

SPATGEDRAG
BIJ HET
KORTSLUITBOOGLASSEN

HANS RENNER

T.U. DELFT

Faculteit der Scheikundige Technologie
en der Materiaalkunde
Sectie Lasttechnologie en N.D.O.

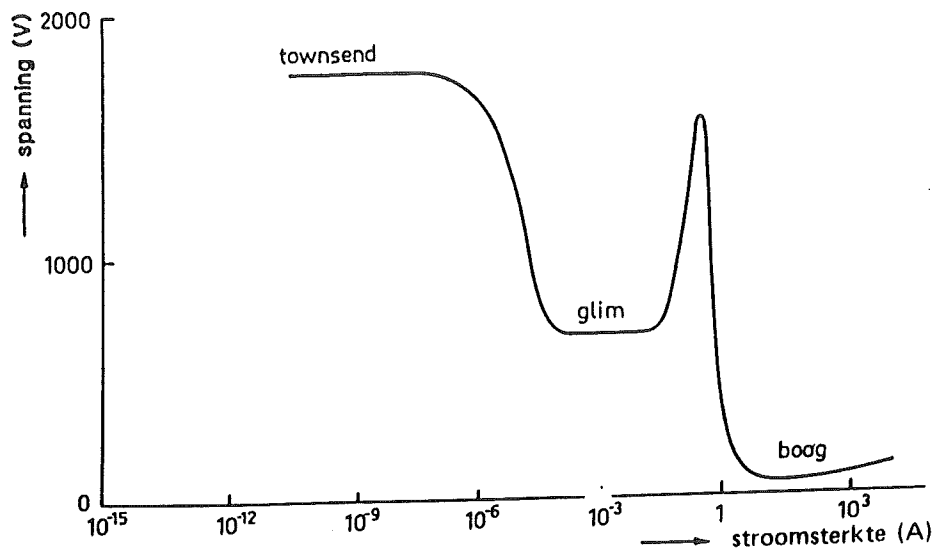
Afstudeerbegeleider : Ir.M.J.M. Hermans
Afstudeerhoogleraar : Prof.Dr.G. den Ouden

1 Inleiding	3
2 Inleiding MIG/MAG-lassen	4
3 Materiaaltransport bij het booglassen	7
3.1 Inleiding	7
3.2 Open booglassen	8
3.3 Kortsluitbooglassen	10
3.3.1 Transport onder invloed van de zwaartekracht en de oppervlaktespanning	10
3.3.2 Effect van de Lorentzkracht op het materiaaltransport	12
3.3.3 Nieuwe voorwaarde voor de stabiliteit van metaaltransport	14
4 Spatgedrag	18
4.1 Spatgedrag bij het MIG/MAG lassen	18
4.2 Spatgedrag bij kortsluitbooglassen met CO ₂ gasbescherming	19
4.2.1 Soorten spatten	19
4.2.2 De hoofdoorzaken van het spatten	21
4.2.2.1 De koolmonoxydeontwikkeling	21
4.2.2.2 De elektrische explosie van de gesmolten metaalbrug	22
4.2.2.3 De elektrische explosie van microbruggen	27
5 Conclusies	29
Literatuur	30

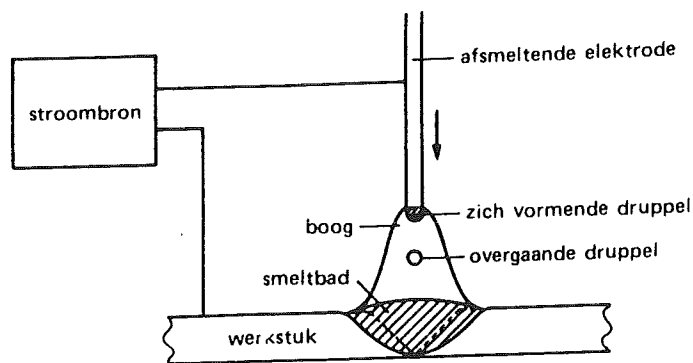
1 Inleiding

In deze scriptie zal naar een aantal aspecten van het MAG-lassen worden gekeken. Het MAG-lassen wordt gekenmerkt door materiaaltransport van de elektrode naar het werkstuk. Dit materiaaltransport kan worden ingedeeld in een aantal typen en wordt beïnvloed door een groot aantal parameters, zoals o.a. het beschermgas, de stroomsterkte en de boogspanning. Een probleem bij het MAG-lassen is het optreden van spatten. Spatten kunnen worden gedefinieerd als metaaldruppels, die niet in het lasbad terechtkomen of het lasbad weer verlaten. Spatverliezen leiden tot een slechte laskwaliteit (het ontstaan van bindingsfouten en porositeit) en een lagere produktiviteit (materiaal- en tijdverlies).

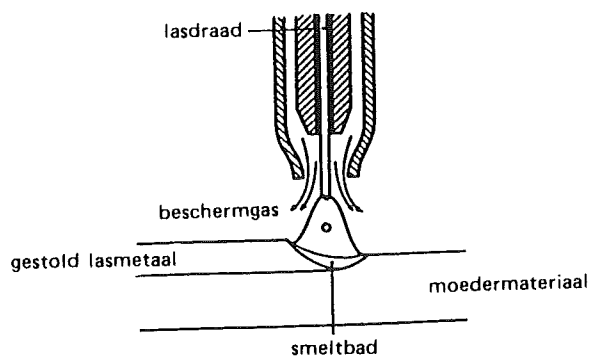
In deze scriptie zal worden gekeken naar oorzaken en oplossingsmethoden van dit spatgedrag. De aandacht zal vooral gaan naar het kortsluitboog-lassen en de invloed van CO_2 op het spatgedrag. Dit alles op basis van een literatuuronderzoek.



Figuur 1: Stroom-spanning karakteristiek van de verschillende typen gasontlading.[1]



Figuur 2: Principe van het booglassen.[1]



Figuur 3: MIG/MAG lassen.[1]

2 Inleiding MIG/MAG-lassen

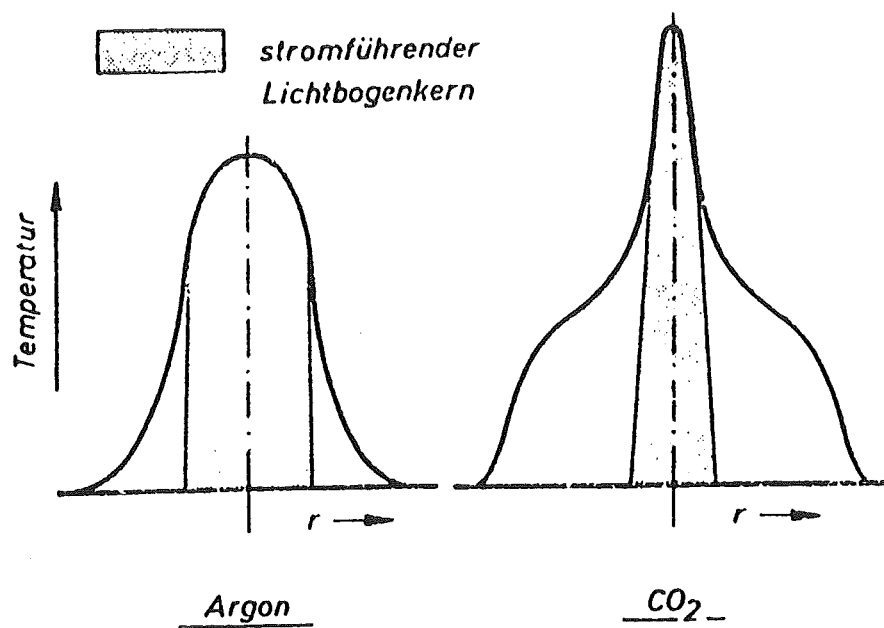
Het verschijnsel van elektriciteitsgeleiding is al heel lang bekend [1].

Het manifesteert zich in een aantal vormen : vonk, bliksem, Townsend-ontlading, glimontlading en boogontlading. Deze laatste drie zijn stationaire ontlastingstypen die voor een onbepaalde tijd kunnen voortduren. Zij kunnen worden beschreven aan de hand van een zgn. stroom-spanningkarakteristiek (zie fig. 1).

De boog die ontstaat bij relatief lage spanning en hoge stroomsterkte, is op grond van zijn eigenschappen uitermate geschikt om te worden toegepast als warmtebron bij het booglassen. Het principe van booglassen is schematisch weergegeven in fig. 2. Tussen een metalen elektrode, die afsmeltend (zoals in fig. 2) of niet-afsmeltend kan zijn, en het te lassen werkstuk (bijvoorbeeld twee platen die verbonden moeten worden) wordt een elektrische boog ontstoken (de lasboog). De afstand tussen de elektrode en het werkstuk (de booglengte) ligt meestal tussen de 0.1 en 1 cm. De elektrische stroom kan worden geleverd door een transformator (in geval van lassen met wisselstroom) of een gelijkrichter (in geval van lassen met gelijkstroom).

Door de in de boog geproduceerde elektrische energie zal het werkstuk worden opgewarmd en gedeeltelijk smelten, waardoor een smeltbad (het lasbad) ontstaat. Bij gebruik van een afsmeltende elektrode zal ook gesmolten elektrodemateriaal via druppels in het lasbad terechtkomen. Door nu de elektrode langs de lasnaad te bewegen (en in geval van een afsmeltende elektrode tevens naar beneden om het afsmelten te compenseren) wordt de lasnaad met vloeibaar materiaal gevuld. Het vloeibare materiaal zal vervolgens afkoelen en stollen. Aldus ontstaat de gewenste lasverbinding.

Bij het MIG/MAG-lassen (MIG en MAG zijn afkortingen van Metal Inert Gas en Metal Active Gas) wordt gebruik gemaakt van een afsmeltende elektrode in de vorm van een continu toegevoerde draad (zie fig. 3). Dit kan een massieve draad zijn of een gevulde draad bestaande uit een metalen omhulsel en een poedervormige vulling. De gevulde draad heeft als voordeel dat de chemische samenstelling via de poedervormige vulling gemakkelijk gevarieerd kan worden.



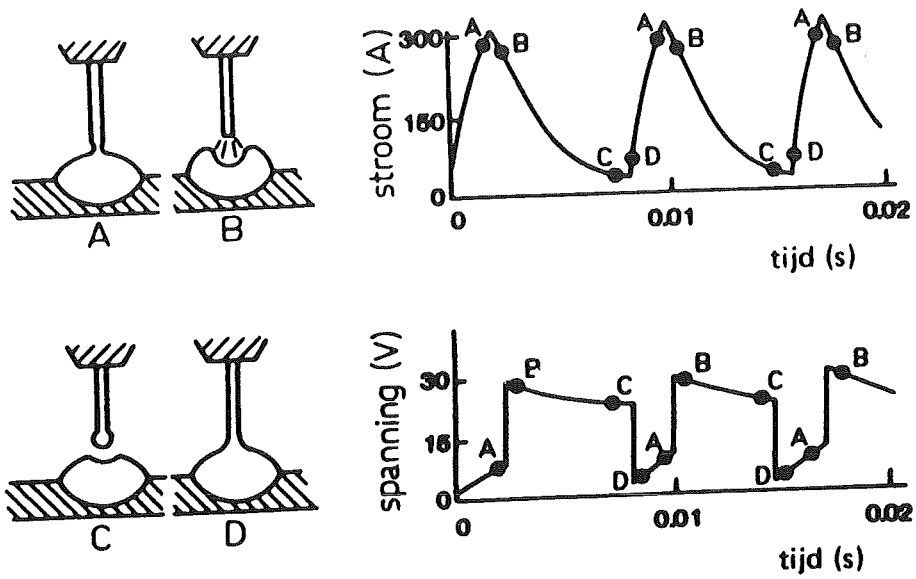
Figuur 4: Schematische representatie van de temperatuur- en stroomverdeling in de boog.[2]

Op basis van het gebruikte beschermgas wordt onderscheid gemaakt tussen het MIG en het MAG-lassen.

Bij het MIG-lassen wordt een inert gas (argon, helium of een mengsel hiervan) als beschermgas gebruikt, terwijl bij het MAG-lassen een inert gas (meestal argon) wordt toegepast waaraan een kleine hoeveelheid zuurstof en/of CO_2 is toegevoegd. Door de toevoeging van zuurstof en/of CO_2 wordt de boog gestabiliseerd en krijgt het gesmolten lasmetaal betere vloeieigenschappen t.g.v een veranderde oppervlaktespanning. Een bijzondere vorm van het MAG-lassen is het CO_2 -lassen, waarbij zuivere CO_2 als beschermgas wordt gebruikt. In verband met de oxyderende werking van zuurstof en CO_2 worden bij het MAG-lassen meestal bepaalde de-oxyderende stoffen aan de lasdraad toegevoegd. Aangezien CO_2 ten opzichte van argon een veel grotere thermische geleidbaarheid heeft, vanwege de diffusie van dissociatieënergie, ontstaan er twee verschillende boogvormen, zie fig. 4 [2].

Bij CO_2 is de plasmastroom sterk samengetrokken tot een smalle kern met een hoge temperatuur en stroomdichtheid. Deze wordt omgeven door een brede hittezone. Bij het argon gas is er een brede stroomvoerende kern en een smalle hittegeleidingszone. De samentrekking van de boog bij CO_2 als gevolg van de hogere thermische geleidbaarheid zorgt i.t.t. argon voor een verhoging van de weerstand. Zodat er een grotere spanningsval is nl. 17.7 V/cm bij CO_2 en slechts 6 V/cm bij argon. Bij het lassen met CO_2 en gelijke stroomomstandigheden ontstaat er dus een kortere boog met een grotere spanningsval i.v.t. argon. De smallere kern bij CO_2 heeft ook gevolgen voor de Lorentzkracht en dus voor het materiaaltransport. In het algemeen geldt dat het MIG-lassen wordt toegepast voor het lassen van non-ferro metaal en het MAG-lassen voor staal.

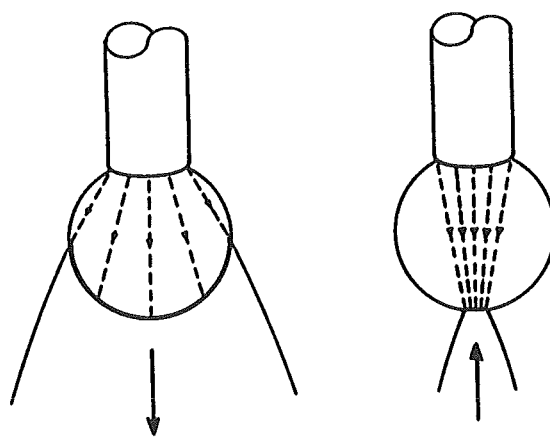
Bij het MIG/MAG-lassen moet onderscheid [1] worden gemaakt tussen het open-boog lassen en het kortsluitbooglassen. In geval van open-boog lassen brandt de boog continu en treden er geen kortsluitingen op tussen elektrode en werkstuk. Het materiaaltransport vindt plaats in de vorm van discrete druppels.



Figuur 5: Het verloop van stroom en spanning bij kortsluitbooglassen.[1]

Bij het kortsluitbooglassen vindt het materiaaltransport via kortsluitingen plaats en wordt de boog periodiek gedoofd. Kortsluitbooglassen is slechts mogelijk bij relatief lage waarden van stroom en spanning. In fig. 5 wordt het verloop van stroom en spanning bij het kortsluitbooglassen schematisch weergegeven.

Vanwege het relatief kleine lasbad wordt het kortsluitbooglassen vooral toegepast bij het lassen van dun materiaal. Ook kan gelast worden in alle posities. Als nadeel kan genoemd worden het gevaar voor bindingsfouten ten gevolge van de geringe warmteïnbreng in het werkstuk. Het MIG/MAG-lassen heeft een groot toepassingsgebied en is te mechaniseren en te automatiseren.



Figuur 6: De Lorentzkracht werkend op een metaaldruppel.[1]
Links: stroomdivergentie Rechts: stroomconvergentie.

3 Materiaaltransport bij het booglassen

3.1 Inleiding

[1]

Bij het booglassen met een afsmeltende elektrode zal het elektrode materiaal door de overgedragen warmte tot smelten worden gebracht. Aan het einde van de elektrode zal zich ten gevolge hiervan een druppel vormen die onder invloed van verschillende krachten zal worden afgesplitst en naar het smeltbad worden getransporteerd.

Bij dit proces spelen de volgende krachten een rol:

1 zwaartekracht: De zwaartekracht zal afsplitsing van de druppel bevorderen dan wel tegengaan afhankelijk van de stand van de elektrode.

2 oppervlaktespanning: De oppervlaktespanning zal, in verband met het streven naar minimale oppervlaktenergie, druppelafplitsing onder alle omstandigheden tegengaan.

3 explosieve krachten: Explosieve krachten zijn het gevolg van gasontwikkeling in de druppel en kunnen leiden tot afsplitsing van vloeibare metaaldeeltjes in alle richtingen.

4 zuigkracht: Deze kracht is het gevolg van de plasmastroming (die ontstaat t.g.v. temperatuurs- en dus dichtheidsverschillen en door de elektromagnetische kracht). Deze kracht heeft een aanzuigende werking op de druppel en bevordert dus de afsplitsing.

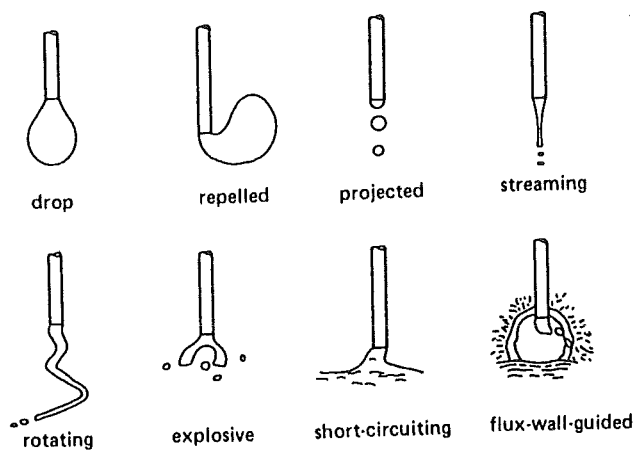
5 Lorentzkracht: Ten gevolge van het verloop van de stroomdichtheid in de druppel zal er op de druppel een elektromagnetische kracht werken. Deze Lorentzkracht heeft dezelfde oorsprong als de kracht die de plasmastroming veroorzaakt en kan worden geschreven als :

$$F_1 = C \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \quad (1)$$

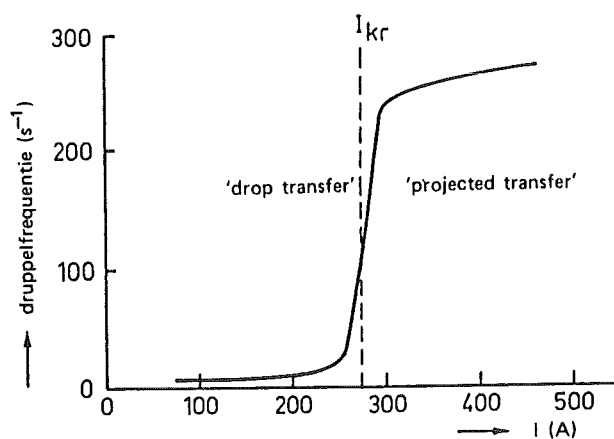
Hierin is C een factor die bepaald wordt door het stroomdichtheidsverloop en μ_0 de magnetische permeabiliteit in vacuum. Bij divergentie van de stroom (als het aanrakingsvlak tussen boog en druppel groter is dan de doorsnede van de elektrode) is C positief en zal druppelafplitsing worden bevorderd.

Tabel 1: IIW-classificatie van materiaaltransport.

Designation of transfer type	Welding processes (examples)
1. Free flight transfer	
1.1. Globular	Low-current GMA
1.1.1. Drop	CO ₂ shielded GMA
1.1.2. Repelled	
1.2. Spray	Intermediate-current GMA
1.2.1. Projected	Medium-current GMA
1.2.2. Streaming	High-current GMA
1.2.3. Rotating	SMA (coated electrodes)
1.3. Explosive	
2. Bridging transfer	Short-arc GMA, SMA
2.1. Short-circuiting	
2.2. Bridging without interruption	Welding with filler wire addition
3. Slag-protected transfer	
3.1. Flux-wall guided	SAW
3.2. Other modes	SMA, cored wire, electrosag



Figuur 7: De verschillende typen druppelovergang volgens de classificatie van het II-W.



Figuur 8: De druppelfrequentie als functie van de stroomsterkte bij het MIG-lassen in argon met 1.6 mm staal draad als electrode.

Bij convergentie van de stroom (als het aanrakingsvlak tussen boog en druppel kleiner is dan de doorsnede van de elektrode) is C negatief en zal druppelafsplitsing worden tegenwerkt (fig. 6).

De bovengenoemde krachten hangen voor wat grootte en richting betreft af van de lasomstandigheden. Het is mogelijk voor de verschillende typen materiaaltransport een krachtenbalans op te stellen.

Uit onderzoek is gebleken dat er onderscheid kan worden gemaakt tussen verschillende typen materiaaltransport. Deze zijn door het International Institute of Welding (IIW) geclassificeerd en staan weergegeven in tabel 1 en fig. 7. In het vervolg zal aan deze engelse benaming van materiaaltransport worden vastgehouden.

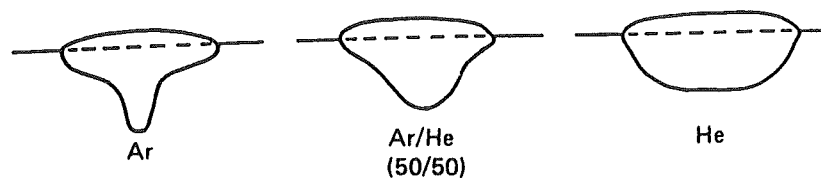
3.2 Open booglassen [1]

Het materiaaltransport bij het MIG/MAG-lassen is sterk afhankelijk van de stroomsterkte, de polariteit en het soort beschermgas en in geval van openboog lassen bij een relatief hoge boogspanning.

Wanneer gelast wordt in een argonrijk beschermgas met de elektrode als positieve pool en relatief lage stroomsterkte, vindt druppelovergang plaats in de vorm van drop transfer (grote druppels met een diameter enkele malen groter dan de diameter van de elektrode).

Bij verhoging van de stroomsterkte vindt bij een bepaalde grenswaarde (de kritische stroomsterkte) een tamelijk abrupte verandering van het materiaaltransport plaats. Boven deze kritische stroomsterkte gaan de druppels over in de vorm van projected transfer (een regelmatige stroom van gerichte druppels met een diameter ongeveer gelijk aan de diameter van de elektrode en met een druppelfrequentie van enkele honderden per seconde). De kritische stroomsterkte is afhankelijk van het elektrodemateriaal en van de diameter van de elektrode (zie fig. 8).

Bij het verhogen van de stroomsterkte gaat projected transfer over in streaming transfer (een gerichte sproeiregen van zeer fijne druppels), terwijl bij zeer hoge stroomsterkte streaming transfer over gaat in rotating transfer (een spiraal van vloeibaar metaal).



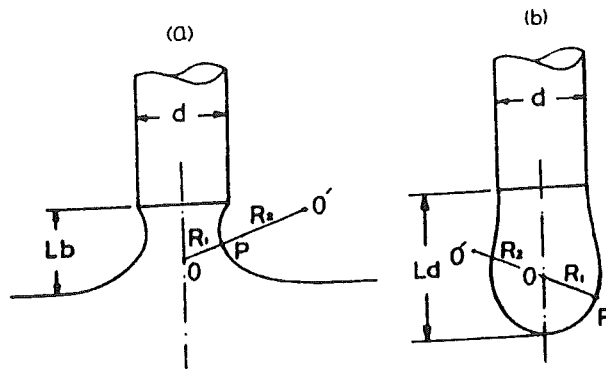
Figuur 9: Dwarsdoorsneden van de las bij het MIG-lassen in verschillende beschermgassen.[1]

Om bij relatief lage stroomsterkte (beneden de kritische waarde) toch materiaaltransport in de vorm van projected transfer, in plaats van drop transfer te laten plaatsvinden, kan gebruik worden gemaakt van stroompulsen. Het principe van pulserend lassen berust op het feit dat de stroom periodiek gedurende korte tijd boven de kritische stroomsterkte wordt gebracht. De frequentie en pulsduur worden in het algemeen zodanig gekozen dat per puls een druppel wordt afgesplitst.

Bij het lassen in een argonrijk beschermgas met de elektrode als negatieve pool is de boog onder alle omstandigheden instabiel, terwijl de druppelovergang zeer onregelmatig is met grove druppels en veel spatten (repelled transfer). De oorzaak van dit gedrag houdt verband met het optreden van stroomconvergentie in de druppel als gevolg van het kleine aanrakingsvlak tussen boog en druppel (een zgn. kathodevlek). Door de stroomconvergentie ontstaat een Lorentzkracht waarvan de richting afhangt van de plaats van de kathodevlek. De Lorentzkracht is gedefinieerd als de interactie tussen elektrische stroom en geïnduceerd magneetveld. De Lorentzkracht kan worden ontbonden in een horizontale en een verticale component. De horizontale component is de zgn. pinch-kracht. Het is duidelijk dat deze Lorentzkracht de druppelafsplitsing tegenwerkt en het optreden van spatten bevordert. Enige verbetering in het materiaaltransport treedt op wanneer een kleine hoeveelheid zuurstof aan het beschermgas wordt toegevoegd of wanneer een alkalihoudende laag op het elektrode-oppervlak wordt aangebracht.

Bij helium treedt onder alle omstandigheden globular transfer op: drop-transfer bij het lassen met de elektrode als positieve pool, repelled transfer bij het lassen met de elektrode als negatieve pool. Dat in bepaalde gevallen toch helium of een helium-argon-mengsel als beschermgas wordt gebruikt, vindt zijn oorzaak in het feit dat bij gebruik van helium in het algemeen een betere lasvorm wordt verkregen (zie fig. 9).

Wanneer CO_2 als beschermgas wordt toegepast, vindt zowel bij positieve als bij negatieve polariteit instabiel materiaal transport plaats in de vorm van grove druppels en veel spatten (repelled transfer). Hoewel bij negatieve polariteit duidelijk verbeteringen optreden wanneer op de elektrode een dunne alkalihoudende laag wordt aangebracht, worden i.h.a. toch de beste resultaten verkregen wanneer gelast wordt met de elektrode als positieve pool.



Figuur 10a: De vorm van de vloeistofbrug aan een cilinder met bijbehorende afmetingen.[3]

Figuur 10b: De vorm van de vloeistofdruppel aan een cilinder met bijbehorende afmetingen.[3]

3.3 Kortsluitbooglassen

Bij het MIG/MAG kortsluitbooglassen vindt materiaaltransport plaats in de vorm van shortcircuiting transfer bij relatief lage boogspanning zie fig. 5. Hierbij wordt het vloeibare metaal van de elektrode naar het smeltbad getransporteerd via kortsluitingen (ongeveer honderd per seconde). In dit hoofdstuk wordt de invloed van de zwaartekracht, de oppervlaktespanning en de Lorentzkracht op dit materiaaltransport beschreven zoals onderzocht door M.Kiyohara T.Okada en H.Yamamoto [3].

3.3.1 Transport onder invloed van de zwaartekracht en de oppervlaktespanning

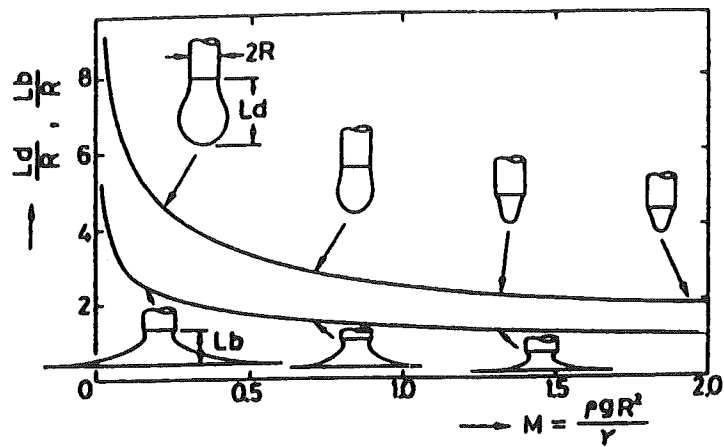
Wanneer een cilinder vanuit een vloeistof (met een lage oppervlaktespanning) wordt getrokken dan blijft er een brug van vloeistof bestaan tot aan een bepaalde kritische lengte L_b , waarna hij breekt (zie fig. 10a).

Een andere manier waarop het materiaaltransport kan worden benaderd is het groeien van een druppel aan het uiteinde van een cilinder. Als een bepaalde druppellengte overschreden wordt zal de druppel worden afgesplitst. Deze grens is de kritische druppellengte L_d .

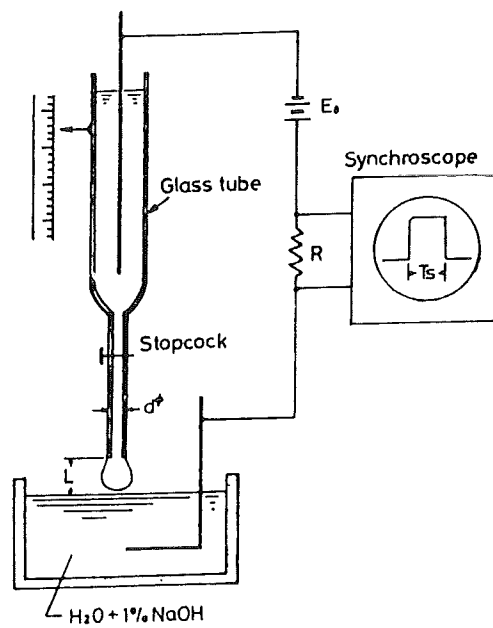
Wanneer een druppel (zie fig. 10b) aan een cilinder een vloeistofoppervlak nadert en contact maakt dan wordt er eenzelfde brug gevormd als in fig. 10a. Een vloeistofbrug met een lengte kleiner dan de kritische lengte is stabiel en zal niet verbroken worden.

Uit metingen blijkt dat de kritische bruglengte altijd kleiner is dan de kritische druppellengte, met andere woorden $L_b < L_d$.

In het geval dat een druppel contact maakt met het bad, waarbij een vloeistofbrug ontstaat die groter is dan de kritische bruglengte m.a.w. $L_b < L < L_d$ dan is de brug instabiel en zal verbroken worden.



Figuur 11: Relatie tussen L_d/R en M en tussen L_b/R en M . [3]



Figuur 12: Experimentele opstelling voor het meten van de kortsluittijd T_s . [3]

Laplace beschrijft de vorm van de druppel of brug met de vergelijking :

$$\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \rho g z \quad (2)$$

γ =oppervlaktespanning

R_1, R_2 =kromtestraal

ρ =dichtheid

z =afstand tot uiteinde cilinder

g =zwaartekrachtversnelling

Deze vergelijking kan herschreven worden tot:

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{\rho g R_1^2}{\gamma}}} + \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho g R_2^2}{\gamma}}} = \sqrt{\frac{\rho g z^2}{\gamma}} \quad (3)$$

Definiëren we de capillairconstante $a = \sqrt{\gamma / \rho g}$ dan geldt deze vergelijking voor alle vloeistoffen.

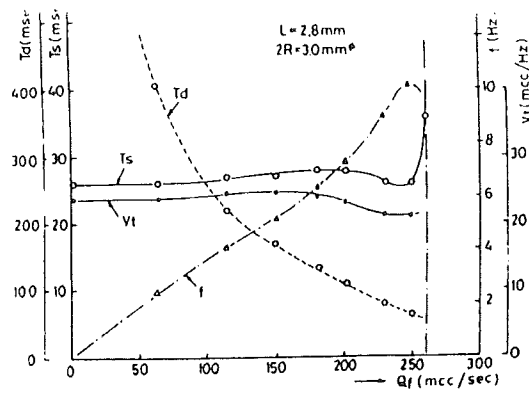
Op basis van vergelijking (3) wordt nu de zgn. 'drop size index' (dimensieloos) gedefiniëerd als :

$$M = \frac{R^2}{a^2} = \frac{\rho g R^2}{\gamma} \quad (4)$$

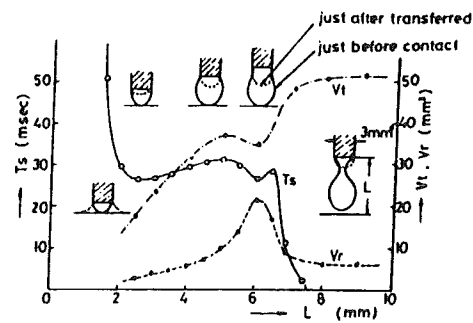
dan blijkt :

$$\frac{L_d}{R} = F(M) \quad \text{en} \quad \frac{L_b}{R} = G(M) \quad (5)$$

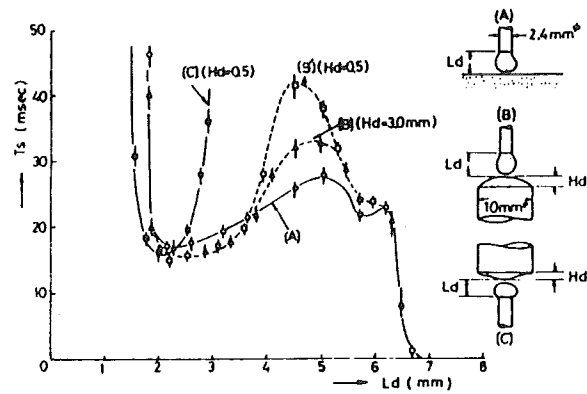
Figuur 11 laat de relatie zien tussen L_d/R en M , en L_b/R en M . Uit de figuur



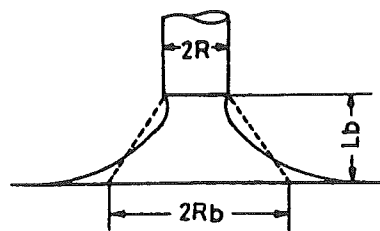
Figuur 13: Boogtijd, kortsluittijd, kortsluitfrequentie en overgedragen volume als functie van het vloeistofdebiet.[3]



Figuur 14: Boogtijd, kortsluittijd, overgedragen volume en achtergebleven volume als functie van de afstand tussen capillair en vloeistofoppervlak.[3]



Figuur 15: Kortsluittijd T_s als functie van de afstand tussen capillair en vloeistofoppervlak.[3]



Figuur 16: Kegelvormige volumebenadering van de vloeistofbrug.[3]

volgt (bij dezelfde straal) : hoe groter σ/γ des te kleiner L_b en L_d . Om deze transportverschijnselen te bestuderen werd een experimentele opstelling gebouwd (fig. 12). M.b.v. druppelexperimenten volgden hieruit verbanden tussen bijvoorbeeld : het vloeistofdebiet Q_f en het 'transfer interval T_d' (=boogtijd), 'contact duration T_s' ' (=kortsluittijd) en de kortsluitfrequentie f , (zie fig. 13). Figuur 14 geeft het verband van bovengenoemde parameters en de afstand tussen capillair en vloeistofoppervlak. In de praktijk van het lassen wordt niet gewerkt met een oneindig lasbad, figuur 15(a), maar met een bad van eindige afmetingen, zie figuur 15(b). Dit feit heeft vooral gevolg voor de waarde van T_s . Deze neemt nu sterk toe bij het naderen van L naar L_d . Dit effect wordt nog duidelijker bij het afnemen van het badvolume (fig. 15b'). Uit dezelfde figuur volgt dat de oppervlaktespanning een grotere rol speelt dan de zwaartekracht bij het breken van de vloeistofbrug. Dit blijkt uit het feit dat bij het lassen in positie van fig. 15c de waarde van L L_b nadert, T_s een gelijke waarde heeft als T_s bij het lassen onder een normale positie.

3.3.2 Effect van de Lorentzkracht op het materiaaltransport

Tijdens het kortsluitbooglassen vindt materiaaltransport plaats zelfs als L kleiner is dan L_b . Er zou dus eigenlijk een stabiele brug moeten ontstaan, hierbij speelt de Lorentzkracht een rol.

De vloeistofkolom kan benaderd worden door een kegel met een volume (zie fig. 15) :

$$V = \frac{\pi}{3} L_b (R^2 + R_b^2 + R R_b) \quad (6)$$

De naar beneden gerichte kracht t.g.v. de stroom I_s wordt weergegeven door de volgende vergelijking :

$$F = \frac{I^2 \mu_0}{4 \pi} \log \left(\frac{R_b}{R} \right) \quad (7)$$

Als de kracht homogeen op de kegel werkt dan geldt voor de dichtheid :

$$\rho_e = \frac{F}{V_g} \quad (8)$$

Op identieke wijze als de vorige sectie wordt nu de 'drop size index' met alleen de invloed van de Lorentzkracht gedefiniëerd:

$$M_e = \frac{\rho_e g R^2}{\gamma} = \frac{\mu_0 I^2}{R\gamma} \left(\frac{R}{L_b} \right) \frac{3}{\pi} \left[\frac{\log\left(\frac{R_b}{R}\right)}{1 + \left(\frac{R_b}{R}\right) + \left(\frac{R_b}{R}\right)^2} \right] \quad (9)$$

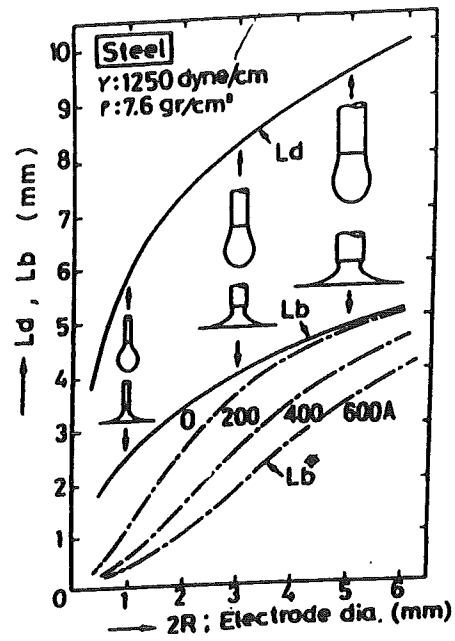
Als we hierin N introduceren (de waarde tussen de haken van vgl 9 is constant ($\alpha=0.09 \pm 0.01$) indien $1.5 < R_b/R < 3.5$) :

$$N = \frac{\alpha \mu_0 I^2}{R\gamma} \quad (\alpha = 8.5 \times 10^{-2}) \quad (10)$$

dan wordt vergelijking 9 herschreven tot :

$$M_e = \left(\frac{R}{L_b} \right) N \quad (11)$$

Wanneer nu zowel de zwaartekracht als de oppervlaktespanning als de Lorentzkracht tegelijk werken, komen we tot een gemeenschappelijke 'drop size index' met een corresponderende nieuwe waarde van L_b^* :



Figuur 17: Berekende waarde van L_d en L_b^* voor een staalelectrode.[3]

$$\frac{L_b^*}{R} = g(M^*) \quad (12)$$

waarin :

$$M^* = M + M_e = \left(\frac{\rho + \rho_e}{\gamma} \right) g R^2 \quad (13)$$

Als (M,N) gegeven is dan volgt m.b.v. vergelijking 12 en 13 de waarde van L_b^* . In figuur 17 is dit gedaan voor staal met γ bepaald in een argon atmosfeer. Uit deze figuur volgt dat het Lorentz-effect vooral optreedt bij hoge stroomsterkten en dunne elektroden ($I > 200A$ en $R = 0.8-1.6$ mm). De Lorentzkracht maakt het dus mogelijk dat een relatief kleine vloeistofbrug nog verbroken kan worden.

3.3.3 Nieuwe voorwaarde voor de stabiliteit van metaaltransport

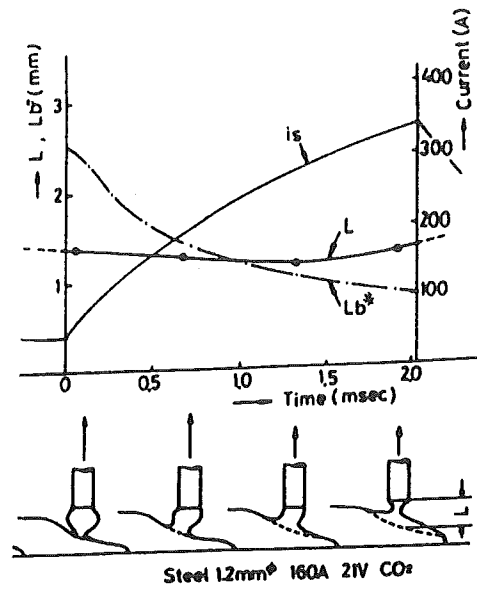
In sectie 3.3.1 werd de conclusie getrokken dat materiaaltransport optreedt bij zwaartekracht en oppervlaktetension onder een voorwaarde dat :

$$L_d > L > L_b \quad (14)$$

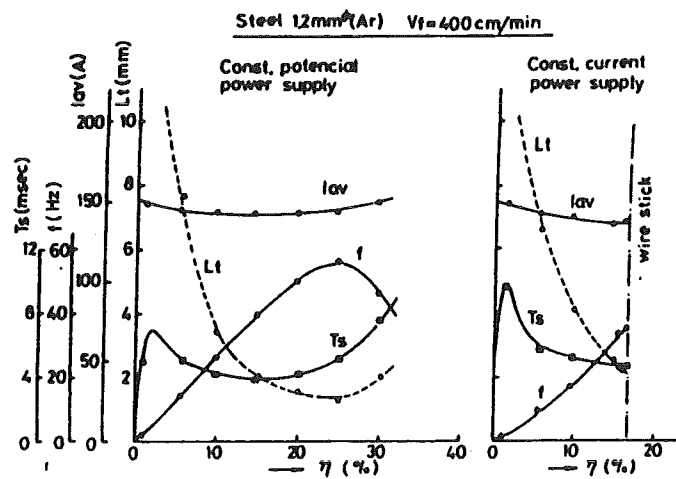
Als ook de Lorentzkracht een rol speelt, geldt :

$$L_d > L > L_b^* \quad (15)$$

In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op het stabiele gebied van materiaaltransport in het kortsluitbooglassen m.a.w. het instabiele gebied van de vloeistofbrug.



Figuur 18: Variatie van de gesmolten metaalbruglengte, kortsluitstroom I_s en Lb^* in de kortsluitfase.[3]



Figuur 19a en b: Karakteristieken van de kortsluitboog bij een constante spanningsbron (a) en een constante stroombron (b).[3]

Een typische overgang is te zien in fig. 18. Wanneer de hangende druppel het smeltbad raakt, dan zet het onderste gedeelte van de druppel uit en de bovenkant snoert in en breekt. Bij deze kortsluiting blijft L_b^* afnemen aangezien I_s toeneemt.

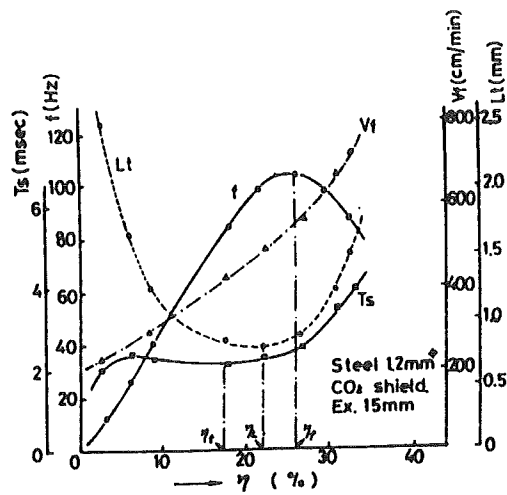
De bruglengte L blijft tijdens de kortsluiting constant en is tijdens het begin van de kortsluitperiode kleiner dan L_b . Door de invloed van de Lorentzkracht neemt de kritische vloeistofbruglengte af. Deze lengte bereikt het instabiliteitspunt als $L_b^* < L$.

Bij het gebruik van een stroombron met een horizontale karakteristiek, zal I_s toenemen tot een verzadigingswaarde van I_s met een corresponderende L_b^* . De draadtoevoersnelheid V_f speelt hierbij echter ook een rol. Als deze toeneemt neemt de boogtijd af. Hierdoor wordt het smelten van de elektrode beperkt. De druppelgrootte voordat kortsluiting optreedt is kleiner. Als de lengte van de vloeistofbrug net na de kortsluiting voldoet aan vgl. 15 is de oppervlaktespanning voldoende voor het breken van de brug. Als V_f nog meer toeneemt en $L_0 < L_{b0}^*$ (L_{b0}^* is L_b^* net na kortsluiting) dan blijft de brug bestaan zolang aan vgl. 15 wordt voldaan totdat L_b^* voldoende is gedaald. Is V_f echter te groot dan stoot de elektrode op de bodem van het werkstuk, het zgn. 'stubbing'.

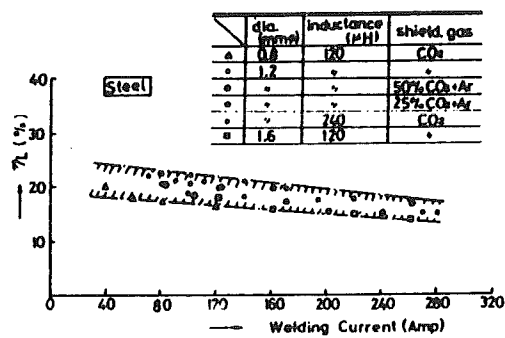
Dit is gemeten in de praktijk (fig. 19). Hierin is η op de horizontale as de verhouding tussen kortsluittijd en de cyclustijd, De waarde van η wordt gegeven door de vergelijking :

$$\eta = \frac{T_s}{T_a + T_s} \times 100 (\%) \quad (16)$$

Fig. 19a heeft betrekking op een constante spanningsbron en fig. 19b heeft betrekking op een constante stroombron. Uit de meetresultaten van beide figuren komt naar voren dat een gebied kan worden aangegeven waarin het kortluitbooglasproces optimaal verloopt. Dit gebied bestaat uit combinaties van lasparameters (T_s , f (kortsluitfrequentie), $L_t = V_f/f$ en η).

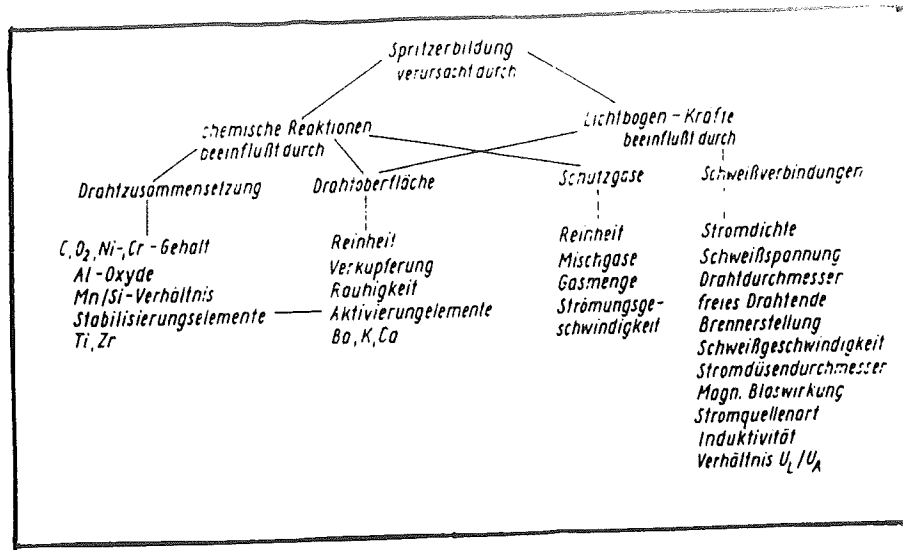


Figuur 20: Typische karakteristieken van een kortsluitboog met staal ($E_0=24V$, $R_c=20m\Omega$, $L_c=120\mu H$).[3]

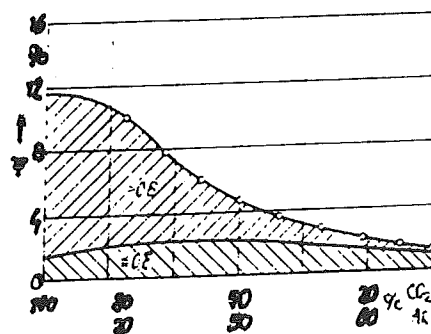


Figuur 21: Het meest stabiele gebied onder verschillende lascondities.[3]

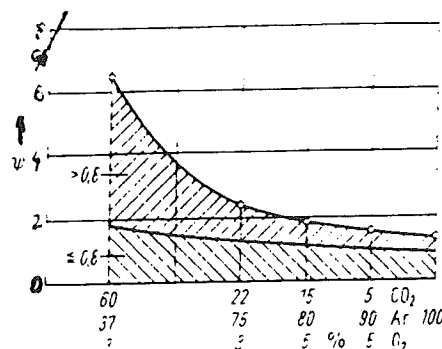
Dit is nog duidelijker te zien in figuur 20. Deze figuur geeft de relatie tussen η en de waarden van f , V_f , T_s en L_t . Deze figuur laat de veranderingen zien wanneer de toevoersnelheid V_f toeneemt voor een bepaalde boogspanning. Het kortsluitboogproces begint bij $\eta=0$ en terwijl deze toeneemt, neemt f ook toe en L_t af. Hierbij blijft T_s konstant. Als L_t een bepaalde grenswaarde bereikt begint T_s toe te nemen bij een waarde van $\eta=\eta_t$. Hier begint ook de Lorentzkracht te domineren. Als η verder toeneemt voorbij het punt $\eta=\eta_l$, begint L_t weer toe te nemen, wordt $\eta=\eta_f$ bereikt dan begint f af te nemen en T_s neemt radicaal toe. De grens wordt nu bereikt als het eerdergenoemde 'stubbing' optreedt. Deze grens begint bij $\eta=40-50\%$. Hoe kleiner L_t des te stabiel het proces en dus minder spatverlies. η_l is dus de optimale waarde voor het proces en zijn preciese waarde ligt rond de 20% afhankelijk van de lascondities (zie figuur 21).



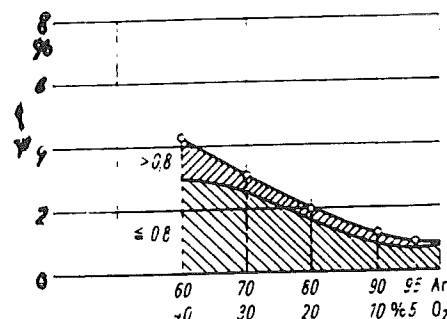
Figuur 22: De invloedsfactoren op het spatverlies bij het MIG/MAG-lassen.[4]



Figuur 23a: Spatverlies en spatgrootte voor een gasmengsel van Ar/CO₂. [4]



Figuur 23b: Spatverlies en spatgrootte voor een gasmengsel van Ar/CO₂/O₂. [4]



Figuur 23c: Spatverlies en spatgrootte voor een gasmengsel van Ar/O₂. [4]

4 Spatgedrag

In het voorgaande hoofdstuk werd gesteld dat het mogelijk is een gebied aan te geven waarin de lasparameters optimaal op elkaar zijn afgestemd. Het lasproces is dan regelmatig. Het is mogelijk een verband aan te geven tussen de regelmaat van het proces en het spatgedrag.

4.1 Spatgedrag bij het MIG/MAG lassen

P.Scheibner [4] definieert het spatverlies met het kental ψ :

$$\psi = \frac{\text{massa draadverlies}}{\text{massa gesmoltendraad}} * 100\% \quad (17)$$

Bij het spatverlies bij het MIG/MAG lassen spelen vele invloedsfactoren een rol die bovendien niet onafhankelijk van elkaar zijn (zie fig. 22). De factoren kunnen worden onderverdeeld in 4 categoriën:

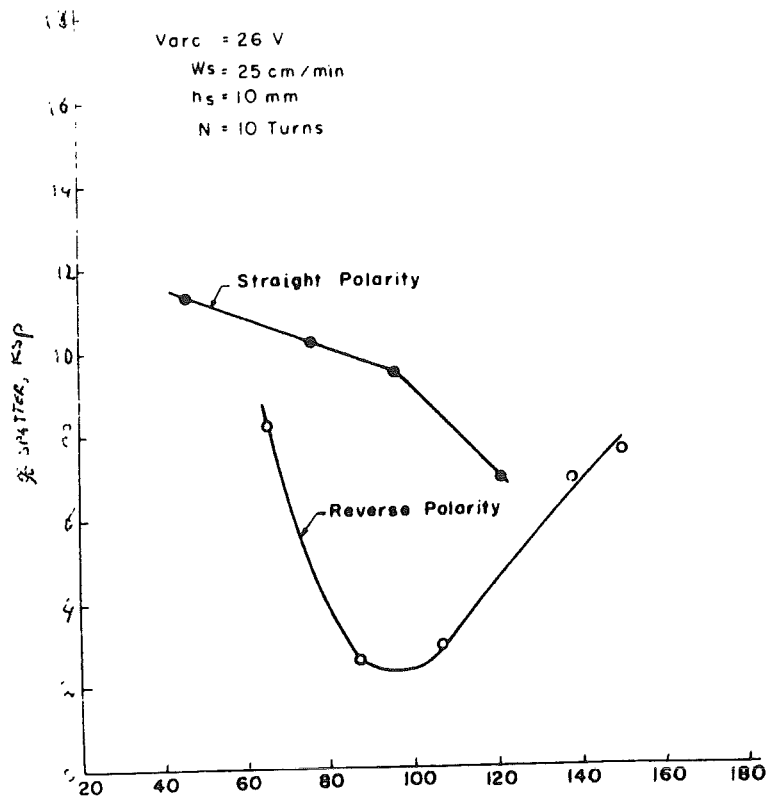
- 1) beschermgassamenstelling
- 2) draadoppervlak
- 3) draadsamenstelling
- 4) lasparameters

Het spatverlies is afhankelijk van het type materiaaltransport en varieert van 3-15% bij het kortsluitbooglassen, 2.5-9% bij globulair transport onder CO₂ tot 1-2.5% bij sproei transport onder menggas (open boog lassen)

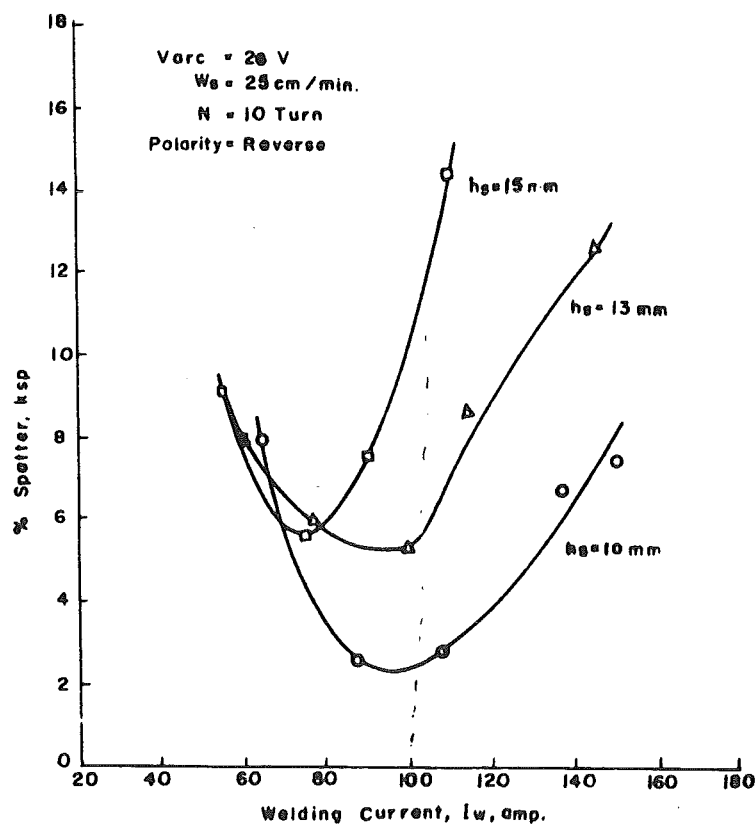
ad 1). Het effect van de gassamenstellingen op het spatverlies is te zien in fig.23. Hierin valt op dat voor Ar-CO₂ mengsel, het totale spatverlies afneemt met toenemend argongehalte. De hoeveelheid grote spatten neemt af tot aan 60% argon totdat er bij 80% geen verbetering meer is. Bij het gasmengsel Ar-CO₂-O₂ neemt het totale spatverlies af tot aan 75% argon. Bij Ar-O₂ is het totale gehalte spatten minder dan bij een vergelijkbaar CO₂ gehalte, ook is hier het percentage grote spatten zeer klein.



Figuur 24: De invloed van draadsamenstelling en draadoppervlak.[4]



Figuur 25: Relatie tussen spatverlies en stroom bij een positieve en negatieve electrode.[5]



Figuur 26: Effect van de uitsteeklengte op het spatverlies bij 38V.[5]

ad 2) en 3). De invloed van draadsamenstelling en draadoppervlak is te zien in fig. 24. Zuiverheid en oppervlakte-actieve-elementen verlagen het spatverlies terwijl porositeit en elementen als C, Cr, O₂ en Al het spatverlies verhogen.

ad 4). Gupta [5] zegt over de invloed van lasparameters dat het spatverlies bij een positieve elektrode afneemt tot een minimum en vervolgens weer toeneemt bij toename van de stroom. De stroomwaarde met een minimaal spatverlies neemt toe met toenemende boogspanning. Met een negatieve elektrode zijn de spatverliezen veel groter dan bij een positieve elektrode in het lage stroom/spanning gebied. Dit verschil is verwaarloosbaar bij hoge stromen (zie fig. 25)

Een grotere uitsteeklengte verhoogt ook het spatverlies. (zie fig. 26)

4.2 Spatgedrag bij kortsluitbooglassen met CO₂ gasbescherming

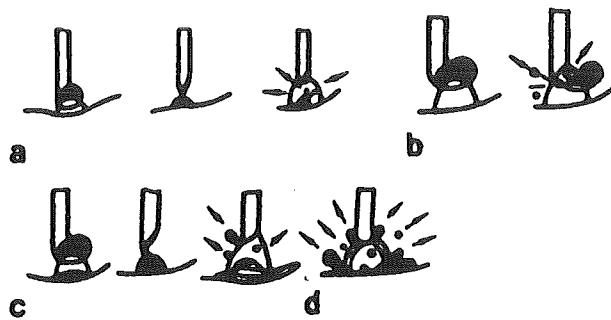
D.m.v. high-speed filmopnamen is het mogelijk spatten onder te verdelen in een aantal categoriën. Potapevskii [6] beschrijft acht soorten, twee soorten vallen echter buiten het bestek van deze scriptie aangezien hier het kortsluitbooglassen en een stabiel lasproces worden beschreven.

4.2.1 Soorten spatten

Er blijken zes verschillende soorten spatten te bestaan namelijk :

1: Uitstoten van spatten wanneer een vloeistofbrug breekt.

Dit komt zowel voor bij kortsluitingen (fig. 27a) als bij loshangende druppels waarvan de nek breekt (fig. 27b). De diameters van deze spatten liggen tussen de 0.05 en 1.55 mm. Het totale verlies wordt geschat op 1-3%. De oorzaak ligt in een elektrische explosie. Het effect kan nog versterkt worden door de ontwikkeling van koolmonoxyde, wanneer staal met een hoog koolstofgehalte wordt gelast.



Figuur 27: a)spatten van bruggen b)het breken van de nek
c)uitstoten van metaalresidu d)spatten uit het bad.[6]



Figuur 28: uitstoten van grote druppels.[6]



Figuur 29: a)fijne spatten vanaf electrodedruppels en b)het
uiteenvallen van druppels.[6]



Figuur 30: Fijne spatten vanuit het smeltbad.[6]

2:Uitstoten van het metaalresidu vanaf de elektrode.

Wanneer de explosie genoemd onder 1 een grote kracht heeft (fig. 27c en 27d).

3:Uitstoten van spatten uit het smeltbad.

Wanneer het breken van de brug met veel kracht gepaard gaat is het proces ontregeld en ontstaat er een kortsluiting tussen elektrode en het smeltbad. Hierdoor kunnen ook spatten uit het lasbad vrijkomen (fig. 27e).

4:Uitstoten van grote druppels door de kracht die de brug breekt.

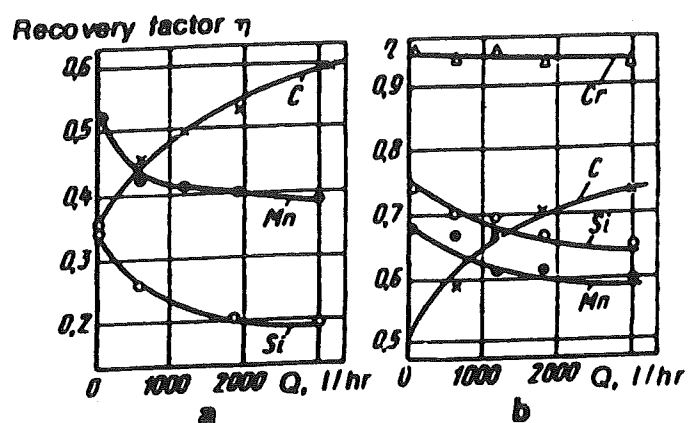
Dit gebeurt wanneer een stroombron wordt gebruikt met een zeer vlakke karakteristiek en dus een grote stroomcapaciteit heeft. Wanneer er een kortsluiting optreedt zal dus een zeer grote kortsluitstroom gaan lopen met het zelfde effect als genoemd onder 1 echter met grovere spatten (fig. 28). Deze grote stroom veroorzaakt ook de elektrische explosie van microbruggen, hierop wordt later nog teruggekomen..

5:Fijne spatten vanaf de elektrodedruppels en het uiteenvallen van druppels.

Als koolmonoxyde in de druppels wordt gevormd, kan dit aanleiding geven tot spatverlies (fig. 29).

6:Fijne spatten vanuit het smeltbad.

Deze spatten ontstaan vanuit de plaats waar de elektrodedruppels in het smeltbad zijn gevallen. Hier speelt ook de koolmonoxydeontwikkeling een rol en onregelmatigheden zoals bijv. roest versterken dit effect (fig. 30).



Figuur 31: De recovery factor als functie van het CO₂-debiet
 bij a) staal 20 en b) staal NP-30KhGSA draad.
 (Us.c-25V, v=1.65 cm/sec L=0.32).[7]

4.2.2 De hoofdoorzaken van het spatten

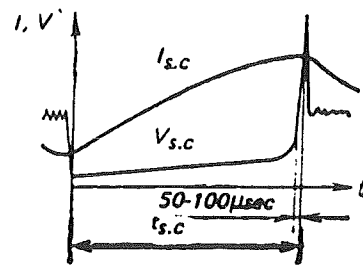
Uit het voorgaande kan worden afgeleid dat er drie hoofdoorzaken voor spatvorming bestaan. Deze zijn :

- 1 De koolmonoxydeontwikkeling (no.1,5,6 sectie 4.2.1)
- 2 De elektrische explosie van de gesmolten metaalbrug (no.1,2,3 sectie 4.2.1)
- 3 De elektrische explosie van microbruggen (no.4 sectie 4.2.1)

4.2.2.1 De koolmonoxydeontwikkeling

Popkov [7] vond dat bij het gebruik van CO_2 als beschermgas er een oxyderende atmosfeer wordt gecreëerd, doordat CO_2 in de boog wordt ontbonden in koolmonoxyde en zuurstof. Door deze zuurstofontwikkeling worden elementen als titanium, mangaan en silicium snel geoxydeerd, koolstof oxydeert echter langzamer. Als het CO_2 -debiet groter wordt dan blijkt de c-recovery factor η (=verhouding opgenomen koolstof t.o.v. geoxideerde koolstof) zelfs toe te nemen (zie fig. 30)

De oxydatie van koolstof in de druppels gaat vergezeld met de ontwikkeling van koolmonoxyde. Dit gas verzamelt zich in gasbellen op de grens van het vast-vloeistof gebied. Onder bepaalde condities ontploffen deze gasbellen. Er ontstaan spatten. De oplossing ter voorkoming van deze spatoorzaak is het verminderen van koolstofoxydatie. Dit kan via desoxydanten zoals titanium (dit heeft een grotere affiniteit tot zuurstof dan koolstof of mangaan). Titanium is echter vrij duur. In de laspraktijk wordt SG3-lasdraad gebruikt. Hier zit meer Mn en Si in t.o.v. SG1 en SG2 (DIN 8559). Popkov geeft ook een tweede oplossing via het verhogen van de kortsluitfrequentie d.m.v. een hogere boogspanning. Deze laatste oplossing zorgt ervoor dat de druppels minder tijd doorbrengen in de boog. Dit valt echter in het bestek van een optimale afstelling van de lasparameters. Ook het eerder genoemde hogere CO_2 -debiet is een oplossing.



Figuur 32: Oscillogrammen van stroom en spanning bij het lassen zonder stroomverminderingen.[9]

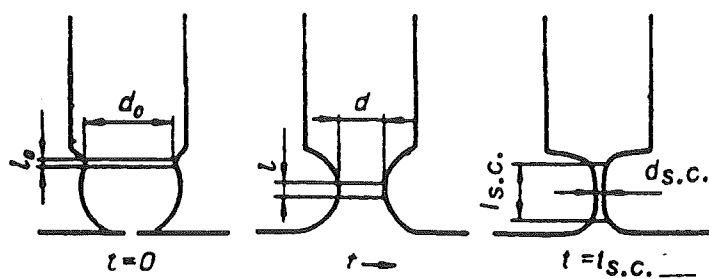
4.2.2.2 De elektrische explosie van de gesmolten metaalbrug

I.I. Zaruba vond dat de spatten niet afkomstig waren van krachten van elektromagnetische aard, maar van een elektrische explosie van een geleider nl. de gesmolten metaalbrug [8]. Naar mijn mening vergat hij dat de weerstandsverhitting juist optreedt door de insoering van de metaalbrug en hier speelt de Lorentzkracht juist zijn rol

Bij het kortsluitbooglassen, vergemakkelijken de elektromagnetische krachten t.g.v. de stroom, het breken van een vloeistofbrug en verzekeren de voortgang van het lasproces. Het is daarom niet mogelijk om de kortsluitstroom en de snelheid van toename al te zeer te begrenzen. Deze stroomdoorgang veroorzaakt echter een sterke toename van thermische energie. Hierdoor zullen spatten ontstaan aan het einde van de kortsluitperiode, wanneer de gesmolten metaalbrug is gebroken en de boog weer ontsteekt. Dit uit zich in de eerste schokgolf, de tweede schokgolf volgt wanneer na een pauze in de stroom de boog herontsteekt. Het is dus noodzakelijk om de kortsluitstroom te begrenzen. De bovengenoemde tegenstrijdigheid kan geëlimineerd worden door van de oppervlaktespanning gebruik te maken die ook in staat is de brug te breken wanneer deze de kritische lengte bereikt. Hierdoor is het mogelijk om de stroom te begrenzen en de explosiekracht te verminderen.

I.S. Pinchuk [9] ontdekte dat de spanningsval in de brug sterk toeneemt in de laatste periode van de kortsluitfase, 50 tot 100 μ s voordat de boog weer ontsteekt (zie fig. 32). Dit kan verklaard worden via het dunner worden van de brug waardoor de weerstand toeneemt en t.g.v. de weerstandsverhitting de temperatuur toeneemt. Deze oscillogrammen geven aan dat de afmetingen van de brug in deze periode gewoonlijk kleiner zijn dan de kritische afmetingen (de diameter van de nek is 0.1-0.2 mm) De spannings curve van de brug kan gebruikt worden om het moment te bepalen wanneer de brug zijn kritische afmetingen bereikt.

Om de condities te bepalen wanneer een stroomafname ook voor een spatafname zorgt, is onderzoek verricht naar het opwarmen en breken van de brug in de eindperiode van de kortsluitfase.



Figuur 33: De veranderingen van afmetingen van de vloeistofbrug tijdens de kortsluitfase.[8]

I.I. Zaruba [8] benadert de diameter van de brug aan de hand van 'high-speed film' opnamen met de volgende vergelijking :

$$d^2 = d_0^2 - kt^2 \quad (18)$$

Hierin is :

d =diameter brug op tijdstip t

d_0 =diameter brug op moment van kortsluiting

t =tijd

k =konstante

Op het moment van de explosie heeft de gesmolten metaalbrug een volume van :

$$V_{s.c.} = \frac{\pi (d_0^2 - kt_{s.c.}^2)}{4} l_{s.c.} \quad (19)$$

Hierin is :

$t_{s.c.}$ =kortsluittijd

l =lengte vloeistofbrug

De vloeistofbrug wordt schematisch weergegeven in fig. 33. Om te bepalen hoeveel warmteenergie in de brug wordt opgebouwd, wordt eerst de energie op een willekeurig tijdstip berekend, aangezien de lengte en diameter constant varieëren. De energie wordt dan vervolgens geïntegreerd over de kortsluittijd.

Onder aanname dat het volume constant blijft tijdens kortsluiten geldt:

$$\frac{\pi (d_0^2 - kt^2)}{4} l = \frac{\pi (d_0^2 - kt_{s.c.}^2)}{4} l_{s.c.} \quad (20)$$

Hierin is de waarde van d_0 bepaald m.b.v. de filmopnamen en als een eerste benadering kan voor $l_{s.c.}$ de diameter van de druppel genomen worden (zie fig. 33). De lengte op tijdstip t kan nu beschreven worden door :

$$l_{(t)} = \frac{d_0^2 - kt_{s.c.}^2}{d_0^2 - kt^2} l_{s.c.} \quad (21)$$

Het gebruiken van de vergelijkingen 18 en 21 levert voor de weerstand van de gesmolten metaalbrug op een willekeurig tijdstip t :

$$r_{(t)} = \frac{4}{\pi} \rho \frac{(d_0^2 - kt_{s.c.}^2)}{(d_0^2 - kt^2)^2} l_{s.c.} \quad (22)$$

Hierin is :

ρ = de soortelijke elektrische weerstand

De weerstandsverhitting in de brug tijdens kortsluiting is dan:

$$Q_b = \int_t i_{(t)}^2 r_{(t)} dt \quad (23)$$

Voor die gevallen waarin de kortsluitstroom beperkt wordt door de

weerstand en niet door de inductie kan aangenomen worden dat $i_{(t)} = I_{s.c.} = \text{constant}$.

Vergelijking 23 kan dan worden omgeschreven tot:

$$Q_b = \frac{4}{\pi} \rho I_{s.c.}^2 l_{s.c.} (d_0 - kt_{s.c.})^2 \int_0^{t_{s.c.}} \frac{dt}{(d_0^2 - kt^2)^2} \quad (24)$$

Deze Q_b is berekend voor een aantal praktijkgevallen en leverden waarden op van circa $2.9 \cdot 10^{-2}$ cal.

De warmte nodig om het metaal van de vloeibare metaalbrug te doen verdampen kan worden berekend met de volgende vergelijking :

$$Q_{pot.} = \frac{\pi d^2}{4} l_{s.c.} q_v \quad (\text{kcal.}) \quad (25)$$

Hierin is :

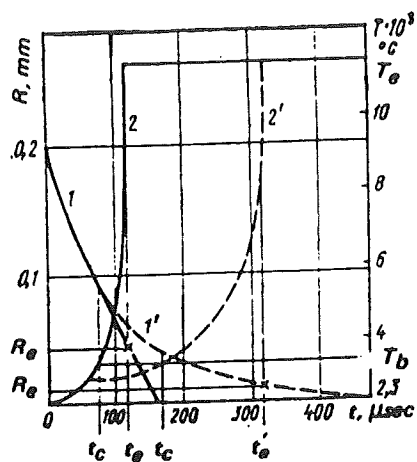
q_v = de soortelijke verdampingswarmte (kcal/cm^3)

Invullen van vergelijking 24 in 25 levert m.b.v. $q_v = 10.15 \text{ kcal/cm}^3$ een waarde van $d_{s.c.}$ op van 0.06 mm. Dus zodra de diameter van de brug een waarde bereikt van 0.06 mm is weerstandsverhitting in staat de brug te verdampen.

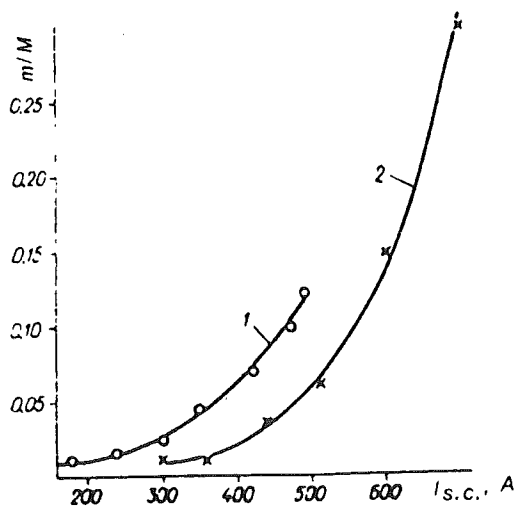
I.S. Pinchuk [9] geeft een soortgelijk verhaal maar is echter niet te controleren. Wel komt hij tot dezelfde kritische brugdiameter.

[citaat]

Bestuderen van de vergelijkingen laat zien dat zonder stroomvermindering het metaal wordt verwarmd tot aan de kooktemperatuur T_b in een tijd t_b



Figuur 34: a) constrictie (1,1') en het verwarmen van de brug (2,2')
 rechte lijnen: geen stroomvermindering
 onderbroken lijnen: wel stroomvermindering
 kruizen: moment van explosie.[9]



Figuur 35: Relatie tussen het spatverlies en kortsluitstroom
 1) $L=0.6 \text{ mH}$ 2) $L=0 \text{ mH}$. [10]

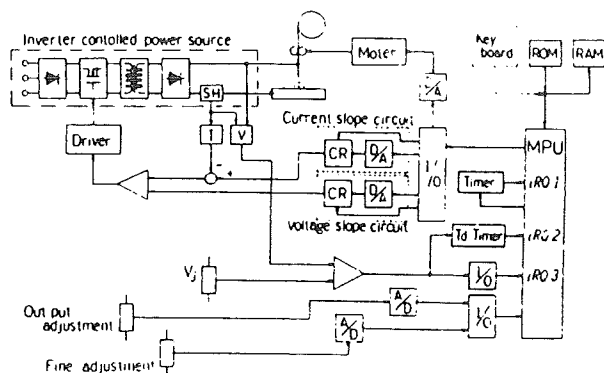
(zie fig. 34).

T.g.v. niet uniform verwarmen wordt het materiaal bovendien tot op een zekere hoogte oververhit. Dit heeft tot gevolg dat er een hoeveelheid onnodige thermische energie W_t wordt verzameld, welke vrijkomt gedurende het verdampen van het metaal en de explosie veroorzaakt.

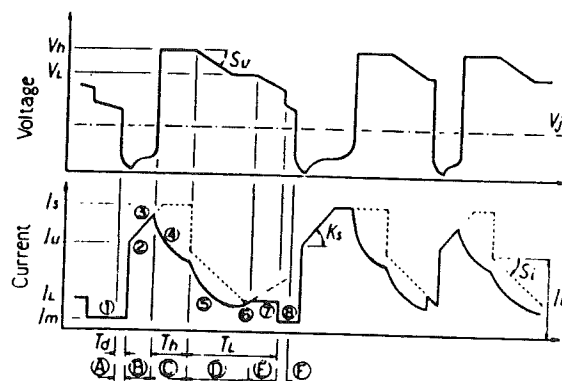
Om de explosie-energie te berekenen wordt aangenomen dat de explosie plaatsvindt op het moment dat de specifieke warmte-inhoud, gevormd na het bereiken van temperatuur T_b , gelijk is aan de specifieke warmte van het verdampen van het metaal Q_i , en dat de energie van de explosie gelijk is aan de hoeveelheid thermische energie $W_t = \pi R^2 l Q_i$, met R en l gelijk aan de straal en de lengte van de brug op het moment van de explosie. Door nu op dit kritieke moment stroomreductie te gebruiken zal de brug later exploderen en met een veel kleinere straal dus met een veel kleiner volume; dus ook met veel minder explosie-energie. In een in de praktijk uitgevoerd experiment werd door middel van stroomvermindering een 16-voudige vermindering van de explosieenergie verkregen. Stroomvermindering moet pas worden toegepast nadat de brug zijn kritische afmetingen heeft bereikt ($R=0.1-0.2\text{mm}$) en niet later dan het moment dat $R=0.05\text{mm}$.

[einde citaat]

Oude methoden om de kortsluitstroom te beperken zijn spoelen en rheostaten (regelbare weerstanden) [10]. Deze worden in het stroomcircuit opgenomen. Als de stroom begrensd wordt door een rheostaat, bereikt deze zijn maximale waarde op het eerste moment van kortsluiting, en blijft praktisch onveranderd tot het moment waarop de brug explodeert. Wanneer de stroom wordt beperkt door een spoel, bereikt deze zijn maximale waarde op het moment van de explosie. In beide gevallen explodeert de brug op het moment van maximale stroomdoorgang en dit is het negatieve aspect van deze methoden. Wanneer de stroom wordt begrensd door een rheostaat daalt deze abrupt op het moment dat de boog ontsteekt na de kortsluiting, terwijl bij een spoel de boog met een bijna maximale stroom ontsteekt. In de praktijk blijkt dat een spoel meer spatten veroorzaakt dan een rheostaat (zie fig. 35), echter abrupt de stroom laten dalen is niet gunstig voor de stabiliteit van de boog. Dit is ook gebleken in de praktijk waaruit volgde dat met een spoel in het circuit met een veel lagere kortsluitstroom kan worden



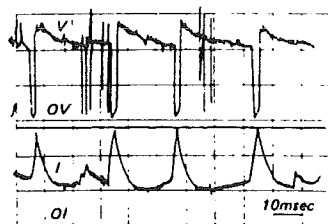
Figuur 36: Microcomputer om de stroom-spanningskarakteristieken aan te passen.[11]



Figuur 37: De zesdelige aanpassing van de stroom-spanningkarakteristiek.[11]

Wire feed (m/min)	Stuck place	Sticking spatter (g/min)	
		Conventional method	New method
3	Nozzle	0.14	0.03
7.5	Nozzle	0.60	0.12
	Base metal	2.05	0.04

Figuur 38: Vergelijking van spatverliezen.[11]



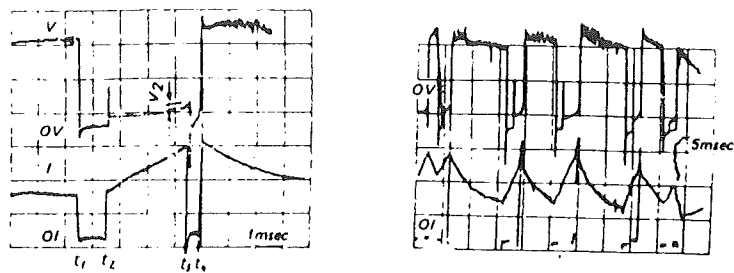
Figuur 39: Oscillogrammen van stroom en spanning (V=24V Iw=200A).[12]

gelast waarbij het proces nog stabiel bleef.

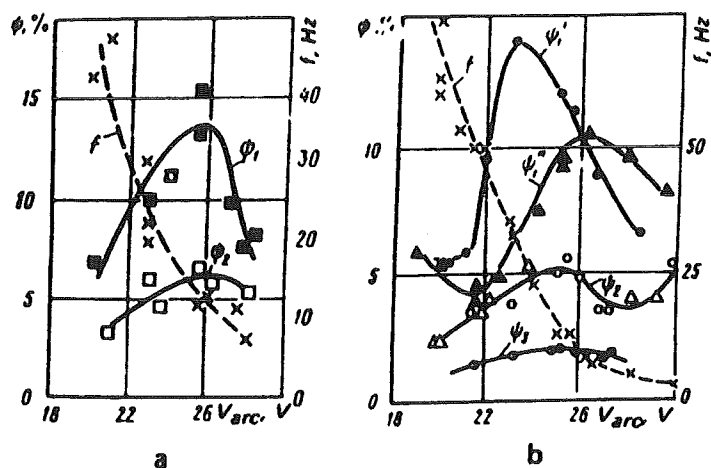
Toekomstige ontwikkelingen zijn te vinden in het microprocessor gestuurd aanpassen van de spannings- en stroomkarakteristiek. T. Mita [11] heeft dit onderzocht. Hij verdeelt de kortsluitboogcyclus in zes stukken waarbij de lasparameters I en U aan de omstandigheden worden aangepast. Zie figuur 36 en 37. Door deze zeer snelle en nauwkeurige aanpassings-mogelijkheden wordt een aanzienlijke vermindering van het spatverlies verkregen (zie fig. 38).

4.2.2.3 De elektrische explosie van microbruggen

I.S. Pinchuk [12] vond dat bij het kortsluitbooglassen, bij kortsluitingen die langer duren dan 1 msec relatief grote bruggen van vloeibaar metaal worden gevormd die het materiaaltransport verzorgen. Er zijn echter een groot aantal kortsluitingen korter dan 1 msec. Gedurende deze kortsluitingen worden bij het beginnend contact tussen druppel en smeltbad microbruggen gevormd. Deze microbruggen zijn zeer instabiel en breken snel t.g.v. elektromagnetische krachten en voorkomen daarmee dat de druppel contact maakt met het smeltbad. Analyse van oscillogrammen (zie fig. 39) laat zien dat het aantal van deze micro-kortsluitingen 2 tot 3 maal groter is dan het aantal normale kortsluitingen. Om tot een normale druppel-overgang te komen, met een vermindering van het spatten moet een sterke stroom vermindering worden gebruikt aan het begin van iedere kortsluiting. Dit zorgt ervoor dat de elektromagnetische kracht sterk wordt verminderd. Dit proces kan als volgt worden beschreven. Wanneer de boog is gedoofd en de druppel contact maakt met het smeltbad zal de boogspanning dalen tot het kortsluitspanning (zie fig. 40). Bij een ingestelde spanning V_{p1} wordt de stroom verminderd met behulp van een thyristor tot een limietwaarde van I_{aux1} gedurende een periode van τ_1 . Na deze periode keert de stroom weer terug tot zijn normale waarde. Voor optimale stabilisatie werden in de experimenten de volgende waarden gevonden $V_{p1} = 8-12V$, $I_{aux1} = 2-10A$, en voor $\tau_1 = 0.7-1$ msec. Ook werd ontdekt dat bij een hogere boogspanning een stroomvermindering efficiënter werkt. De stroomvermindering veroorzaakt ook dat de gemiddelde kortsluittijd 30-40% langer duurt.



Figuur 40: Oscillogrammen van stroom en spanning met stroomvermindering aan het begin van de kortsluitfase.[12]



Figuur 41: Het effect van stroomverminderingen op het spatverlies.[12]

a) dia.=1.6mm Iw=280A b) dia.=1.2mm Iw=180A
 dichte blokjes: zonder stroomvermindering
 open blokjes: met stroomvermindering
 circles=0.25mH
 vierkanten=0.35mH
 driehoeken=0.5mH
 f=frequentie van kortsluitingen langer dan 1 msec.

Echter wordt deze enkele stabilisatie van materiaaltransport los gebruikt van het hiervoor gaande genoemde stroomvermindering aan het eind van de kortsluitperiode, dan zal geen noemenswaardige spatvermindering optreden. Wordt dit echter wel gedaan dan zal het spatten met nog eens een factor 1.2 tot 1.5 verminderen.

Deze stroomverminderingen zijn van korte duur en treden op in de perioden dat de elektrode niet aan het smelten is en hebben dus zodoende geen effect op de smeltefficiëntie. Een vergelijking van de curves ψ_1 en ψ_2 (zie fig. 41a, 41b) laat zien dat in het gegeven spanningsgebied het spatten minimaal wordt gehalveerd. Uit fig. 41b volgt dat een spoel in het elektrische circuit in het geval van stroomverminderingen geen effect meer heeft op het spatten. Dit komt omdat de boven genoemde thyristor onafhankelijk werkt van de dynamische eigenschappen van de bron, die in hoofdzaak bepaald worden door de spoel.

5 Conclusies

Bij het kortsluitbooglassen onder CO_2 blijken er zes relevante soorten spatten voor te komen met als hoofoorzaken :

- 1) de koolmonoxydeontwikkeling;
- 2) de elektrische explosie van de gesmolten metaalbrug;
- 3) de elektrische explosie van microbruggen.

De oplossing voor de eerste oorzaak is het verminderen van de koolstof-oxydatie d.m.v. desoxydanten (bijvoorbeeld verhoogd gehalte van mangaan en silicium). Een andere oplossing is het verhogen van het CO_2 -debiet.

De oplossing voor de tweede oorzaak is het verminderen van de oververhitting van het lasmetaal, deze onnodige thermische energie heeft de explosie tot gevolg. Dit kan d.m.v. een stroomreductie nadat de vloeistofbrug zijn kritische afmetingen heeft bereikt ($R=0.1-0.2\text{mm}$) en niet later dan $R=0.05\text{mm}$.

Een oplossing voor de laatste oorzaak is ook een stroomreductie, nodig aan het begin van de kortsluiting gedurende een periode van 0.7-1 msec. Deze stroomreductie heeft echter alleen nut als de hiervoor genoemde stroomreductie ook wordt toegepast, aangezien het elektronisch-circuit het moment van stroomreductie dan nauwkeuriger kan bepalen.

De genoemde stroomreducties zijn van korte duur en hebben dus geen invloed op de smeltefficiëntie.

De drie genoemde oplossingen zijn echter alleen van nut bij een kortsluitboogproces werkend onder een optimale afstelling van de lasparameters

Literatuur

- 1 prof.dr.G den Ouden,
Lastechnologie.
Delftse UitgeversMaatschappij, 1987.
- 2 U.Dilthey,
"Characteristics of arc behaviour and metal transfer during CO₂-welding".
I.I.W. Doc. 212-273-73.
- 3 M. Kiyohara T. Okada H. Yamamoto,
"On the stability of metal transfer in shortcircuiting arc welding and the
new control systems".
I.I.W. Doc. 212-276-73.
- 4 P. Scheibner,
"Ergebnisse aus untersuchungen zur spritzerbildung beim MAG-
schweizen".
Schweiztechnik 30 (1980), 62-65.
- 5 L.K. Gupta, S.R. Gupta, P.C. Gupta,
"How welding parameters affect spatter during CO₂ welding".
Welding and Metal Fabrication (december 1980), 673-676.
- 6 A.G. Potapevskii,
"Types of metal spatter in CO₂-welding".
Avt. Svarka 5 (1974), 10-12.
- 7 A.M. Popkov,
"Causes of spatterloss in welding with the shortcircuiting CO₂-shielded
arc".
Svar. Proiz. 5 (1971), 14-16.
- 8 I.I. Zaruba,
"Electrical explosion as the cause of metal spatter".
Avt. Svarka 3 (1970), 14-18.

9 I.S. Pinchuk

"Reducing spatter in shortcircuiting welding by limiting the energy of explosion of bridges".

Svar. Proiz. 11 (1976), 52-54.

10 I.I. Zaruba,

"mechanism of metal spatter during arc welding".

Avt. Svarka 11 (1970), 12-16.

11 T.Mita,

"Reducing spatter in CO₂ gas-shielded arc welding
Waveform control".

Quarterly Journal Of The Japan Welding Society 6 (1988), 209-214.

12 I.S. Pinchuk,

"Stabilisation of transfer and methods of reducing the spattering
of metal in CO₂-welding with a short arc".

Svar. Proiz 6 (1980), 9-10.

