegen de gemiddelde stroom bij een ingestelde spanning van 24V, helling -2V/100A en smoorspoel instelling 6 (75%).

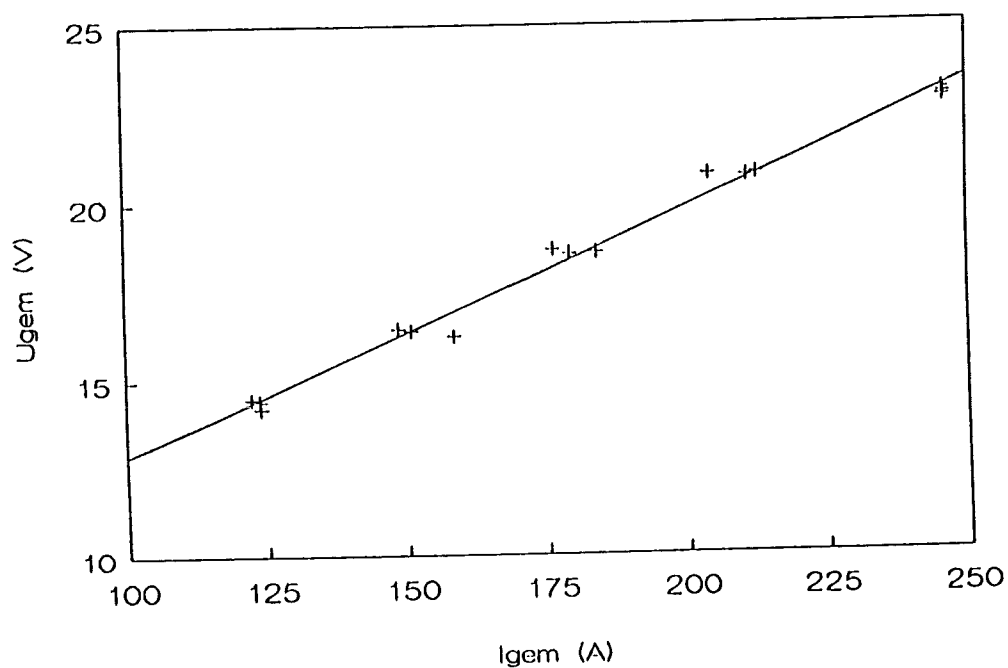


Fig. 30 De gemiddelde stroom en spanning met het laagste spatverlies en hoogste kortsluitfrequentie, helling -2V/100A en smoorspoel 6 (75%).

4.1.2 De piekstroom en -spanning

Tussen de piekstroom en het spatverlies is geen duidelijk verband aan te geven. De gemeten piekstroom bij verschillende stroomsterktes blijft ongeveer gelijk. Als de ingestelde spanning verhoogd wordt, neemt de piekstroom wel enigszins toe.

De boogstroom neemt bij toenemende stroomsterkte toe, de warmte-inbreng zal in dit geval dan ook hoger zijn.

Tussen de waarden van de spanning en het spatverlies is ook geen verband gevonden.

De boogspanning U_B en de piekspanning U_P veranderen niet veel bij een ingestelde spanning en verschillende stroomsterktes. De minimale spanning U_M neemt toe als de ingestelde stroom wordt verhoogd.

4.1.3 De boog- en kortsluittijd

Uit de meetresultaten blijkt dat bij een toenemende boogtijd het spatverlies toeneemt (zie fig. 31). De boogtijd neemt met toenemende stroomsterkte af.

Met een toenemende stroomsterkte neemt de draadaanvoersnelheid toe, de draad zal daarom sneller kortsluiting maken met het lasbad. Hierdoor neemt de boogtijd af. Als de stroomsterkte echter te hoog is kan "stubbing" (vastlopen van de draad in het lasbad) optreden en neemt de boogtijd weer toe.

Tijdens de boogtijd vindt geen materiaaltransport plaats van lasdraad naar het lasbad, maar groeit de druppel aan het uiteinde van de lasdraad. Uit de meetresultaten blijkt dus dat een grote druppel (lange boogtijd) ongunstig is voor het spatverlies, waarschijnlijk omdat bij het verbreken van de vloeistofbrug veel materiaal verloren gaat.

Er is geen duidelijk verband aan te geven tussen de kortsluittijd en het spatverlies.

De kortsluittijd wordt bepaald door de krachten die de vloeistofbrug verbreken en de lengte van de vloeistofbrug. De kortsluittijd neemt bij gelijke spanning en toenemende stroomsterkte eerst iets af en bij hoge stroomsterkte weer toe (zie fig. 31). De kortsluittijden bij de verschillende instellingen van de spanning en stroom zijn zeer kort (ca. 2-3ms). Hieruit zou geconcludeerd kunnen worden dat de lengte van de vloeistofbrug zich in het instabiele gebied bevindt, oftewel tussen de lengtes L_d en L_b^* zoals beschreven in paragraaf 2.5.2.

De verschillen tussen de kortsluittijden zijn niet groot, alleen bij zeer hoge stroom wordt de kortsluittijd langer omdat hier "stubbing" optreedt. Door de hoge draadsnelheid kan de draad in vaste toestand het lasbad induiken, waardoor de brug niet zo makkelijk verbroken kan worden.

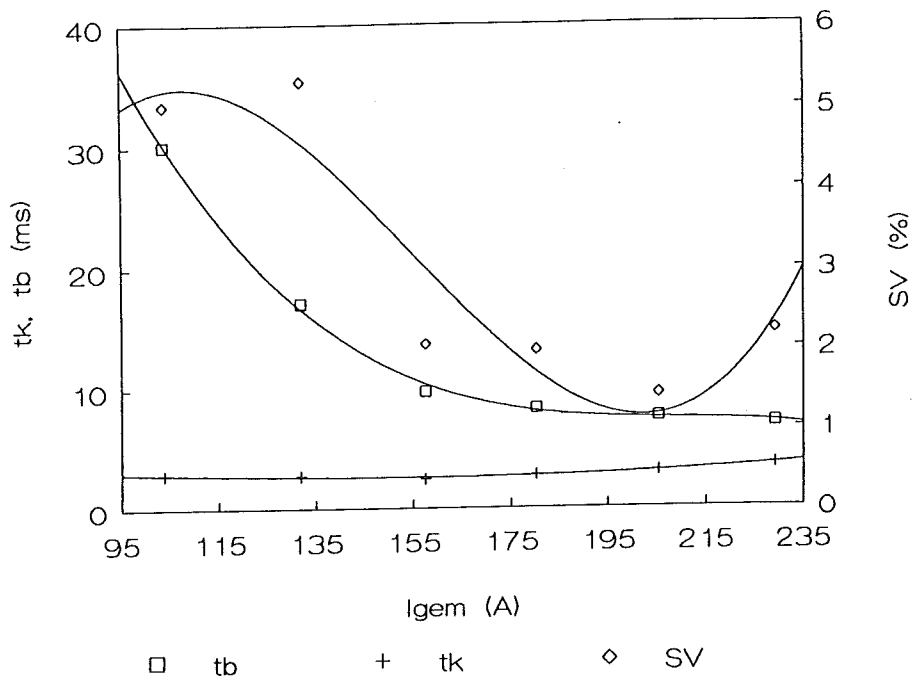


Fig. 31 De boogtijd, kortsluittijd en de spatverliezen uitgezet tegen de gemiddelde stroom, bij een ingestelde spanning van 20 V, helling -2V/100A en smoorspoel 6 (75%).

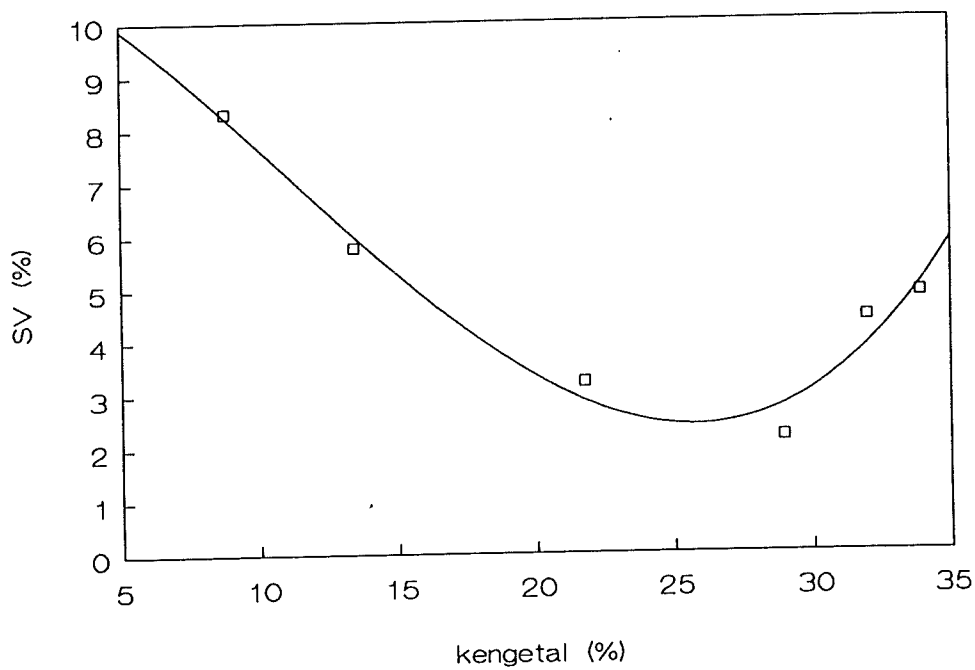


Fig. 32 Het spatverlies uitgezet tegen het kengetal bij een ingestelde spanning van 20V, helling -2V/100A en smoorspoel 6 (75%).

4.1.4 Het kengetal

Om een dimensieloze grootheid te verkrijgen die kenmerkend voor het kortsluitboogproces is, wordt het kengetal gedefiniëerd. Het kengetal is het produkt van de kortsluittijd en de kortsluitfrequentie en wordt uitgedrukt in procenten. Het kengetal blijkt een indicatie te geven voor de stabiliteit van het proces en het spatverlies. Het kengetal geeft het percentage van de tijd aan waarbij het proces zich in kortsluiting bevindt. Het kengetal is dus kenmerkend voor twee belangrijke waarden van het kortsluitproces, de kortsluittijd en de kortsluitfrequentie. De kortsluittijden blijven ongeveer constant totdat de stroom te hoog wordt, dan neemt de kortsluittijd toe.

Het kengetal hangt ook af van de kortsluitfrequentie. Uit het voorgaande is gebleken dat een hoge frequentie over het algemeen samengaat met een laag spatverlies.

Voor de verschillende instellingen van de stroom en de spanning is het kengetal berekend en gekeken naar het bijbehorende spatverlies. In figuur 32 is het kengetal uitgezet tegen het spatverlies bij een ingestelde spanning van 20V. Uit de meetresultaten volgt dat het spatverlies over het algemeen laag is als het kengetal rond 30% ligt. Het spatverlies neemt duidelijk toe onder de 15%. Het percentage dat het proces zich in kortsluiting bevindt is in deze gevallen dus te laag.

4.1.5 De standaardafwijking

Van enkele grootheden die met de transiënt recorder bepaald zijn, is ook de standaardafwijking berekend. De standaardafwijking van de boogtijd geeft een indicatie voor de stabiliteit van het proces. Een grote standaardafwijking gaat samen met een hoog spatverlies en een kleine standaardafwijking met een laag spatverlies. De regelmatigheid van de boogtijd evenals de grootte van de boogtijd hebben dus invloed op het spatverlies.

De standaardafwijking is ook bepaald voor de kortsluitfrequentie. De standaardafwijking van de kortsluitfrequentie is bij een laag spatverlies vrij hoog. Hieruit blijkt dat de frequentie van de kortsluitingen belangrijker is dan de regelmaat waarmee deze plaatsvinden.

De standaardafwijking van de kortsluittijd en de piekstroom geeft ook geen indicatie voor de stabiliteit en het spatverlies van het lasproces. Een lage standaardafwijking van de waarden kan samengaan met een hoog spatverlies, evenzo kan een hoge standaardafwijking een laag spatverlies geven. Alleen als de standaardafwijking even groot of zelfs groter dan de gemeten waarde is, gaat dit altijd samen met een hoog spatverlies.

4.1.6 Het kortsluitvermogen

Voor een stabiel proces bij het kortsluitbooglassen, is het van belang dat de vloeistofbrug op de juiste manier verbroken wordt. Het vermogen dat gedurende de kortsluittijd toegevoerd wordt heeft

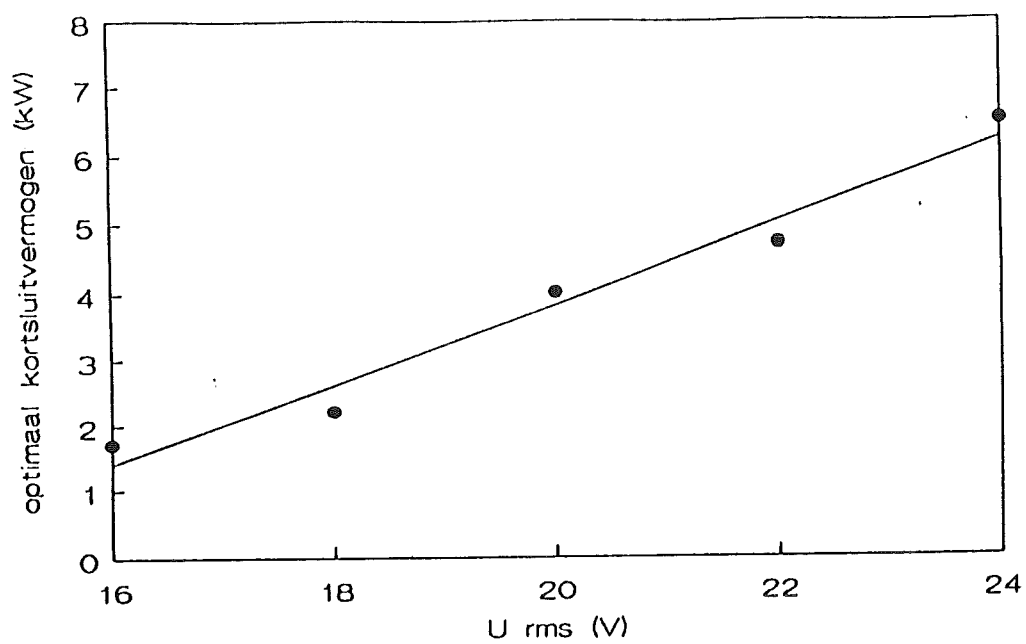


Fig. 33 Het kortsluitvermogen met het laagste spatverlies uitgezet tegen de gemiddelde spanning, helling -2V/100A smoorspoel 6 (75%).

invloed op de wijze van verbreken van de vloeistofbrug. Met behulp van een computerprogramma is daarom de totale energie bepaald die toegevoerd wordt gedurende iedere kortsluiting. Omdat de tijdseenheid waarin de energie toegevoerd wordt ook van belang is, wordt de gemiddelde energie toegevoerd tijdens een kortsluiting gedeeld door de gemiddelde duur van een kortsluiting. Na deling wordt het gemiddeld kortsluitvermogen P_K verkregen.

Bij een te laag kortsluitvermogen zijn de spatverliezen hoog. De spatverliezen nemen af met een toenemend vermogen totdat een minimum bereikt wordt. Hierna neemt het spatverlies weer toe met een toenemend kortsluitvermogen.

Bij de verschillende spanningen bestaat een optimaal kortsluitvermogen met het laagste spatverlies. Het kortsluitvermogen met het laagste spatverlies, bij een bepaalde ingestelde spanning, is uitgezet in figuur 33. Uit deze figuur blijkt dat het optimale kortsluitvermogen toeneemt met toenemende spanning.

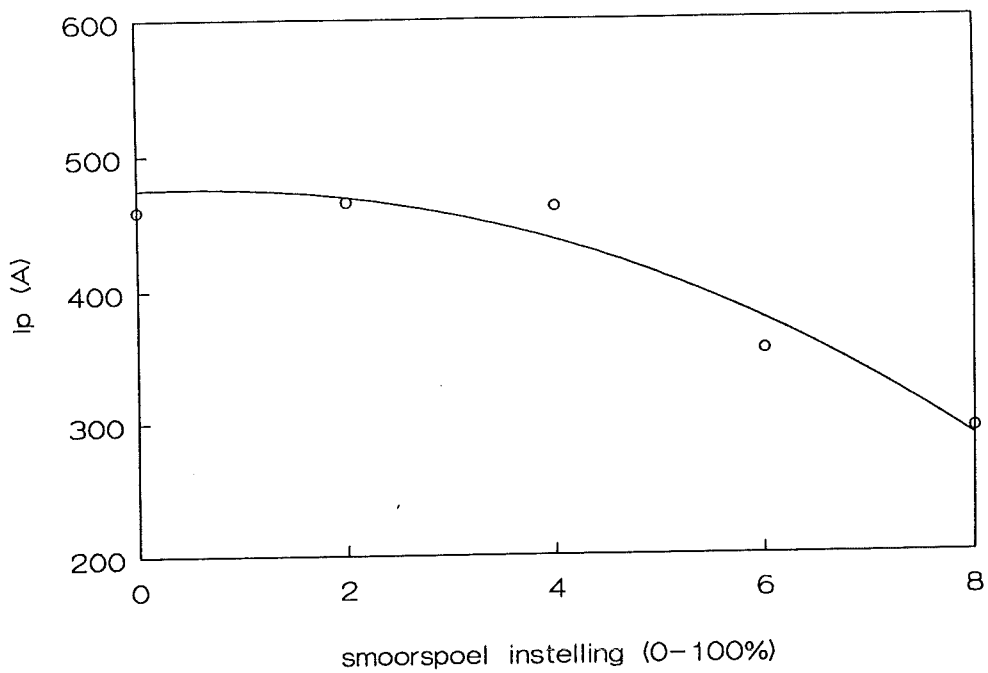


Fig. 34 De piekstroom bij verschillende zelfinductie instellingen, de ingestelde spanning is 20V, stroom 225A en de helling -2V/100A.

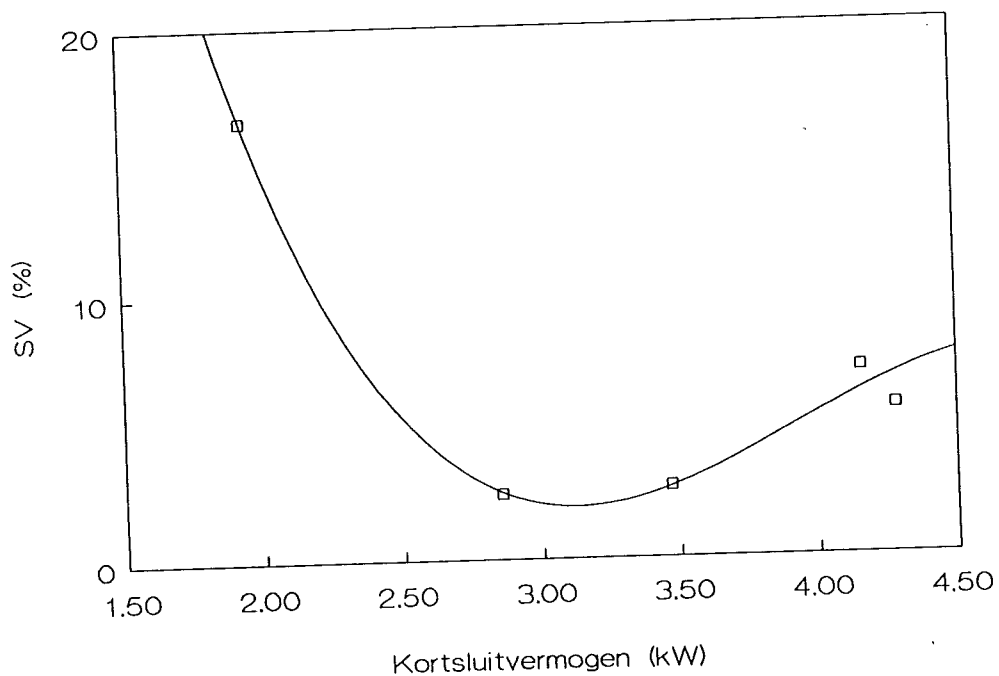


Fig. 35 Het spatverlies tegen het kortsluitvermogen bij een ingestelde spanning van 18V en stroom 175A, vaste instelling van de helling -2V/100A en verschillende zelfinductie instellingen (0-100%).

4.2 De verschillende instellingen van de stroombron

Experimenten zijn uitgevoerd met als doel de invloed van de zelfinductie en de U-I karakteristiek op het materiaaltransport te bestuderen. Hiertoe is de zelfinductie gevarieerd van 0 tot 100 % (0-8), in stappen van 25%. De helling is gevarieerd van horizontaal t/m $-6\text{V}/100\text{A}$ in stappen van $-2\text{V}/100\text{A}$.

De resultaten van de data-analyse staan gegeven in Appendix 2.

De waarden gegeven in de figuren zijn weer gemiddelden over drie metingen.

4.2.1 De zelfinductie

Allereerst is gekeken bij ingestelde waarden van 225A en 20V, 175A en 18V (punten op de band van maximale kortsluitfrequentie), of het spatverlies nog te verminderen zou zijn door de zelfinductie of de instelling van de helling te veranderen. Met een helling van $-2\text{V}/100\text{A}$, is de zelfinductie van 0 verhoogd naar 8.

In figuur 34 is de piekstroom uitgezet tegen de zelfinductie. Uit de figuur volgt dat de piekstroom afneemt met toenemende zelfinductie.

De kortsluittijden worden met hogere zelfinductie langer. Bij zelfinductie 8 neemt de kortsluittijd sterk toe evenals de boogtijd.

Bij toenemende zelfinductie is een minimum aan te geven voor het spatverlies. Bij 18V en 20V is het spatverlies het laagst bij zelfinductie 6 (75%).

Het kengetal ligt bij zelfinductie 8 (100%) met een hoog spatverlies rond de dertig procent. De kortsluitfrequentie is in dit geval weliswaar laag, maar de kortsluittijd is lang. Deze twee effecten heffen elkaar op waardoor het kengetal toch rond de dertig procent ligt. Hieruit blijkt dat het kengetal niet altijd een juist beeld geeft.

In figuur 35 en 36 is kortsluitvermogen uitgezet tegen het spatverlies.

Het spatverlies wordt lager met een toenemend kortsluitvermogen om vervolgens weer hoger te worden. Bij een bepaald kortsluitvermogen is het spatverlies minimaal. Het kortsluitvermogen wordt lager met toenemende zelfinductie omdat de piekstroom afneemt.

Zelfinductie 6 is een kritieke instelling voor het kortsluitboogproces bij 18V en 175A (en 200A). In Appendix 2, tabel 11 zijn 6 metingen gegeven bij 18V en 175A, vier van de metingen geven een laag spatverlies de andere twee metingen een hoog spatverlies. Tussen het verloop van de stroom en spanning bij het hoge en lage spatverlies bestaat geen groot verschil. Alleen de boogtijden zijn iets langer als een hoger spatverlies wordt geconstateerd. Deze resultaten komen uit een moment-

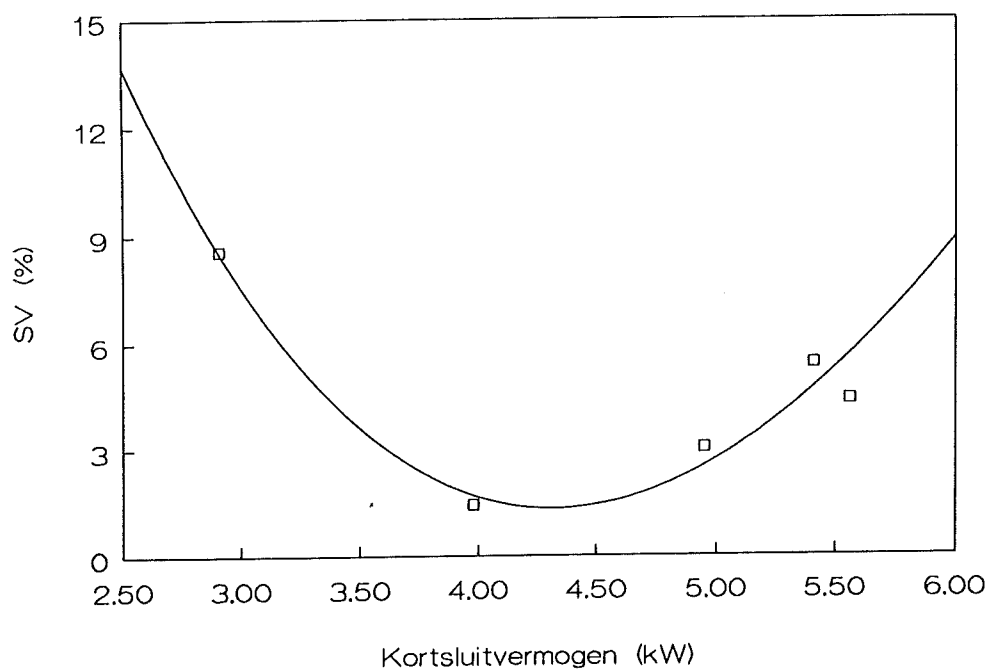


Fig. 36 Het spatverlies tegen het kortsluitvermogen bij een ingestelde spanning van 20V en stroom 225A, vaste instelling van de helling -2V/100A en verschillende zelfinductie instellingen (0-100%).

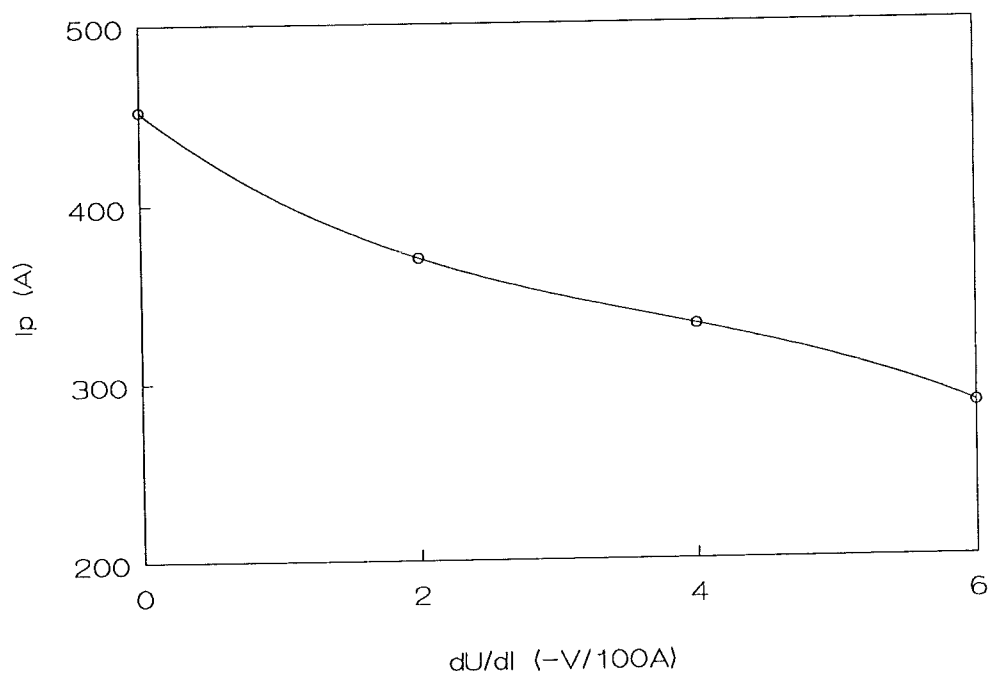


Fig. 37 De piekstroom bij verschillende instellingen van de helling, de ingestelde spanning is 18V, stroom 175A en smoorspoel 4 (50%).

opname van 400 ms gedurende een lasperiode van 30 s. Het kan zijn dat gedurende de 30 s een onregelmatigheid optreedt in het lasproces waardoor het spatverlies hoger wordt terwijl dit niet uit de meetresultaten van de transiënt recorder volgt.

Uit de metingen met verschillende zelfinductie bij 18 en 20V volgt dat zelfinductie 6 bij 20V het laagste spatverlies geeft. Bij 18V is de zelfinductie 4 de beste omdat het lasproces geen storingen vertoont en het spatverlies relatief laag is.

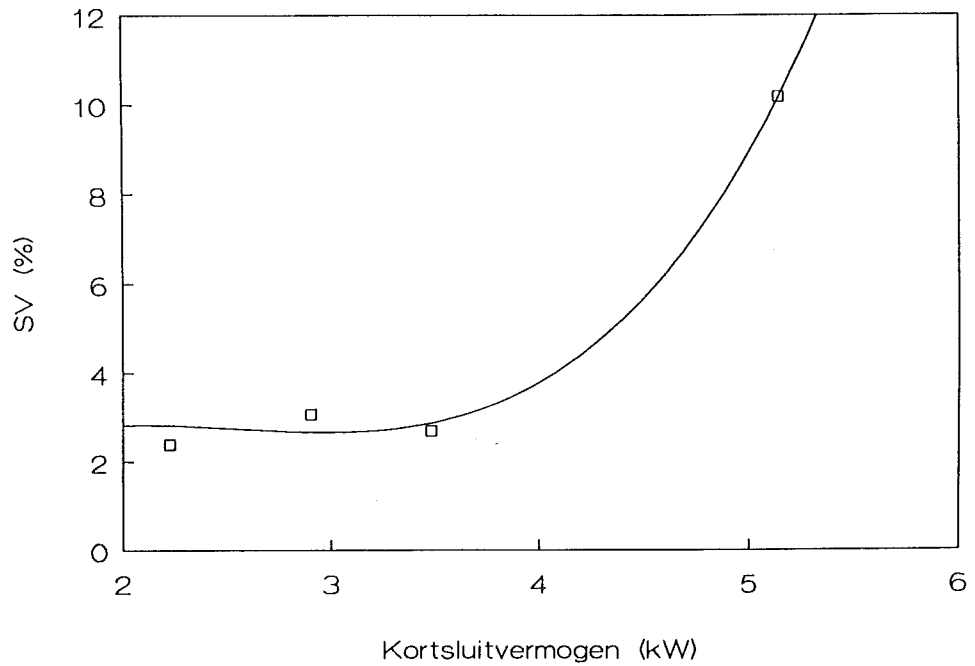


Fig. 38 Het spatverlies tegen het kortsluitvermogen bij een ingestelde spanning van 18 V en stroom 175A, zelfinductie (75%), de instelling van de helling is gevarieerd van horizontaal tot -6V/100A in stappen van -2V/100A.

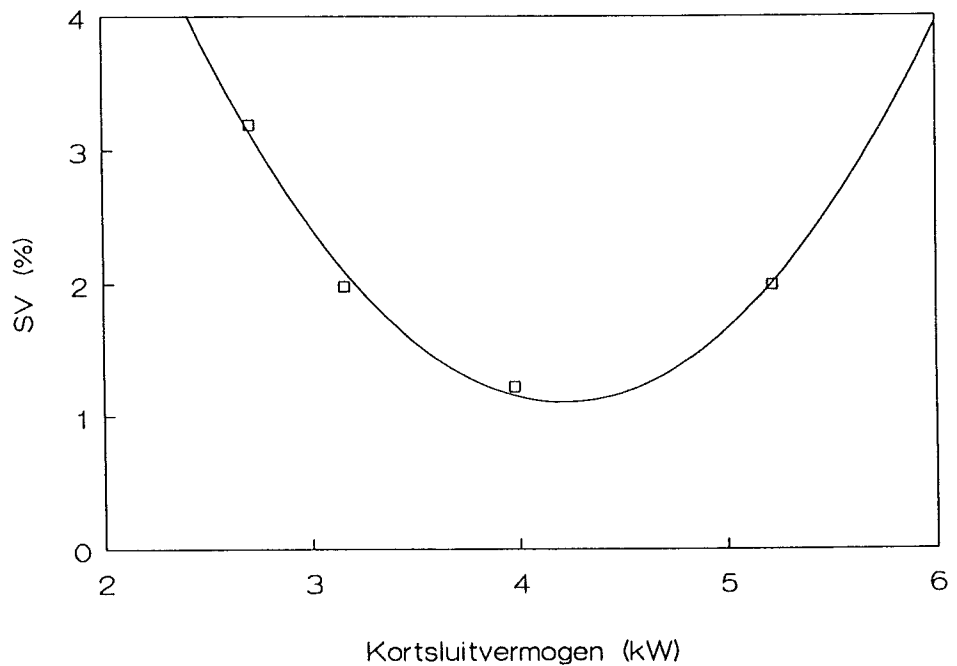


Fig. 39 Het spatverlies tegen het kortsluitvermogen bij een ingestelde spanning van 20 V en stroom 225A, zelfinductie (75%), de instelling van de helling is gevarieerd van horizontaal tot -6V/100A in stappen van -2V/100A.

4.2.2 De instelling van de U-I karakteristiek

Bij 18V en 175A, 20V en 225A is gekeken of met de beste instelling van de zelfinductie, het spatverlies nog verlaagd zou kunnen worden door de instelling van de helling te veranderen.

Als de ingeschakelde weerstand groter wordt krijgt de helling van de stroombronkarakteristiek een grotere daling en neemt de piekstroom af (zie fig. 37).

In figuur 38 en 39 is het kortsluitvermogen uitgezet tegen het spatverlies. Bij een te laag kortsluitvermogen (c.q. grote helling van de stroombronkarakteristiek) treedt een hoog spatverlies op evenals bij een te hoog kortsluitvermogen (c.q. kleine helling van de stroombronkarakteristiek).

Bij 20V is de invloed van de instelling van de helling op het spatverlies niet groot. Het kengetal ligt in alle gevallen dan ook rond de 30%. De instellingen -2 t/m -6V/100A geven wel enige spreiding in het spatverlies maar hier is geen duidelijke lijn in te ontdekken. De boogtijden blijven ongeveer gelijk evenals de kortsluitfrequentie die hoog is.

Bij 18V is de invloed van de U-I karakteristiek groter, een vlakke instelling van de U-I karakteristiek geeft een onregelmatig proces met een hoog spatverlies. Bij de andere instellingen treedt enige spreiding in het spatverlies op.

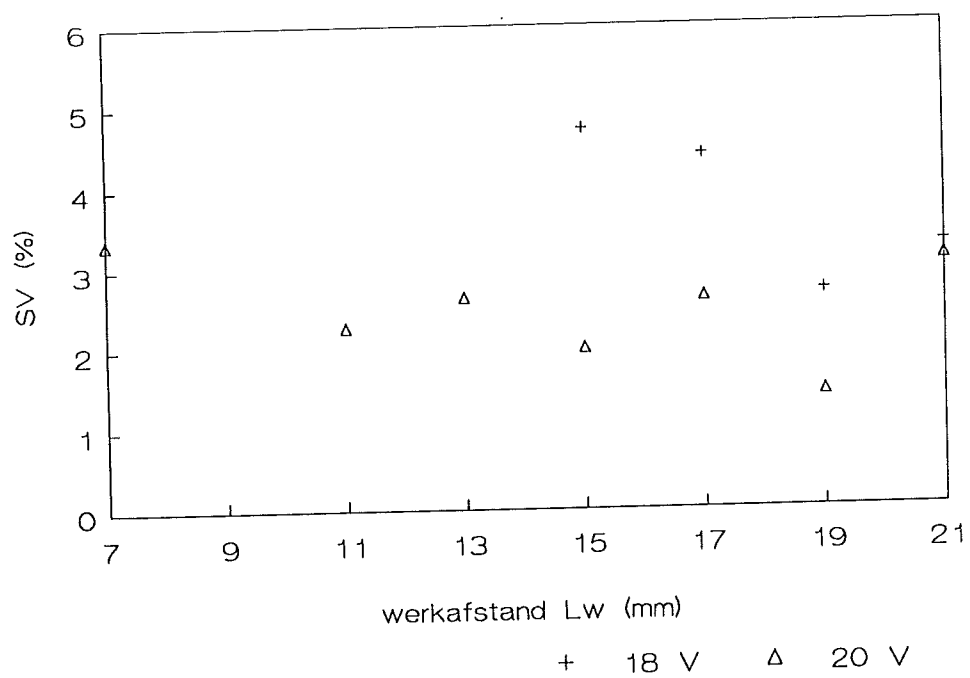


Fig. 40 Het spatverlies tegen de werkafstand, bij 18V en 20V en vaste instellingen van de zelfinductie en de helling.

4.3 De invloed van de werkafstand

Om de invloed van de werkafstand op de stabiliteit van het lasproces en het spatverlies vast te stellen is bij twee optimale instellingen van de stroom en spanning de werkafstand gevarieerd.

De waarden van deze metingen bij 18V en 20V zijn uitgezet in figuur 40.

Het spatverlies neemt eerst af met afnemende werkafstand om vervolgens weer toe te nemen.

De kortsluitfrequentie is het hoogst bij de grootste werkafstand. Deze komt echter niet overeen met het laagste spatverlies. De kortsluitfrequentie neemt af bij kleinere werkafstanden.

De piekstroom varieert wel maar hierin is geen duidelijke lijn te ontdekken.

De kortsluittijden blijven bij verschillende werkafstanden ongeveer gelijk.

Bij 18V en 20V ligt het kengetal rond de 30% bij een werkafstand van 19 mm. Bij deze instellingen is het spatverlies ook het laagst.

In par. 2.4.2 is de invloed besproken van de werkafstand op de lengte van de lasboog. Volgens de theorie zou de booglengte groter worden als de werkafstand kleiner wordt.

Dit blijkt in overeenstemming te zijn met de experimenten. Voor de lassen gemaakt met de verschillende werkafstanden zijn de dieptes van het lasbad opgemeten. Deze staan gegeven in Appendix 3, tabel 14. De lassen die met de kleinste werkafstand zijn gelegd, hebben de grootste diepte en breedte van alle lasbaden. De grotere diepte van het lasbad duidt op een hogere warmte-inbreng. De warmte-inbreng kan bij een gelijke boogstroom alleen hoger worden als de weerstand van de boog, oftewel de booglengte, toeneemt.

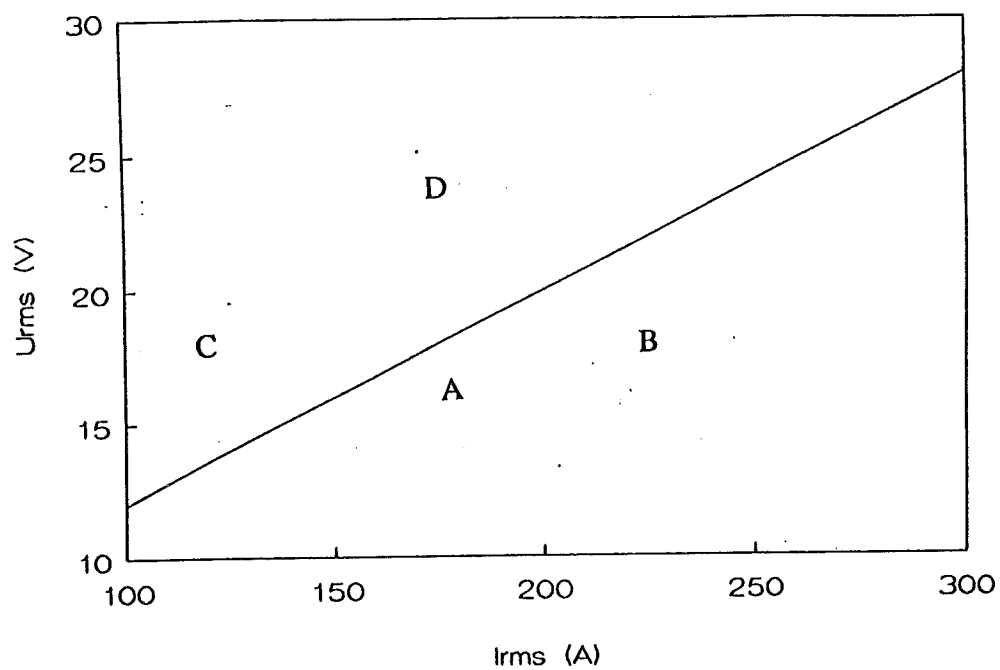


Fig. 41 De meetpunten aangegeven in een stroom- spanningsfiguur.

4.4 De instelling van de stroombron buiten de maximale kortsluitfrequentieband

Uit de eerste metingen is gebleken dat er een band bestaat tussen de stroom en spanning bij een maximale kortsluitfrequentie en een minimaal spatverlies. Er is vervolgens gekeken of het spatverlies buiten deze band nog verbeterd kan worden door de U-I karakteristiek of de zelfinductie te veranderen.

Bij de metingen buiten de optimale band is het kortsluitboogproces op het gehoor afgeregeld. In figuur 41 zijn de meetpunten aangegeven. De helling van de stroombronkarakteristiek en de zelfinductie werden zodanig ingesteld tot de hoogste frequentie hoorbaar werd. De resultaten van deze metingen zijn gegeven in Appendix 4.

Aanvankelijk zijn de zelfinductie en de instelling van de helling veranderd in het gebied beneden de ideale band. In dit gebied is de stroom te hoog voor de ingestelde spanning of de spanning te laag voor de ingestelde stroom. De draadsnelheid is groter dan de afsmeltsnelheid. Hierdoor kan "stubbing" optreden. In dit gebied is gemeten bij een ingestelde spanning van 16V en een stroom van 175A (punt A). Daarnaast is gemeten bij een ingestelde spanning van 18V en 225A (punt B). In beide gevallen bleek enige verbetering mogelijk in het proces of het spatverlies door de U-I karakteristiek horizontaal in te stellen. Het spatverlies blijft echter zeer hoog, omdat nog steeds "stubbing" optreedt door de hoge draadsnelheid. Door de horizontale U-I karakteristiek treden vaak twee kortsluitingen vlak na elkaar op. De eerste stroompiek is zeer hoog waardoor het lasbad in sterke beroering gebracht wordt en de lasdraad vlak na de eerste kortsluiting weer aangetikt wordt. Daarnaast ontsteekt de boog in enkele gevallen niet omdat de afstand tussen draad en lasbad te groot is geworden door de krachtige verbreking van de vloeistofbrug. Dat twee kortsluitingen vaak vlak na elkaar plaats vinden is ook te zien aan de grote standaardafwijking van de piekstroom.

In het gebied boven de band van maximale kortsluitfrequentie zijn ook metingen uitgevoerd met verschillende instellingen van de U-I karakteristiek en de zelfinductie. Deze metingen zijn uitgevoerd bij 18V en 120A (punt C) en bij 24V en 175A (punt D).

Boven deze band bleek het proces verbeterd te kunnen worden door de helling een grotere daling te geven ($-6V/100A$), waardoor de piekstroom afneemt. De pinchkracht zal kleiner zijn en het verbreken van de vloeistofbrug verloopt rustiger. Het spatverlies neemt in dit geval sterk af maar blijft wel hoger dan in de band voor maximale kortsluitfrequentie. Door de grotere daling van de helling neemt de kortsluittijd enigszins toe.

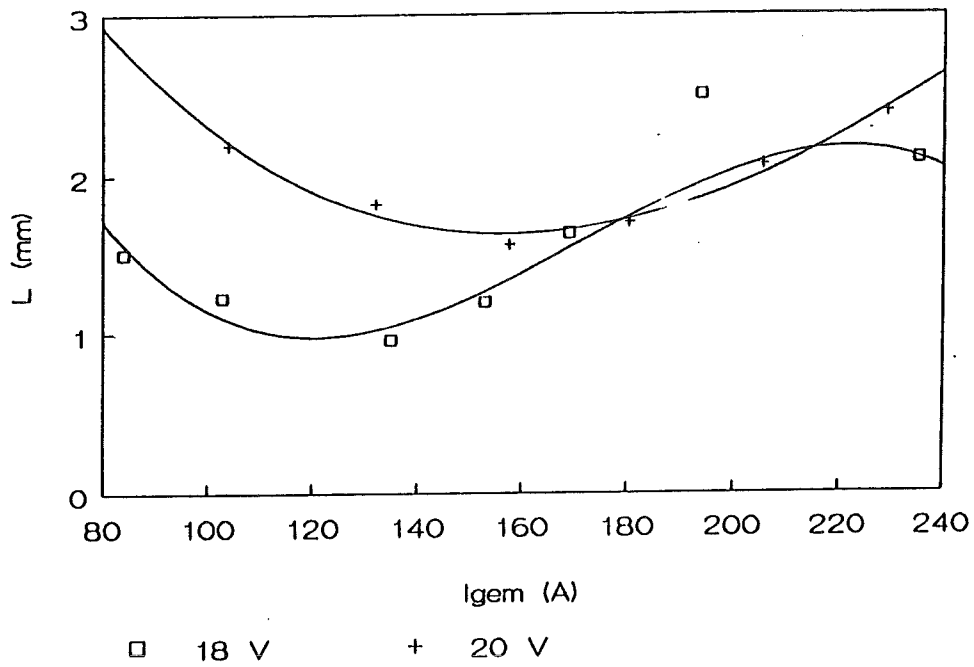


Fig. 42 Het verloop van de berekende vloeistofbruglengte tegen de gemiddelde stroom bij een ingestelde spanning van 18V en 20V.

5. DISCUSSIE

5.1 De lengte van de vloeistofbrug en de lasboog

In de figuren 22 en 23 is het verloop van de stroom en spanning tijdens het kortsluitbooglassen gegeven. In deze figuren is te zien dat de stroom gedurende de boogtijd eerst geleidelijk afneemt. Na een zekere tijd wordt de lasstroom evenals de spanning min of meer constant. Vlak voor de volgende kortsluiting ontstaat enige fluctuatie in de stroom. Hierna vindt kortsluiting plaats en neemt de stroomsterkte weer toe. Omdat de spanning evenals de stroomsterkte gedurende de boogperiode ongeveer constant blijft, kan geconcludeerd worden dat de booglengte tijdens de boogperiode ook min of meer constant blijft, totdat het oscillerende lasbad contact met de druppel maakt. Als de booglengte namelijk afneemt, zal met een stroombron die een vlakke karakteristiek heeft de stroomsterkte toenemen (zie fig. 6). Dit impliceert dat de boog gedurende de boogperiode langs de druppel omhoog klimt zodat de lengte ongeveer constant blijft gedurende de boogperiode, totdat deze aangetikt wordt door de golf die in het lasbad ontstaat.

Uit snelle filmopnamen (ref. 13) blijkt dat door de druk die ontstaat bij het ontsteken van de lasboog, in het lasbad een indeuking ontstaat. Door de boogdruk wordt het vloeibare metaal opzij gedrukt. Zodra de extra boogdruk wegvalt zal een staande golfbeweging in het lasbad ontstaan die afhankelijk is van de geometrie van het lasbad, zoals beschreven in paragraaf 2.6. De golf kan onder bepaalde omstandigheden contact maken met de druppel die aan het uiteinde van de lasdraad hangt.

Zoals uit de theorie blijkt, is de lengte van de vloeistofbrug van belang voor het verbreken van de vloeistofbrug. Om enig inzicht in het verloop van deze lengte te krijgen bij verschillende instellingen, is deze lengte berekend m.b.v de volgende vergelijking:

$$L = \frac{V_d}{f} \quad (13)$$

waarbij L de vloeistofbruglengte, V_d de draadsnelheid en f de kortsluitfrequentie is.

Met behulp van vergelijking 13 is de lengte van de vloeistofbrug bij verschillende stroomsterktes berekend voor 18V en 20V, bij constante instelling van de U-I karakteristiek en constante zelfinductie. In figuur 42 zijn de berekende vloeistofbruglengtes uitgezet als functie van de gemiddelde stroomsterkte bij een ingestelde spanning van 18 en 20V. In deze figuur is te zien dat bij gelijke spanning en toenemende stroomsterkte de lengte van de vloeistofbrug eerst afneemt en bij een bepaalde stroomsterkte weer toeneemt.

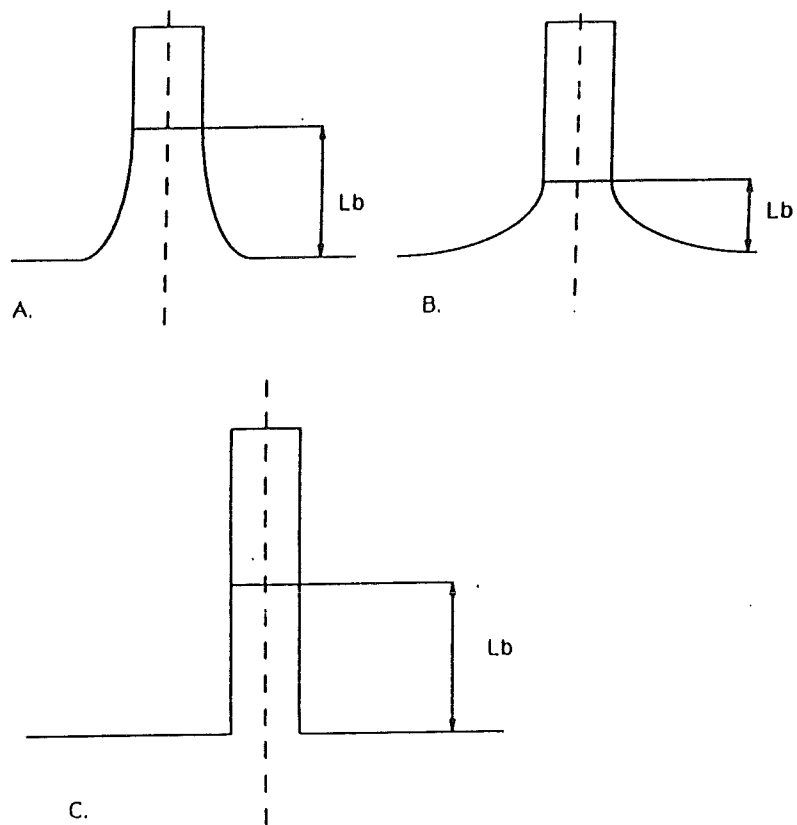


Fig. 43 Verschillende voorkomende configuraties van de vloeistofbruglengte (A, B) en de cilindrische configuratie (C), zoals gebruikt voor de berekening.

Opgemerkt moet worden dat de lengte van de vloeistofbrug die op deze manier verkregen wordt niet geheel overeenstemmen zal met de werkelijkheid, omdat geen rekening is gehouden met de configuratie van de vloeistofbrug (zie figuur 43).

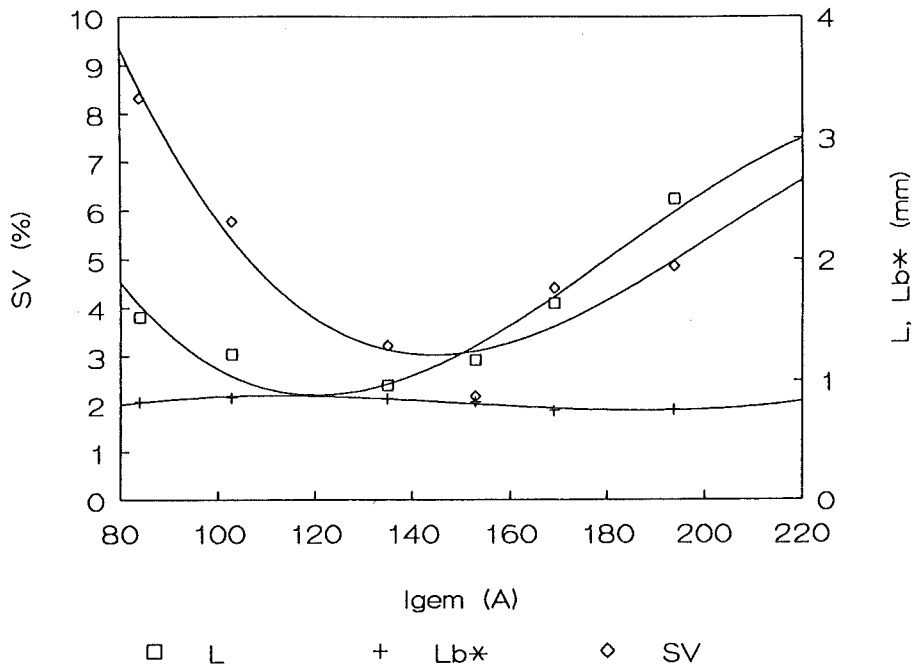


Fig. 44 Het spatverlies, de kritische vloeistofbruglengte L_{b*} en de berekende vloeistofbruglengte tegen de gemiddelde stroomsterkte bij een ingestelde spanning van 18 V, zelfinductie 6 (75%) en helling $-2V/100A$.

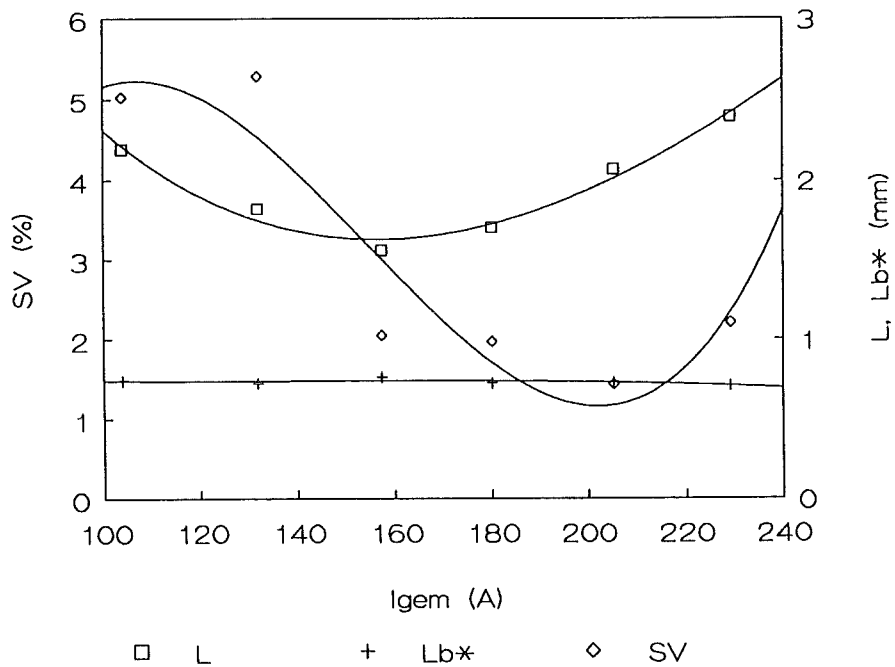


Fig. 45 Het spatverlies, de kritische vloeistofbruglengte L_{b*} en de berekende vloeistofbruglengte tegen de gemiddelde stroomsterkte bij een ingestelde spanning van 20V, zelfinductie 6 (75%) en helling $-2V/100A$.

5.2 De invloed van de vloeistofbruglengte op het materiaaltransport

5.2.1 De vloeistofbruglengte bij verschillende spanningen en stroomsterktes

Op basis van de theoretische beschouwing gegeven in paragraaf 2.5.2 mag verwacht worden dat de kracht die nodig is voor het verbreken van de vloeistofbrug afhangt van de kritische lengte van de vloeistofbrug.

Om de kritische lengte L_b^* beter te kunnen vergelijken met de werkelijke lengte van de vloeistofbrug, zijn deze voor 18 en 20V uitgezet tegen de gemiddelde stroomsterkte (zie fig. 44 en 45).

De kritische lengte L_b^* is bepaald uit figuur 14, uitgaande van de gemiddelde piekstroom en een oppervlaktespanning $\gamma=1.205$ N/m. Als de oppervlaktespanning hoger is zal de lijn naar boven verschuiven, indien de oppervlaktespanning lager is zal deze naar beneden verschuiven (vergelijking 11).

De werkelijke lengte L van de vloeistofbrug is berekend met vergelijking 13.

In de figuren is tevens het spatverlies aangegeven. Uit deze figuren blijkt dat de lengte L in alle gevallen boven de lengte L_b^* ligt. De piekstroom is dus groot genoeg om de vloeistofbrug te verbreken. Dit is in overeenstemming met de kortsluittijden die ongeveer gelijk blijven. Bij lage stroomsterkte ligt de lengte L ver boven de lengte L_b^* . De piekstroom is in deze gevallen veel groter dan noodzakelijk, zodat de kracht waarmee de vloeistofbrug verbroken wordt te sterk is. Door de krachtige verbreking van de vloeistofbrug is het spatverlies in deze gevallen dan ook groot. Het spatverlies begint af te nemen als de lengte L de kritische lengte L_b^* begint te naderen. De pinchkracht komt dan in de buurt van de kracht die nodig is om de vloeistofbrug te verbreken. Tijdens het verbreken van de brug zal daarom minder materiaal in de vorm van spatten verloren gaan.

Bij verdere verhoging van de stroomsterkte neemt het spatverlies weer toe, omdat "stubbing" (vastlopen van de draad in het lasbad) optreedt. De pinchkracht is in enkele gevallen niet groot genoeg om de vloeistofbrug te verbreken. Het verschil tussen de lengte L en L_b^* wordt weer groter omdat de kortsluitfrequentie niet meer toeneemt terwijl de draadsnelheid wel groter wordt.

Wanneer L in de buurt komt van L_b^* kunnen er problemen gaan optreden.

Bij 18V, 175A en 200A, zelfinductie 6 en helling -2V/100A bijvoorbeeld was het proces de ene keer stabiel en de andere keer weer onstabiel. Blijkbaar is de pinchkracht soms net niet groot genoeg om de vloeistofbrug te verbreken. Bovendien moeten we er nog rekening mee houden dat L in werkelijkheid kleiner is i.v.m. de "echte" configuratie van de vloeistofbrug (par. 5.1).

De gemeten waarden van de stroom bevestigen dit, in figuur 46 is het verloop van de stroom bij

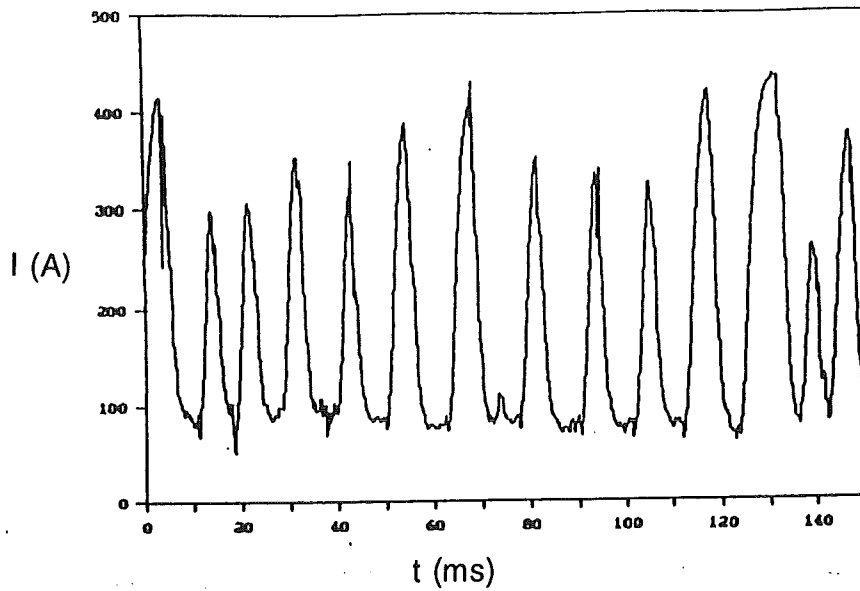


Fig. 46 Het stroomverloop bij een regelmatig proces, ingestelde spanning 18V en stroom 175A, helling -2V/100A en zelfinductie 6 (75%).

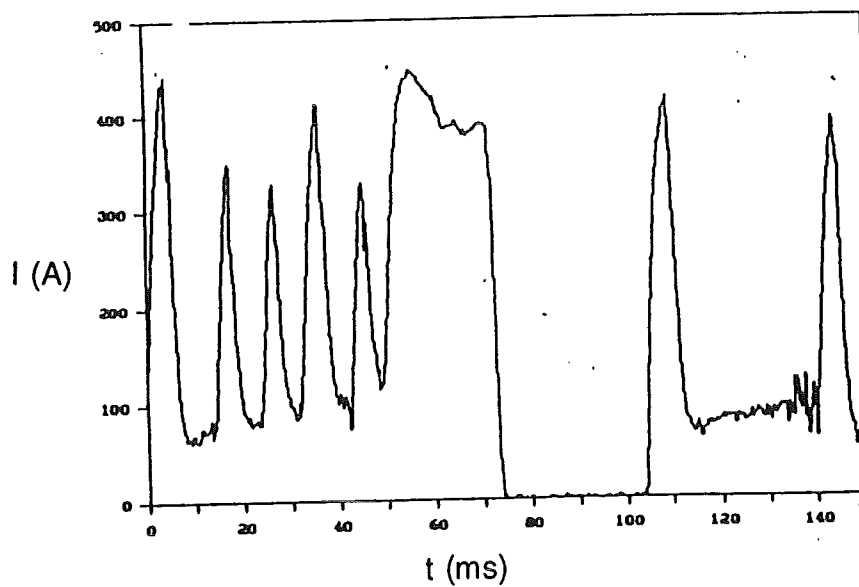


Fig. 47 Het stroomverloop bij een onregelmatig proces, ingestelde spanning 18V en stroom 175A, helling -2V/100A en zelfinductie 6 (75%).

een laag spatverlies en in figuur 47 de gemeten stroom bij een hoog spatverlies weergegeven. In figuur 47 is een piekstroom te zien die enige tijd blijft bestaan, na verbreking ontsteekt de lasboog niet. De kracht is in dit geval dus niet groot genoeg geweest om de vloeistofbrug direct te verbreken.

5.2.2 De invloed van de zelfinductie en de U-I karakteristiek

Bij een te lage piekstroom is het spatverlies hoog omdat de vloeistofbrug niet gemakkelijk verbroken wordt. In dit geval is de kortsluittijd lang. Bij de juiste piekstroom zal de vloeistofbrug met weinig materiaalverlies verbroken worden. Het lasbad zal bij het ontsteken van de boog een zodanige beweging krijgen dat de druppel regelmatig contact maakt met het lasbad. Bij een te hoge piekstroom wordt de vloeistofbrug zo krachtig verbroken dat veel spatverlies optreedt.

Naarmate de zelfinductie hoger is, neemt de stroompiek af. Door de hogere zelfinductie kan de stroom minder snel toenemen. De kracht waarmee de vloeistofbrug verbroken wordt neemt hierdoor ook af, het zal daarom langer duren voor de vloeistofbrug verbroken wordt. Dit komt overeen met de gemeten waarden van de kortsluittijd, deze worden met toenemende zelfinductie langer. Bij zelfinductie 100% neemt bij 18 en 20V de kortsluittijd sterk toe. Het kan zijn dat de Lorentzkracht in dit geval niet meer in alle gevallen groot genoeg is om de vloeistofbrug te verbreken. De standaardafwijking van de kortsluittijd is in deze gevallen ook groot hetgeen duidt op een grote onregelmatigheid in het verbreken van de vloeistofbrug. In figuur 48 zijn de stroom en spanning gegeven, die opgenomen zijn met de transiënt recorder bij 20V. In enkele gevallen is te zien dat de stroom toeneemt tot een bepaalde piekwaarde. Hierna blijft de stroom deze waarde houden totdat de brug op een of andere manier toch verbroken wordt. Waarschijnlijk zal door de Joulese verwarming een groter gedeelte van de draad vloeibaar worden. Hierdoor neemt de lengte van de vloeistofbrug toe totdat deze groter is dan L_b^* , waarna de kortsluiting verbroken kan worden.

Met de U-I karakteristiek kan de maximale piekstroom geregeld worden. De kracht die de vloeistofbrug verbreekt (pinchkracht) mag niet te groot worden omdat hierdoor gedeeltes van de vloeistofbrug weggeslingerd worden.

Als de U-I karakteristiek horizontaal ingesteld wordt, is de pinchkracht te groot en is de verbreking van de vloeistofbrug te krachtig. De afstand tussen draad en lasbad is hierdoor soms te groot zodat de lasboog niet meer kan ontsteken tot de volgende kortsluiting.

Als de daling van de helling te groot is, kan de vloeistofbrug niet meer verbroken worden t.g.v. een kleine piekstroom en neemt de kortsluittijd toe.

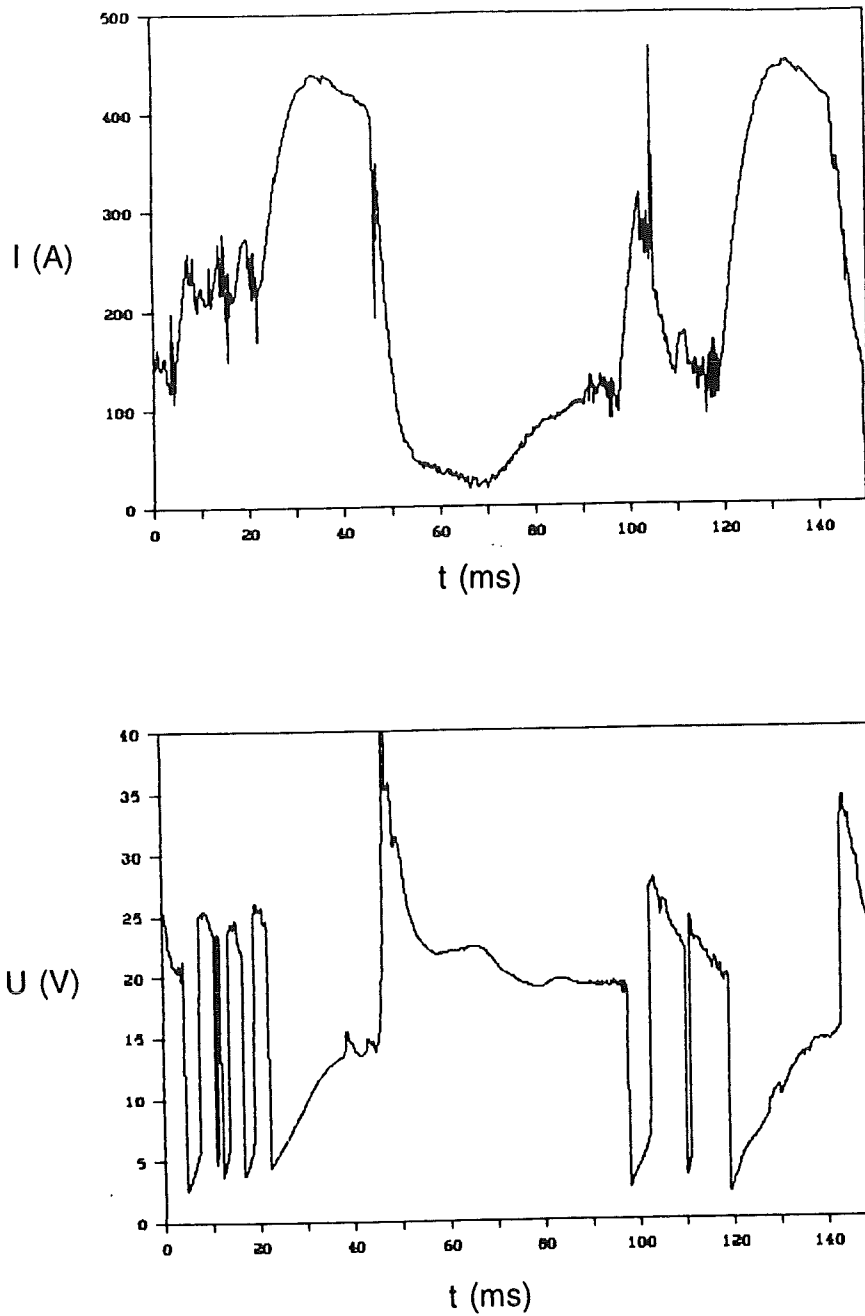


Fig. 48 De stroom en spanning opgenomen met de transiënt recorder, bij een ingestelde spanning van 20V en stroom van 225A, helling $-2\text{V}/100\text{A}$ en zelfinductie 8 (100%).

5.2.3 De vloeistofbruglengte bij verschillende werkafstanden

Uit de meetresultaten volgt dat de kortsluitfrequentie afneemt als de werkafstand kleiner wordt. Bij een kleinere werkafstand neemt de draadsnelheid echter toe. Uit vergelijking 13 blijkt dat deze twee effecten een tegengestelde uitwerking hebben op de vloeistofbruglengte.

In Appendix 5, tabel 20 zijn de vloeistofbruglengtes gegeven, die berekend zijn voor de verschillende werkafstanden bij een ingestelde spanning van 20V en een stroomsterkte van 225A.

De berekende vloeistofbruglengte varieert wel enigszins bij de verschillende werkafstanden, maar hier is geen duidelijke lijn in te herkennen. De krachten nodig voor verbreking van de vloeistofbruglengte zullen dus door de veranderende werkafstand ook niet wezenlijk veranderen.

5.2.4 De lengte van de vloeistofbrug buiten de maximale kortsluitfrequentieband

Uit de metingen met verschillende instellingen van stroom en spanning is gebleken dat boven de maximale kortsluitfrequentieband de pinchkracht te groot is voor de verbreking van de vloeistofbrug, waardoor een relatief groot spatverlies optreedt. De piekstroom moet dus verlaagd worden, zodat de verbreking van de vloeistofbrug minder heftig plaatsvindt. De piekstroom kan verlaagd worden door de U-I karakteristiek een grotere dalende helling te geven.

Inderdaad blijkt dat hierdoor in dit werkgebied het spatverlies aanzienlijk verminderd wordt. De piekstroom neemt af en de kortsluittijd toe.

In het gebied beneden de maximale kortsluitfrequentieband kan "stopping" optreden. Als "stopping" optreedt kan de kortsluiting niet verbroken worden. Door de vlakke U-I karakteristiek kan de piekstroom echter sterk toenemen waardoor de kortsluiting toch verbroken wordt. Door de krachtige ontsteking zal de lasboog het lasbad echter in heftige beroering brengen waardoor weer snel een kortsluiting zal plaatsvinden. Het is duidelijk dat het proces erg instabiel zal zijn met een hoog spatverlies.

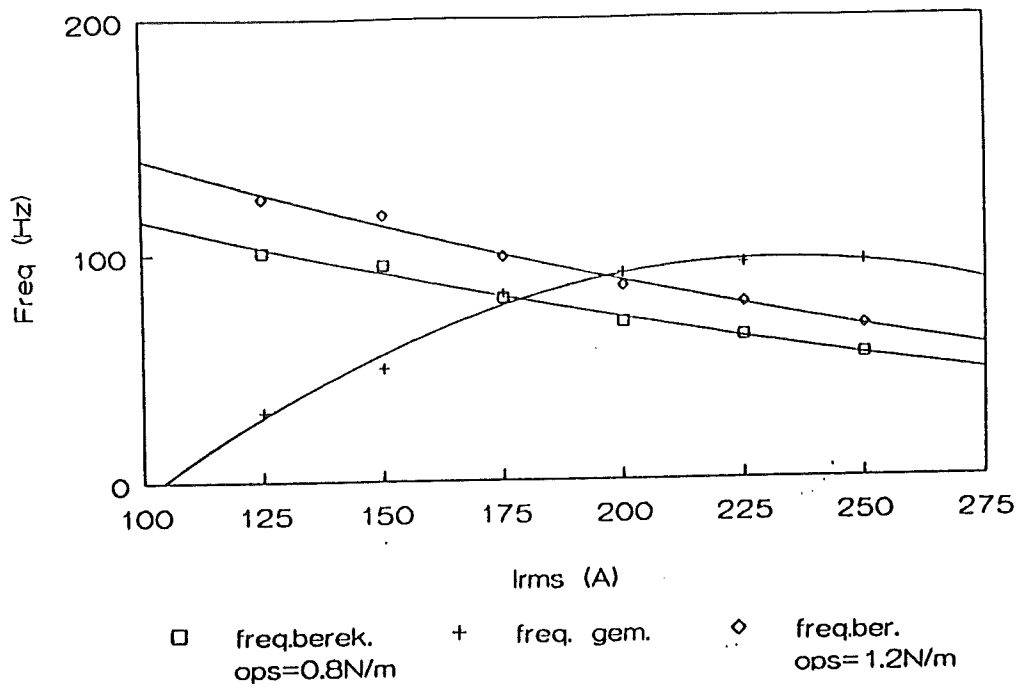


Fig. 49 De gemeten en berekende frequenties tegen de gemiddelde stroom, ingestelde spanning 20V, zelfinductie 6 (75%) en helling -2V/100A.

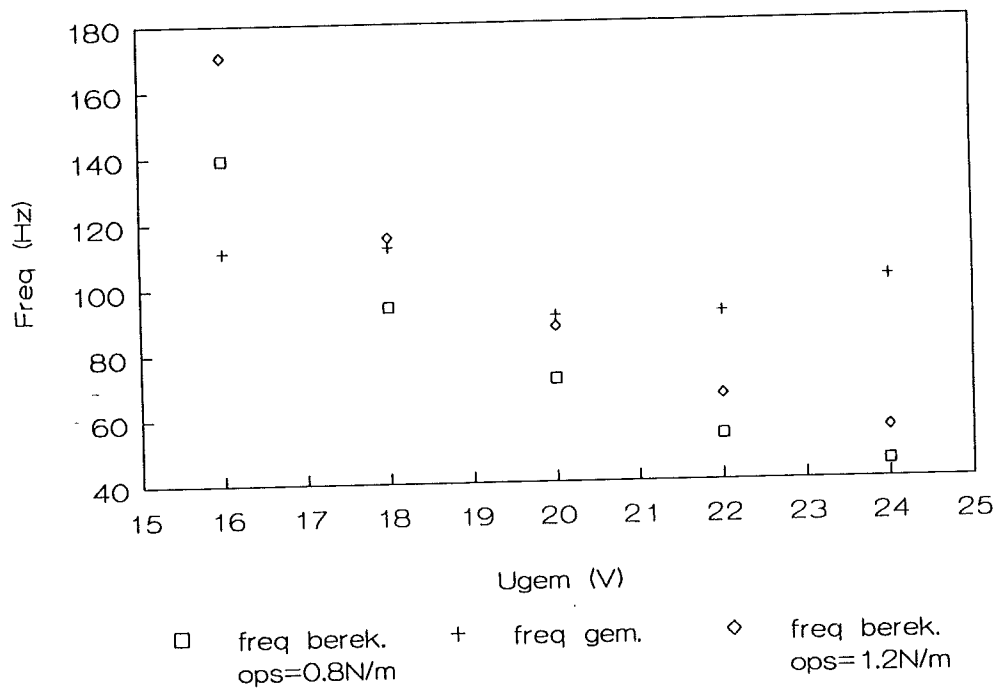


Fig. 50 De gemeten en berekende frequenties tegen de spanning, bij de optimale instelling van de stroom.

5.3 De invloed van de oscillatiebeweging van het lasbad

De beweging van het lasbad heeft een grote invloed op de kortsluitfrequentie. De oscillatiebeweging van het lasbad moet zodanig zijn dat de draad in hoge frequentie aangetikt wordt. De beweging moet echter regelmatig zijn, zodat ook het materiaaltransport op regelmatige wijze plaatsvindt. De golfbeweging in het lasbad ontstaat door het ontsteken van de lasboog na de kortsluiting. Afhankelijk van de boogdruk en de synchronisatie van ontsteken van de lasboog met de oscillatiebeweging, kan de golfbeweging in het lasbad versterkt dan wel tegengewerkt worden.

5.3.1 De geometrie van het lasbad

In paragraaf 2.6 is de invloed van verschillende parameters beschreven op de beweging van het lasbad. Met vergelijking 12 kan de oscillatiefrequentie berekend worden die in het lasbad ontstaat, afhankelijk van de oscillatie, de oppervlaktespanning, de dichtheid en de geometrie van het lasbad. Bij 20 V, zelfinductie 6, helling $-2\text{V}/100\text{A}$, zijn bij verschillende ingestelde stroomsterktes de oscillatiefrequenties berekend afhankelijk van de breedte van het lasbad.

Omdat de tijd waarin de stroomsterkte afneemt na het ontsteken van de boog vrij kort is, wordt aangenomen dat oscillatie van het type mode 1 optreedt (zie fig. 18, 19).

De oscillatiefrequenties zijn berekend met $\gamma=1,2 \text{ N/m}$ en $\gamma=0,8 \text{ N/m}$ omdat de oppervlaktespanning niet precies bekend is. Voor de dichtheid ρ is 7900 kg/m^3 genomen (ref. 6). De berekende oscillatiefrequenties zijn samen met de gemeten kortsluitfrequenties als functie van de stroomsterkte in figuur 49 weergegeven.

De kortsluitfrequentie gemeten bij een lage ingestelde stroomsterkte ligt veel lager dan de oscillatiefrequentie. In dit geval mist de oscillatiebeweging de druppel regelmatig waardoor de kortsluitfrequentie lager is dan de oscillatiefrequentie. Dit wordt ook waargenomen in de snelle filmopnamen (ref. 13).

Bij de ingestelde stroom met de maximale kortsluitfrequentie, komt de gemeten kortsluitfrequentie redelijk overeen met de berekende oscillatiefrequentie voor $\gamma=1,2 \text{ N/m}$. In dit geval zal de oscillatiebeweging het draaduiteinde niet missen waardoor de kortsluitfrequentie gelijk is aan de oscillatiefrequentie van het lasbad.

Bij hoge stroomsterkte is de kortsluitfrequentie hoger dan de oscillatiefrequentie. In dit geval gaat de draadsnelheid een overheersende rol spelen. Door de grotere draadsnelheid maakt de draad eerder contact met het lasbad, de kortsluiting kan zelfs al plaatsvinden voordat de oscillatiebeweging de maximale amplitude bereikt. Omdat meerdere kortsluitingen na elkaar kunnen plaatsvinden, kan de kortsluitfrequentie hoger zijn dan de oscillatiefrequentie. Het proces is in dit geval echter

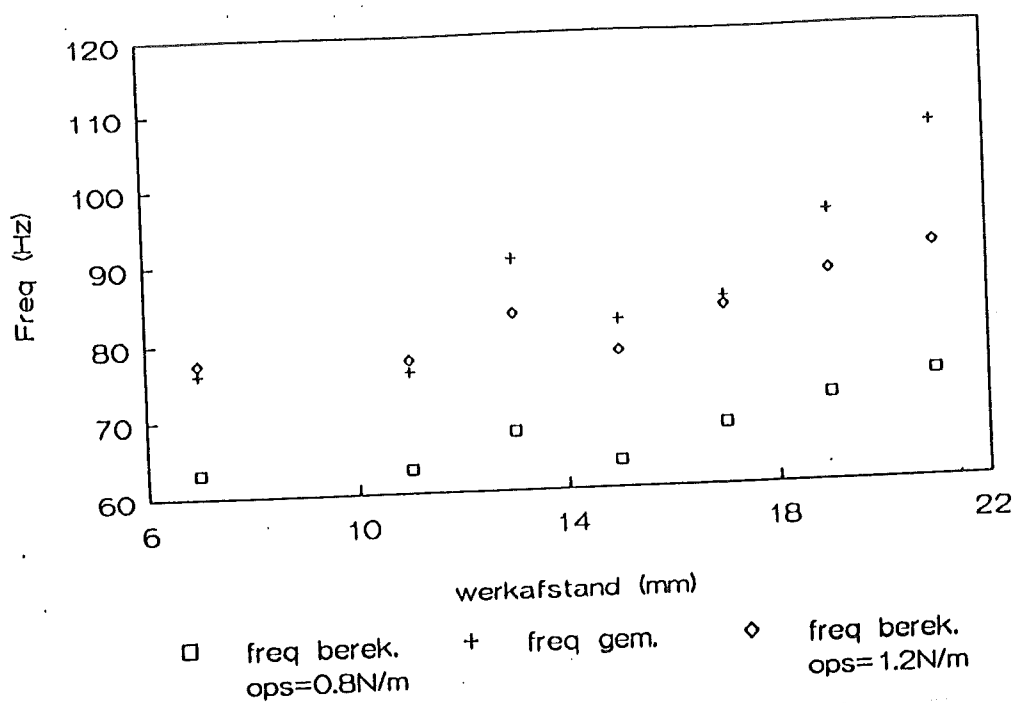


Fig. 51 De gemeten en berekende frequenties bij verschillende werkafstanden, 20V en 200A, zelfinductie 6 (75%) en helling -2V/100A.

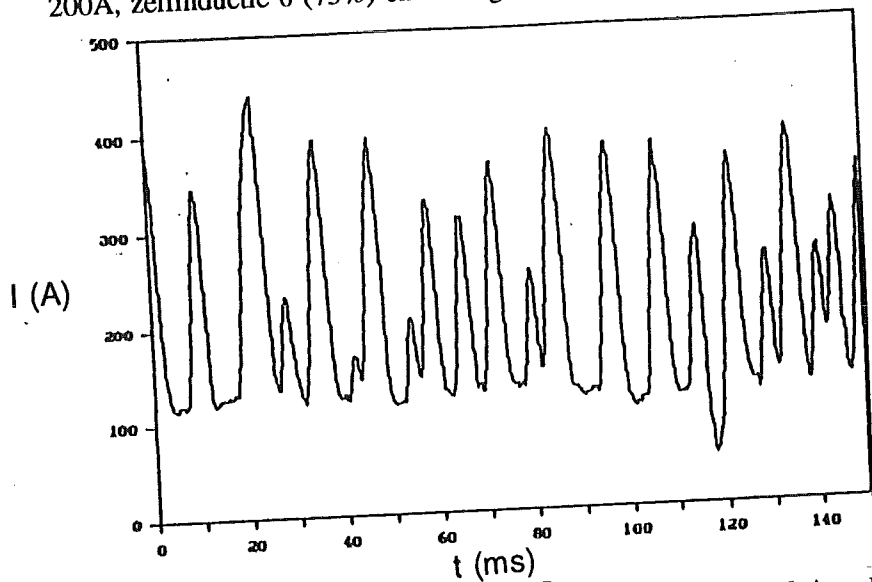


Fig. 52 Het stroomverloop bij een werkafstand van 21mm, 20 V 225 A, zelfinductie 6 (75%) en helling -2V/100A.

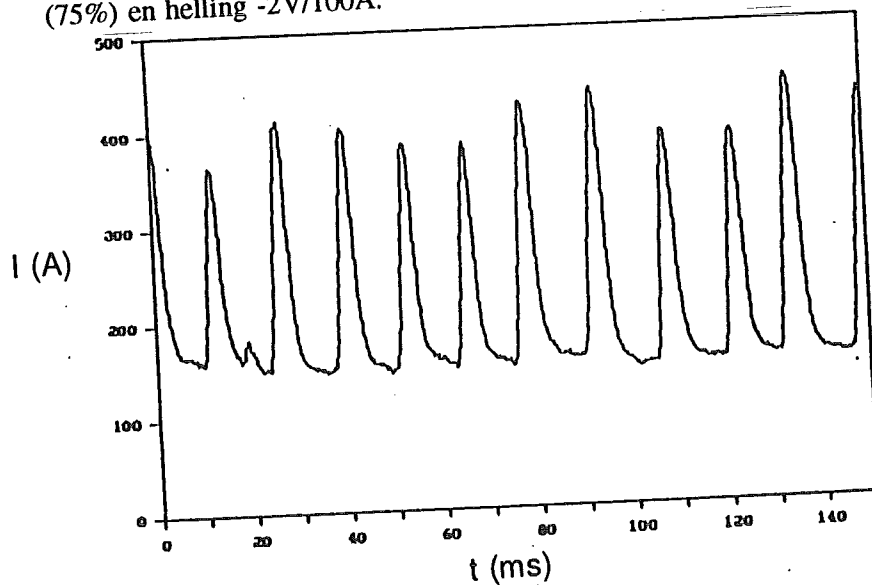


Fig. 53 Het stroomverloop bij een werkafstand van 7mm, 20 V 225 A, zelfinductie 6 (75%) en helling -2V/100A.

zeer onregelmatig omdat het ontsteken van de boog en de oscillatiebeweging niet synchroon lopen. Bovendien zal de verbreking van de vloeistofbrug zeer moeizaam verlopen door de korte vloeistofbruglengte.

In figuur 50 zijn de oscillatiefrequenties gegeven, berekend voor de instellingen van stroom en spanning in de maximale kortsluitfrequentieband. De kortsluitfrequenties bij 18V en 20V komen overeen met de berekende oscillatiefrequenties. De kortsluitfrequentie bij 16V is lager, hier mist de oscillatiebeweging toch waarschijnlijk nog regelmatig de lasdraad. Bij 22V en 24V is de kortsluitfrequentie hoger dan de berekende oscillatiefrequentie. In deze gevallen komt het relatief grote lasbad waarschijnlijk in een onrustige beweging, waardoor de draad frequenter aangetikt wordt. De standaardafwijking van de kortsluitfrequentie is in dit geval ook hoger dan de standaardafwijking van de andere maximale kortsluitfrequenties.

De werkafstand heeft invloed op de breedte van het lasbad, het lasbad is het smalst bij de grootste werkafstand. De breedte van het lasbad neemt vervolgens toe met afnemende werkafstand en blijft bij zeer kleine werkafstanden ongeveer constant (zie Appendix 5, tabel 23). In figuur 51 zijn de oscillatiefrequenties gegeven met de verschillende breedten van de lasbaden voor $\gamma=1,2$ en $\gamma=0.8$ N/m. De frequentie is maximaal bij het smalste lasbad en neemt vervolgens af met de breedte van het lasbad. Aangenomen wordt weer dat oscillatie van het type mode 1 optreedt. Uit de figuur blijkt dat de berekende oscillatiefrequentie redelijk overeenkomt met de kortsluitfrequentie voor $\gamma=1.2$ N/m. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de krachten bij veranderende werkafstand inderdaad gelijk blijven en dat de kortsluitfrequentie verandert doordat de breedte van de lasbaden niet constant is.

De kortsluitfrequentie bij werkafstand 21 mm ligt iets hoger dan de berekende oscillatiefrequentie. In dit geval is de beweging van het lasbad waarschijnlijk onrustiger dan in de andere gevallen. Dit blijkt ook uit figuur 52, hier is het stroomverloop als functie van de tijd gegeven bij een werkafstand van 21 mm, het verloop van de stroom bij kleinere werkafstanden is veel regelmatig (zie fig. 53).

Het niet geheel synchroon lopen van de ontsteking van de boog met de oscillatiebeweging van het lasbad kan hiervan de oorzaak zijn. Bij werkafstand 21 mm kan de gasbescherming ook onvoldoende geweest zijn, waardoor gasontwikkelingen het lasproces verstoren. Het lasuiterlijk bevestigt dit vermoeden. De lassen gelegd met de grootste werkafstanden hebben in het oppervlak veel meer slakeilandjes dan de lassen die met een kleinere werkafstand zijn gelegd. Deze slakeilandjes duiden op een hoger zuurstofgehalte in het lasbad, dat met mangaan en silicium gereageerd heeft.

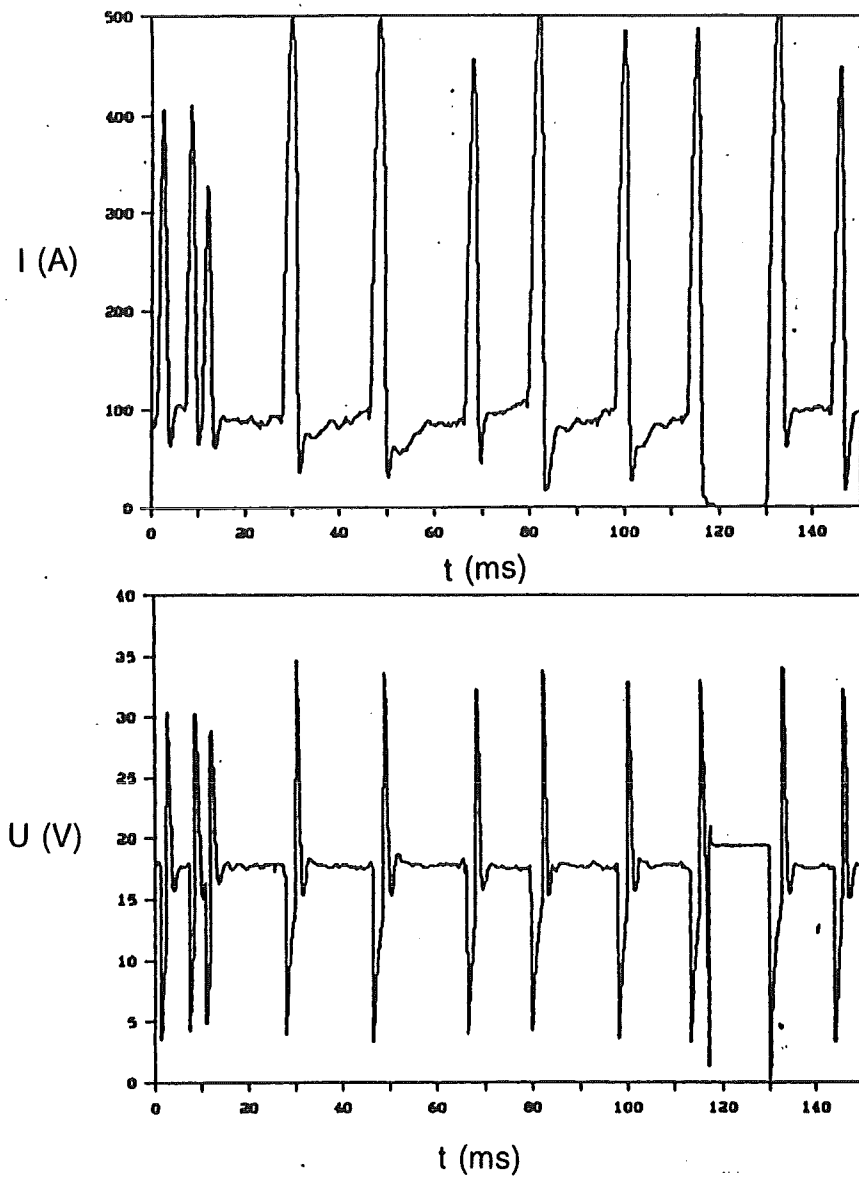


Fig. 54 Het stroomverloop bij een ingestelde spanning van 18 V en stroom 175A, zelfinductie 4 (50%) en een horizontale U-I karakteristiek.

Daarnaast heeft het zuurstofgehalte ook invloed op de oppervlaktespanning: als het zuurstofgehalte toeneemt zal de oppervlaktespanning afnemen. De oppervlaktespanning heeft weer invloed op de kortsluitfrequentie (vergelijking 12).

In het lasbad ontstaat dus een staande golfbeweging, die afhankelijk is van de vorm van het lasbad. De berekende oscillatiefrequenties en de gemeten kortsluitfrequenties komen bij de optimale instellingen redelijk overeen voor de oscillatie mode 1 en $\gamma=1.2$ N/m. De standaard afwijking in de kortsluitfrequenties is waarschijnlijk hoog omdat de oppervlaktespanning niet constant is voor de hele draad (t.g.v. kleine variaties in chemische samenstelling over de lengte van de draad).

De synchronisatie van ontsteken van de lasboog en de golfbeweging in het lasbad is goed in de band van maximale kortsluitfrequentie.

5.3.2 De invloed van de U-I karakteristiek en de zelfinductie op de oscillatiebeweging

De U-I karakteristiek heeft naast de invloed op de verbreking van de vloeistofbrug ook invloed op de beweging van het lasbad. De piekstroom op het moment van verbreken van de vloeistofbrug bepaald namelijk de boogdruk. Als de boogdruk te hoog wordt kan het lasbad in een onrustige beweging komen. Tijdens het onderzoek was de beweging in het lasbad onrustig als de U-I karakteristiek horizontaal ingesteld werd. De andere instellingen van de U-I karakteristiek hadden minder invloed op de beweging van het lasbad.

Het stroom- en spanningsverloop bij 18V en horizontale helling is gegeven in figuur 54. Door de krachtige ontsteking van de lasboog wordt de beweging van het lasbad onrustig, dit is te zien aan het stroomverloop. De stroom daalt na het verbreken van de kortsluiting tot onder de boogstroom, waarna de stroom weer toeneemt. De stroom blijft dan ongeveer constant totdat de volgende kortsluiting plaatsvindt. In deze figuur is ook te zien dat de boog soms in het geheel niet ontsteekt en dat een nieuwe kortsluiting nodig is om de boog weer te ontsteken. Omdat de boog niet ontsteekt zal in dit geval het lasbad niet in een oscillatiebeweging komen.

Bij 20V en een horizontale helling wordt de beweging van het lasbad zeer onrustig.

Door de eerste stroompiek die ongeveer gelijk is aan de maximale stroom die de stroombron kan leveren (480A), komt het lasbad in een zodanige beweging, dat de draad kort na het verbreken van de vloeistofbrug weer aangetikt wordt. De tweede stroompiek ligt veel lager (200A).

De kortsluitfrequentie is weliswaar hoog, maar het proces is zeer onregelmatig.

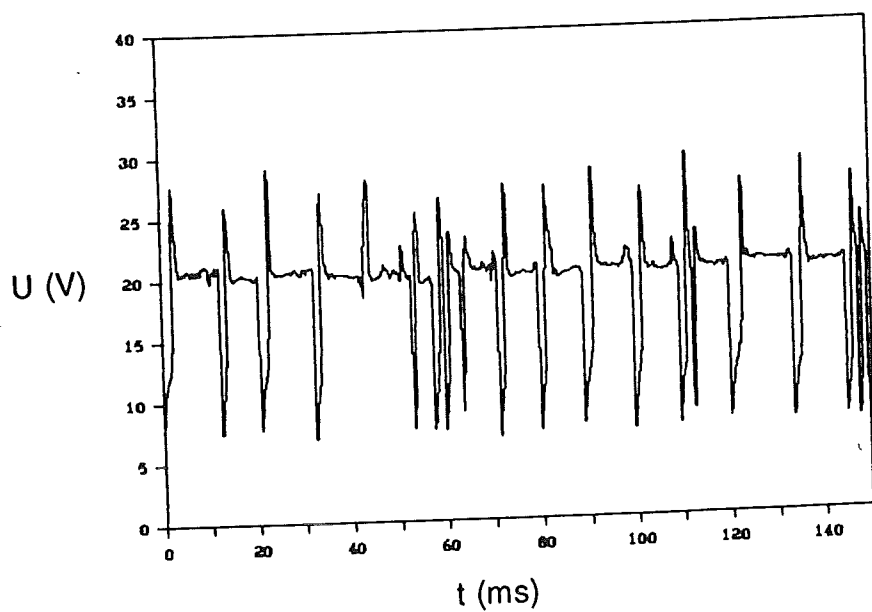
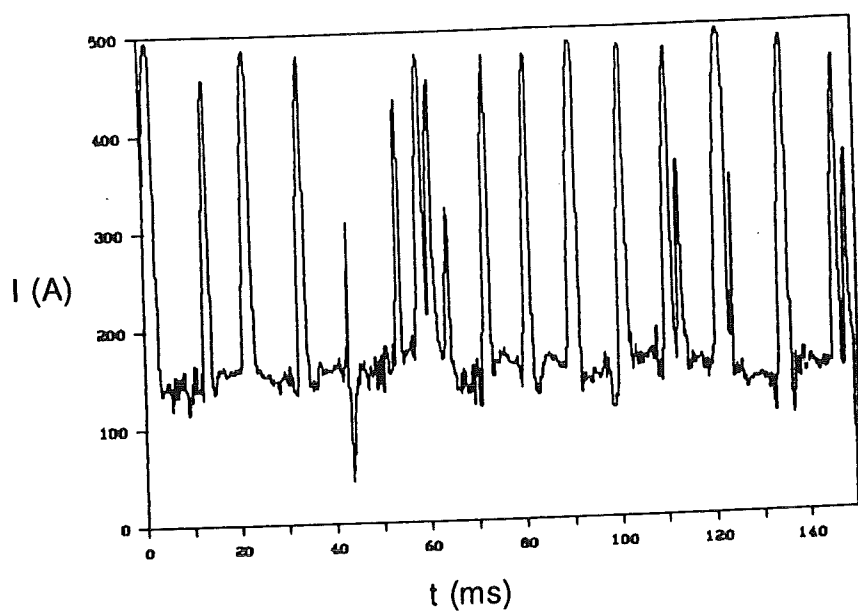


Fig. 55 De stroom opgenomen met de transiënt recorder, bij een ingestelde spanning van 20V, instelling van de helling -2V/100A en zelfinductie 0%.

De instelling van de zelfinductie heeft ook invloed op de beweging van het lasbad. De zelfinductie bepaalt niet alleen de maximale boogdruk (piekstroom), maar ook de afname van de boogdruk na het ontsteken van de boog.

Als de zelfinductie te hoog is (100%), kan de amplitude van de golfbeweging het draaduiteinde missen en wordt de boogtijd lang (nadelig voor het spatverlies).

Bij zelfinductie 0%, is de boogdruk zeer hoog, bovendien is de afname van de boogdruk groot. Hierdoor wordt de beweging van het lasbad weer onrustig (zie fig. 55), het proces is instabiel en geeft een hoog spatverlies.

5.4 De invloed van de chemische samenstelling van de lasdraad

Uit het onderzoek is gebleken dat de chemische samenstelling van de draad van groot belang is voor een stabiel proces met een laag spatverlies. De chemische samenstelling bepaalt namelijk de oppervlaktespanning. Deze oppervlaktespanning heeft een grote invloed op de oscillatiebeweging van het lasbad en op de kritische lengte van de vloeistofbrug. Door een hoge oppervlaktespanning neemt de oscillatiefrequentie van het lasbad toe. Door een hoge oppervlaktespanning is echter een grotere pinchkracht nodig om de vloeistofbrug te verbreken.

Het proces geeft het laagste spatverlies als de pinchkracht net groot genoeg is om de vloeistofbrug te verbreken. Als de chemische samenstelling echter varieert over de lengte van de draad, kan het voorkomen dat de pinchkracht in enkele gevallen niet meer groot genoeg is om de vloeistofbrug te verbreken. Hierdoor kunnen instabiliteiten in het proces optreden met extra spatverlies.

Bij de kritieke instellingen van de stroombron (18V, 175A en 200A, helling -2V/100A, zelfinductie 6), verloopt het proces in het algemeen stabiel. In enkele gevallen treden echter tijdens korte periodes gedurende het lasproces instabiliteiten op. Bij deze instellingen is het verschil tussen de kritische vloeistofbruglengte en de werkelijke vloeistofbruglengte klein (zie fig. 44). Een verschil in de oppervlaktespanning kan de oorzaak zijn dat de vloeistofbrug niet tijdig verbroken wordt.

Om het vermoeden te bevestigen dat de chemische samenstelling van de draden niet constant is, zijn enkele draden op chemische samenstelling onderzocht.

De monsters zijn na ontsluiten geanalyseerd m.b.v. ICP-OES en vlam-AAS. Met deze methoden is het gehalte mangaan, silicium, koper en fosfor bepaald. De resultaten zijn gegeven in Appendix 6, tabel 24. Het gehalte aan zuurstof, koolstof en zwavel is bepaald met de CS-MAT 650 volgens Ströhlein. De resultaten van deze bepalingen zijn gegeven in Appendix 6, tabel 25. Het percentage zuurstof is echter voor de helft afkomstig van oppervlaktezuurstof.

Uit de analyse resultaten blijkt dat de percentages mangaan, koper, silicium, koolstof en fosfor enigszins variëren, maar de gevonden waarden vallen binnen de normen (zie tabel 1).

Het percentage zwavel varieert wel veel, zwavel is bovendien een element dat de oppervlaktespanning sterk beïnvloedt. Het zwavelgehalte vertoont zelfs al grote verschillen in een stuk draad van 40 cm. Het variërende zwavelgehalte bevestigt het vermoeden dat de oppervlaktespanning over de lengte van de draad verschilt.

De oppervlaktespanning zal variëren tussen 1.0 en 1.2 N/m (zie tabel 2).

Precieze uitspraken over de oppervlaktespanning zijn echter niet mogelijk omdat alle elementen in de draad invloed op de oppervlaktespanning hebben. De chemische samenstelling van de plaat zal

de oppervlaktespanning ook beïnvloeden, grote verschillen zullen echter door de aangevoerde draad veroorzaakt worden.

Opgemerkt moet worden dat het in verband met variaties in de chemische samenstelling van de draad niet verstandig is te kiezen voor de meest kritische stroombroninstelling, waarbij het spatverlies minimaal is. Beter is het een werkpunt te kiezen dat in alle gevallen een stabiel proces geeft. Het extra spatverlies dat onder deze omstandigheden optreedt zal men op de koop toe moeten nemen.

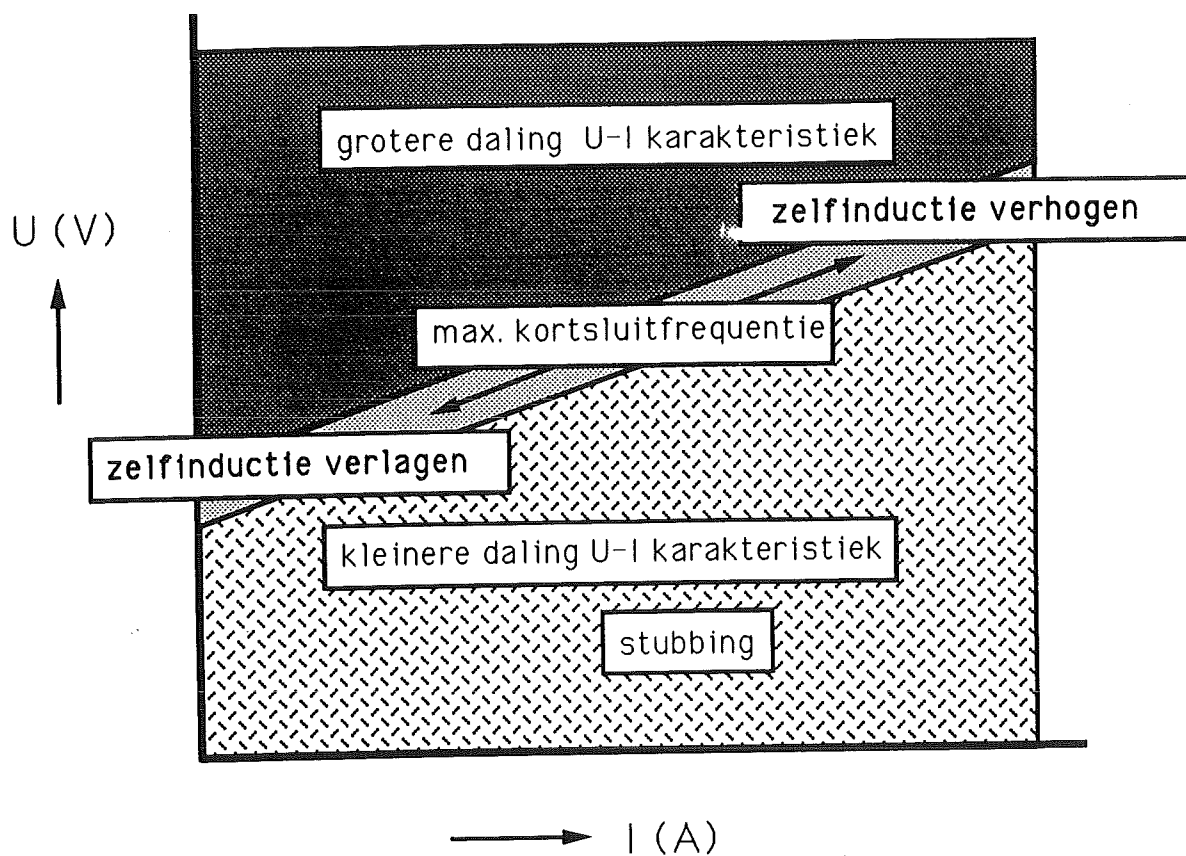


Fig. 56 De werkgebieden van het kortsluitbooglassen.

5.5 Beschrijving werkgebieden

In figuur 56 is getracht aan te geven welke werkgebieden in het U-I vlak geschikt zijn voor het kortsluitbooglassen. In deze figuur is tevens aangegeven welke instellingen van de stroombron in bepaalde werkgebieden een stabiel proces geven met een relatief laag spatverlies.

Zoals uit het onderzoek is gebleken werkt het kortsluitboogproces optimaal als de draadaanvoer-snelheid (lasstroom) en de boogspanning goed op elkaar zijn afgestemd. In het kortsluitboog werk-gebied liggen deze werkpunten in een band van maximale kortsluitfrequentie.

Theoretisch zou men mogen verwachten dat bij het verhogen van de draadsnelheid de kortsluitfre-quentie blijft toenemen. Hierbij zou de hoeveelheid materiaal die per kortsluiting naar het lasbad getransporteerd wordt moeten afnemen. Deze tendens blijkt in de praktijk te zijn begrensd. Na het passeren van de lijn van maximale kortsluitfrequentie neemt de kortsluitfrequentie af en neemt de lengte van de vloeistofbrug toe.

In figuur 56 is de band aangegeven waarbij de kortsluitfrequentie het hoogst en het spatverlies minimaal is. In deze band zijn de instellingen voor de stroom en spanning optimaal. De helling van de stroombron is voor deze hele band $-2V/100A$.

Als langs deze band de spanning en stroom verhoogd wordt (dus van linksonder naar rechtsboven) moet de zelfinductie verhoogd worden om het laagste spatverlies te verkrijgen. Door de hogere zelfinductie kan de piekstroom minder toenemen. Hierdoor kan de piekstroom bij hogere stroom-sterktes minder toenemen.

In het gebied van de maximale kortsluitfrequentie zijn de oscillatiebeweging, de lengte van de vloeistofbrug, het kortsluitvermogen en de kracht voor het verbreken van de vloeistofbrug goed op elkaar afgestemd.

In het gebied beneden de maximale kortsluitfrequentie is de draadsnelheid groter dan de neersmelt-snelheid. De kortsluitfrequentie gaat afwijken van de verwachte monotoon stijgende lijn, de kortsluitfrequentie neemt af. De lengte de vloeistofbrug is klein; het verbreken van de vloeistofbrug levert problemen op. De Joulese verhitting zorgt ervoor dat een groter gedeelte van de draad vloeibaar wordt, waardoor weer een instabiele situatie ontstaat. De kortsluittijd neemt sterk toe en de boogtijd vertoont een grote standaardafwijking.

In dit gebied treedt dus "stubbing" op. Dit kan niet voorkomen worden door de instellingen van de stroombron anders te kiezen. De vloeistofbrug kan echter wel verbroken worden door de helling van de stroombron zo vlak mogelijk in te stellen. De piekstroom neemt hierdoor sterk toe,

waardoor een kortsluiting makkelijker verbroken kan worden. Door de hoge piekstroom neemt het spatverlies tijdens de verbreking echter toe en wordt het lasbad in sterke beroering gebracht, hetgeen resulteert in meer spatverlies. Het gebied beneden de maximale kortsluitfrequentie is dus niet geschikt voor het kortsluitbooglassen.

De boogtijd bepaalt hoeveel materiaal gesmolten wordt en dus de druppelgrootte. Tijdens de boogtijd wordt de meeste warmte aan het materiaal afgegeven. Als de boogspanning (booglengte) te hoog is voor de draadsnelheid (in het werkgebied boven de ideale band) is de boogtijd lang. Op het moment van kortsluiting bevat de vloeistofbrug veel gesmolten materiaal en bevindt deze zich in het instabiele gebied ($L_b^* < L$). De noodzakelijke pinchkracht om de brug te verbreken is kleiner dan de werkelijke pinchkracht. Hierdoor bestaat de mogelijkheid dat bij een lage draadsnelheid de brug explosief verbroken wordt. Een korte boogtijd is gunstig omdat in dit geval een kleine hoeveelheid materiaal in een hoge frequentie overgaat van de lasdraad naar het lasbad.

In het gebied boven de maximale kortsluitfrequentie is de piekstroom dus in het algemeen te groot voor de lengte van de vloeistofbrug. In dit gebied moet de piekstroom dus verlaagd worden. Dit kan gerealiseerd worden door de helling van de stroombronkarakteristiek een grotere daling te geven. Door de aangepaste instelling van de helling neemt het spatverlies inderdaad af, deze is echter nog steeds hoger dan in de ideale band. De kortsluitfrequentie is nog steeds lager dan in de band voor maximale kortsluitfrequentie.

6. CONCLUSIES

Het kortsluitbooglassen is een complex proces waarbij vele variabelen een rol spelen. Als deze variabelen juist op elkaar zijn afgestemd, zal het kortsluitboogproces stabiel zijn en een laag spatverlies geven. Uit het onderzoek kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

1. Er bestaat een band voor de stroomsterkte en spanning met een maximale kortsluitfrequentie en een minimaal spatverlies. Dit is het optimale werkgebied voor het kortsluitbooglassen
2. De pinchkracht nodig voor het verbreken van de vloeistofbrug moet afgestemd zijn op de lengte van de vloeistofbrug. Dit zal resulteren in een laag spatverlies.
3. De oscillatiebeweging van het lasbad is zeer belangrijk voor het materiaaltransport. Om een laag spatverlies te bereiken moet de oscillatiefrequentie afgestemd zijn op de kortsluitfrequentie met een grote amplitude. De beweging mag bovendien niet te onrustig zijn.
4. De chemische samenstelling van de draad mag niet te veel variëren, omdat de oppervlaktespanning invloed heeft op het verbreken van de vloeistofbrug en de oscillatiebeweging van het lasbad.
5. De methode zoals die in de praktijk wordt gebruikt, het afregelen van het proces op het gehoor, blijkt een goede methode te zijn. Het spatverlies dat onder deze omstandigheden optreedt is laag.

7. AANBEVELINGEN

Uit het onderzoek is gebleken dat de oppervlaktespanning van grote invloed is op het materiaaltransport tijdens het kortsluitbooglassen. Het is daarom interessant de invloed van de oppervlaktespanning verder te onderzoeken.

Hierbij kan gedacht worden aan verschillende beschermgassen die invloed hebben op de vorm van de lasboog en de oppervlaktespanning.

Daarnaast zouden lasdraden van verschillende chemische samenstelling, waarbij de oppervlaktespanning van de draden bepaald is, onderzocht kunnen worden. Men zou hierbij moeten streven naar draden die bijna niet in chemische samenstelling verschillen over de lengte van de draad.

Het is hierbij ook van belang om de invloed van de chemische samenstelling van de plaat op de oscillatiebeweging van het lasbad te onderzoeken.

LITERATUUR

1. J. Kaptejin, E. J Moolhuijsen en G. den Ouden,
"Booglassen met pulserende stroom"
Lastechniek 52 (1986), 182-186.
2. R.J.A. van Kampen,
"Materiaaltransport en spatgedrag tijdens het MIG/MAG lassen"
Literatuurstudie (1991).
3. J.F. Lancaster,
"The physics of spatter formation during dip transfer GMA welding"
I.I.W. Doc. 212-738-89.
4. M. Kiyohara, T. Okada en H. Yamamoto,
"On the stability of metal transfer in short circuiting arc welding and the new control systems"
I.I.W. Doc. 212-276-73.
5. G. den Ouden,
"Physical properties of the arc column"
I.I.W. Doc. 212-184-70, 1-7.
6. Y.H. Xiao en G. den Ouden
"A study of GTA weld pool oscillation"
Welding Journal 69 (1990), 289-293.
7. Y.H. Xiao en G. den Ouden
"Weld pool oscillation during GTA welding of austenitic stainless steel"
Proc. of Jom-5 (1990), 401-408
8. Y.H. Xiao en G. den Ouden
"Weld pool oscillation during GTA welding of mild steel"
I.I.W. Doc.212-776-90.

9. P.H. van Lent,
"Handboek MIG/MAG lassen"
Nederlands instituut voor Lastechniek (1989).
10. T. Shinoda, M. Matsui, Y. Takeuchi
"Effect of surface tension on short circuiting metal transfer phenomena in GMA welding"
I.I.W. Doc. XII-1214-91.
11. P.W. Verbeek, F.C.A. Groen
"Selected topics for image processing"
TU Delft (1990).
12. S. Liu, T.A. Siewert, H.-G. Lan
"Metal transfer mode in gas metal arc welding"
In Proceedings Conf. "Advances in welding processes"
Gatlinburg (1989), 475-479
13. T. de Haan, M.J.M. Hermans
"Directe observatie van het kortsluitboogproces m.b.v. snelle filmopnamen"
IOP-metalen (1991).

APPENDIX 1

Tabel 4. Meetgegevens verkregen bij een ingestelde spanning van 16 V, met een instelling van de helling -2V/100A en een smoorspoelinstelling 6, de ingestelde stroom is gevarieerd.

I_{RMS} (A)	I_{gem} (A)	U_{gem} (V)	t_B (ms)	st.afw (ms)	t_K (ms)	st.afw (ms)	KF (Hz)	st.afw (Hz)	KG (%)	I_p (A)	st.afw (A)	I_B (A)	U_M (V)	U_B (V)	U_P (V)	P_K (kW)	SV (%)
100	74,5	15,7	19,6	0,6	2,8	0,4	44,7	1,0	12,5	281,8	15,5	47,2	1,1	16,2	26,6	1,6	6,67
100	79,1	15,0	12,9	3,7	2,0	0,4	67,0	32,9	13,6	249,7	16,8	43,1	1,0	16,6	25,2	1,4	5,76
100	81,7	15,1	12,2	4,4	2,2	0,5	69,2	36,8	15,5	251,0	20,5	51,3	1,0	15,8	26,2	1,4	6,44
125	96,5	14,7	7,6	3,0	2,4	0,6	100,0	31,2	23,8	253,0	24,5	42,5	1,0	15,9	25,6	1,6	4,25
125	93,5	14,7	8,2	3,2	2,3	0,6	95,6	31,3	21,5	252,0	27,7	36,0	1,0	15,9	26,2	1,4	3,91
125	94,5	14,7	8,4	3,5	2,5	0,5	91,7	29,5	22,7	258,6	23,4	37,7	1,0	15,9	26,5	1,3	4,42
150	123,9	14,4	6,1	1,1	2,7	0,7	113,8	12,1	30,4	282,3	30,7	40,6	1,1	16,1	27,0	1,6	3,59
150	124,0	14,2	6,3	1,5	2,8	0,8	110,3	20,2	30,9	282,1	39,6	39,4	1,1	15,9	26,7	1,7	2,82
150	122,4	14,5	6,4	2,3	2,7	0,8	109,1	25,2	29,9	285,0	31,8	43,4	1,1	16,0	27,1	1,7	2,55
175	116,7	14,8	11,6	11,7	4,0	3,3	64,1	46,7	25,5	258,9	132,6	60,9	1,1	19,0	24,9	2,3	12,55
175	118,2	14,7	12,7	13,2	3,9	3,8	60,0	79,4	23,2	228,5	130,5	68,3	1,1	19,8	24,3	2,2	8,66
175	139,0	14,0	4,6	0,8	2,8	0,8	134,4	26,7	37,4	274,9	29,5	53,4	1,2	16,3	26,4	1,7	8,22

Tabel 5. Meetgegevens verkregen bij een ingestelde spanning van 18 V, met een instelling van de helling -2V/100A en een smoorspoelinstelling 6, de ingestelde stroom is gevarieerd.

I_{RMS} (A)	I_{gem} (A)	U_{gem} (V)	t_B (ms)	st.afw (ms)	t_K (ms)	st.afw (ms)	KF (Hz)	st.afw (Hz)	KG (%)	I_P (A)	st.afw (A)	I_B (A)	U_M (V)	U_B (V)	U_P (V)	P_K (kW)	SV (%)
100	83,8	17,4	27,3	6,1	2,5	0,3	33,6	4,6	8,3	307,3	14,8	56,7	1,3	18,1	30,0	1,7	8,48
100	83,1	17,5	27,5	7,0	2,8	0,5	33,0	5,7	9,1	312,5	13,9	56,1	1,3	18,0	30,1	2,0	8,97
100	85,0	17,4	27,2	5,3	2,7	0,4	33,5	4,8	9,0	308,1	12,6	63,6	1,4	18,0	30,7	1,9	7,52
125	103,6	17,0	15,0	2,6	2,3	0,4	57,8	14,8	13,4	285,6	12,9	72,9	1,7	17,8	29,2	2,1	6,81
125	103,5	17,1	14,5	5,2	2,4	0,4	59,3	27,7	14,3	296,4	15,6	66,8	1,7	17,8	29,4	1,9	5,34
125	101,2	17,1	16,5	5,4	2,4	0,5	53,1	26,3	12,7	295,8	16,5	68,2	1,9	18,0	29,4	2,0	5,21
150	135,1	16,5	7,3	1,8	2,0	0,4	107,6	17,3	21,8	291,5	18,0	69,5	1,7	17,7	28,6	2,0	3,12
150	135,3	16,5	7,7	2,8	2,2	0,4	101,1	23,7	21,9	296,3	19,1	72,5	1,8	17,7	28,4	1,9	2,93
150	134,5	16,5	7,6	2,3	2,1	0,4	102,9	19,2	21,7	293,5	18,6	70,6	1,7	17,7	28,7	2,0	3,6
175	158,8	16,3	7,0	1,4	3,0	0,8	99,8	18,8	30,1	330,4	35,0	84,1	1,9	17,8	29,0	2,5	2,57
175	151,2	16,4	5,6	0,7	2,3	0,6	125,6	15,8	29,0	291,8	33,9	76,8	2,0	18,1	28,4	2,1	1,95
175	148,8	16,5	6,5	0,9	2,5	0,6	111,1	12,6	27,7	304,4	30,8	80,3	2,0	17,9	28,8	2,2	1,99
200	170,4	16,5	7,5	3,6	3,4	1,6	91,7	47,5	31,4	343,4	62,4	88,4	2,3	18,5	29,4	2,8	4,44
200	170,1	16,6	7,0	1,9	3,3	1,1	96,4	35,2	32,2	343,8	60,2	91,6	2,2	18,7	29,5	2,7	2,36
200	166,3	16,0	8,1	4,6	3,9	1,5	83,7	62,3	32,3	352,7	69,0	91,6	2,0	18,3	29,0	2,7	6,42
225	182,4	16,5	10,3	9,9	4,2	2,4	68,9	56,0	28,7	341,9	100,8	132,6	2,8	20,9	27,8	3,3	5,54
225	196,8	16,2	6,5	4,6	4,1	2,6	94,8	63,7	38,6	327,8	116,2	125,5	3,0	20,0	28,7	3,4	4,75
225	202,0	16,0	9,2	7,6	4,7	2,9	72,9	111,3	34,4	355,3	107,5	101,9	2,4	19,7	27,3	3,3	4,3
250	220,7	16,3	5,5	4,1	4,3	3,1	104,3	174,2	44,5	334,7	112,0	152,8	3,4	20,2	29,4	3,8	3,72
250	228,5	16,2	5,6	3,9	4,6	2,8	98,6	59,4	45,0	339,4	124,5	159,1	3,5	20,8	29,0	4,0	4,05
250	256,4	23,2	5,5	4,0	2,1	1,4	132,9	144,2	28,1	348,2	81,3	224,2	7,8	25,5	31,1	6,5	3,1

Tabel 6. Meetgegevens verkregen bij een ingestelde spanning van 20 V, met een instelling van de helling -2V/100A en een smoorspoelinstelling 6, de ingestelde stroom is gevarieerd.

I_{RMS} (A)	I_{gem} (A)	U_{gem} (V)	t_B (ms)	st.afw (ms)	t_K (ms)	st.afw (ms)	KF (Hz)	st.afw (Hz)	KG (%)	I_P (A)	st.afw (A)	I_B (A)	U_M (V)	U_B (V)	U_P (V)	P_K (kW)	SV (%)
125	106,8	19,4	33,5	2,0	3,0	0,5	27,4	1,4	8,1	371,0	12,6	78,0	1,8	20,3	32,7	1,8	4,91
125	102,7	19,6	23,7	13,4	2,5	0,8	38,1	82,9	9,7	306,3	113,5	68,3	2,3	20,9	32,8	2,2	5,5
125	102,3	19,5	33,2	2,0	3,2	0,4	27,6	1,7	8,7	370,8	16,0	74,4	1,8	20,0	33,0	2,5	4,69
150	134,1	19,1	16,0	6,2	2,7	0,4	53,5	22,5	14,7	356,3	15,2	91,6	2,2	20,0	32,0	2,3	5,62
150	131,0	19,2	17,9	6,4	2,9	0,3	48,0	19,5	14,1	370,4	20,8	89,7	2,2	19,9	31,9	2,6	4,93
150	130,9	19,1	17,5	7,2	2,6	0,8	49,8	35,1	13,0	348,3	50,8	87,3	2,3	20,2	31,3	2,7	5,34
175	160,3	18,7	9,5	3,0	2,5	0,6	83,5	30,3	20,5	336,4	51,7	106,0	2,9	19,9	30,9	2,7	2,03
175	155,9	18,8	10,2	1,6	2,5	0,4	78,6	10,5	19,9	339,7	24,9	100,8	2,6	19,8	31,1	2,6	2,23
175	156,2	18,8	9,5	1,8	2,4	0,5	84,1	9,9	20,2	338,2	21,3	98,4	2,4	19,8	31,2	2,8	1,9
200	184,4	18,6	9,1	2,2	3,1	0,8	82,5	34,7	25,3	380,4	55,4	115,0	3,1	20,1	32,3	3,3	1,81
200	176,6	18,7	8,6	2,1	2,7	0,9	89,2	36,5	23,8	355,7	59,0	115,1	3,1	20,2	31,6	3,1	2,1
200	179,6	18,6	7,3	2,7	2,6	1,0	101,3	58,4	26,0	336,5	66,6	121,2	3,3	20,5	30,9	3,3	2,01
225	207,3	18,5	6,4	3,2	2,9	1,6	107,4	75,7	31,1	331,1	117,6	141,4	4,0	21,3	29,6	3,9	1,17
225	204,2	18,6	8,8	3,6	3,4	1,5	82,0	39,5	28,0	379,5	101,9	135,2	3,8	20,6	31,4	3,9	1,47
225	204,6	18,7	7,5	3,6	2,9	1,8	95,8	67,3	27,5	353,9	116,3	132,5	3,9	21,1	30,6	4,1	1,64
250	231,2	18,5	7,6	3,7	4,0	2,2	87,4	48,4	34,9	386,7	113,0	174,5	4,5	21,8	30,8	4,7	2,7
250	225,7	18,6	6,3	3,4	3,0	2,5	107,0	73,9	32,6	339,5	112,4	159,6	4,8	21,4	29,6	4,4	1,87
250	230,7	18,6	7,1	4,1	3,7	1,9	92,4	52,9	34,1	371,0	110,8	192,2	4,6	22,1	29,2	4,7	2,07

Tabel 7. Meetgegevens verkregen bij een ingestelde spanning van 22 V, met een instelling van de helling -2V/100A en een smoorspoelinstelling 6, de ingestelde stroom is gevarieerd.

I_{RMS} (A)	I_{gem} (A)	U_{gem} (V)	t_B (ms)	st.afw (ms)	t_K (ms)	st.afw (ms)	KF (Hz)	st.afw (Hz)	KG (%)	I_p (A)	st.afw (A)	I_B (A)	U_M (V)	U_B (V)	U_P (V)	P_K (kW)	SV (%)
150	137,0	22,4	46,3	2,3	3,2	0,4	20,2	0,9	6,5	437,8	19,6	110,8	2,6	23,0	36,8	3,9	5,23
150	137,4	21,3	24,7	14,3	2,6	1,0	36,6	128,4	9,6	362,3	89,1	137,6	3,5	23,6	33,1	4,0	4,87
150	136,3	21,2	22,7	14,4	2,9	0,5	39,1	118,9	11,3	344,9	75,4	161,3	3,3	24,8	33,2	4,0	3,33
175	164,1	21,1	17,8	10,8	2,6	0,8	49,1	59,9	12,6	361,5	81,5	132,3	3,2	22,2	32,1	3,7	4,9
175	164,2	21,2	17,6	10,9	2,8	0,7	49,3	105,0	13,6	373,7	75,7	147,6	3,1	23,3	33,4	3,9	3,72
175	161,7	21,2	17,0	12,3	3,1	1,0	49,6	168,2	12,6	317,4	138,2	138,9	3,2	26,1	31,3	12,4	4,34
200	184,6	21,1	12,0	7,2	2,3	1,1	70,1	127,7	15,9	344,1	96,9	165,6	4,2	23,0	31,1	4,3	3,86
200	187,8	21,0	11,1	4,9	2,5	0,8	73,7	59,8	18,4	377,1	58,0	148,5	4,1	22,5	33,0	4,0	3,08
200	187,2	21,2	9,9	6,0	2,5	0,9	81,2	147,5	19,9	345,8	71,3	178,8	4,2	24,0	32,2	4,6	3,17
225	211,0	20,7	10,6	3,0	2,9	1,0	74,1	125,8	21,7	395,3	71,6	155,1	4,4	22,0	32,8	4,4	1,68
225	212,9	20,8	9,2	4,1	2,3	1,1	87,2	107,2	20,2	371,8	94,2	160,6	4,8	22,1	31,8	4,6	1,14
225	204,3	20,8	10,2	3,5	2,7	0,9	77,4	63,9	21,0	386,9	76,4	155,5	4,3	22,5	32,7	4,4	3,13
250	232,2	20,6	8,6	4,7	3,1	1,9	85,8	109,1	26,9	384,3	104,6	174,7	5,2	22,7	32,4	5,2	2,17
250	244,1	20,2	7,7	4,8	3,2	2,1	91,8	115,4	29,8	387,9	89,1	208,0	5,3	23,5	30,3	5,5	2,19
250	236,0	20,7	7,4	4,8	2,9	1,6	97,4	186,1	27,8	360,4	102,7	189,8	5,4	23,3	31,0	5,0	1,6
275	256,5	20,7	4,5	3,2	2,7	2,1	140,5	126,0	37,6	338,0	80,5	205,8	6,2	23,7	29,8	5,6	2,25
275	258,5	20,5	9,2	5,0	4,1	3,4	74,9	96,2	30,6	399,2	80,6	178,7	5,2	23,0	31,6	5,3	2,17
275	267,7	20,6	5,7	4,3	2,8	2,3	117,5	106,0	32,5	355,9	74,7	208,2	5,8	23,7	29,1	5,8	2,17
300	276,9	21,0	8,4	6,9	2,7	2,8	89,9	88,1	24,5	358,9	89,1	230,0	6,3	24,0	27,0	5,6	4,49
300	279,4	21,0	6,5	5,7	2,3	2,3	114,9	181,7	25,8	338,0	88,0	229,1	6,6	24,7	27,3	5,8	3,98
300	273,9	21,1	7,6	6,5	2,5	2,5	99,7	211,3	24,5	355,5	88,1	218,5	6,5	24,2	27,7	5,7	4,19

Tabel 8. Meetgegevens verkregen bij een ingestelde spanning van 24 V, met een instelling van de helling -2V/100A en een smoorspoelinstelling 6, de ingestelde stroom is hierbij gevarieerd.

I_{RMS} (A)	I_{gem} (A)	U_{gem} (V)	t_B (ms)	st.afw (ms)	t_K (ms)	st.afw (ms)	KF (Hz)	st.afw (Hz)	KG (%)	I_P (A)	st.afw (A)	I_B (A)	U_M (V)	U_B (V)	U_P (V)	P_K (kW)	SV (%)
175	167,1	23,2	26,0	17,3	3,0	1,1	34,5	178,0	10,5	392,1	67,4	170,4	3,7	25,8	35,9	4,7	5,14
175	162,4	23,4	28,6	14,0	2,8	0,8	31,9	44,2	9,0	391,2	128,2	123,2	3,5	25,6	37,8	4,7	6,06
175	165,5	23,3	21,0	17,1	2,6	0,8	42,3	180,6	11,0	364,6	95,2	174,7	4,4	25,7	36,7	5,0	4,22
200	195,1	23,1	14,8	12,1	2,3	1,3	58,8	184,3	13,2	353,0	96,0	201,4	4,8	26,1	33,4	5,5	4,42
200	187,0	23,3	16,0	11,6	2,3	1,3	54,7	135,5	12,7	362,0	106,9	167,1	4,7	24,4	34,8	5,0	3,25
200	195,3	23,4	17,5	11,1	2,5	0,9	50,0	164,8	12,6	379,8	82,5	195,1	4,7	26,1	34,6	6,0	3,88
225	221,5	23,3	8,9	6,1	1,9	1,0	92,8	138,6	17,1	335,3	81,6	191,6	5,6	24,9	32,8	5,9	2,76
225	218,2	23,2	9,7	7,8	1,8	1,0	86,6	106,7	15,9	340,1	87,6	189,8	5,8	24,2	32,2	5,8	2,69
225	210,0	23,4	9,4	7,9	2,1	1,2	87,6	137,1	18,0	337,1	108,7	187,4	5,5	25,0	33,7	5,9	2,85
250	246,0	23,1	7,2	5,0	2,1	1,1	107,7	144,3	22,5	352,2	81,5	212,2	6,8	24,8	31,1	6,4	2,6
250	246,1	22,9	8,9	5,8	2,1	1,0	91,0	151,1	18,7	356,2	80,3	214,0	6,2	23,9	30,7	6,1	2,37
250	246,3	22,9	7,4	5,7	1,9	1,1	106,9	123,8	20,3	338,5	79,6	217,5	6,9	24,1	30,2	6,2	0,81
275	270,3	22,8	6,7	5,4	2,1	1,6	112,7	150,1	23,9	360,9	74,1	246,8	7,3	25,2	30,0	6,9	2,23
275	256,4	23,2	5,5	4,0	2,1	1,4	132,9	144,2	28,1	348,2	81,3	224,2	7,8	25,5	31,1	6,5	2,72
275	259,7	22,8	6,5	4,1	2,1	1,5	116,7	110,8	24,1	354,4	76,1	225,4	7,2	25,0	31,2	6,6	2,09
300	289,2	23,0	4,9	4,1	1,9	1,9	148,8	191,6	28,0	340,9	71,7	244,9	8,4	26,3	29,3	7,2	6,62
300	314,8	23,8	10,1	8,5	1,5	0,7	86,0	256,7	13,0	383,4	53,2	297,4	9,3	24,9	27,2	8,7	3,21
300	305,5	22,7	9,4	8,5	1,5	1,8	92,3	141,2	14,1	355,5	84,1	272,4	8,4	25,7	26,7	7,4	2,62

APPENDIX 2

Tabel 9. Meetgegevens verkregen bij een ingestelde spanning van 18 V en stroom van 175A, een helling instelling van -2V/100A, de smoorspoel instelling is gevarieerd.

choke (-)	I_{gem} (A)	U_{gem} (V)	t_B (ms)	st.afw (ms)	t_K (ms)	st.afw (ms)	KF (Hz)	st.afw (Hz)	KG (%)	I_p (A)	st.afw (A)	I_B (A)	U_M (V)	U_B (V)	U_P (V)	P_K (kW)	SV (%)
0	148,4	17,5	9,2	3,9	2,2	0,6	87,5	28,6	19,5	396,8	28,8	96,6	6,3	18,8	25,8	4,1	7,05
0	148,3	17,6	9,2	4,3	2,3	0,8	87,2	43,6	19,8	394,4	42,4	96,1	6,7	18,8	25,7	4,2	5,93
0	146,3	17,6	9,5	4,9	2,4	0,8	84,2	66,3	19,8	400,1	41,5	96,7	6,5	18,8	26,0	4,2	8,24
2	146,9	17,5	10,9	6,3	2,3	0,8	75,8	125,2	17,4	410,6	48,7	125,7	5,4	19,8	27,0	4,4	6,16
2	144,9	17,6	11,0	5,1	2,4	0,5	74,9	65,4	17,8	416,2	33,2	104,6	5,2	19,0	28,4	4,3	5,57
2	150,5	17,3	9,6	4,1	2,3	0,7	84,1	49,8	19,2	403,7	80,3	105,2	4,8	19,0	27,4	4,2	5,04
4	152,6	17,0	6,0	0,7	2,0	0,3	125,6	12,5	25,0	368,1	13,9	96,5	3,6	18,4	30,9	3,5	2,8
4	151,4	17,0	6,4	0,8	2,0	0,3	118,8	11,9	24,1	370,8	13,1	94,4	3,6	18,4	30,7	3,5	2,66
4	152,6	16,9	6,2	0,6	2,0	0,3	121,6	10,2	24,4	372,0	12,4	96,0	3,4	18,3	31,0	3,4	2,62
5	150,5	16,7	6,1	0,6	2,2	0,4	120,0	8,6	26,9	337,1	18,5	90,4	2,9	18,2	30,3	2,8	2,75
5	154,5	16,6	6,0	0,5	2,3	0,4	120,0	9,3	27,6	339,4	21,1	92,8	2,8	18,1	30,3	3,0	2,73
5	153,6	16,7	6,0	0,6	2,2	0,5	121,4	11,1	27,2	338,5	20,7	90,6	2,9	18,2	30,0	2,8	1,94
6	158,8	16,3	7,0	1,4	3,0	0,8	99,8	18,8	30,1	330,4	35,0	84,1	1,9	17,8	29,0	2,5	2,57
6	151,2	16,4	5,6	0,7	2,3	0,6	125,6	15,8	29,0	291,8	33,9	76,8	2,0	18,1	28,4	2,1	1,95
6	148,8	16,5	6,5	0,9	2,5	0,6	111,1	12,6	27,7	304,4	30,8	80,3	2,0	17,9	28,8	2,2	1,99
8	117,1	16,7	31,2	29,6	6,1	5,1	26,9	45,3	16,3	210,9	137,5	50,7	0,8	22,8	23,5	1,8	15,41
8	121,1	16,4	14,5	17,7	7,1	6,6	45,9	65,2	32,7	254,7	70,1	93,8	2,1	20,1	25,7	2,2	18,17
8	113,8	16,6	14,2	11,8	6,6	5,8	47,5	84,4	31,1	193,2	156,6	50,6	1,3	29,1	25,7	1,8	16,15

Tabel 10. Meetgegevens verkregen bij een ingestelde spanning van 20 V en stroom 225 A, een vaste instelling van de helling -2V/100A, de smoorspoel instelling is gevarieerd.

choke (-)	I _{gem} (A)	U _{gem} (V)	t _B (ms)	st.afw (ms)	t _K (ms)	st.afw (ms)	KF (Hz)	st.afw (Hz)	KG (%)	I _P (A)	st.afw (A)	I _B (A)	U _M (V)	U _B (V)	U _P (V)	P _K (kW)	SV (%)
0	205,1	19,2	6,8	3,7	1,9	0,6	114,9	132,4	21,7	452,5	49,3	156,7	7,7	21,4	27,0	5,4	5,9
0	206,7	19,2	6,8	3,2	1,9	0,7	116,0	118,3	21,7	455,8	50,5	152,1	7,8	21,1	26,6	5,4	5,38
0	204,1	19,3	8,0	2,4	2,1	0,6	98,2	38,3	21,1	469,5	46,2	139,4	7,6	20,8	27,7	5,5	4,97
2	206,4	19,2	7,4	3,0	2,0	0,7	107,1	137,0	21,3	462,0	53,1	164,2	6,8	21,4	29,1	5,6	4,91
2	203,3	19,2	8,1	3,3	2,2	0,8	97,6	105,0	21,4	465,8	48,4	160,1	6,8	21,3	29,7	5,6	4,46
2	204,2	19,1	8,0	1,8	2,1	0,7	98,8	44,0	20,7	468,2	44,6	145,9	6,7	20,6	29,6	5,5	3,77
4	201,1	19,0	8,7	1,8	2,4	0,6	89,6	61,9	21,6	461,0	46,2	139,3	4,7	20,5	31,4	4,9	3,63
4	199,8	19,1	8,5	1,5	2,4	0,5	91,8	17,6	21,7	461,9	42,9	138,8	4,7	20,5	31,7	4,9	2,87
4	198,8	19,2	8,9	2,6	2,6	0,6	87,3	66,0	22,3	462,6	43,5	146,0	4,8	21,0	32,1	5,1	2,62
6	207,3	18,5	6,4	3,2	2,9	1,6	107,4	75,7	31,1	331,1	117,6	141,4	4,0	21,3	29,6	3,9	1,17
6	204,2	18,6	8,8	3,6	3,4	1,5	82,0	39,5	28,0	379,5	101,9	135,2	3,8	20,6	31,4	3,9	1,47
6	204,6	18,7	7,5	3,6	2,9	1,8	95,8	67,3	27,5	353,9	116,3	132,5	3,9	21,1	30,6	4,1	1,64
8	195,5	17,8	12,0	14,6	5,0	4,6	59,3	183,3	29,5	269,7	98,5	139,6	3,5	23,0	24,4	2,7	8,78
8	211,6	17,6	13,0	10,7	8,6	6,9	47,4	50,2	40,8	322,2	104,1	144,5	3,4	23,2	28,0	3,4	9,13
8	191,7	18,0	16,5	17,0	5,3	3,8	45,4	52,5	23,9	287,7	79,4	134,6	3,5	21,5	24,2	2,6	7,81

Tabel 11. Meetgegevens verkregen bij een ingestelde spanning van 18 V en stroom 175 A en 200 A, met een instelling van de helling van -2V/100A en een smoorspoelinstelling 6.

I_{RMS} (A)	I_{gem} (A)	U_{gem} (V)	t_B (ms)	st.afw (ms)	t_K (ms)	st.afw (ms)	KF (Hz)	st.afw (Hz)	KG (%)	I_p (A)	st.afw (A)	I_B (A)	U_M (V)	U_B (V)	U_P (V)	P_K (kW)	SV (%)
175	158,8	16,3	7,0	1,4	3,0	0,8	99,8	18,8	30,1	330,4	35,0	84,1	1,9	17,8	29,0	2,5	2,57
175	151,2	16,4	5,6	0,7	2,3	0,6	125,6	15,8	29,0	291,8	33,9	76,8	2,0	18,1	28,4	2,1	1,95
175	148,8	16,5	6,5	0,9	2,5	0,6	111,1	12,6	27,7	304,4	30,8	80,3	2,0	17,9	28,8	2,2	1,99
175	152,2	16,3	7,2	0,8	2,8	0,7	100,1	9,3	27,9	329,5	30,7	78,8	2,1	17,6	30,3	2,4	4,61
175	155,0	16,4	6,8	0,7	2,8	0,7	104,4	10,9	29,2	329,1	29,1	78,2	2,0	17,6	30,0	2,3	2,31
175	156,4	16,1	6,7	0,5	2,8	0,6	105,4	9,6	29,3	324,4	29,2	77,3	2,0	17,6	29,7	2,1	5,66
200	166,3	16,7	14,1	16,1	4,0	2,1	55,2	69,0	22,2	345,9	96,6	113,1	2,1	20,1	28,2	3,0	9,03
200	160,7	16,8	11,3	12,4	3,7	3,0	67,0	90,4	24,6	295,9	128,2	106,3	2,2	23,2	26,5	3,2	8,77
200	160,5	16,7	12,7	13,2	4,0	3,1	59,7	135,0	24,1	305,2	142,5	112,8	2,6	23,5	27,5	3,2	7,43
200	170,4	16,5	7,5	3,6	3,4	1,6	91,7	47,5	31,4	343,4	62,4	88,4	2,3	18,5	29,4	2,8	4,44
200	170,1	16,6	7,0	1,9	3,3	1,1	96,4	35,2	32,2	343,8	60,2	91,6	2,2	18,7	29,5	2,7	2,36
200	166,3	16,0	8,1	4,6	3,9	1,5	83,7	62,3	32,3	352,7	69,0	91,6	2,0	18,3	29,0	2,7	6,42

Tabel 12. Meetgegevens verkregen bij een ingestelde spanning van 18 V en stroom van 175 A, met verschillende instellingen van de helling en een vaste instelling van de smoorpoel 6.

helling (-V/100A)	I _{gem} (A)	U _{gem} (V)	t _B (ms)	st.afw (ms)	t _K (ms)	st.afw (ms)	KF (Hz)	st.afw (Hz)	KG (%)	I _p (A)	st.afw (A)	I _B (A)	U _M (V)	U _B (V)	U _P (V)	P _K (kW)	SV (%)
-	129,3	17,4	11,7	7,2	2,2	0,5	71,9	68,5	16,1	461,5	47,2	115,3	3,7	19,0	33,1	5,2	11,08
-	131,1	17,3	11,5	4,9	2,1	0,7	73,2	90,1	15,5	437,5	112,4	98,2	3,5	18,3	32,1	5,0	11,04
-	130,4	17,3	12,4	5,6	2,2	0,6	68,7	43,0	14,9	458,0	63,9	87,6	3,5	17,8	33,0	5,2	8,4
2	152,6	17,0	6,0	0,7	2,0	0,3	125,6	12,5	25,0	368,1	13,9	96,5	3,6	18,4	30,9	3,5	2,8
2	151,4	17,0	6,4	0,8	2,0	0,3	118,8	11,9	24,1	370,8	13,1	94,4	3,6	18,4	30,7	3,5	2,66
2	152,6	16,9	6,2	0,6	2,0	0,3	121,6	10,2	24,4	372,0	12,4	96,0	3,4	18,3	31,0	3,4	2,62
4	160,2	16,7	5,4	0,5	2,1	0,3	134,2	10,5	27,9	328,4	12,7	103,6	3,4	18,8	29,0	2,8	4,01
4	160,1	16,8	5,7	0,4	2,2	0,3	126,8	8,1	27,9	335,4	12,4	103,0	3,3	18,8	29,1	2,9	2,92
4	156,9	16,8	5,7	0,4	2,2	0,4	126,6	7,7	28,3	331,2	14,7	99,8	3,3	18,9	29,3	2,9	2,27
6	167,1	16,4	5,0	0,9	2,4	0,4	135,1	121,6	31,9	285,5	20,7	115,4	3,3	19,5	27,0	2,3	3,24
6	166,6	16,4	5,0	0,6	2,2	0,4	139,9	11,2	30,6	283,5	14,9	115,0	3,2	19,5	26,2	2,2	1,89
6	165,6	16,5	5,3	1,0	2,5	0,5	127,6	18,8	31,9	288,0	11,2	112,5	3,3	19,6	27,2	2,3	2,05

Tabel 13. Meetgegevens verkregen bij een ingestelde spanning van 20 V en stroom van 225 A, met verschillende instellingen van de helling en een vaste instelling van de smoorpoel 6.

helling (-V/100A)	I _{gem} (A)	U _{gem} (V)	t _B (ms)	st.afw (ms)	t _K (ms)	st.afw (ms)	KF (Hz)	st.afw (Hz)	KG (%)	I _p (A)	st.afw (A)	I _B (A)	U _M (V)	U _B (V)	U _P (V)	P _K (kW)	SV (%)
-	182,2	18,0	5,4	4,1	2,6	1,2	125,4	97,7	32,3	330,6	174,9	178,0	2,7	22,2	29,3	5,3	1,96
-	195,1	18,6	4,6	3,8	2,6	0,9	140,3	134,1	35,8	336,7	151,4	209,5	2,7	23,5	29,7	5,3	2,01
-	184,9	18,6	4,9	3,6	2,7	0,9	132,2	94,2	35,1	355,1	134,3	194,0	2,5	23,4	30,9	5,1	2,01
2	207,3	18,5	6,4	3,2	2,9	1,6	107,4	75,7	31,1	331,1	117,6	141,4	4,0	21,3	29,6	3,9	1,17
2	204,2	18,6	8,8	3,6	3,4	1,5	82,0	39,5	28,0	379,5	101,9	135,2	3,8	20,6	31,4	3,9	1,33
2	204,6	18,7	7,5	3,6	2,9	1,8	95,8	67,3	27,5	353,9	116,3	132,5	3,9	21,1	30,6	4,1	1,15
4	215,8	18,2	7,6	3,5	3,8	1,9	87,6	84,8	33,4	339,8	70,1	145,0	3,8	21,3	28,7	3,1	1,49
4	216,5	18,2	6,2	2,9	3,3	1,9	104,4	71,6	34,9	318,9	74,4	146,2	4,1	21,5	28,2	3,2	2,83
4	214,4	18,1	5,1	2,4	2,8	1,7	127,1	75,9	35,2	297,5	74,2	150,3	4,3	21,5	28,1	3,1	1,63
6	209,9	18,4	10,8	9,7	4,8	4,8	66,6	123,2	32,2	287,8	50,5	169,8	3,9	23,2	25,3	2,7	2,32
6	212,5	18,1	10,7	11,5	5,3	5,0	62,3	106,3	32,8	284,2	54,1	156,5	3,8	22,9	25,5	2,8	2,29
6	207,0	18,5	10,4	8,1	4,6	4,2	65,9	101,6	30,6	281,2	49,0	155,4	4,1	22,9	25,5	2,6	4,97

APPENDIX 3

Tabel 14. De breedte B en diepte d van de lasbaden bij verschillende werkafstanden, de ingestelde stroom was 225 A en spanning 20 V.

L_w (mm)	B (mm)	d (mm)
21	8,69	2,26
17	9,19	2,35
15	9,61	2,54
13	9,21	2,6
11	9,65	3,07
7	9,65	3,15

Tabel 15. Meetgegevens verkregen bij een ingestelde spanning van 18 V, met een instelling van de helling van -2V/100A en een smoorspoelinstelling 6, de werkafstand is hierbij gevarieerd.

Lw (mm)	I _{gem} (A)	U _{gem} (V)	t _B (ms)	st.afw (ms)	t _K (ms)	st.afw (ms)	KF (Hz)	st.afw (Hz)	KG (%)	I _p (A)	st.afw (A)	I _B (A)	U _M (V)	U _B (V)	U _P (V)	P _K (kW)	SV (%)
21	148,5	17,1	6,0	0,4	2,0	0,3	125,8	7,9	24,9	367,1	14,0	91,5	3,8	18,6	30,9	3,5	3,41
21	147,6	17,1	6,7	0,6	2,3	0,3	111,4	9,1	25,7	386,0	13,6	88,2	3,8	18,5	31,4	3,7	3,36
21	148,2	17,1	5,8	0,5	1,9	0,3	129,2	9,3	24,9	366,4	11,6	92,0	3,9	18,5	31,0	3,4	3,04
19	152,6	17,0	6,0	0,7	2,0	0,3	125,6	12,5	25,0	368,1	13,9	96,5	3,6	18,4	30,9	3,5	2,8
19	151,4	17,0	6,4	0,8	2,0	0,3	118,8	11,9	24,1	370,8	13,1	94,4	3,6	18,4	30,7	3,5	2,66
19	152,6	16,9	6,2	0,6	2,0	0,3	121,6	10,2	24,4	372,0	12,4	96,0	3,4	18,3	31,0	3,4	2,62
17	145,0	17,0	7,5	0,4	2,1	0,3	104,4	5,3	21,9	399,5	16,3	88,5	3,0	18,3	30,5	3,4	5,45
17	147,6	17,0	7,1	1,3	2,1	0,5	109,9	25,7	22,6	389,8	40,4	90,0	3,3	18,4	30,6	3,6	4,26
17	145,3	17,0	7,2	0,9	2,0	0,2	108,1	10,8	22,0	390,2	9,9	90,9	3,3	18,4	30,7	3,4	4,51
15	147,9	17,1	7,7	1,2	2,0	0,3	103,9	11,2	20,5	400,1	16,8	93,7	3,0	18,4	29,9	3,3	4,9
15	148,2	17,1	8,0	1,0	2,0	0,4	101,1	15,2	19,8	398,7	23,3	93,8	2,9	18,4	29,5	3,3	4,97
15	148,8	17,1	8,1	1,1	2,0	0,3	99,0	10,5	19,8	406,4	13,9	94,7	3,0	18,3	29,7	3,4	4,31

Tabel 16. Meetgegevens verkregen bij een ingestelde spanning van 20 V, met een instelling van de helling van -2V/100A en een smoorspoelinstelling 6, de werkafstand is hierbij gevarieerd.

Lw (mm)	I _{gem} (A)	U _{gem} (V)	t _B (ms)	st.afw (ms)	t _K (ms)	st.afw (ms)	KF (Hz)	st.afw (Hz)	KG (%)	I _p (A)	st.afw (A)	I _B (A)	U _M (V)	U _B (V)	U _P (V)	P _K (kW)	SV (%)
21	207,8	18,8	6,5	3,3	3,1	1,8	104,8	91,6	32,2	348,1	99,2	128,1	4,2	20,9	30,6	4,1	3,3
21	204,2	18,9	6,7	2,8	3,1	1,7	102,3	71,4	31,7	346,0	107,2	125,4	4,5	20,8	31,3	4,1	2,91
21	205,3	18,8	5,9	3,1	3,0	1,7	112,2	128,4	33,8	332,9	95,0	126,5	4,1	21,4	30,7	4,1	3,05
19	207,3	18,5	6,4	3,2	2,9	1,6	107,4	75,7	31,1	331,1	117,6	141,4	4,0	21,3	29,6	3,9	1,17
19	204,2	18,6	8,8	3,6	3,4	1,5	82,0	39,5	28,0	379,5	101,9	135,2	3,8	20,6	31,4	3,9	1,47
19	204,6	18,7	7,5	3,6	2,9	1,8	95,8	67,3	27,5	353,9	116,3	132,5	3,9	21,1	30,6	4,1	1,64
17	205,8	19,1	9,1	2,2	3,2	0,9	81,1	38,3	26,0	393,2	59,0	137,8	3,3	20,8	31,3	3,9	2,62
17	203,7	18,8	9,0	2,2	3,4	1,0	81,1	38,8	27,4	392,0	68,8	132,8	3,5	20,6	31,5	3,9	2,87
17	195,7	19,1	8,2	2,2	2,7	1,4	91,1	71,9	24,9	351,5	99,6	131,7	3,6	20,6	30,0	3,9	2,38
15	209,3	18,8	9,8	2,0	3,6	0,6	74,1	22,5	27,0	419,0	57,4	142,7	3,2	20,6	31,4	3,9	1,99
15	212,6	18,7	8,6	3,2	3,0	1,4	86,4	40,7	25,8	380,7	84,4	148,8	3,2	20,7	30,2	4,0	1,98
15	208,8	18,8	8,7	3,1	3,1	1,4	85,1	63,7	26,2	385,6	90,4	137,2	3,4	20,4	30,2	3,9	2,03
13	206,9	18,8	8,4	2,4	2,8	0,9	89,3	40,0	25,2	375,1	80,4	137,7	3,3	20,6	29,9	3,6	2,95
13	205,4	18,9	8,1	2,9	2,7	1,0	93,0	89,1	25,1	362,2	76,9	143,2	3,1	20,6	29,3	3,7	2,55
13	205,3	18,9	8,7	2,5	2,7	1,1	87,7	66,3	23,5	375,0	78,1	138,7	3,2	20,5	30,1	3,7	2,39
11	208,7	18,8	10,2	2,4	3,1	1,0	75,1	42,3	23,4	402,1	64,5	142,3	2,7	20,5	29,8	3,8	2
11	210,4	18,8	11,0	1,2	3,1	0,6	70,5	7,4	21,9	413,8	29,1	145,1	2,4	20,3	30,0	3,6	2,26
11	206,2	18,8	9,5	3,5	2,8	1,1	81,9	59,0	22,8	368,1	83,5	141,8	3,2	20,6	29,3	3,8	2,57
7	213,1	18,7	11,1	2,7	2,8	0,9	72,1	54,7	19,9	396,1	53,1	148,0	1,6	20,3	27,9	3,6	3,96
7	209,5	18,8	10,2	2,5	2,3	0,8	79,8	33,7	18,5	379,7	38,9	144,2	1,8	20,4	27,9	3,4	2,96
7	216,0	18,7	10,7	2,3	2,5	0,8	76,2	32,1	18,8	394,0	52,0	151,9	1,7	20,3	28,1	3,4	3,07

APPENDIX 4

Tabel 17. Meetgegevens verkregen bij verschillende instellingen van smoorspoel en helling buiten de maximale kortsluitfrequentieband.

	I_{RMS} (A)	U_{RMS} (V)	choke (-)	hel. (-V/100A)	I_{gem} (A)	U_{gem} (V)	t_B (ms)	st.afw (ms)	t_K (ms)	st.afw (ms)	KF (Hz)	st.afw (Hz)	KG (%)	I_P (A)	st.afw (A)	I_B (A)	U_M (V)	U_B (V)	U_P (V)	P_K (kW)	SV (%)
A	16	175	6	2	116,7	14,8	11,6	11,7	4,0	3,3	64,1	46,7	25,5	258,9	132,6	60,9	1,1	19,0	24,9	2,3	12,55
	16	175	6	2	118,2	14,7	12,7	13,2	3,9	3,8	60,0	79,4	23,2	228,5	130,5	68,3	1,1	19,8	24,3	2,2	8,66
	16	175	6	2	139,0	14,0	4,6	0,8	2,8	0,8	134,4	26,7	37,4	274,9	29,5	53,4	1,2	16,3	26,4	1,7	8,22
	16	175	4	-	107,8	14,6	5,0	3,5	1,9	0,7	146,0	83,6	27,8	334,2	160,2	33,8	1,8	16,1	27,9	3,5	8,23
	16	175	4	-	110,3	14,6	4,6	2,2	1,8	0,7	157,8	74,1	28,2	324,1	166,5	23,4	1,6	15,9	28,3	3,4	6,24
	16	175	4	-	108,6	14,6	4,7	3,1	1,9	0,9	151,9	127,3	28,8	315,0	180,4	17,7	1,1	16,0	27,9	3,5	6,94
B	18	225	6	2	182,4	16,5	10,3	9,9	4,2	2,4	68,9	56,0	28,7	341,9	100,8	132,6	2,8	20,9	27,8	3,3	5,54
	18	225	6	2	196,8	16,2	6,5	4,6	4,1	2,6	94,8	63,7	38,6	327,8	116,2	125,5	3,0	20,0	28,7	3,4	4,75
	18	225	6	2	202,0	16,0	9,2	7,6	4,7	2,9	72,9	111,3	34,4	355,3	107,5	101,9	2,4	19,7	27,3	3,3	4,3
	18	225	6	-	160,6	15,5	3,1	2,6	2,6	1,3	176,7	120,6	45,5	270,6	192,8	126,8	0,9	20,8	28,0	4,3	8,12
	18	225	6	-	152,5	15,7	3,8	3,5	2,7	1,7	152,8	146,7	41,6	263,1	209,8	136,1	1,2	22,1	29,0	4,4	7,61
	18	225	6	-	156,1	15,5	3,3	3,0	2,6	1,4	169,3	110,7	43,7	265,6	196,6	121,9	0,9	21,1	28,3	4,0	7,22
D	24	175	6	2	167,1	23,2	26,0	17,3	3,0	1,1	34,5	178,0	10,5	392,1	67,4	170,4	3,7	25,8	35,9	4,7	5,14
	24	175	6	2	162,4	23,4	28,6	14,0	2,8	0,8	31,9	44,2	9,0	391,2	128,2	123,2	3,5	25,6	37,8	4,7	6,06
	24	175	6	2	165,5	23,3	21,0	17,1	2,6	0,8	42,3	180,6	11,0	364,6	95,2	174,7	4,4	25,7	36,7	5,0	4,22
	24	175	6	6	175,5	23,5	38,8	12,3	4,2	1,1	23,3	6,4	9,8	326,2	25,8	151,8	3,3	25,0	30,9	2,5	4,64
	24	175	6	6	178,7	22,9	20,2	11,4	2,9	1,7	43,5	105,9	12,8	275,8	59,9	144,8	4,0	23,3	29,7	2,7	4,51
	24	175	6	6	174,8	23,4	21,5	10,9	2,4	1,6	42,2	65,8	10,2	262,0	58,2	157,5	3,9	24,8	30,4	3,1	3,54
C	18	120	6	2	103,6	17,0	15,0	2,6	2,3	0,4	57,8	14,8	13,4	285,6	12,9	72,9	1,7	17,8	29,2	2,1	6,81
	18	120	6	2	103,5	17,1	14,5	5,2	2,4	0,4	59,3	27,7	14,3	296,4	15,6	66,8	1,7	17,8	29,4	1,9	5,34
	18	120	6	2	101,2	17,1	16,5	5,4	2,4	0,5	53,1	26,3	12,7	295,8	16,5	68,2	1,9	18,0	29,4	2,0	5,21
	18	120	6	6	120,8	16,5	8,5	2,3	2,6	0,4	89,8	24,2	23,5	189,6	9,6	86,5	2,0	18,8	23,8	1,0	3,35
	18	120	6	6	118,8	16,6	9,0	2,9	2,6	0,3	86,3	24,4	22,1	188,5	7,1	85,6	2,0	18,9	23,8	0,9	2,21
	18	120	6	6	114,7	16,7	10,0	3,5	2,8	0,6	77,9	32,2	21,9	189,9	13,1	83,1	2,0	18,9	24,0	1,0	2,52

APPENDIX 5

Tabel 18. De lengte berekend van de vloeistofbrug bij een ingestelde spanning van 18 V en verschillende stroomsterktes met een instelling van de helling -2V/100A en een smoorspoel instelling 6.

I_{RMS} (A)	I_{gem} (A)	U_{gem} (V)	L (mm)	st.afw (mm)	SV (%)
100	83,75	17,43	1,5	0,2	8,48
100	83,14	17,45	1,5	0,3	8,97
100	84,95	17,41	1,5	0,2	7,52
125	103,62	17,02	1,2	0,3	6,81
125	103,51	17,12	1,2	0,5	5,34
125	101,23	17,14	1,3	0,6	5,21
150	135,14	16,47	0,9	0,2	3,12
150	135,3	16,54	1,0	0,2	2,93
150	134,45	16,5	1,0	0,2	3,6
175	158,75	16,25	1,3	0,2	2,57
175	151,19	16,41	1,0	0,1	1,95
175	148,79	16,47	1,1	0,1	1,99
200	170,37	16,53	1,6	0,8	4,44
200	170,1	16,55	1,5	0,6	2,36
200	166,31	16	1,8	1,3	6,42
225	182,38	16,54	2,7	2,2	5,54
225	196,8	16,19	2,1	1,4	4,75
225	201,99	16,04	2,7	4,1	4,3
250	220,73	16,34	2,1	3,6	3,72
250	228,5	16,19	2,3	1,4	4,05
250	256,41	23,19	1,9	2,1	3,1

Tabel 19. De lengte berekend van de vloeistofbrug bij een ingestelde spanning van 20 V en verschillende stroomsterktes met een instelling van de helling -2V/100A en een smoorspoel instelling 6.

I_{RMS} (A)	I_{gem} (A)	U_{gem} (V)	L (mm)	st.afw (mm)	SV (%)
125	106,83	19,37	2,5	0,1	4,91
125	102,68	19,57	1,7	3,8	5,5
125	102,26	19,49	2,4	0,1	4,69
150	134,06	19,07	1,8	0,7	5,62
150	130,95	19,16	1,9	0,8	4,93
150	130,86	19,14	1,8	1,3	5,34
175	160,27	18,68	1,5	0,6	2,03
175	155,94	18,8	1,6	0,2	2,23
175	156,18	18,79	1,5	0,2	1,9
200	184,38	18,64	1,9	0,8	1,81
200	176,64	18,72	1,7	0,7	2,1
200	179,55	18,61	1,5	0,9	2,01
225	207,28	18,5	1,8	1,3	1,17
225	204,23	18,62	2,4	1,1	1,47
225	204,58	18,67	2,0	1,4	1,64
250	231,15	18,52	2,6	1,4	2,7
250	225,66	18,62	2,1	1,5	1,87
250	230,65	18,57	2,5	1,4	2,07

Tabel 20. De lengte van de vloeistofbrug L, berekend bij verschillende werkafstanden, met een ingestelde spanning van 20 V en stroom 225 A, helling -2V/100A en smoorspoel instelling 6.

Lw (mm)	I _{gem} (A)	U _{gem} (V)	L (mm)	st.afw (mm)	SV (%)
21	207,81	18,82	2,0	1,8	3,3
21	204,18	18,89	2,0	1,4	2,91
21	205,26	18,8	1,9	2,2	3,05
19	207,28	18,5	1,8	1,3	1,17
19	204,23	18,62	2,4	1,1	1,47
19	204,58	18,67	2,0	1,4	1,64
17	205,79	19,05	2,3	1,1	2,62
17	203,68	18,83	2,2	1,0	2,87
17	195,69	19,06	2,0	1,5	2,38
15	209,31	18,77	2,4	0,7	1,99
15	212,64	18,7	2,1	1,0	1,98
15	208,81	18,77	2,1	1,6	2,03
13	206,89	18,75	1,9	0,8	2,95
13	205,42	18,85	1,7	1,7	2,55
13	205,32	18,85	1,7	1,3	2,39
11	208,74	18,77	2,1	1,2	2
11	210,42	18,76	2,2	0,2	2,26
11	206,17	18,83	1,8	1,3	2,57
7	213,1	18,7	1,8	1,4	3,96
7	209,45	18,8	1,7	0,7	2,96
7	216,01	18,66	1,7	0,7	3,07

Tabel 21. De oscillatiefrequentie berekend bij een ingestelde spanning 20 V en verschillende stroomsterktes, met zelfinductie 6 en helling -2 V/100 A.

I_{RMS} (A)	D (mm)	γ (N/m)	Freq berekend (Hz)	KF (Hz)
125	7,1	0,8	101,0	31,02
125	7,1	1,2	123,7	31,02
150	7,4	0,8	95,0	50,45
150	7,4	1,2	116,4	50,45
175	8,2	0,8	80,4	82,06
175	8,2	1,2	98,4	82,06
200	9,1	0,8	69,6	90,98
200	9,1	1,2	85,2	90,98
225	9,6	0,8	63,4	95,06
225	9,6	1,2	77,6	95,06
250	10,6	0,8	55,2	95,6
250	10,6	1,2	67,6	95,6

Tabel 22. De frequenties berekend met de breedte D van het lasbad en verschillende γ .
 In deze tabel zijn ook de kortsluitfrequenties gegeven zoals gemeten bij
 verschillende optimale instellingen van stroom en spanning, met een instelling
 van de helling -2V/100A en zelfinductie 6.

U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	γ (N/m)	D (mm)	Freq berekend (Hz)	KF (Hz)
16	150	0,8	5,7	139,2	111,1
16	150	1,2	5,7	170,4	111,1
18	175	0,8	7,4	94,1	112,2
18	175	1,2	7,4	115,2	112,2
20	200	0,8	8,9	71,5	91,0
20	200	1,2	8,9	87,5	91,0
22	225	0,8	10,7	54,0	91,7
22	225	1,2	10,7	66,2	91,7
24	250	0,8	12,3	45,4	101,8
24	250	1,2	12,3	55,6	101,8

Tabel 23. De oscillatiefrequentie berekend met de breedte D van het lasbad, bij een ingestelde spanning van 20 V en stroom 225 A, verschillende werkafstanden, met zelfinductie 6 en helling -2 V/100 A.

L_w (mm)	D (mm)	γ (N/m)	Freq berekend (Hz)	KF (Hz)
21	8,7	0,8	73,9	106,4
21	8,7	1,2	90,5	106,4
19	8,9	0,8	71,3	95,1
19	8,9	1,2	87,4	95,1
17	9,2	0,8	68,0	84,4
17	9,2	1,2	83,3	84,4
15	9,6	0,8	63,6	81,9
15	9,6	1,2	77,9	81,9
13	9,2	0,8	67,8	90,0
13	9,2	1,2	83,0	90,0
11	9,7	0,8	63,2	75,8
11	9,7	1,2	77,4	75,8
7	9,7	0,8	63,2	76,0
7	9,7	1,2	77,4	76,0

APPENDIX 6

Tabel 24. De samenstelling van de draden zoals bepaald met ICP-OES en vlam-AAS.

massa %	Mn	Cu	Si	P
draad 1	1.3	0.13	0.69	0.03
draad 2	1.3	0.09	0.79	0.02
draad 3	1.67	0.11	0.63	0.02

Tabel 25. Het gehalte zuurstof, koolstof en zwavel bepaald in de verschillende draden.

	meting	C	O	S
draad 1	1 ^e	0.1188	0.081	0.0137
draad 1	2 ^e	0.0938	0.120	0.0096
draad 1	3 ^e	0.1075	0.144	0.0037
draad 2	1 ^e	0.1061	0.099	0.0164
draad 2	2 ^e	0.1112	0.125	0.0184
draad 2	3 ^e	0.1359		0.0208
draad 3	1 ^e	0.082		0.0140

