

TIG- en plasma- lassen

vm 81

VWM

TIG- en plasmalassen

vm 81



Vereniging FME-CWM
vereniging van ondernemers in de
technologisch-industriële sector

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
Telefoon: (079) 353 11 00
Telefax: (079) 353 13 65
E-mail: info@fme.nl
Internet: www.fme.nl

© Vereniging FME-CWM/januari 2010, 2^e druk

Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Hoewel grote zorg is besteed aan de waarborging van een correcte en, waar nodig, volledige uiteenzetting van relevante informatie, wijzen de bij de totstandkoming van de onderhavige publicatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publicatie van de hand.

Vereniging FME-CWM
afdeling Technologie & Innovatie
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon: 079 - 353 11 00
telefax: 079 - 353 13 65
e-mail: info@fme.nl
internet: www.fme.nl

TIG- en plasmalassen

toelichting

Voor u ligt de voorlichtingspublicatie "TIG- en plasmalassen". Deze voorlichtingspublicatie is bedoeld voor allen die te maken hebben of te maken krijgen met toepassing van de betreffende verbindingstechnieken. Daarbij moet worden gedacht aan bijvoorbeeld constructeurs, lastechnici, werkvoorbereiders, enzovoorts.

Deze voorlichtingspublicatie is een update van de voorlichtingspublicaties VM 81 uit 1990.

De updating was noodzakelijk daar zich in de afgelopen jaren een groot aantal belangrijke ontwikkelingen heeft voorgedaan op het gebied van deze technieken.

Het NIMR (Netherlands Institute of Metals Research) inmiddels opererend onder de naam M2i (Materials innovation institute) heeft geld ter beschikking gesteld om deze nieuwe publicatie te laten opstellen en aan te passen aan de stand der techniek. De FME heeft de coördinatie daarvan op zich genomen en voor de aanpassing van de inhoud van deze voorlichtingspublicatie het NIL ingeschakeld.

Op de websites www.dunneplaat-online.nl en www.verbinden-online.nl die in het kader van andere projecten zijn ontwikkeld, is op het gebied van dunne plaat bewerking en verbindingstechnieken een groot aantal publicaties vrij te downloaden (waaronder ook deze publicatie).

samengesteld door

De oorspronkelijke publicatie is samengesteld door W.G. Essers in samenwerking met een begeleidingsgroep uit de industrie.

Deze revisie is tot stand gekomen met medewerking van H.J.M. Bodt (NIL).

Als co-lezers hebben Mw. G. van Krieken (NIL), Th. Luijendijk (TU-Delft) en A. Gales (TNO/STODT) een wezenlijke bijdrage geleverd.

Eindredactie: P. Boers (FME).

technische informatie

Nederlands Instituut voor Lastechniek

- | | |
|-------------------------|--|
| - bezoekadres | Boerhaavelaan 40, Zoetermeer |
| - correspondentie-adres | Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER |
| - telefoon | 088 - 400 85 60 |
| - telefax | 079 - 353 11 78 |
| - e-mail | info@nil.nl |
| - website | www.nil.nl |

informatie over en bestelling van VM-publicaties, Praktijkaanbevelingen en Tech-Info bladen

Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

- | | |
|-------------------------|--|
| - bezoekadres | Boerhaavelaan 40, Zoetermeer |
| - correspondentie-adres | Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER |
| - telefoon | 079 - 353 11 00 |
| - telefax | 079 - 353 13 65 |
| - e-mail | info@fme.nl |
| - website | www.fme.nl |

Inhoud

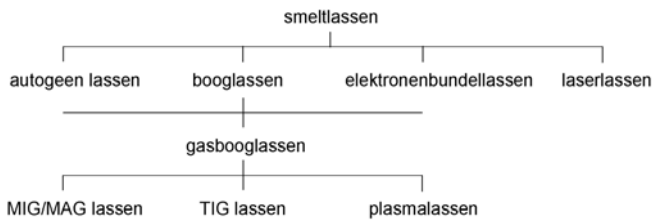
1	Inleiding	5	9	Plasmalassen	39
			9.1	Algemeen	39
2	TIG-lassen	6	9.2	Procesbeschrijving	39
	2.1 Algemeen	6		9.2.1 Enige procesvarianten	40
	2.2 Proceskeuze	6	9.3	Enige voor- en nadelen van plasmalassen in vergelijking met TIG-lassen	41
	2.3 Procesbeschrijving	6			
3	De apparatuur voor TIG-lassen	8	10	De apparatuur voor plasmalassen	42
	3.1 De lastoorts	8	10.1	De stroombron	42
	3.1.1 De gasbescherming	8	10.2	De plasmatoorts	42
	3.1.2 De koeling	8	10.3	Processturing voor plasmalassen	43
	3.1.3 De constructie	9			
	3.1.4 De optimale TIG-toorts	9	11	Gassen voor plasmalassen	44
	3.2 De stroombron	9	11.1	Plasmagas	44
	3.2.1 Algemeen	9	11.2	Beschermgas	44
	3.2.2 Verschillende typen moderne stroombronnen	10	11.3	Focusseergas	44
4	De lasboog en de elektrode	12	12	Enkele veel gebruikte procesvormen van plasmalassen	45
	4.1 De lasboog	12	12.1	Microplasmalassen	45
	4.2 De boogkolom	12	12.2	Plasmalassen met de "melt-in" techniek	45
	4.3 De kathode	13	12.3	Plasmalassen met de "keyhole" techniek	46
	4.4 De anode	13			
	4.5 De elektrode	13	13	Toepassingen van plasmalassen	47
	4.6 Het starten van de boog	16	13.1	Enkele naadvormen voor plasmalassen	47
	4.7 De stroomsoort	17	13.2	Enige toepassingen van microplasmalassen	47
5	Beschermgassen	20	13.3	Enkele toepassingen van keyhole plasmalassen	47
	5.1 Soorten beschermgas	20	13.4	Oorzaken van fouten bij plasma keyhole lassen	49
	5.2 Meten en sturen van de gashoeveelheid	22	13.5	Plasmalassen met een gepulseerde lasstroom	50
	5.3 Gasbacking of formeren	23			
	5.4 Een aantal methoden voor het aanbrengen van backinggas	23	14	Vergelijking van enkele smeltlasprocessen met hoge energiedichtheden	51
6	Procesvarianten van TIG-lassen	25	14.1	TIG- en plasmalassen	51
	6.1 TIG Hot Wire	25	14.2	Laserlassen	51
	6.2 Dubbelgas TIG-lassen	25	14.3	Elektronenbundellassen	51
	6.3 Meerelektroden TIG-lassen	26			
	6.4 TIG Narrow Gap lassen	26	15	Veiligheid	53
	6.5 TIG-puntlassen	26	15.1	Gevaren ten gevolge van elektrische spanning	53
	6.6 Single Puls TIG-lassen	27	15.2	Straling van de boog	53
	6.7 "A-TIG-lassen"	27	15.3	Gas, damp en rook	53
7	Toepassingen van TIG-lassen	28	Gebruikte literatuur	55	
	7.1 Handlassen	28	Trefwoorden	56	
	7.2 Gemechaniseerd TIG-lassen	28			
	7.3 Lasnaadvoorbereiding	29			
	7.4 Lasonvolkomenheden	29			
	7.5 Hechten	30			
8	TIG-lassen van de verscheidene metalen	31			
	8.1 Lastoevoegmaterialen, algemeen	31			
	8.2 Staal	31			
	8.2.1 Ongelegeerd staal	31			
	8.2.2 Laaggelegeerd staal	31			
	8.2.3 Hooggelegeerd staal	32			
	8.3 Nikkel en nikkellegeringen	34			
	8.4 Koper en koperlegeringen	34			
	8.5 Aluminium en aluminiumlegeringen	35			
	8.6 TIG-lassen van een aantal bijzondere metalen	38			

Hoofdstuk 1

Inleiding

In het diagram van figuur 1.1 is een aantal smeltlasprocessen weergegeven. TIG- en plasmalassen vinden hun plaats in de groep van de gasbooglasprocessen.

De verschillen tussen de twee processen die in deze publicatie worden besproken, komen duidelijk tot uiting in tabel 1.1, waarin indicatief de toepassingen en de mogelijkheden van beide processen worden weergegeven.



figuur 1.1 Overzicht van een aantal smeltlasprocessen en de positionering van het TIG- en plasmalassen daarin

tabel 1.1 Overzicht van de gebruiksmogelijkheden van TIG- en plasmalassen

criteria	plasmalassen	TIG-lassen	
materialen	on- en laaggelegeerd staal	x	x
	hooggelegeerd staal	x	x
	aluminium en -legeringen	(x)	x
	koper en -legeringen	x	x
	nikkel en -legeringen	x	x
materiaaldiktebereik	0,05 - 10	0,1 - 8	
lasposities (beperkt)	PA (onder de hand)	x	x
	PB (las onder 45°, bijv. hoeklas)	x	x
	PC (uit de zij)	x	x
	PD (las onder 45°; bijv. hoeklas boven het hoofd)		x
	PE (boven het hoofd)		x
	PF (verticaal opgaand)		x
	PG (verticaal neergaand)		x
lasnaadvorm	Stomp	x	x
	Niet stomp	x	x
productvorm	Plaat, staf	x	x
	Pijp, profiel	x	x
Kostprijs per meter laslengte ¹⁾	-	--	
Kwaliteit van de verbinding ²⁾	++	++	
Mechanisatie ³⁾	++	++	
ARBO en Milieu ⁴⁾	Lichtstraling (incl. UV en IR)	--	--
	Gas	--	--
	Lasrook/Stof	+	+
	Geluid	+	+
	Slak	++	++
1) ++ zeer laag; + laag; +/- gemiddeld; - hoog; -- zeer hoog			
2) ++ zeer goed; + goed; +/- redelijk; - slecht			
3) ++ zeer goed; + goed; +/- beperkt; - niet			
4) -- zeer veel, - veel; + weinig; ++ geen			

Hoofdstuk 2

TIG-lassen

Definitie van TIG-lassen:

TIG-lassen is een gasbooglasproces waarbij een boog wordt onderhouden tussen een niet afsmeltende wolframelektrode en het werkstuk. Het smeltbad, de boog en de elektrode worden beschermd door een inert gas. Door de warmte van de boog worden de delen van een werkstuk tot smelten gebracht. Afhankelijk van de toepassing wordt er al of niet een toevoegmateriaal gebruikt. Het proces kan met de hand of gemechaniseerd worden uitgevoerd.

2.1 Algemeen

TIG-lassen is in 1936 uitgevonden in de Verenigde Staten. Het proces kreeg toen de naam Heli-arc lassen (Airco) en Argon-arc (Union Carbide). Het werd voor het eerst in de tweede wereldoorlog in de Verenigde Staten op industriële schaal toegepast. Onder de naam argon-arc was het proces ook aanvankelijk in Nederland bekend. Het werd hier reeds in het begin van de jaren vijftig toegepast. Het proces heeft daarna nog een aantal andere namen gekregen:

- ▶ In de Engelstalige landen en ook in Nederland: TIG-lassen. Hetgeen een afkorting is van Tungsten Inert Gas.
- ▶ Een uitzondering hierop is de Verenigde Staten. Zij spreken van GTAW. Dat staat voor Gas Tungsten Arc Welding.
- ▶ In Duitsland: WIG-Schweissen. Dat is een afkorting van Wolfram Inert Gas.

In deze voorlichtingspublicatie zullen wij blijven spreken van TIG-lassen.

Aanvankelijk werd gedacht dat het TIG-lasproces vooral voor speciale materialen en bijzondere toepassingen zou worden gebruikt. Het proces wordt echter meer en meer toegepast voor het lassen van laaggeleerde en hooggeleerde staalsoorten en vooral ook voor non-ferro metalen.

Het TIG-proces leent zich uitstekend voor handmatig lassen. Het zicht op het smeltbad en de te lassen naad is in de regel goed. Het proces is goed beheersbaar. Waar nodig, kan toevoegmateriaal worden gebruikt.

Ook voor mechanisering en automatisering is het proces zeer geschikt. Dat blijkt onder andere uit het lassen bij de bouw van kernreactoren. Een reactor bevat ca. 30.000 pijplasma-verbindingen, die met behulp van gemechaniseerd TIG-lassen worden uitgevoerd.

Een aantal kenmerken van het TIG-lasproces zijn:

1. Met het TIG-lassen kan een uitstekende kwaliteit van de lasverbinding worden gerealiseerd
2. Het proces is uitstekend geschikt voor het lassen van dunne plaat.
3. Er kan in alle posities mee worden gelast.
4. Er is geen slak.
5. Er kan zowel met als zonder toevoegmateriaal worden gelast.
6. Bijna alle metalen kunnen met het TIG-proces worden gelast.
7. De boog is stabiel.
8. Er zijn geen spatten.

Beperkingen zijn:

1. Het proces is in het algemeen betrekkelijk traag. Toch zal dit verderop met voorbeelden worden gerelativeerd.
2. De lage lassnelheid heeft in de regel een grote warmte-inbreng tot gevolg. Hierdoor is de warmte beïnvloed

zone groot en kan er veel vervorming van het werkstuk optreden.

3. De elektrode is aan slijtage onderhevig. Vooral voor gemechaniseerd lassen kan dit bezwaarlijk zijn.
4. Het proces is gevoelig voor tocht.

2.2 Proceskeuze

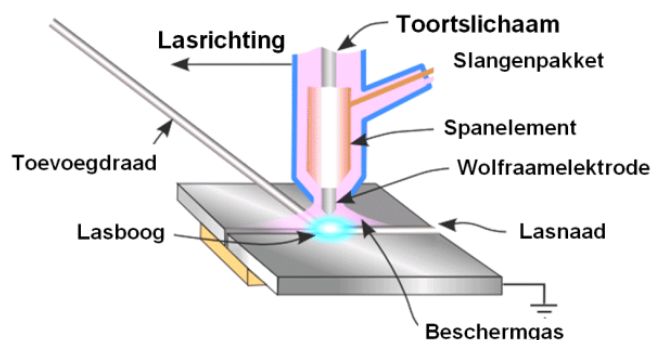
De keuze van een bepaald lasproces in een gegeven praktijksituatie, kan soms een lastige zijn. Enorm veel factoren hebben invloed op die keuze. Een greep uit enkele van deze factoren:

- ▶ soorten van verbindingen;
- ▶ materialen;
- ▶ losneembaarheid;
- ▶ gebruikstemperatuur;
- ▶ investeringsmogelijkheden;
- ▶ toleranties;
- ▶ te behalen kwaliteitsniveau;
- ▶ enz.

Al deze factoren bepalen de invalshoek om te komen tot een weloverwogen keuze van de verbindingstechniek. Op de website "www.dunneplaat-online.nl" wordt u geconfronteerd met deze factoren, teneinde u te helpen bij het keuzeproces. En passant wordt de gebruiker ook bekend gemaakt met andere technieken dan lassen, zoals lijmen, solderen en mechanisch verbinden. Een bezoekje meer dan waard!

2.3 Procesbeschrijving

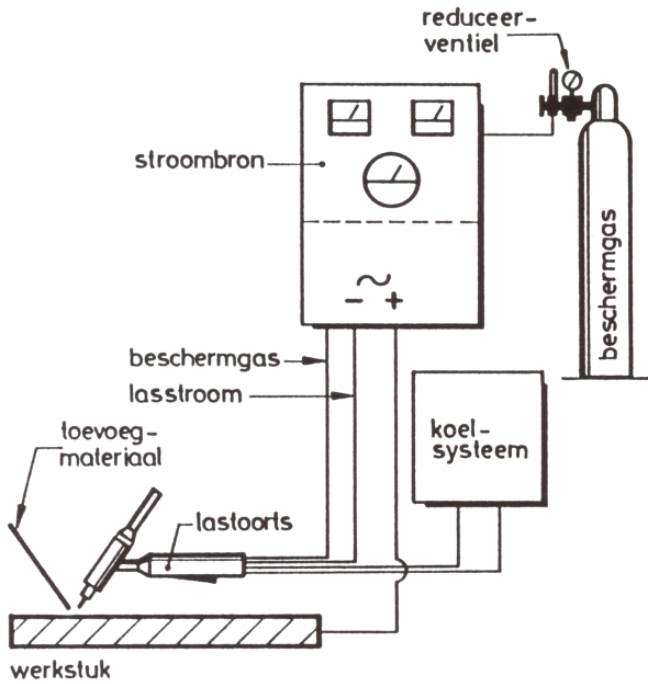
In figuur 2.1 is een schematische weergave van het TIG-proces gegeven. In een lastoorts is de wolframelektrode verbonden met een pool van een stroombron. De andere pool is verbonden met het werkstuk. Er staat een boog tussen de wolframelektrode en het werkstuk. Het geheel vindt plaats in een beschermende gasatmosfeer. Doorgaans is dat argon.



figuur 2.1 Principe van het TIG-lassen

Figuur 2.2 toont een opstelling voor TIG-lassen. Achtereenvolgens is de volgende apparatuur afgebeeld:

- ▶ de gascilinder, die het beschermgas bevat;
- ▶ De stroombron. Vaak een combinatie van wissel- en gelijkstroom. Meestal bevat de stroombron ook een stuur-eenheid voor het proces en een ontstekinrichting voor de boog;
- ▶ een "slangenpakket" vanaf de stroombron naar de lastoorts. Zo'n slangenpakket bevat de stroomtoevoerkabel, de gastoevoer en eventueel de water toe- en afvoer (wanneer de toorts voor hoge stroomsterkten bedoeld is en watergekoeld wordt via een koelsysteem). Verder ook vaak een stuurkabel. Hiermee kan de lasser vanaf de toorts het proces starten en stoppen.
- ▶ het werkstuk. Dit is via een stroomkabel verbonden met de andere pool van de stroombron.



figuur 2.2 Schematische voorstelling van de apparatuur voor TIG-lassen

Voor de aanvang van het proces wordt eerst het argon door de toorts gevoerd. Vervolgens wordt de "open spanning" van de stroombron tussen werkstuk en elektrode aangebracht. Deze is in de orde van 70 V. Met één van de nog nader te bespreken startmethoden wordt de boog ontstoken. Deze boog heeft een temperatuur van meer dan 10.000 °C. De warmte van de boog wordt gebruikt om de te lassen materialen tot smelten te brengen. Wanneer met de hand wordt gelast, kan - indien nodig - met de andere hand toevoegmateriaal worden aangevoerd, in feite, zoals dat ook bij autogeen lassen gebeurt. Bij gemechaniseerd lassen wordt het eventueel benodigde toevoegmetaal continu aangevoerd vanaf een spoel.

Wanneer met gelijkstroom wordt gelast, is de elektrode in de regel aangesloten aan de negatieve pool. Hier is de warmteontwikkeling het minste.

Vanwege het hoge smeltpunt van wolfram wordt dit metaal als elektrodemateriaal gebruikt.

Hoofdstuk 3

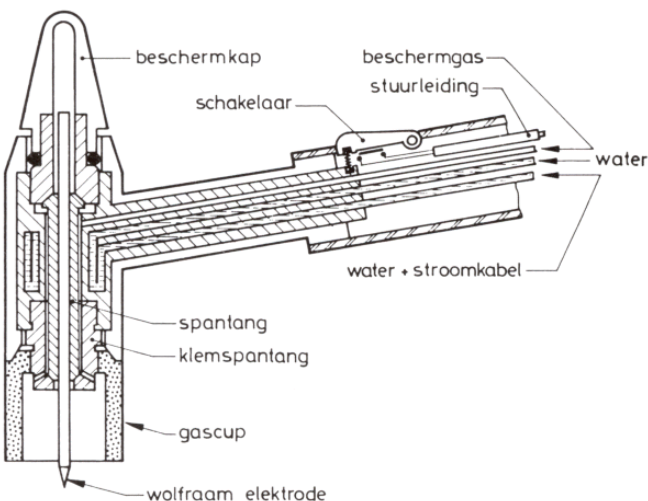
De apparatuur voor TIG-lassen

3.1 De lastoorts

De lastoorts heeft een aantal functies. De wolfraamelektrode zit hierin in een spantang (ook wel klemnippel genoemd) gevat. Voor iedere elektrodediameter is er een aparte spantang. De elektroden zijn in de regel 175 mm lang. Door deze lengte kunnen ze na slijtage herhaalde malen worden nageslepen. De spantang maakt elektrisch contact met de stroomtoevoerkabel. Het naar boven uitstekende deel van de elektrode wordt afgeschermd met een niet elektrisch geleidende beschermkap. Wanneer in nauwe ruimtes moet worden gelast, worden ook wel kortere elektroden gebruikt. Naar gelang van de lengte van de wolfraamelektrode is ook de lengte van de beschermkap korter of langer.

3.1.1 De gasbescherming

In figuur 3.1 is de doorsnede van een watergekoelde lastoorts weergegeven. De elektrode wordt omgeven door een mondstuk. Wanneer er met zeer hoge stromen wordt gelast, is dit mondstuk van metaal.



figuur 3.1 Schematische doorsnede van een toorts voor TIG-lassen

Het metalen mondstuk is geïsoleerd van de stroomvoerende delen. In de regel echter is het mondstuk van een keramisch materiaal gemaakt. De isolatie is dan niet alleen tegen stroomvoerende delen in de toorts gewaarborgd, maar ook ten opzichte van het werkstuk.

De punt van de elektrode steekt ongeveer 2 - 4 mm onder het mondstuk uit.

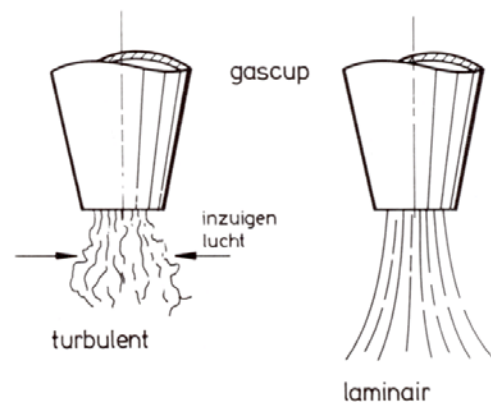
Een stelregel is: de uitsteek = de elektrodediameter.

De maximale uitsteek is gelijk aan de halve diameter van het gasmondstuk.

Bij toortsen voor TIG-lassen is het wenselijk dat het gas min of meer laminair uit de toorts stroomt. Turbulentie van het gas zorgt, door inzuigen van de omringende lucht, voor een slechte gasbescherming.

Voorbeelden van turbulente en laminaire gasstromen zijn afgebeeld in figuur 3.2. Eén van de maatregelen om een laminaire stroming te garanderen, is het mondstuk te voorzien van een gaslens. Dit is een ring van poreus, gesinterd materiaal. Ook kan hij bestaan uit fijnmazig zeef-

of filtermateriaal. Wel moet er dan voor gezorgd worden dat er tussen de wolfraamelektrode, de gaslens en het mondstuk geen spleten aanwezig zijn. Dit betekent in de praktijk dat er voor iedere elektrodediameter een aparte gaslens is. Anders is het middel erger dan de kwaal en treden er grote verschillen in gassnelheid op. Met een goede gaslens kan de afstand van de toorts tot het werkstuk aanzienlijk worden vergroot. De laminaire stroming van het gas geeft tot op 15 á 20 mm afstand van een vlakke plaat nog een goede bescherming. Een belangrijk voordeel van de gaslens is, dat de elektrode tot 15 mm onder de toorts kan uitsteken, waardoor de lasser een beter zicht op de las krijgt. Andere voordelen van een gaslens zijn: het proces wordt er iets minder tochtgevoelig door en het gasverbruik kan zo'n 10 tot 25% worden verminderd. Toch worden dergelijke gaslensen slechts in beperkte mate toegepast. Doordat de gascup bij het toepassen van gaslensen groter is dan de standaard gascup, kan dit bij lassen in nauwe ruimtes bezwaarlijk zijn.



figuur 3.2 Turbulente gasstroming met inzuigen van omringende lucht en laminaire stroming

Het mondstuk is uitwisselbaar en kan in een handomdraai van de toorts worden geschroefd. Mondstukken zijn verkrijgbaar in allerlei maten en afmetingen. Vooral de afmetingen ervan zijn belangrijk. De inwendige diameter ervan moet zodanig groot zijn, dat het smeltbad en de omringende hete metaaldelen voldoende beschermd worden tegen de inwerking van de lucht. Maar ook weer niet te groot, zodat het zicht op de las behouden blijft. Als stelregel kan men ervan uitgaan dat de inwendige diameter van het mondstuk 4 maal de diameter van de elektrode is.

Wanneer zeer reactieve materialen worden gelast, zoals zirkoon, titaan of molybdeen, dan bieden de normale mondstukken niet meer voldoende bescherming. Wanneer deze materialen bij een temperatuur boven 300 °C worden blootgesteld aan de omringende lucht, oxideren ze en kan er verbrossing optreden. Hierbij kan een gasslof uitkomst bieden: een langwerpige mondstuk van wel 60 - 80 mm lengte. Ook wel wordt er in deze gevallen gelast in geheel met gas afgeschermd omgevingen, zoals een "couveuse". Hierop wordt in een van de volgende hoofdstukken nog nader in gegaan.

3.1.2 De koeling

Wanneer er stromen boven ca. 150 A worden gebruikt, zijn de toortsen voor TIG-lassen in de regel watergekoeld. Deze stroomsterkte is geen scherpe grens. Bij watergekoelde systemen is vaak een waterbeveiliging ingebouwd ter bescherming van de toorts tegen overbelasting. Is dit een detectie voor de waterdruk, dan kunnen er nog beschadigingen van de toorts optreden, omdat voldoende stroming van het water dan niet gegarandeerd is. Vernau-

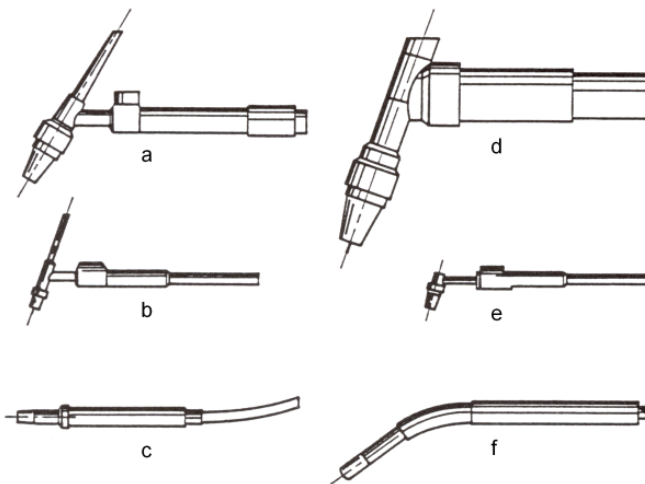
wingen in de toorts kunnen dan voor te weinig koeling zorgen. Beter is een detectie van de hoeveelheid water dat door de toorts gaat, dus een stromingsmeter achter de toorts. Bij onvoldoende waterstroming wordt de elektrische stroom meteen uitgeschakeld.

Het slangenpakket bevat naast de gastoevoerslang een toe- en afvoerslang van het koelwater. De toevoerleiding van het water bevat tevens de stroomkabel voor de elektrode. Deze kabel kan hierdoor van geringe diameter zijn. Hij wordt immers direct gekoeld.

Bij een gasgekoelde toorts moet de stroomkabel aanmerkelijk dikker worden genomen, ook al is de maximale stroomsterkte, waarbij deze toorts gebruikt mag worden, lager.

3.1.3 De constructie

Er bestaat een betrekkelijk groot aantal variaties van toortsconstructies. In figuur 3.3 zijn enkele veel voorkomende vormen schetsmatig weergegeven.



figuur 3.3 Een aantal voorkomende typen van TIG-toortsen

Figuur 3.3a toont een veel voorkomend model voor handlassen. De toorts is watergekoeld. Indien nodig, kan bij dit type de beschermkap snel worden losgedraaid om de elektrode te verwisselen. In figuur 3.3b is dezelfde uitvoering getoond, maar dan een gasgekoeld model voor lagere stromen. Figuren 3.3c en 3.3d zijn voorbeelden van machinetoortsen. Bezwaarlijk bij de uitvoering van figuur 3.3c is, dat de wolframelektrode wat moeilijker te verwisselen is. Dit gaat beter met de zwaardere (watergekoelde) uitvoering van de toorts in 3.3d afgebeeld. Een compacte uitvoering voor lassen in nauwe ruimtes is afgebeeld in figuur 3.3e. Hetzelfde geldt voor de toorts van figuur 3.3f. Hiervan is het voorste deel buigbaar in alle richtingen.

Met een schakelaar op de handgreep kan de lasser een aantal functies van het lasapparaat bedienen. Afhankelijk van de apparatuur kunnen dat zijn :

- ▶ het openen en sluiten van het gasventiel;
- ▶ het inschakelen van het ontstekingsmechanisme voor de boog;
- ▶ het inschakelen van de lasstroom;
- ▶ het inschakelen van een kratervulling (de zogenaamde "down-slope").

Per fabrikant kunnen de functies van de schakelaar verschillen, maar bij moderne apparatuur zou een volgorde kunnen zijn:

- ▶ bij het indrukken en vasthouden van de knop wordt eerst gedurende een aantal van te voren ingestelde seconden gas gegeven (gas-voorstroom of pre-flow). Vervolgens schakelt de stroom in en de boog wordt ontstoken;

- ▶ na het loslaten van de knop gaat het lasprogramma in;
- ▶ wanneer de knop weer wordt ingedrukt (en gehouden) komt de down-slope in;
- ▶ na het loslaten van de knop wordt de stroom uitgeschakeld. Het gas valt na enige tijd af (gas-nastroom of post-flow).

Bij volledig geautomatiseerd of gemechaniseerd lassen worden al deze functies overgenomen door een computer of een stuureenheid.

3.1.4 De optimale TIG-toorts

Zoals bij alle technische hulpmiddelen, bestaat ook bij TIG-lassen het ideale gereedschap niet, in dit geval de lastoorts. Als die in een bepaald geval wel nodig zou zijn, dan zou hij voor die toepassing moeten worden geconstrueerd.

Toch is er een aantal richtlijnen op te stellen, waaraan een goede lastoorts moet voldoen. Hierbij moet uiteraard wel onderscheid worden gemaakt tussen gemechaniseerd TIG-lassen en handlassen.

Een handtoorts moet gemakkelijk te hanteren zijn. Belangrijk is ook dat hij licht van gewicht is. In ieder geval moet de toorts goed in balans zijn met het gewicht van het slangenpakket. Dit laatste moet voldoende soepel zijn om kleine correcties van de lasser met de toorts zonder schokken mogelijk te maken. De schakelaar op de toorts moet gemakkelijk bedienbaar zijn.

Van groot belang is het zicht van de lasser op het smeltbad. Dat moet niet gehinderd worden door een te groot mondstuk. Eventueel met een aanpassing van de beschermkap voor het uitstekende einde van de elektrode moet de toorts goed hanteerbaar zijn in nauwere ruimtes.

Vooral van belang bij watergekoelde toortsen is, dat de elektrode zodanig goed geklemd wordt in de spantang, dat er ook van een wezenlijke koeling van de elektrode sprake is. Dit is voor de standtijd van de elektrode van doorslaggevende betekenis. Uiteraard geldt dit laatste in bijzondere mate voor gemechaniseerd lassen, waar in de regel de stromen hoger zijn en de inschakelduur groter is. Hierbij moet er ook voor worden gezorgd dat de diverse onderdelen, zoals het mondstuk en vooral de elektrode, gemakkelijk verwisselbaar zijn. Ook de lastoortsen hebben een inschakelduur. Voor handlastoortsen geldt een inschakelduur van 60% en bij gemechaniseerd lassen moet de inschakelduur van de toorts altijd 100% zijn.

3.2 De stroombron

3.2.1 Algemeen

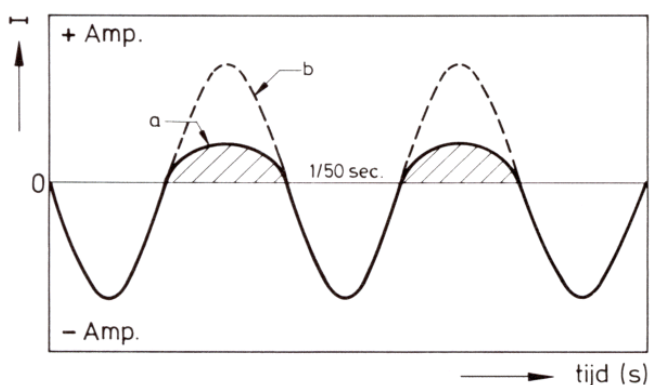
Bij TIG-lassen wordt zowel gebruik gemaakt van wisselstroom als van gelijkstroom. Afhankelijk van het te lassen metaal wordt er een keuze gemaakt. Het TIG-lassen van bepaalde materialen, zoals aluminium, wordt bij voorkeur met wisselstroom uitgevoerd. Een ander criterium kan zijn de mate waarin het TIG-proces wordt gebruikt. Wordt slechts zo nu en dan met TIG gelast, dan kan worden volstaan met een stroombron voor het booglassen met beklede elektroden, indien de open spanning van het apparaat niet te laag is. De stroombron kan dan nog toegerust worden met een unit voor H.F.-ontsteking en een gasdosering.

TIG-lasapparatuur bevat in de regel een van de volgende stroombronnen:

1. Een gelijkstroombron. Deze wordt vooral gebruikt voor het lassen van niet-aluminium metalen.
2. Een gecombineerde wissel- en gelijkstroom bron, ook wel dubbelstroom apparaat genoemd. Deze is zowel geschikt voor het lassen van aluminium als van andere metalen.

Een inmiddels wat verouderde wisselstroombron voor TIG-lassen is voorzien van een condensatorbatterij. Door verschil in mogelijkheid tot elektronenemissie van het werkstuk en de elektrode is de stroomsterkte gedurende de positieve halve periode kleiner dan gedurende de negatieve halve periode. Dit verschijnsel wordt het "gelijkrichteffect" genoemd. Het is weergegeven in figuur 3.1. Deze vervorming heeft een aantal negatieve invloeden op het proces. Enkele voorbeelden hiervan: De belasting van de stroombron is niet gelijkmatig. Daardoor is de inschakelduur van de bron geringer. Verder is de boog minder stabiel. Van groot belang is echter ook de slechte reiniging van het werkstuk bij het lassen van aluminium. Op dit laatste komen we in § 4.7 terug. Toevoeging van een condensatorbatterij of een synchron-impulsgenerator (een elektronische schakeling, waarmee de gelijkstroomcomponent gestuurd kan worden) doet de sinus weer de juiste vorm aannemen.

Tegenwoordig is echter apparatuur met een blokvormige wisselstroom redelijk ingeburgerd (§ 4.7).



figuur 3.4 Wisselstroom TIG-lassen.
a. de vervorming van de sinus ten gevolge van het "gelijkrichteffect"
b. de "gecorrigeerde" wisselstroom

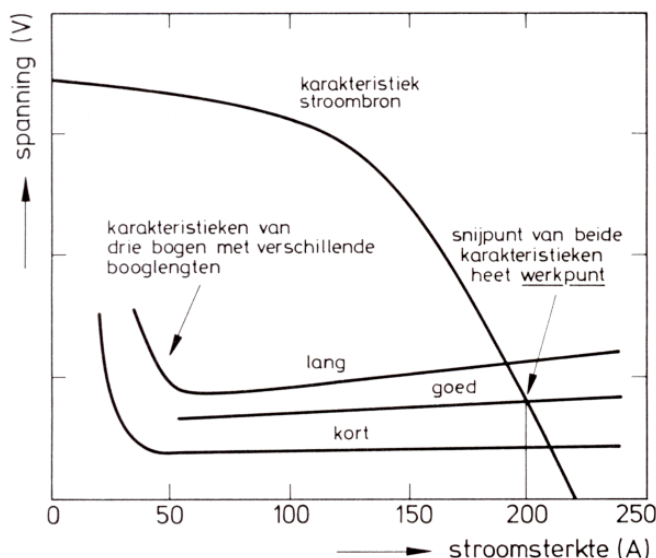
Bij de aanschaf van een TIG-apparaat moet aan de volgende punten aandacht worden besteed:

- ▶ De dikte en soort van het te lassen materiaal bepalen de maximale stroom met de daarbij behorende inschakelduur, maar ook de minimale stroom. Een onderste grens van 5 A (en soms zelfs 1 A) is voor de meeste bronnen nog goed haalbaar. Over lagere stromen zal in een van de volgende hoofdstukken nog gesproken worden.
- ▶ Inschakelduur. Dit is de relatieve tijd dat een bron met een bepaalde stroom kan worden belast. Dit wordt gemeten over een tijd van 10 minuten. Bij gemechaniseerd lassen moet de stroombron een inschakelduur hebben van 100%, terwijl bij handlassen kan worden volstaan met een inschakelduur van 60%.
- ▶ Mogelijkheden tot stroomregeling. Bij sommige toepassingen is het belangrijk dat de stroom bij netspanningsveranderingen constant blijft.
- ▶ Afstandsbediening. Afhankelijk van de toepassing zijn er hiervoor een aantal mogelijkheden:
 1. Bediening met een voetschakelaar. Bij eenvoudig handlassen wordt zo'n schakelaar vaak gebruikt.
 2. Een schakelaar met meervoudige functies op de toorts.
 3. Een zogenaamde "remote control" ingang op het lasapparaat. Met elektrische spanningen, afkomstig van een externe stuur eenheid, wordt het proces gestuurd. Het is duidelijk dat deze laatste mogelijkheid bij gemechaniseerd lassen belangrijk is.
- ▶ Aansluitmogelijkheden van de lastoorts. Zijn de gebruikte stromen zodanig, dat er water- of gaskoeling nodig is? Er moet ook gelet worden op de hoeveelheid lawaai die

de koeling veroorzaakt. Dit geldt vooral voor een geforceerde waterkoeling met een gesloten koelsysteem. Wanneer de stroombron luchtgekoeld is, let dan op de hoeveelheid geproduceerde warmte in de lasruimte. Let er bij het aansluiten ook op dat de ventilator in de goede richting draait.

- ▶ Ingebouwde startvoorzieningen. Op de verschillende startsystemen wordt nog nader ingegaan (§ 4.6).
- ▶ Verplaatsingsmogelijkheden, indien nodig (wielen, hijsogen).
- ▶ In het algemeen: De prijs van de apparatuur in relatie tot de mogelijkheden ervan.
- ▶ Veiligheid.
- ▶ Zaken als maximum stroomsterkte, inschakelduur, aansluitwaarden, veiligheid, enz. staan vermeld op de kenplaat van de stroombron.

Één eigenschap hebben alle stroombronnen voor het TIG-lassen met elkaar gemeen: de dalende statische stroom/spanningskarakteristiek. Dat wil zeggen, dat bij veranderende boogspanning de stroom nagenoeg constant blijft (figuur 3.5). In de figuur zijn tevens drie karakteristieken van de TIG-boog geschetst. Één voor een lange boog, één voor een korte boog en één voor een gemiddelde boog lengte. Door de betrekkelijk steil dalende karakteristiek van de stroombron, verschillen de bogen, bij variëren van de boog lengte, nogal in spanning, maar weinig in stroom. Bij de elektronisch gestuurde transistorbronnen is de karakteristiek vaak geheel verticaal. Dan hebben veranderingen van de boog lengte in het geheel geen veranderingen van de stroom tot gevolg.



figuur 3.5 Statische karakteristiek van een stroombron voor TIG-lassen

3.2.2 Verschillende typen moderne stroombronnen

Zoals in de vorige paragraaf reeds werd besproken, zijn er voor TIG-lassen een aantal verschillende typen stroombronnen. De noodzaak hiertoe vindt zijn oorsprong in het feit dat niet elk materiaal met dezelfde stroomsoort kan worden gelast.

We kunnen de volgende typen onderscheiden:

1. De dubbelstroom TIG-bron. Deze bestaat in de regel uit een tweefasentransformator, een diodebrug en een thyristorbesturing. Deze besturing maakt het mogelijk de lasstroom over een betrekkelijk groot bereik continu te regelen.
2. Een thyristor gelijkstroombron. Hierbij worden in vergelijking met een gewone gelijkrichter de diodes aan

de secundaire kant van de transformator vervangen door thyristors (figuur 3.6a). Met dit type stroombronnen kunnen stroom en tijd beter worden ingesteld. Tevens kan dit soort bronnen gebruikt worden voor een "square wave" stroomvorm, d.w.z. een blokvormige wisselstroom. Hierop komen we nog terug (§ 4.7). Ook kan in beperkte mate (met beperkte frequenties) pulserende stroom worden toegepast.

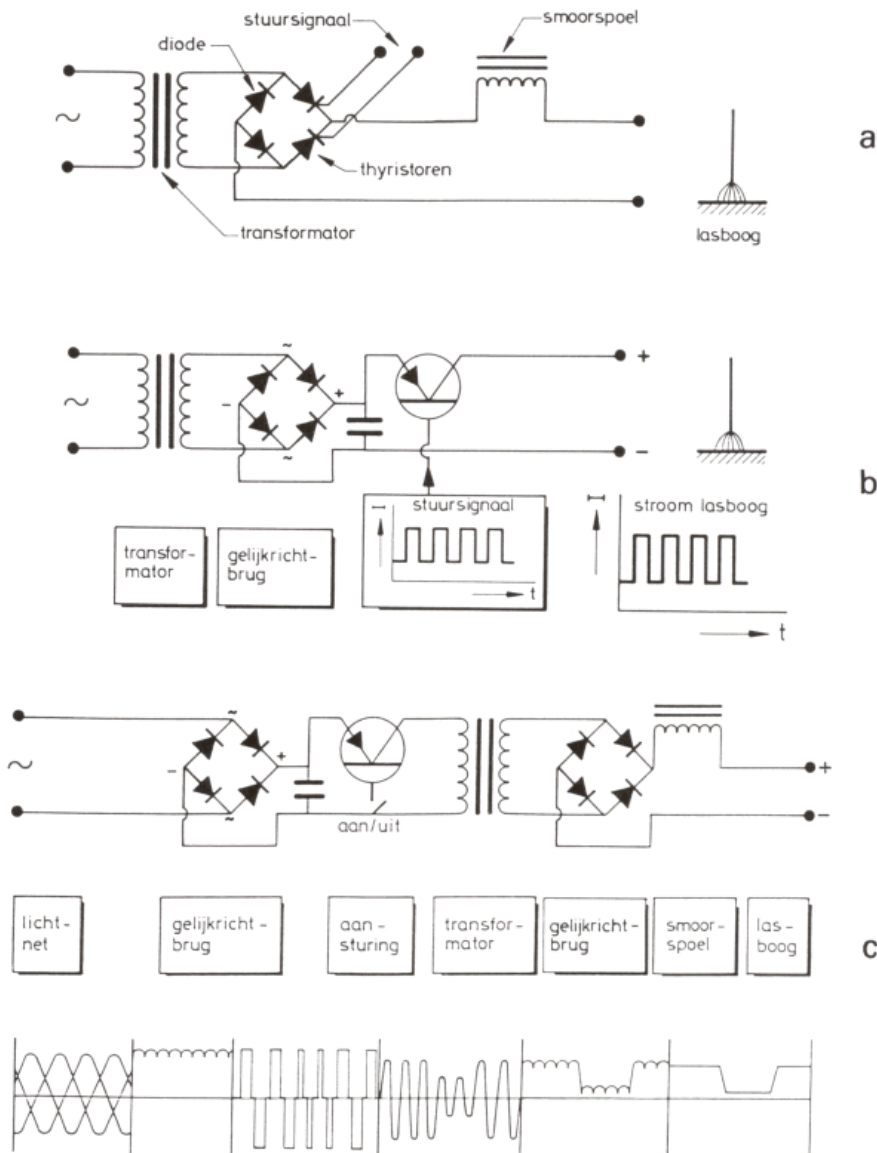
Een nadeel van de thyristorstroombronnen is de betrekkelijk grote rimpel. Deze kan wel 30% van de ingestelde waarde bedragen! Afhankelijk van het aantal thyristors heeft de rimpel een frequentie van 150 Hz (3 thyristors) of van 300 Hz (6 thyristors).

3. Een transistor stroombron. Hiervan bestaat een aantal uitvoeringen. De meest geavanceerde is een analoge stroombron, deze heeft een aantal vermogenstransistors parallel geplaatst. De stroom wordt geregeld door een analogo stuursignaal (figuur 3.6b). Met deze bronnen wordt een zeer stabiele stroom verkregen. De regelnaauwkeurigheid is in de orde van 1%. Het is mogelijk de stroom te pulseren met een grote variatie aan frequenties: van bijvoorbeeld 0,1 Hz tot 10 kHz. Ook de vorm van de puls kan zeer nauwkeurig worden inge-

steld. Met speciale aanpassing is het mogelijk een zeer steile "square wave" stroomvorm te krijgen (zie § 4.7). Nadelen van analoge transistor stroombronnen zijn: Deze bronnen zijn nogal duur en het elektrisch rendement is vrij slecht.

Een ander voorbeeld van transistorbronnen is in figuur 3.6c gegeven. Dit is het inverter-type. Hierbij wordt de spanning van het lichtnet eerst gelijkgericht. Van deze gelijkspanning wordt dan weer met schakelende transistors een hoog-frekwente wisselspanning gemaakt. Met een betrekkelijk kleine transformator wordt de spanning vervolgens omlaag getransformeerd en tenslotte gelijkgericht. Door sturing van de aan/uit verhouding van de primaire H.F.-pulsen of de amplitude van de primaire H.F.-spanning kan de lasstroom of lasspanning snel (1 ms) gestuurd worden.

Hoewel we in de industrie alle eerder genoemde stroombronnen nog tegen kunnen komen, worden er tegenwoordig vrijwel alleen nog maar TIG-stroombronnen van het inverter type verkocht, vanwege hun gunstige elektrische rendement, goede laseigenschappen, alsmede kleine afmetingen en laag gewicht.



figuur 3.6 a. Principe van een thyristorgestuurde stroombron
 b. Principe van een analoge transistorstroombron
 c. Principe van een primair geschakelde stroombron, ook wel inverter of switched mode bron genoemd. Er onder staan het spanningsverloop in de verschillende fasen afgebeeld

Hoofdstuk 4

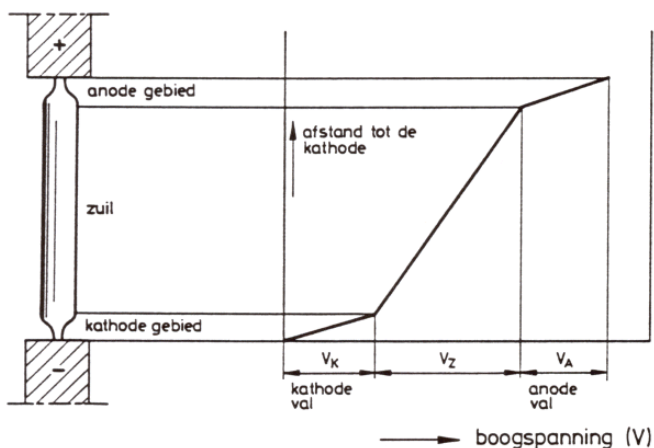
De lasboog en de elektrode

4.1 De lasboog

De lasboog bestaat in feite uit een gas van zeer hoge temperatuur. Hierdoor wordt de elektrische stroom geleid tussen de elektrode en het werkstuk. In dit hoofdstuk zal worden getracht de fysische achtergronden van dit mechanisme te verduidelijken.

In figuur 4.1 is de vorm van een typische TIG-boog geschetst. Daarnaast is de spanningverdeling in de boog weergegeven. In zo'n lasboog onderscheidt men drie gebieden:

1. Het anodegebied. Hier treden de elektronen vanuit de boog in de positieve elektrode. De spanning vertoont hier een steile gradiënt.
2. Het kathodegebied. Dit bevindt zich aan de andere zijde van de boog. Ook hier is er een steile potentiaalgradiënt. Er is een aantal mogelijkheden om van hieruit de elektronenstroom naar de boog te onderhouden. Daar wordt nog nader op terug gekomen (§ 4.3).
3. De boogkolom of de zuil. Dit is het grootste deel van de boog. De spanningsgradiënt is hier aanmerkelijk kleiner.



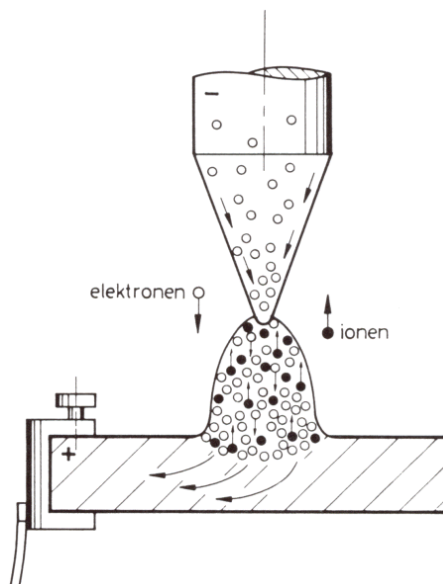
figuur 4.1 De lasboog en de spanningsverdeling in de boog

In het verdere verloop van dit hoofdstuk zal eerst de boogkolom nader worden bekeken, vervolgens de kathode en tenslotte de anode.

4.2 De boogkolom

Voorwaarde voor een lasboog is, dat het een goede stroomgeleider moet zijn. In de dagelijkse praktijk kent men vooral metalen als goede stroomgeleiders. De stroomgeleiding van metalen is te danken aan het feit, dat een aantal elektronen in een metaal zich nagenoeg vrij kunnen bewegen. Deze "vrije" elektronen bewegen zich tussen een rooster van positieve ionen door. Wanneer er een spanningsverschil tussen de uiteinden van het metaal wordt aangelegd, zullen deze vrije elektronen zich van min naar plus gaan begeven. Er ontstaat daardoor dus een elektrische stroom. De ionen bewegen niet. In een metaal wordt de stroom dus in z'n geheel gedragen door elektronen. Doordat de elektronen met de ionen voortdurend botsen, is er een elektrische weerstand. Het verband tussen de aangelegde spanning (U), de stroom (I) en de weerstand (R), kennen we als de wet van Ohm: $U = I \times R$.

In tegenstelling tot metalen, zijn gassen bij kamertemperatuur zeer slechte geleiders. Er zijn in het gas geen ladingdragers om de stroom te geleiden. Wanneer echter een gas tot zeer hoge temperatuur verhit wordt, zal de binding in de gasatomen zoveel geringer worden, dat er ook hier elektronen vrijkomen. In tegenstelling tot de metalen, zullen bij een gas ook de ionen zich vrij kunnen bewegen. Het verbreken van de binding tussen een elektron en het ion heet: ionisatie. Wanneer in zo'n geïoniseerd gas een spanningsverschil wordt aangelegd, zullen, net als in een metaal, de elektronen zich naar de positieve kant begeven. Nu zullen echter ook de ionen meedoen aan de stroomgeleiding en in de tegenovergestelde richting gaan. Hoewel we nog moeten verklaren hoe een boog wordt ontstoken, kunnen we alvast gaan kijken hoe de stroomgeleiding verloopt in de kolom van een TIG-boog. In figuur 4.2 is zo'n TIG-boog schematisch weergegeven. Verondersteld wordt dat de wolframelektrode negatief is en het werkstuk positief. Wanneer het stroombeeld gevolgd wordt, zien we dat in de wolframelektrode de elektronen zich naar de punt bewegen; vervolgens bewegen er elektronen in de boogkolom naar de positieve zijde. Ionon gaan naar de negatieve kant. De kinetische energie van beide deeltjes is gelijk: $\frac{1}{2}mv^2$.



figuur 4.2 Schematische doorsnede van een TIG-boog

Aangezien de massa van een elektron veel kleiner is dan die van een ion, is de snelheid van een elektron vele malen groter dan de snelheid van een ion. Dit heeft tot gevolg dat de stroomgeleiding in zo'n heet gas voornamelijk door de beweging van elektronen gebeurt.

De temperatuur waarbij de ionisatie plaats vindt, is afhankelijk van het type gas. Zo'n heet geïoniseerd gas wordt ook wel plasma genoemd.

In het algemeen is de mate van ionisatie (ook wel ionisatiegraad) van een gas afhankelijk van:

1. De temperatuur. In het algemeen: hoe hoger de temperatuur, hoe meer gas er geïoniseerd is.
2. De ionisatie-energie van het gas. Dit is maat voor de hoeveelheid energie die aan een gasatoom (of ander element) moet worden toegevoerd, voordat ionisatie optreedt. Hoe lager dit getal, des te groter is de ionisatie.

Voor stroomgeleiding in gassen moet men aan temperaturen denken die hoger zijn dan $6000\text{ }^\circ\text{C}$; voor argon zelfs hoger dan $10.000\text{ }^\circ\text{C}$.

Van de gassen die bij TIG-lassen het meest gebruikt worden, zijn de ionisatie-energieën:

Argon 15,7 eV en
Helium 24,5 eV.

Op de gevolgen hiervan komen we nog terug (§ 5.1).

4.3 De kathode

Van de stroomgeleiding in de beide elektroden (metalen) en die in de boogkolom (heet gas) zijn in het voorgaande zeer summier de fysische achtergronden belicht. Maar ook bij de overgangen vaste stof (elektrode) - gas en vloeistof (smeltbad) - gas moet de continuïteit van de stroom gewaarborgd zijn, wil TIG-lassen een stabiel proces zijn. In de overganggebieden moet de stroom gedragen worden door ionen en elektronen. Vooral bij de kathode wil dat nog wel eens problematisch zijn. Hier moeten immers elektronen uit het metaal treden om voldoende stroom te verkrijgen.

Bij TIG-lassen is in de meeste gevallen de wolframelektrode negatief. Bij onderstaande beschouwingen beperken we ons even hiertoe. In een van de volgende hoofdstukken worden ook de andere mogelijkheden bekeken.

Hoe vrij de elektronen zich ook in een metaal kunnen bewegen, bij kamertemperatuur is het nagenoeg onmogelijk voor een elektron om het oppervlak van een metaal te verlaten. Hiervoor moet een bepaalde energiedrempel worden overwonnen. Deze drempel heet de uittrede-energie. Pas wanneer een elektron, op welke wijze dan ook, zoveel energie heeft gekregen, dat de uittrede-energie is gepasseerd, kan het elektron het oppervlak van het metaal verlaten. Het uittreden van een elektron uit een metaal heet emissie.

Van een aantal veel voorkomende elementen zijn de uittrede-energieën:

Wolfram	4,5 eV
IJzer	4,2-4,5 eV
Thorium	3,4 eV
Wolfram-Thoriumoxide	2,6 eV

Voor lassen zijn twee wijzen van emissie van belang:

- Veldemissie. Deze ontstaat door voor het oppervlak een voldoende sterk elektrisch veld aan te leggen.
- Thermische emissie. Deze treedt vooral op bij metalen met een hoog smeltpunt. De temperatuur van het metaal kan dan zo hoog worden, dat de elektronen de uittrede-energie bereiken.

Bij TIG-lassen (negatieve elektrode) is er bijna altijd sprake van een combinatie van deze twee mechanismen. Toch is in de regel de thermische emissie van doorslaggevende betekenis.

Voor een goede thermische emissie is het belangrijk dat de temperatuur van de elektrode zo hoog mogelijk kan worden. Dus een materiaal met een hoog smeltpunt is noodzakelijk hiervoor. Wolfram is dan ook uitermate geschikt als kathodemateriaal. Het smeltpunt is 3410 °C, terwijl het kookpunt bij 5500 °C ligt. De uittrede-energie is niet zo laag. Dat is de reden dat bij TIG-lassen met de elektrode negatief (in de meeste gevallen), zuiver wolfram toch niet gebruikt kan worden. Ondanks het hoge smeltpunt worden er niet genoeg elektronen geëmitteerd voor voldoende stroomgeleiding. Er kunnen echter elementen aan het wolfram worden toegevoegd, waardoor de uittrede-energie verlaagd wordt. Hierboven is daarvan reeds een voorbeeld gegeven: $W + ThO_2$. Wolfram heeft een uittrede-energie van 4,5 eV, thoriumoxide 3,4. De legering van bijvoorbeeld 2% thoriumoxide in wolfram heeft een uittrede-energie van 2,6 eV. Dit is laag genoeg om voldoende stroom te kunnen leveren. Opgemerkt dient te worden dat thorium licht radioactief is en om die reden

niet meer in Nederland mag worden verhandeld. Er bestaat een betrekkelijk grote verscheidenheid van alternatieve elektrodesamenstellingen. Deze worden in § 4.5 behandeld.

Hoewel in het kathodegebied het grootste deel van de stroom door de elektronen verzorgd wordt, zijn er ook een aantal gasionen die op de kathode botsen. Het "bombardelement" van de relatief zware positieve ionen op het kathode-oppervlak zorgt er voor dat de hoge temperatuur van de kathode in stand blijft. Daar staat tegenover dat emissie van de elektronen energie "kost". Daardoor wordt de kathode gekoeld.

Hierbij wordt nogmaals opgemerkt, dat het hierboven beschreven kathodemechanisme uitsluitend opgaat voor het geval dat de wolframelektrode negatief is. Wanneer het werkstuk negatief gekozen wordt, treedt er in de regel een ander kathodemechanisme op. Dat zal kort worden besproken in § 4.7.

4.4 De anode

Het mechanisme van stroomgeleiding aan de anode kant is aanmerkelijk eenvoudiger dan aan de kathode. De elektronen treden hier zonder moeite in het anode-oppervlak. Zij staan hier, behalve de bewegingsenergie, ook de bij de emissie opgenomen energie weer af. Dat betekent dat het anode-oppervlak wel erg warm wordt; veel warmer dan de kathode!

4.5 De elektrode

Bij TIG-lassen is er een drietal mogelijkheden voor wat betreft de polariteit van de wolframelektrode:

- De elektrode is negatief, dus kathode.
- De elektrode is positief, dus anode.
- De elektrode is afwisselend positief en negatief, zoals bij het lassen met wisselstroom het geval is.

In al deze gevallen treedt er slijtage van de wolframelektrode op. In het ene geval meer dan in het andere, terwijl ook de mechanismen van slijtage met elkaar verschillen. We zullen hieronder de meest voorkomende gevallen van slijtage beschrijven. Tevens zullen er methoden worden genoemd om de slijtage tot een minimum te beperken. Dit laatste is van groot belang; immers met de mate van slijtage van de wolframelektrode staat of valt het TIG-proces. Zeker wanneer er moet worden gelast met gemechaniseerde opstellingen. Er is hierboven al vermeld dat de wolframelektrode, teneinde een goede emissie bij het lassen aan de negatieve pool te geven, "gelegeerd" is met bepaalde elementen. In feite wordt het wolfram vervaardigd uit poeder. Dit wordt in staven (diameter bijvoorbeeld 25 mm) samengeperst, gesinterd en dan gehamerd en getrokken tot de uiteindelijke maat. Voor het samenpersen van het uitgangspunt kunnen er oxides van bijvoorbeeld thorium door het poeder worden gemengd. Op deze wijze kan er een grote verscheidenheid van mengsels en dus ook van elektroden worden gemaakt. De toevoegingen worden ook wel dope genoemd. Thoriumoxide was, tot het verbod op toepassing in 2006, de meest gebruikte dope. Thoriumoxide blijkt licht radioactief te zijn en valt daarmee onder de atoomwet, vandaar het verbod. Dit betekent geen verbod voor de elektrode, maar er is wel een vergunning nodig voor opslag en gebruik. Er is echter een aantal goede alternatieven die beter zijn dan de thorium-elektrode.

De belangrijkste "dopes", steeds in de vorm van oxides, die aan een wolframelektrode worden toegevoegd zijn: ceriumoxide (CeO_2), lanthaanoxide (La_2O_3), yttriumoxide (Y_2O_3) en zirkoniumoxide (ZrO_3). Meestal hebben oxides een hoger smeltpunt dan het zuivere materiaal en dat is

bij wolframelektroden wel nodig. In tabel 4.1 is een overzicht van de courante wolframelektroden weergegeven. De turkooisgekleurde elektrode wordt het meest toegepast omdat deze bij gelijk- en wisselstroom zeer goede eigenschappen heeft.

Tot voor enkele jaren terug waren er slechts een betrekkelijk gering aantal elektrodesamenstellingen. Zo was er (en is er nog) zuiver W (wolfram) voor het lassen met wisselstroom. Zoals in § 3.2.1 is beschreven, is er reeds bij zuiver wolfram een "gelijkrichteffect". Toevoegingen van dope zou dat nog veel erger maken. Toch worden er ook wel voor wisselstroomlassen elektroden met een paar tienden van procenten ZrO_2 gebruikt. Dat wordt vooral gedaan om beter te kunnen starten en herstarten, hetgeen een stabielere lasboog geeft.

De meest voorkomende diameters van de wolframelektroden zijn: 0,5 - 1,0 - 1,6 - 2,0 - 2,4 - 3,0 - 3,2 - 4,0 - 5,0 - 6,0 - 6,4 - 8,0 mm.

De lengtes: 50 - 75 - 150 - 175 mm.

Wat betreft de kleurcodering, daar kan nogal wat verwarring over ontstaan.

Vooral de nieuwere typen, zoals die met lanthaanoxide, yttriumoxide en ceriumoxide, wisselen nogal eens van kleurcodering per fabrikant.

De diameter die voor de wolframelektrode moet worden gekozen, is afhankelijk van: De stroomsoort, de stroomsterkte, de polariteit, de koeling en het uitstekende deel van de elektrode. In tabel 4.2 zijn een aantal van deze verbanden weergegeven.

Als algemene regel geldt:

Wisselstroom : Zuiver wolfram of wolfram met ZrO_2 .
Gelijkstroom negatieve pool: Wolfram met dope.

Het lassen met wisselstroom wordt in de regel uitgevoerd met zuiver wolframelektroden. Wolfram + ZrO_2 wordt gebruikt, wanneer er zeer hoge eisen aan de start worden gesteld (reactorbouw). Door de betere starteigenschappen is de kans, dat de startplaats verontreinigd wordt, kleiner. Verder is de toelaatbare stroom van zo'n elektrode hoger.

Een enkele maal wordt er gelast met de elektrode positief (dun aluminium en magnesium). Uit tabel 4.2 blijkt dat er dan wel erg lage stroomsterkten gekozen moeten worden (ongeveer een factor 10 lager), terwijl de punt van de elektrode dan toch nog iets gesmolten is. Bij het lassen aan de negatieve pool wordt de slijtage van de wolframelektrode vooral veroorzaakt door het verdwijnen - migreren - van de dope uit de punt. Hierdoor wordt het aandeel van de thermische emissie geringer. Veldemissie komt er voor in de plaats. De temperatuur van de elektrode wordt dan plaatselijk zo hoog, dat kleine plekjes aan de punt gaan smelten (figuur 4.3). Dit gaat zo door, totdat de gehele punt over een bepaalde lengte gesmolten is. De boog grijpt dan vaak aan op hoger gelegen delen van de wolframelektrode waar nog wel dope aanwezig is.

Twee effecten treden dan op:

1. De reeds genoemde slijtage.
2. De boog wordt minder stabiel en de boogspanning varieert nogal. Op den duur is dat merkbaar aan een wisselend lasresultaat.

Uit eigen onderzoek is gebleken dat, wat betreft de slijtage van de elektrode, niet alle dopes gelijk zijn. In volg-

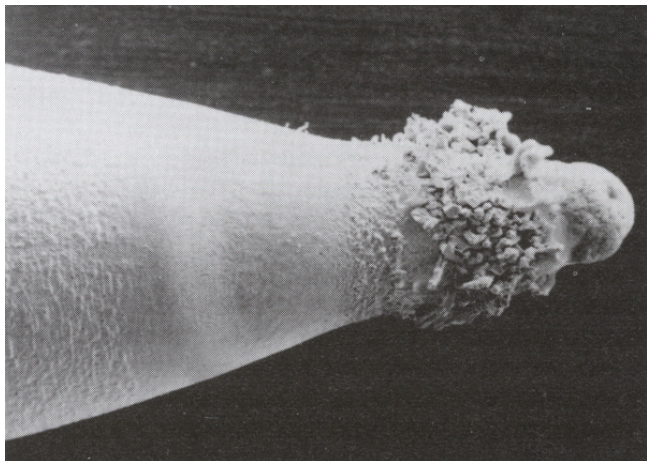
tabel 4.1 Samenstelling van wolframelektroden voor TIG-lassen

type elektrode	kopkleur	legeringselementen in %	gelijkstroom		wisselstroom	boogstabiliteit	herontsteking	standtijd	te lassen materialen
			-pool	+pool					
WL-10	zwart	1,0% lanthaniumoxide	++	--	±	+	+	++	Fe-RVS
WL-15	goud	1,5% lanthaniumoxide	++	--	±	+	+	++	Fe-RVS
WL-20	blauw	2,0% lanthaniumoxide	++	--	±	+	+	++	Fe-RVS
WT-10 ¹⁾	geel	1,0% thoriumoxide	++	--	±	+	+	+	Fe-RVS
WT-20 ¹⁾	rood	2,0% thoriumoxide	++	--	±	+	+	+	Fe-RVS
WT-30 ¹⁾	lila	3,0% thoriumoxide	++	--	±	+	+	+	Fe-RVS
WT-40 ¹⁾	oranje	4,0% thoriumoxide	++	--	±	+	+	+	Fe-RVS
WP	groen	100% wolfram (puur)			+	-	-	-	Aluminium
WR-2	turquoise	2,0% zeldzame elementen	++	--	++	+	++	++	Fe-RVS-aluminium
WC-20	grijs	2,0% ceriumoxide	++	--	±	+	+	+	Fe-RVS
WZ-8	wit	0,8% zirconiumoxide	++		+	+	+	+	Fe-RVS-aluminium

1) Opslag en gebruik is vergunningsplichtig volgens de richtlijnen van het Ministerie van VROM!

tabel 4.2 De toelaatbare stroomsterkten van de elektroden voor TIG-lassen

Elektrode diameter	Gelijkstroom				Wisselstroom	
	Elektrode negatief		Elektrode positief		Zuiver W	W + ZrO_2
mm	W	W + dope	W	W + dope		
0,5	5	20	n.v.t.		5 - 15	5 - 20
1,0	15	80	n.v.t.		10 - 60	15 - 80
1,6	70	150	10	20	50 - 100	70 - 150
2,4	150	250	15	30	100 - 160	140 - 235
3,2	250	400	25	40	150 - 210	225 - 325
4,0	400	500	40	55	200 - 275	300 - 425
4,8	500	800	55	80	250 - 350	400 - 525
6,4	800	1100	80	125	325 - 475	500 - 700



figuur 4.3 Een typisch uiterlijk van een elektrodepunt ten gevolge van migratie van dope

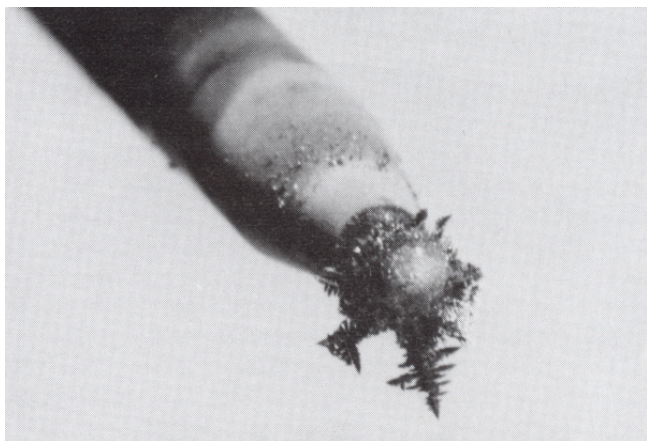
orde van slijtage, van weinig tot meer, kunnen de dopes als volgt worden gerangschikt:

2% La_2O_3 - 2% CeO_2 - 2% Y_2O_3 en vervolgens een groep met 2% ThO_2 , 1% La_2O_3 , 1% CeO_2 en tenslotte de elektrode met ZrO_2 .

Vooraf 2% La_2O_3 en 2% CeO_2 zijn als beste uit het onderzoek gekomen.

Reden van de geringere slijtage: Om een nog niet achterhaalde reden wordt de tip van de elektroden met 2% La_2O_3 en 2% CeO_2 minder warm.

Indien er direct achter de tip een naaldvormige rand ontstaat, ook wel "dendrietten" genoemd, dan is het gasverontreinigd met zuurstof, of de gasbescherming van de toorts is onvoldoende (figuur 4.4).



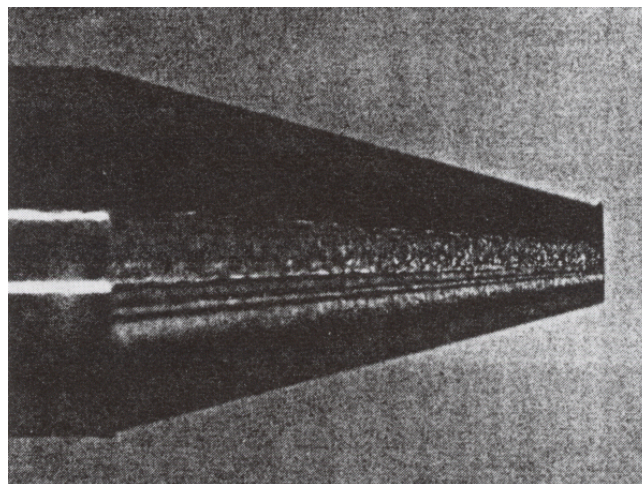
figuur 4.4 "Dendrietvorming" aan de wolfraamelektrode

Bij hoge stromen is belangrijk dat de elektrode zo goed mogelijk gekoeld wordt. Zoals reeds hierboven is beschreven, worden de wolfraamelektroden in de toorts gevat in een spantang. Bij watergekoelde toortsen wordt deze spantang indirect gekoeld. Dat wil zeggen dat de elektrode wel zeer indirect gekoeld wordt. In kritische gevallen is het daarom van groot belang alle vattingen zo schoon mogelijk te maken, zodat de koeling zo effectief mogelijk is. Verder kan de koeling van de elektrode sterk verbeterd worden, door het vrije uiteinde ervan zo kort mogelijk te houden. Voor het TIG-gelijkstroomlassen moet een punt aan de elektrode worden geslepen. Hierbij zijn twee zaken erg belangrijk, namelijk de tophoek en het slijppoppervlak.

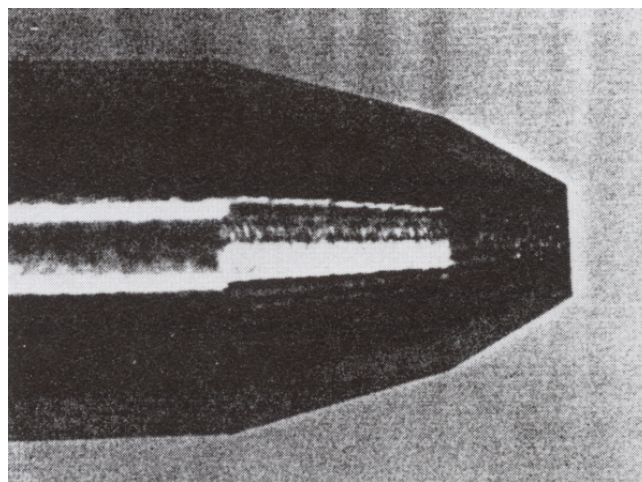
De tophoek

Het beste resultaat geeft een tophoek van 60° . De elektronenstroom is dan optimaal naar het werkstuk gericht. Het smeltbad zal de juiste grootte hebben en de lasboog zal strak en stabiel zijn. Bij een spitsere punt zal de grootte van het smeltbad toenemen en de standtijd van de punt afnemen. De stroomdichtheid zal bij een te spitse punt fors toenemen waardoor de punt sneller slijt en er dus vaker geslepen moet worden. Een spitsere punt mag men enkel toepassen wanneer met extreem lage stroom wordt gelast. Vaak is het beter om in deze gevallen voor een dunnere elektrode te kiezen en deze aan te slijpen met een punt van 60° . Wanneer binnen het stroomgebied van de elektrode met een te stompe punt wordt gelast, zal de stroomdichtheid aan de punt afnemen en zal de boog instabiel worden.

Tenslotte de tophoek van de elektrode (figuur 4.5). Uit onderzoek is gebleken dat bij hogere stroomsterkten, 100 A en hoger, een tophoek van 30° de beste resultaten geeft met betrekking tot de slijtage. Wel is het goed de punt iets te "breken" (figuur 4.6). Voor stroomsterkten tot 30 A wordt een tophoek van 30° , tussen de 30 en de 200 A een tophoek van 60° , en boven de 200 A wordt een tophoek groter dan 60° aanbevolen.



figuur 4.5 Uitgangsvorm van een elektrodepunt



figuur 4.6 Voorgevormde elektrodepunt

Het slijppoppervlak

Om een rustige en strakke boog te krijgen moet het slijppoppervlak zo glad mogelijk zijn. Grove slijpgroeven zorgen voor een onrustige boog en energieverlies. Bij het lassen

met hogere stromen kan de punt van de elektrode iets worden afgevlakt, maximaal 1,0 mm diameter. Een bijkomend voordeel hiervan is, dat de standtijd van de elektrodepunt toeneemt. De slijpgroeven moeten altijd in de lengterichting van de elektrode lopen. Om bij het slijpen van wolframelektroden een goede reproduceerbaarheid van de tophoek en een zo glad mogelijk oppervlak te bekomen, is het beter om gebruik te maken van speciaal daarvoor ontwikkelde slijpparaten. De meeste van deze slijpparaten zijn voorzien van een diamantschijf die een optimaal slijpresultaat garandeert.

Belangrijke punten:

- ▶ Van belang is dat de slijpgroeven in de lengterichting van de elektrode lopen.
- ▶ Slijp zo glad als mogelijk is; liefst polijsten.

4.6 Het starten van de boog

In het voorgaande is getracht te verklaren hoe de boog een elektrische stroom geleidt, wanneer hij reeds ontstoken is. Er is reeds gezegd, dat gas bij kamertemperatuur een zeer slechte geleider is. Verder zullen de elektronen, die in een metaal de stroom gemakkelijk geleiden, niet zomaar buiten het metaal treden. Om de boog te ontsteken zullen er dan ook voorzieningen getroffen moeten worden om een geleidend pad tussen de elektrode en het werkstuk in te leiden. Hieronder zullen een aantal startmethoden worden behandeld:

1. De eenvoudigste methode om te starten is de wolframelektrode in contact te brengen met het werkstuk, terwijl de open spanning van de stroombron reeds is aangebracht. Er loopt nu een hoge stroom (kortsluitstroom) door de elektrode, via het contactoppervlak, naar het werkstuk. Zowel de wolframpunt, als het oppervlak van het werkstuk zullen zeer warm worden hetgeen vaak tot "vastvriezen" van de elektrodepunt leidt.

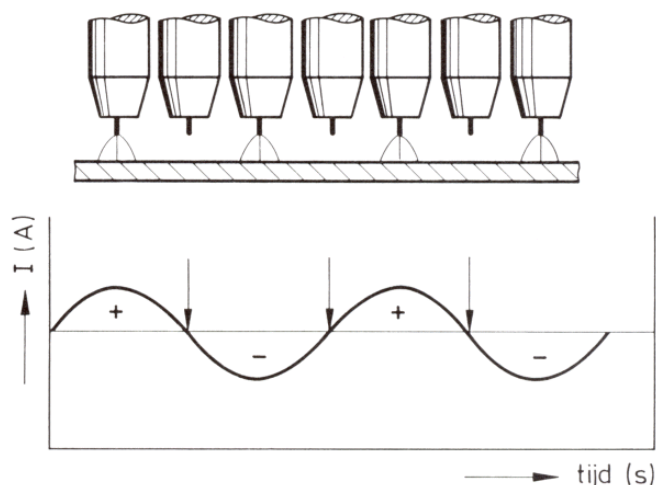
Wanneer de elektrode weer wordt weggetrokken breekt vaak de punt af, waardoor een instabiele lasboog wordt verkregen en het werkstuk verontreinigd wordt met wolfram. De afstand werkstuk - elektrode is bij het begin van het verbreken van het contact nog zo klein, dat de veldsterkte (open spanning/afstand) voldoende hoog is, om ionisatie van het beschermgas te bewerkstelligen. Het is duidelijk dat bij deze startmethode de wolframelektrode extra zal slijten. Verder is vrijwel altijd de verontreiniging van de las met wolfram niet acceptabel. Deze manier van starten moet dan ook altijd worden afgeraden.

Bij wat meer geavanceerde apparatuur is deze methode van starten via contact met het werkstuk verbeterd. Bij dit type apparatuur is een speciale elektronische schakeling ingebouwd, die detecteert wanneer de elektrode het werkstuk raakt. Deze schakeling zorgt er nu voor, dat er niet de hoge kortsluitstroom gaat lopen, maar een zeer lage stroom (10-15 A). Bij het verbreken van het contact met het werkstuk zal de stroom geleidelijk toenemen, om bij de gewenste werkafstand (de juiste booglengte) de ingestelde waarde van de stroom te bereiken. De slijtage is in dit geval vergelijkbaar met contactloos starten, maar pessimisten zeggen dat de kans op wolframinsluitingen in de las aanwezig blijft. Dit wordt echter niet door onderzoek bevestigd. Daarom is het beter om voor een contactloze manier van starten te kiezen.

2. Een contactloze methode om de TIG-boog te starten is die waarbij een zeer hoge hoogfrequente spanning (H.F.) gebruikt wordt. De hoge spanning (bijvoorbeeld 2 tot 20 kV met wisselende frequenties tussen de 150 kHz en 1 MHz) doet een vonkenbrug tussen de elektrode en het werkstuk ontstaan. Het pad tussen

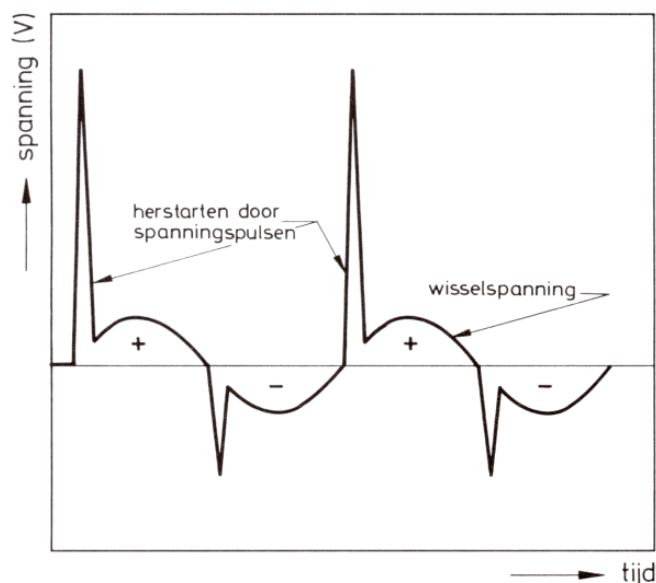
de elektrode en het werkstuk wordt hierdoor voor-geïoniseerd. Wanneer de open spanning van de stroombron hoog genoeg is, minimaal 70 V, zal de TIG-boog worden ontstoken.

Bij het lassen met gelijkstroom schakelt vervolgens de hoogfrequente startinrichting automatisch uit. Bij het TIG-lassen met wisselstroom zal de boog bij iedere nuldoorgang (zie figuur 4.7) doven. Hij moet dan weer opnieuw ontstoken worden. Door de hoogfrequentgenerator gedurende het lassen aan te laten, ontsteekt de boog telkens weer na iedere nuldoorgang van de wisselstroom. Zoals in de volgende paragraaf zal blijken, is het lassen met wisselstroom vooral van belang voor het lassen van aluminium.

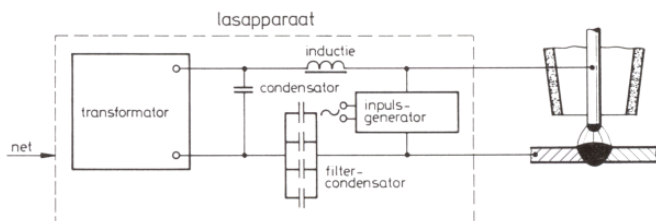


figuur 4.7 TIG-lassen met wisselstroom

De H.F.-generatoren worden meer en meer vervangen door impulsgeneratoren. Deze worden gestuurd met de netfrequentie en geven slechts bij iedere nuldoorgang van de wisselstroom een korte H.F.-puls (figuur 4.8). Deze generatoren veroorzaken minder storingen (voor radio, maar vooral ook voor computers en andere elektronische regelapparatuur) dan de continue H.F.-apparatuur, het nadeel is dat ze wat duurder zijn dan de traditionele H.F.-installatie. In figuur 4.9 is een opstelling voor TIG-lassen met impulsgenerator weergegeven.



figuur 4.8 Herontsteken bij de nuldoorgang



figuur 4.9 Lasopstelling voor TIGwisselstroom lassen met een impulsgenerator en een filtercondensator

De filtercondensator zorgt voor het opheffen van het gelijkrichteffect van de boog, zoals voorheen reeds is beschreven. De condensator met de smoorspoel beschermt de stroombron tegen de hoge spanningspulsen van de impulsgenerator.

3. Een startmethode voor gelijkstroom lassen, die nogal lijkt op de voorgaande, is als volgt: Eerst wordt de open spanning van de stroombron aangebracht tussen de wolfraamelektrode en het werkstuk. Vervolgens wordt gedurende zeer korte tijd (enige microseconden) een spanning van ca. 12 kV tussen het werkstuk en de elektrode aangebracht. Wanneer de afstand tussen elektrode en werkstuk klein genoeg is (enkele millimeters), zal de boog ontsteken. Gebeurt dit niet, dan zal enkele milliseconden later de procedure herhaald worden. Is, bijvoorbeeld, na 5 pogingen de boog nog niet gestart, dan valt de open spanning af en moet de oorzaak van de weigering gezocht worden. Wanneer echter normaal gewerkt wordt, dan zal deze methode uitstekend functioneren. De laatste methode geeft de minste kans op storingen van elektronische apparatuur in de omgeving.

4.7 De stroomsoort

Bij TIG-lassen kunnen de volgende stroomsoorten worden gebruikt:

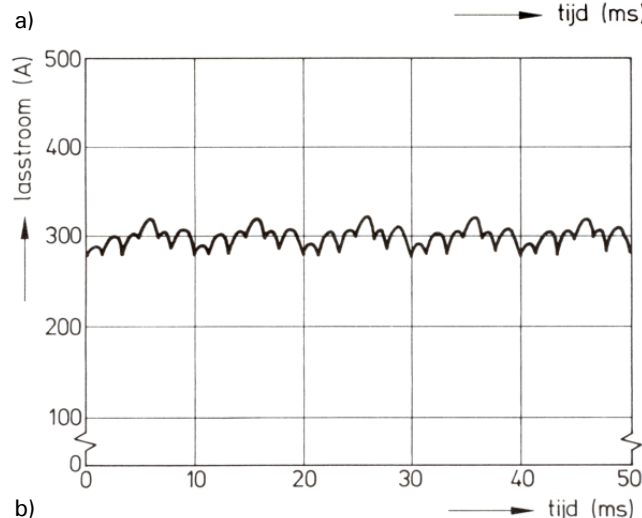
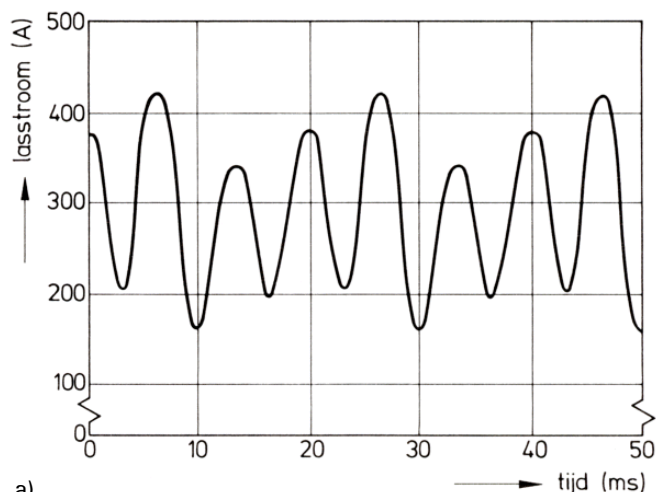
- A. Gelijkstroom.
 - ▶ continue gelijkstroom, elektrode negatief.
 - ▶ continue gelijkstroom, elektrode positief.
 - ▶ pulserende gelijkstroom, elektrode negatief.
- B. Wisselstroom.
 - ▶ sinusvormige wisselstroom.
 - ▶ blokvormige wisselstroom, "square wave".

Verreweg de meeste metalen kunnen met gelijkstroom worden gelast. Wanneer in deze voorlichtingspublicatie over TIG-lassen met gelijkstroom wordt gesproken, dan wordt bedoeld: lassen met de elektrode negatief. In de speciale gevallen dat de elektrode positief wordt genomen, zal dat uitdrukkelijk worden vermeld.

De moderne gestuurde stroombronnen leveren een gelijkstroom die betrekkelijk snel gevarieerd kan worden (dus met een korte reactietijd) met een elektronische stuur-eenheid.

Wanneer een thyristorbron wordt gebruikt, vertoont de stroom een rimpel die aanzienlijk kan zijn. Deze rimpel kan wel worden afgevlakt met een smoorspoel (figuur 4.10), maar dan wordt de reactietijd van de stroomregeling groter. Anders gezegd: Met een smoorspoel wordt de bron trager. Voor het doorsnee TIG-lassen zijn thyristorbronnen echter zeer geschikt.

Deze thyristor gestuurde stroombronnen zijn minder geschikt om mee te lassen, wanneer er snelle veranderingen in de boog optreden. Bijvoorbeeld bij het zeer snel lassen van dunne plaat.



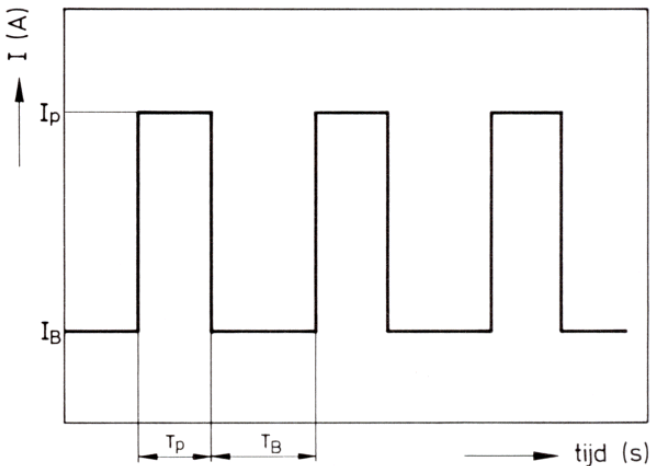
figuur 4.10 Stroomvariaties ten gevolge van de rimpel bij thyristor gestuurde stroombronnen: a) zonder smoorspoel; b) met smoorspoel

De moderne TIG-stroombronnen zijn vrijwel zonder uitzondering inverter stroombronnen, met ander woorden transistor gestuurde stroombronnen.

Hiermee is een volgend type van gestuurde stroombronnen ter sprake gebracht: de transistorbron. Zoals reeds opgemerkt in § 3.2.2 wordt bij transistorbronnen onderscheid gemaakt tussen geschakelde bronnen en analoge bronnen. De analoge stroombron geeft het beste gelijkspanningssignaal zonder rimpel (figuur 3.6b). Dit is echter zelden noodzakelijk. Alleen voor zeer kritische toepassingen waarbij er geen rimpel op het gelijkspanningssignaal aanwezig mag zijn, is de analoge stroombron een verstandige keus. In vrijwel alle andere gevallen voldoet de inverter stroombron uitstekend voor het TIG-lassen met als voordeel aanmerkelijk lagere aanschafkosten. De geschakelde bronnen (figuur 3.6c), ook wel "switched mode" genoemd, geven een gelijkstroom met een hoogfrequente, kleine rimpel.

Gepulseerde gelijkstroom: Het TIG-lassen met een pulserende gelijkstroom stelt speciale eisen aan de stroombron. De stroombron moet in staat zijn sinusvormige of rechtehoekige stroompulsen te leveren. Behalve stroom en spanning (nu gemiddelde stroom en spanning) moeten bij het pulserend TIG-lassen ook de pulsparameters ingesteld kunnen worden (figuur 4.11). Dat zijn:

- ▶ pulsstroom, ook wel piekstroom genoemd (I_p);
- ▶ basisstroom, ook wel grondstroom genoemd (I_b);
- ▶ pulstijd (T_p);
- ▶ puls frequentie (f), of in plaats hiervan de basisstroom-tijd T_b .

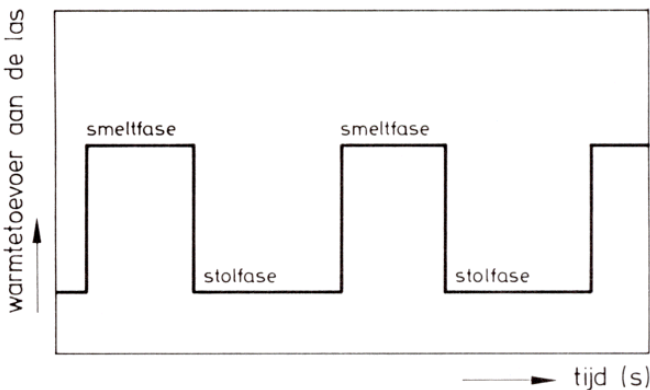


figuur 4.11 Schematisch verloop van de stroom bij pulseren

Bij TIG-lassen met pulserende stroom wordt gedurende de puls veel warmte aan de lasplaats toegevoegd. Het werkstuk wordt dan gesmolten. Gedurende de tijd dat de stroom laag is (basisstroom), wordt de boog slechts in stand gehouden. De aan het werkstuk toegevoegde warmte is gedurende deze tijd slechts zeer gering.

Het lasbad stolt dan weer voor een belangrijk deel en vormt zo weer voor voldoende ondersteuning voor de volgende smeltfase (figuur 4.12).

Bij het TIG-handlassen wordt tijdens de piekstroom de toevoegdraad in het smeltbad gevoerd. Door nu de pulsparameters I_p , T_p en f goed te kiezen, kan in een groot gebied de juiste penetratie en lasvorm worden bereikt. De las bestaat uit een aantal elkaar overlappende puntlassen. Bij dunne plaat bedraagt de overlap zelfs 90%; bij dikkere materialen gaat de overlap naar 50%.



figuur 4.12 De warmtetoever aan de las tijdens de verschillende fasen van pulserend TIG-lassen

De voordelen van pulserend TIG-lassen zijn:

- ▶ het lassen van dunne plaat is aanmerkelijk eenvoudiger dan met continue stroom;
- ▶ het lassen in positie gaat beter. In de lage stroomperiode koelt het smeltbad af, zodat uitzakken van het bad voorkomen wordt;
- ▶ het lassen van werkstukken van verschillende dikte gaat beter;
- ▶ bij pijplassen zijn verschillen in spleetgrootte gemakkelijker op te vangen;
- ▶ II-naden in 6 mm dikke werkstukken zijn met pulserend TIG-lassen mogelijk.

Bovenstaande effecten worden bereikt bij een puls-frequentie die gelegen is tussen 0,3 en 20 Hz. Dus laagfre-

quent pulseren. Deze frequenties kunnen bereikt worden met een thyristorbron, maar tegenwoordig wordt hiervoor vrijwel altijd een transistorbron gebruikt.

Met nog hogere puls-frequenties kunnen andere effecten worden bereikt. Hierbij moet worden gedacht aan frequenties van 1000 tot 10.000 Hz. De twee belangrijkste redenen om deze hoge frequenties te gebruiken, zijn:

- ▶ stabilisering van de boog;
- ▶ het smeltbad zodanig in beroering brengen, dat er korrelverfijning optreedt (bijvoorbeeld bij het lassen van roestvast staal) dit is echter nooit wetenschappelijk bewezen!

Voor het toepassen van deze hoge puls-frequenties moet uiteraard gebruik worden gemaakt van transistor gestuurde stroombronnen.

Tot zover de stroomvormen bij het gelijkstroomlassen met de elektrode negatief. Een aantal metalen zijn echter niet of slechts moeizaam met gelijkstroom en elektrode negatief te lassen. Het ompolen (dus elektrode positief) of het lassen met wisselstroom biedt dan uitkomst.

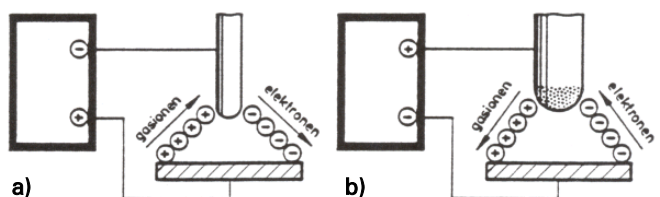
In tabel 4.3 is een overzicht gegeven van de combinatie materiaal - stroomsoort of polariteit elektrode.

In figuur 4.13 is zowel het lassen met de elektrode negatief als met de elektrode positief schematisch weergegeven. Figuur 4.13a toont de situatie wanneer de elektrode negatief is. De elektronen botsen in groten getale en met grote snelheid op het werkstuk. Zij geven er hun kinetische energie af. Hierdoor wordt het werkstuk plaatselijk zo verwarmd, dat er een diepe penetratie kan ontstaan. Verhoudingsgewijs wordt de elektrode maar weinig verhit. Weliswaar hebben de hierop botsende gasionen een grotere massa, maar de snelheid is zo gering, dat de kinetische energie van de gasionen in zijn totaliteit kleiner is.

tabel 4.3 Stroomsoort of polariteit elektrode als functie van het te lassen materiaal

materiaal	gelijkstroom		wisselstroom
	elektrode +	elektrode -	
niet gelegeerd en laag gelegeerd staal	nee	ja, zeer geschikt	mogelijk
hooggelegeerd, roestvast, hitte- en zuurbestendig staal	nee	ja, zeer geschikt	mogelijk
koper en koperlegeringen	nee	ja, zeer geschikt	mogelijk
aluminiumbrons	nee	mogelijk	ja
nikkel en nikkellegeringen	nee	ja	mogelijk
aluminium en aluminiumlegeringen	ja ¹⁾	ja ²⁾	ja
magnesium en magnesiumlegeringen	ja ¹⁾	ja	ja
titaan	nee	ja	nee

1) Met zeer lage stroom.
2) Slechts met speciale voorzieningen. (AVC - booglengthe regeling).



figuur 4.13 TIG-lassen met gelijkstroom. a) elektrode negatief; b) elektrode positief

Anders wordt het wanneer de elektrode positief is (figuur 4.13b). Dan botsen de elektronen op de elektrode. Deze wordt daardoor zo verhit, dat slechts kleine waarden van de stroom voor het lassen met positieve pool gebruikt kunnen worden. Zie hiervoor ook tabel 4.2 in § 4.5.

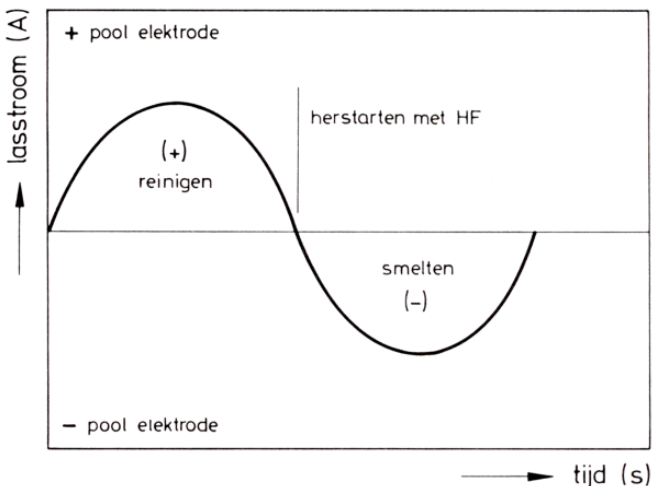
Zoals hierboven reeds werd opgemerkt, kunnen de meeste metalen worden gelast met de elektrode negatief. Een metaal zoals aluminium heeft echter zo'n dichte en hoogsmeltende oxidehuid, dat deze bij lassen met de elektrode negatief (dus het aluminium positief) niet doorbroken en verwijderd wordt (zoals nagenoeg steeds in de techniek, is er een uitzondering wanneer er speciale voorzieningen worden getroffen). In het geval dat het werkstuk negatief is, kan aluminium wel worden TIG-gelast.

De ionenstroom botst op een kleine plek van het aluminium en de oxidelaag wordt daar doorbroken. Doordat de kathodevlek zeer snel van plaats verwisselt gedurende het lassen, ontstaat er een brede zone van "gereinigd" aluminium. Aangezien er geen Al_2O_3 in die mate in de lasdampen voorkomt, moet er wel dissociatie van het oxide optreden, waarbij de zuurstof verdwijnt.

Met gelijkstroom is het dus mogelijk aluminium te lassen, als het werkstuk negatief is. De positieve elektrode wordt nu echter zo warm, dat er slechts zeer lage stroomsterkten kunnen worden toegepast. Verder is de penetratie van de las in het werkstuk vrij ondiep en de lasboog minder stabiel.

Een goed compromis wordt gevonden in het lassen met wisselstroom. Zoals dat in de figuren 3.4 en 4.8 is weergegeven, wordt met een aantal hulpmiddelen het lassen met wisselstroom mogelijk gemaakt: Het gelijkrichteffect tengevolge van de betere elektronenemissie van de elektrode ten opzichte van het werkstuk kan worden voorkomen, terwijl de boog na iedere nuldoorgang van de stroom opnieuw wordt gestart. Er ontstaat nu de situatie dat het werkstuk gedurende een halve periode (=0,01 sec.) negatief is. Het werkstuk wordt dan gereinigd van oxiden. Vervolgens is het werkstuk gedurende een halve periode positief. De op het (gereinigde) aluminium botsende elektronen zorgen nu voor het voldoende verhitten van de lasnaad. Het werkstuk smelt en een las met voldoende penetratie ontstaat. Daarna herhaalt het proces zich weer. Op deze wijze kan er een goede las ontstaan (zie ook figuur 4.14).

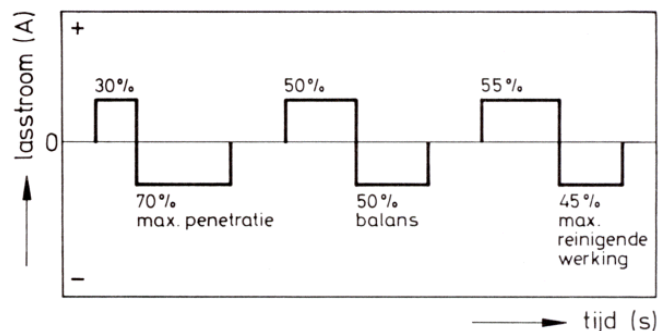
De elektrode wordt, tijdens de halve periode dat hij positief is, wel warm (de belastbaarheid is circa 30% minder), maar krijgt gedurende de volgende halve periode weer tijd om af te koelen. Zo kunnen nog acceptabele stroomsterkten worden gebruikt.



figuur 4.14 Schematische voorstelling van het achtereenvolgens reinigen en smelten van het werkstuk met wisselstroom

Met de elektronisch gestuurde stroombronnen - zowel thyristorbronnen als transistorbronnen - kan een blokvormige wisselstroom worden opgewekt (figuur 4.15), hetgeen tegenwoordig vrijwel altijd het geval is. Hierbij is de nuldoorgang zo snel, dat bij stromen boven 30 A geen ontstekingsmechanisme meer nodig is. Dit is natuurlijk zeer belangrijk wanneer er in een "elektronisch gevoelige" omgeving moet worden gelast.

De elektronische sturing maakt het ook mogelijk met de "reinigingstijd" en de "smelttijd" zodanig te spelen, dat een optimaal lasresultaat kan worden verkregen. De mogelijkheid hiertoe vinden we vaak op de stroombron aangegeven als de "balansknop of -instelling". Een voorbeeld hiervan is in figuur 4.15 gegeven.



figuur 4.15 Blokvormige wisselstroom met mogelijkheid tot sturing van de "reinigingstijd" en "smelttijd"

Hoofdstuk 5

Beschermgassen

Bij nagenoeg alle toepassingen van TIG-lassen worden de wolfraamelektrode, de boog en het smeltbad op het werkstuk beschermd tegen de omringende lucht. De voornaamste bestanddelen van de lucht zijn zuurstof en stikstof. Zuurstof heeft door zijn oxiderende werking zowel een vernietigende invloed op de elektrode, als op de te vormen las. Stikstof heeft bij het lassen van een aantal metalen door de vorming van metaalnitriden vooral een slechte invloed op het lasmetaal. Verder kunnen er bij aanwezigheid van stikstof en zuurstof in de boog stikstofdioxiden worden gevormd. Deze zijn, bij inademen, gevaarlijk voor de gezondheid.

Tengevolge van deze negatieve invloeden op het lasresultaat, moet de lucht uit de lasomgeving worden verdrongen door een adequaat gasscherm. Hiervoor worden pure edelgassen gebruikt, argon of helium. Ook wel worden mengsels ervan gebruikt, of mengsels van een van deze gassen met niet edelgassen.

Een ander belangrijk effect van het beschermgas is de invloed ervan op de boog eigenschappen. De benodigde energie om de gasatomen te ioniseren is voor elk der gassen of gasmengsels verschillend. Meeratomige gassen moeten eerst nog in de boog dissociëren. Dat kost extra dissociatie-energie.

5.1 Soorten beschermgas

Edelgassen vormen geen chemische verbindingen met andere elementen, dus ook niet met metalen bij hoge temperatuur. Daarom worden bij voorkeur edelgassen gebruikt bij de gasbescherming van TIG-lassen. Welk gas gebruikt wordt, hangt af van de aard van het metaal dat moet worden gelast. De meest gebruikte gassen - al of niet in mengsels - zijn:

► Argon (symbool Ar)

Argon is een inert gas (ook wel edelgas genoemd). Bij de bereiding wordt argon door distillatie afgescheiden uit de atmosfeer, waar het voor 0,9% in voorkomt. De soortelijke dichtheid van argon is groter dan die van lucht ($1,4 \times$). Dit maakt dat argon zeer geschikt is als beschermgas. Het "valt als een deken over het smeltbad". Voor lassen wordt argon met slechts zeer geringe verontreiniging gebruikt. De graad van zuiverheid is 99,99% Ar volgens de EN 439. Voor metalen die zeer oxidatiegevoelig zijn (o.a. titaan) wordt echter argon met een nog hogere graad van zuiverheid aanbevolen (99,999%).

Argon is het meest gebruikte beschermgas bij TIG-lassen. Dat heeft de volgende redenen:

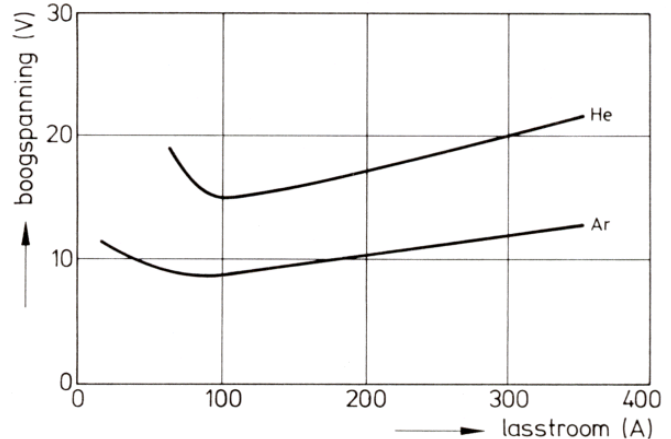
- argon is in vergelijking met helium betrekkelijk goedkoop;
- de boog bij TIG-lassen in argon is stabiel;
- argon heeft een dichtheid van $1,783 \text{ kg/m}^3$, dus ca. $1,4 \times$ zwaarder dan lucht, dus goede bescherming, vooral bij het onder de hand lassen, minder gevoelig voor zijwind;
- het geeft een relatief lage ontsteekspanning, waardoor de boog gemakkelijk start;
- tijdens het lassen is er sprake van een lage boogspanning.

► Helium (symbool He)

Helium is eveneens een inert gas. Het wordt gewonnen uit aardgas (0,14%). Zoals in § 4.2 reeds is vermeld, is

de ionisatie-energie van helium aanmerkelijk groter dan die van argon. Dit heeft tot gevolg dat de boogspanning van een heliumboog hoger is dan die van een argonboog. In figuur 5.1 zijn de boogspanningen van TIG-bogen uitgezet tegen de lasstroom.

Door die hogere spanning transporteert helium meer energie naar het werkstuk dan argon. Het gas wordt daarom gebruikt voor het lassen van werkstukken met grote afmetingen en voor metalen met een grote thermische geleidbaarheid, zoals koper.



figuur 5.1 De boogspanning van de TIG-boog als functie van de lasstroom bij gebruik van verschillende beschermgassen

Helium zorgt tengevolge van de hoge boogspanning voor een diepe penetratie van de las in het werkstuk. Ook de lassnelheid wordt door de hoge boogspanning beïnvloed. Deze wordt erdoor verhoogd ten opzichte van die bij het lassen in argon. Dit is vooral van belang voor gemechaniseerd lassen.

Een ander verschil met argon is de grotere warmtegeleiding van helium. Hierdoor wordt de boog sterk ingesnoerd. De smalle boog zorgt bij de zelfde stroom voor een hoge stroomdichtheid en daardoor voor een extra diepe penetratie.

Natuurlijk heeft helium ook nadelen als beschermgas bij TIG-lassen. In de eerste plaats is het gas in vergelijking met argon erg duur. Verder is helium het lichtste eenatomige gas: de dichtheid van helium is 10 maal zo klein als die van argon. Dat betekent dat er veel meer helium moet worden aangevoerd dan argon, om hetzelfde effect voor de gasbescherming te verkrijgen. De gashoeveelheden van helium moeten tussen 2 en 3 maal zo groot gekozen worden dan die wanneer argon als beschermgas wordt gekozen.

Een ander nadeel van helium is de moeilijke ontsteking van de boog. Dit is een gevolg van de hoge ionisatie-energie van het gas. In de praktijk wordt bij gemechaniseerd lassen eerst de TIG-boog in argon ontstoken; daarna wordt helium als beschermgas aangevoerd. TIG-lassen in een zuivere heliumatmosfeer wordt slechts in beperkte mate toegepast. Voorbeelden daarvan zijn het lassen van grote koperen werkstukken en dun koper met grote lassnelheden. Soms wordt het gas ook gebruikt bij het lassen van aluminium. Op dit laatste voorbeeld wordt in § 8.4 terug gekomen.

De eigenschappen van Helium:

- helium is relatief duur;
- het heeft een dichtheid van $0,178 \text{ kg/m}^3$, dus ca. $7 \times$ lichter dan lucht en $10 \times$ zo licht als argon; voor een goede bescherming moet men minimaal $2 \times$ zo veel gas toevoeren als bij argon;

- helium heeft een relatief hoge ontsteekspanning, waardoor de boog moeilijker start; er is een hoge open spanning vereist;
- helium veroorzaakt een hogere boogspanning, dat wil zeggen een hetere boog, waardoor de inbranding dieper wordt en/of het smeltbad smaller.

► Mengsels van argon en helium

Mengsels van argon en helium worden steeds meer gebruikt en vormen vaak een compromis: Een goede boogstabiliteit wordt gecombineerd met diepe penetratie en/of grotere lassnelheid. In tabel 5.1 is bij gelijk blijvende stroom, voor een drietal gasmengsels de boogspanning en de lassnelheid gegeven.

tabel 5.1 TIG-lassen van 16 mm dik AIMg₃, dubbele V-naad

gasmengsel [%]	lasstroom [A]	boogspanning [V]	lassnelheid [m/min]
100 Ar	400	29	0,45
70 Ar + 30 He	400	31	0,50
30 Ar + 70 He	400	33	0,60

► Stikstof

Stikstof is een meeratomig gas: N₂. Twee-atomige gasen transporteren meer warmte dan één-atomige gasen. Aan het werkstuk wordt naast de ionisatie-energie nu ook nog de dissociatie-energie afgegeven. Zuiver stikstof wordt slechts sporadisch bij TIG-lassen toegepast. Wel als mengsel met argon en dan alleen nog maar een enkele keer voor het lassen van staal en roestvast staal. Stikstof wordt dan zeker in het lasmetaal opgenomen. De corrosieweerstand gaat hierdoor sterk achteruit, terwijl er ook verbrossing optreedt. Tevens kan poreusheid van de las het gevolg zijn.

Stikstof is bij kamertemperatuur inert maar niet bij de hoge temperaturen die in de lasboog heersen.

► Waterstof

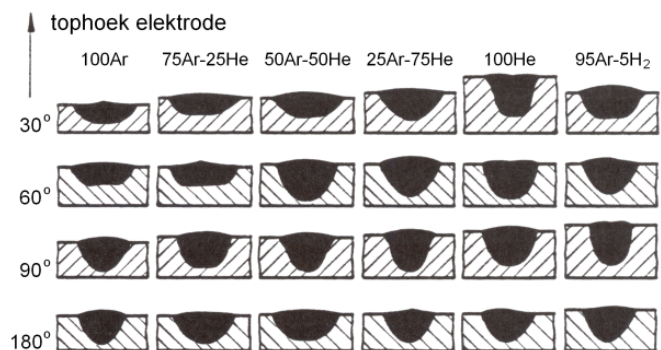
In pure vorm wordt waterstof bij het TIG-lassen niet toegepast. Wel als mengsel met argon. Toevoeging van waterstof aan argon heeft een (iets) hogere boogspanning tot gevolg. De aan het werkstuk overgedragen energie wordt ook daarom groter. Typische toevoegingen zijn 2% en 5% H₂ aan argon. Austenitische staalsoorten en nikkel worden er mee gelast. Een voordeel van waterstoftoevoeging is, dat het gas licht reducerend wordt. Schonere lassen zijn het gevolg. De boog is licht

ingesnoerd, waardoor grotere lassnelheden mogelijk zijn. Ook ontstaat er een diepere penetratie.

Belangrijk: Bij laaggelegeerd staal kan toevoeging van waterstof aan het beschermgas scheuren van de las tot gevolg hebben (waterstofscheuren). Verder kan de las in ferritische stalen, aluminium en koper poreus worden; vooral bij meermalen lassen. Verder treedt bij koper verbrossing op.

In tabel 5.2 zijn een aantal gassen en gasmengsels vermeld, met de daarbij behorende eigenschappen en toepassingsgebieden.

In figuur 5.2 is voor een aantal verschillende gassen en gasmengsels de penetratiediepte van de las getoond. Bij de kleinere tophoeken (vooral 30°) van de wolframelektrode is het duidelijk dat de penetratie van de las in het werkstuk bij toenemend helium groter wordt. Ook voor waterstoftoevoeging aan argon geldt: diepere penetratie van de las.



figuur 5.2 De penetratiediepte van de las in roestvast staal bij een lasstroom van 200 A als functie van de gassenstelling en de tophoek van de wolframelektrode

Verrassend is de invloed van de tophoek van de wolframelektrode. Hoe stomper de tophoek, des te dieper is de penetratie van de las in het werkstuk. De invloed van de gassenstelling wordt door het vergroten van de tophoek al snel overschaduwd. Hetzelfde geldt voor de variaties in booglengte, m.a.w. de invloed van de tophoek op de inbranding kan alleen maar vastgesteld worden bij het gemechaniseerd lassen.

tabel 5.2 Beschermgassen voor TIG-lassen

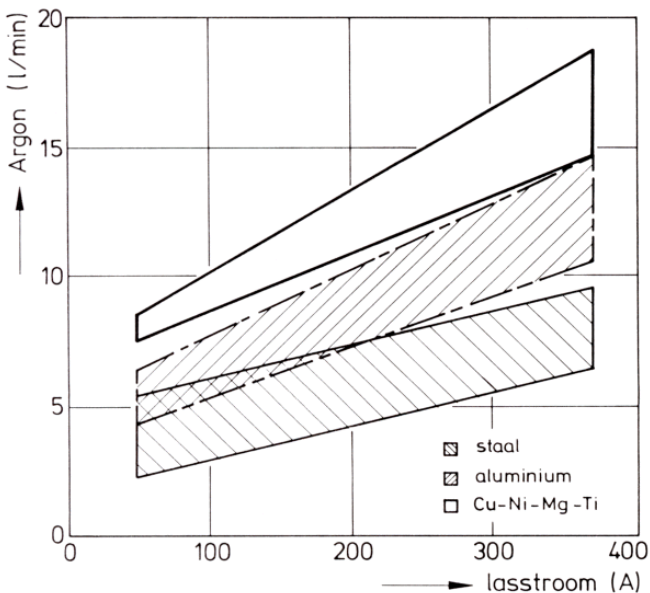
Gas of gasmengsel	Metalen die ermee gelast kunnen worden	Bijzonderheden
Argon	Alle metalen	Betrekkelijk goedkoop. Goede ontsteekeigenschappen van de boog. Stabiele boog.
Helium	Koper, aluminium en hun legeringen bij grotere materiaaldikten	Duur. Meer gasverbruik dan argon. Slechte ontsteekeigenschappen. Minder stabiel. Diepe penetratie. Grote lassnelheid.
75% Ar + 25% He	Nikkel, koper en hun legeringen	Goede ontsteekeigenschappen. Stabiele boog. Goede penetratie.
70% Ar + 30% He		
50% Ar + 50% He	Al en Al-legeringen Cu en Cu-legeringen	Ontsteekeigenschappen worden minder. De boog wordt warmer.
25% Ar + 75% He		
30% Ar + 70% He		
Ar + 2% H ₂	Roestvast staal	Vooral met 5% H ₂ een ingesnoerde boog.
Ar + 5% H ₂		
Stikstof (N ₂)	Koper	Wordt slechts in uitzonderingsgevallen gebruikt. Wegens de vorming van NO en NO ₂ : goed afzuigen!

Van groot belang voor de bescherming van het smeltbad, maar ook voor de stabiliteit van de boog, is de hoeveelheid gas die per tijdseenheid door het mondstuk stroomt. In feite komt het erop neer, dat de gasstroom zodanig moet zijn, dat de totale hoeveelheid lucht in de omgeving van de boog en het smeltbad verdrongen wordt door het beschermgas.

De optimale gashoeveelheid is afhankelijk van een aantal procesparameters:

- ▶ de afmetingen van het mondstuk;
- ▶ het soort beschermgas;
- ▶ het werkstukmateriaal;
- ▶ de laspositie;
- ▶ de "zijwind" of tocht;
- ▶ de hoek van de lastoorts met het werkstuk;
- ▶ de lasstroom;
- ▶ de vorm van de lasnaad.

Wanneer we aannemen dat de diameter van het gasmondstuk aangepast wordt aan de lasstroom, kan er een verband worden aangegeven tussen de lasstroom en de hoeveelheid beschermgas (figuur 5.3).



figuur 5.3 De hoeveelheid beschermgas als functie van de lasstroom

Natuurlijk is de aangegeven hoeveelheid slechts een indicatie voor de lasser om per geval de dan noodzakelijke hoeveelheid te bepalen. Zoals in de figuur is vermeld, gelden de daar gegeven waarden voor argon. Wanneer er helium wordt gebruikt of een mengsel met een overmaat aan helium, dan moeten de waarden uit de figuur worden vermenigvuldigd met een factor 2,5. De hoeveelheden voor argon-helium mengsels met zo'n 70% argon worden gevonden door de waarden van de figuur te vermenigvuldigen met ca. 1,5.

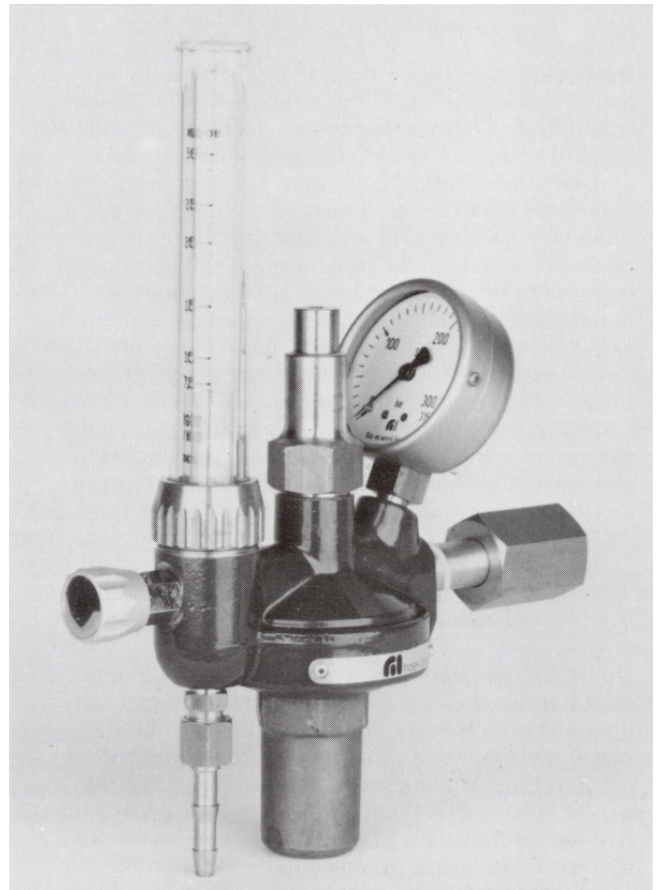
Van groot belang is ook eventuele zijwind. Wanneer deze voelbaar is, moeten bovenstaande waarden al gauw met een factor 1,5 - 2 worden vermenigvuldigd. Parool is echter zijwind of tocht te vermijden bij het TIG-lassen.

5.2 Meten en sturen van de gashoeveelheid

Voor de voorziening van het beschermgas wordt het TIG-apparaat aangesloten op een stalen gascilinder of een centrale leiding. Vooral wanneer met helium of gasmengsels wordt gelast, is men aangewezen op gascilinders.

Deze bevatten het gas onder hoge druk: 150 tot 300 bar. De inhoud van de cilinders is 40 of 50 liter. De cilinder wordt voorzien van een reduceerventiel. Hiermee wordt de hoge druk van het gas in de fles gereduceerd tot de werkdruk.

In figuur 5.4 is zo'n reduceerventiel afgebeeld. In een of twee stappen wordt de druk gereduceerd. Achter het reduceerventiel wordt de doorstroomhoeveelheid van het gas gemeten. Vervolgens wordt het gas via een slang naar het lasapparaat geleid. In het lasapparaat bevindt zich een magneetventiel dat de gastoevoer naar de lastoorts regelt.

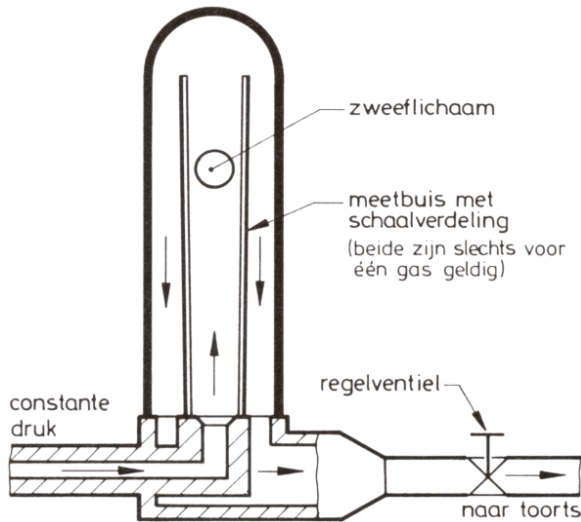


figuur 5.4 Reduceerventiel en gassnelheidsmeter

De lasser zorgt ervoor, dat het gasventiel kort voor het lassen wordt geopend. Er is ook een inrichting in het lasapparaat dat zorgt voor het nastromen van het gas gedurende korte tijd na het lassen. Hierdoor wordt voorkomen dat het nog vloeibare lasmetaal en de wolframelektrode aan de lucht oxideren. In de regel bestaat zo'n gasstroomregeling uit een elektronische schakeling, die het gasventiel na enige tijd uitschakelt. De lasser moet dan uiteraard wel de lastoorts op het smeltbad gericht houden.

Het instellen van de juiste gashoeveelheid is voor het lasresultaat van groot belang. De meeste TIG-apparaten hebben een zogenaamde gasdoorstromingsmeter voor het meten van de gassnelheid. In figuur 5.5 is de doorsnede van een gasdoorstromingsmeter (ook wel rotameter of flowmeter genoemd) afgebeeld (zie eveneens de gassnelheidsmeter in figuur 5.5). In een verticaal geplaatste, conisch uitlopende, glazen buis bevindt zich een kogeltje of ander vlotterlichaam, dat door het uitstromende gas omhoog wordt bewogen. Hoe groter de gassnelheid, des te hoger bevindt zich het kogeltje in de buis. Via de schaalverdeling op de glazen buis kan men de gassnelheid afle-

zen. De glazen buis moet, voor een juiste meting, wel goed verticaal staan. Verder moet de druk van het binnenkomende gas op een bepaalde (op de meter aangegeven) waarde worden ingesteld. Soms bevindt zich een dergelijke meter op het reduceerventiel.



figuur 5.5 Rotameter of "flowmeter"

Door allerlei oorzaken kunnen bij dit type meters toch nogal wat verschillen in de gashoeveelheden voorkomen. Vooral wanneer er wordt gewisseld van lastoorts met een ander slangenpakket en een andere uitstroombiameter, kan de flowmeter een verkeerde waarde aanwijzen. In die gevallen waar een juiste gasdosering van zeer groot belang is, bijvoorbeeld bij gemechaniseerd lassen van dunne plaat, of in de massafabricage, worden andere meetsystemen gebruikt. Met een van die systemen wordt de gashoeveelheid niet alleen gemeten, maar ook geregeld. Dit wordt gedaan met een zogenaamde Mass-Flow-Controller. Door het meten van een aantal fysische eigenschappen van het gas, wordt zeer precies het aantal passerende gasdeeltjes gemeten. Onafhankelijk van druk en temperatuur wordt de gevraagde hoeveelheid gas steeds geleverd.

5.3 Gasbacking of formeren

De achterzijde van een lasnaad wordt in de regel door het beschermgas niet bereikt; zeker niet om daar voldoende bescherming te geven. Voor materialen met een grote affiniteit tot zuurstof moeten maatregelen worden getroffen, opdat de achterzijde van de las niet oxideert. We denken dan aan metalen als titaan, molybdeen, maar ook aan roestvast staal. De corrosiebestendigheid van roestvast staal wordt door oxidatie aanzienlijk minder. De lasen moeten beschermd worden tot de temperatuur beneden de 200 °C is gedaald.

De verzamelnaam van die gassen, die voor dit doel worden gebruikt is backinggas. Natuurlijk kan hiervoor zuiver argon of stikstof worden genomen, maar in de regel wordt aan deze gassen waterstof toegevoegd, vanwege de reducerende werking. Standaard gassen die als backinggas kunnen dienen, zijn: argon of stikstof al of niet met 0,5 - 50% waterstof (volgens EN 439). Naarmate het gas meer waterstof bevat, neemt de reducerende werking toe. Te hoog mag het waterstofgehalte ook weer niet zijn, anders zou er in combinatie met zuurstof uit de lucht knalgasvorming kunnen optreden. Bij een waterstofgehalte boven 10% moet worden afgefakkeld.

Het backinggas verdringt in de eerste plaats de aanwezige lucht. Mocht dat niet helemaal lukken, dan wordt de rest-zuurstof verbrand met het waterstof. De zo ontstane waterdamp wordt met het backinggas afgevoerd.

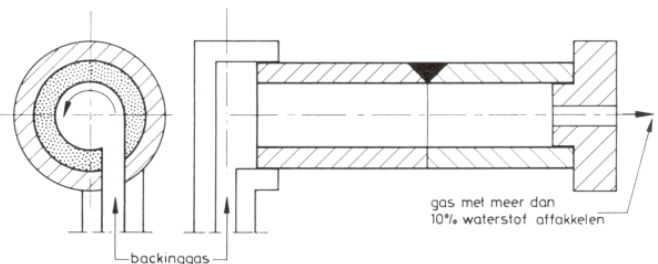
Gassen die waterstof en/of stikstof bevatten, worden uitsluitend gebruikt voor roestvast staal. Voor de kritische metalen, zoals titaan en molybdeen, wordt zuiver argon gebruikt. De verdringing van de lucht moet dan wel zeer doeltreffend gebeuren!

5.4 Een aantal methoden voor het aanbrengen van backinggas

Hieronder worden een aantal methoden aangegeven om het backinggas aan te brengen. Natuurlijk kan deze beschrijving slechts zeer globaal zijn. In de praktijk zullen de werkstukken te veel van elkaar verschillen, om hier eenduidige methoden te kunnen voorschrijven.

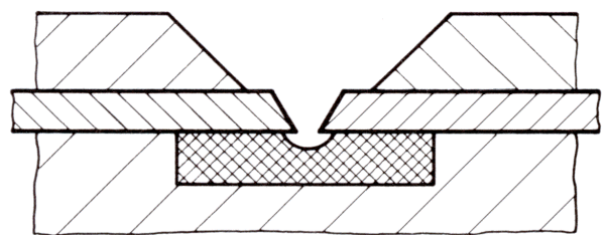
Het eenvoudigste geval lijkt het lassen van een pijp. De binnenzijde ervan zou kunnen worden beschermd door de pijp aan beide zijden af te dichten en er dan het backinggas door heen te blazen. Doordat het backinggas altijd van soortelijke dichtheid (dus van gewicht) verschilt met lucht, is de kans groot dat er toch "luchtzakken" aanwezig blijven.

Beter is het in de "afdichtstop" aan de inblaszijde een tangentele invoer van het backinggas te maken. Door nu het gas op deze wijze in te blazen, wordt de lucht in de pijp langs de gehele inwendige omtrek afgevoerd (zie figuur 5.6)!



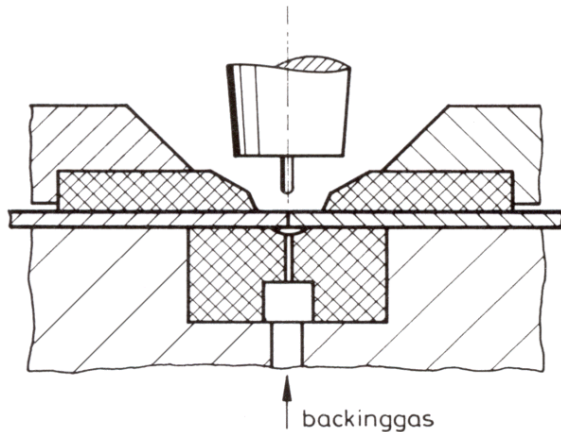
figuur 5.6 Het tangenteel inblazen van een backinggas in een pijp

Voor het lassen van plaatmateriaal zijn er weer andere voorzieningen nodig. Enkele hiervan zijn afgebeeld in de volgende figuren. Het eenvoudigste is (of lijkt) een open I- of V-naad (figuur 5.7). Door een onderlegstrip (bijvoorbeeld koper, al of niet watergekoeld) te gebruiken met een halfronde groef, lijkt de voorwaarde geschapen dat het beschermgas uit de toorts zich door de opening van de naad verspreidt tot onder het werkstuk in de groef van de onderlegstrip. Ook hier is echter het gevaar groot, dat er "luchtzakken" blijven hangen, waardoor er toch nog oxidatie optreedt.



figuur 5.7 Koperen onderlegstrip met een groef. Het beschermgas van de toorts wordt in de groef geblazen en zorgt zo enigszins voor een "backing"

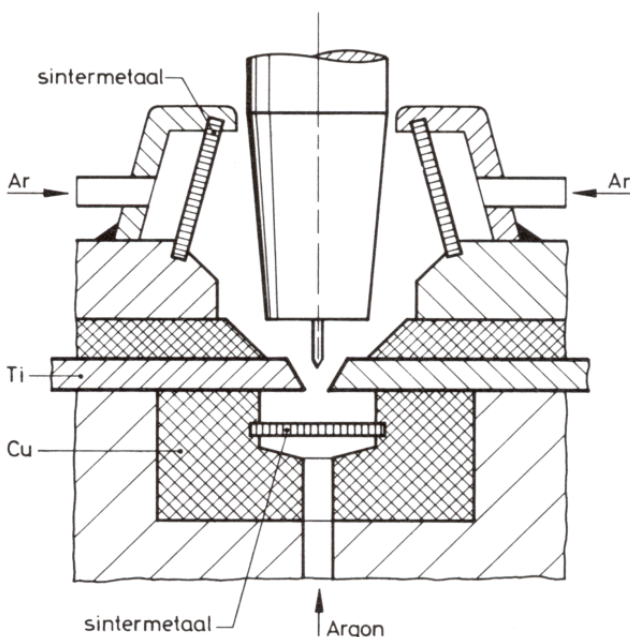
Beter is om ook in dit geval de oplossing te kiezen die nodig is voor het lassen van een gesloten naad. Dat is afgebeeld in figuur 5.8. Hier wordt het gas aangevoerd vanuit een kamer onder de onderlegstrip. In deze kamer heerst enigszins een overdruk van het backinggas. Via een spleet of een aantal gaatjes in de onderlegstrip wordt het gas onder de naad geblazen. Beter zou nog een poreus filter van sintermateriaal (koper) zijn. Zo'n filter garandeert een laminaire gasstroom die alle lucht verdrijft.



figuur 5.8 Een betere aanvoer van het backinggas via een spleet in de onderlegstrip. Hierdoor ontstaat er een gelijkmatige stroming van het gas

Voor het lassen van roestvast stalen pijpen wordt ook wel gebruik gemaakt van z.g. "inserts". Deze worden vanonder in de naad aangebracht. Bijkomende voordelen zijn, dat de pijpdelen gefixeerd zijn en er geen toevoegmateriaal nodig is.

Wanneer zeer oxidatie gevoelige metalen moeten worden gelast, zoals bijvoorbeeld titaan, dan kunnen er voorzorgen worden genomen, zoals is afgebeeld in figuur 5.9. Hierbij wordt de onderzijde weer voorzien van een laminair stromend gas via een sintermateriaal. Hetzelfde gebeurt aan de zijkanten van de toorts. Deze wordt nog eens extra omgeven door een gasmondstuk, waardoor het gas ook via een sintermateriaal wordt aangevoerd. Wellicht kan men in zo'n geval beter in een "couveuse" lassen.



figuur 5.9 Inrichting voor het lassen van zeer oxidatiegevoelige metalen

Hoofdstuk 6

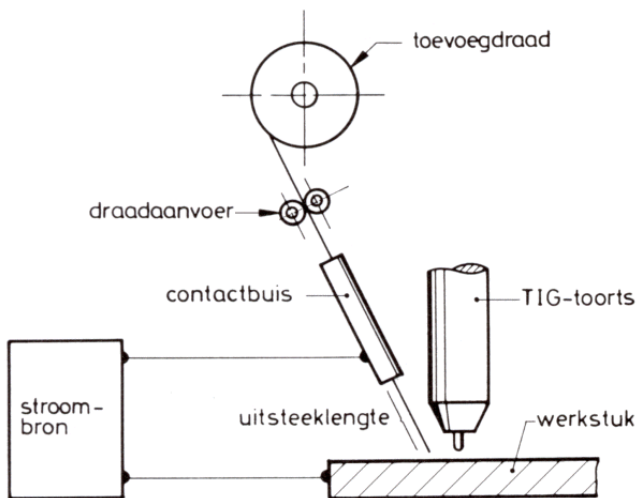
Procesvarianten van TIG-lassen

Veel van de hierna genoemde varianten van het TIG-lassen worden slechts op kleine schaal toegepast of kennen een specifiek toepassingsgebied. Voor de volledigheid van deze publicatie worden deze varianten kort besproken.

6.1 TIG Hot Wire

Bij TIG-lassen wordt in een aantal gevallen toevoegmateriaal gebruikt. Zoals reeds in § 2.2 is vermeld, gebeurt dat bij TIG-handlassen door een staaf toevoegmateriaal met de hand voor in het smeltbad te brengen. Bij gemechaniseerd TIG-lassen wordt een toevoegdraad vanaf een haspel automatisch voor in het smeltbad gevoerd. Wanneer deze toevoegdraad door middel van een elektrische stroomdoorgang wordt verwarmd, spreken we van TIG Hot Wire ofwel TIG warme draad lassen.

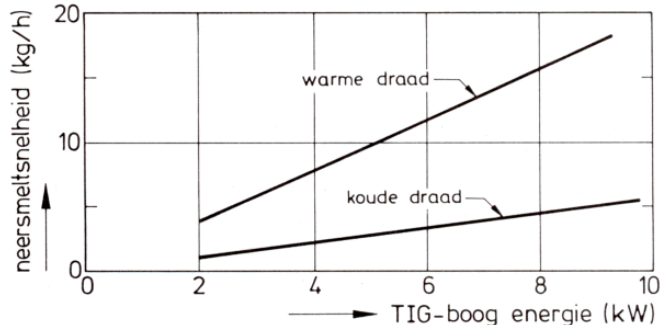
De term "hot wire" is zo ingevoerd in de lastechniek, dat we hem verder onvertaald zullen gebruiken. Het lassen met een extra hete toevoegdraad wordt bij een aantal booglasprocessen toegepast. In alle gevallen is het de opzet de neersmeltsnelheid van het proces te vergroten. In figuur 6.1 is een opstelling voor het TIG Hot Wire lassen geschetst.



figuur 6.1 Een schematische weergave van het TIG Hot Wire proces

Essentieel bij het TIG Hot Wire lassen is dat de lasdraad direct achter de lastoorts in het smeltbad wordt ingevoerd. Met behulp van een stroombron, waarvan de polen respectievelijk zijn aangesloten op de contactbuis van de toevoegdraad en het werkstuk, wordt een wisselstroom door de toevoegdraad gestuurd. Er wordt een wisselstroombron genomen om magnetische beïnvloeding van de lasboog te voorkomen. Deze stroom heeft een zodanige waarde, dat de draad door weerstandverhitting (I^2R) bijna tot aan het smeltpunt verhit wordt. Wel moet de stroom naar boven begrensd zijn, zodat de draad niet doorsmelt en er geen boog ontstaat. Dit laatste wordt ook bereikt door als stroombron een bron met constante spanning te nemen. De spanning wordt dan zo laag gekozen dat er geen boog kan ontstaan.

In figuur 6.2 is voor TIG-lassen met toevoegdraad de neersmeltsnelheid weergegeven als functie van de boogenergie. Het is duidelijk dat er met TIG Hot Wire neersmeltsnelheden bereikt kunnen worden die vergelijkbaar zijn met MIG/MAG-lassen. Doordat er nauwelijks een afkoelende werking van het toevoegen van de warme draad uitgaat, kan de boogenergie voor een belangrijk deel voor het verhogen van de lassnelheid worden gebruikt. Dit blijkt uit tabel 6.1.



figuur 6.2 De neersmeltsnelheid bij TIG-lassen met warme en koude toevoegdraad

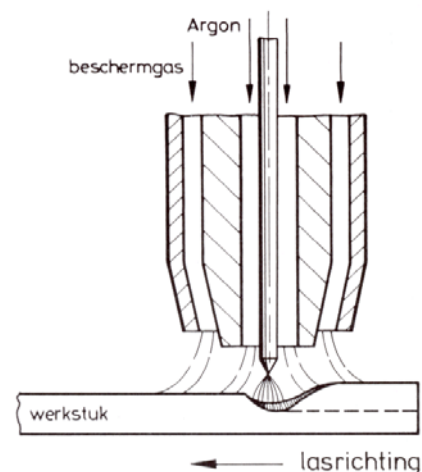
tabel 6.1 Vergelijking van de lassnelheden bij TIG-lassen met koude en warme toevoegdraad. I-naad in roestvast staal met koperen onderlegstrip. Beschermgas 25% Argon + 75% Helium

plaatdikte	boogstroom	TIG-lassen met toevoegdraad		
		koude draad	warme draad	
mm	A	lassnelheid cm/min	draadstroom A	lassnelheid cm/min
1,5	160	65	300	90
2,5	220	35	360	75
3,0	250	30	410	60
5,0	350	18	450	30
6,5	400	10	480	20

Bij gelijkblijvende penetratie van de las in het werkstuk, kunnen bij TIG Hot Wire 1,5 tot 2 maal zo hoge lassnelheden worden gehaald, in vergelijking met TIG-lassen met koude draad toevoer.

6.2 Dubbelgas TIG-lassen

Bij dit proces worden twee gassen concentrisch om de wolframelektrode en de boog aangevoerd. In figuur 6.3 is het principe van het proces weergegeven.



figuur 6.3 Dubbelgas TIG-lassen

De toorts bestaat uit een binnenmondstuk en een buitenmondstuk. Beide omgeven de wolfraamelektrode concentrisch. Het binnenmondstuk laat slechts een nauwe spleet vrij met de wolfraamelektrode. Het hierdoor stromende inerte gas (centrale gas) omgeeft ook de boog zo nauw en met zo'n snelheid, dat deze sterk wordt ingesnoerd. Het gevolg is een diepe penetratie van de las in het werkstuk. Dit effect wordt nog versterkt, wanneer als beschermgas (het buitengas) een mengsel van argon en waterstof wordt genomen. Het waterstof zorgt in dit gas voor een reducerend milieu en daardoor voor een goede bescherming tegen de zuurstof. Tevens dissocieert het waterstof aan de buitenwand van de boog. De dissociatiewarmte die aan de boog wordt onttrokken en de goede warmtegeleiding van het waterstof doet de TIG-boog nog meer insnoeren. Met dubbelgas TIG-lassen is het mogelijk grotere lassnelheden te bereiken dan met gewoon TIG-lassen. Bij het lassen van ongelegeerd staal kan een goede bevochtiging van de laskanten worden verkregen, door als beschermgas een argon-CO₂ mengsel te kiezen; bijvoorbeeld 80% Ar + 20% CO₂.

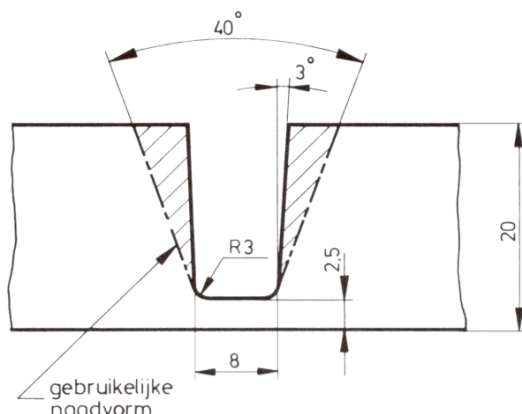
6.3 Meerelektroden TIG-lassen

Hierbij worden een aantal - meestal drie - wolfraamelektroden achter elkaar in de lasrichting geplaatst. De onderlinge afstand wordt zo gekozen, dat er slechts één smeltbad ontstaat. De eerste elektrode zorgt voor een begin van de penetratie, terwijl de laatste dient voor de uiteindelijk benodigde diepte van de penetratie en tevens voor een goed, glad uiterlijk.

Het zal duidelijk zijn, dat ook met deze methode hoge lassnelheden kunnen worden bereikt. Deze methode wordt slechts sporadisch toegepast.

6.4 TIG Narrow Gap lassen

Deze methode wordt alleen gebruikt in combinatie met een toevoegdraad. In figuur 6.4 is een V-naad in een 20 mm plaat afgebeeld. Er is een aantal methoden om deze naad te lassen. In alle gevallen moet echter de hoeveelheid materiaal neergesmolten worden, die nodig is om de groef te vullen. Bij TIG-lassen is het mogelijk de naad aanmerkelijk in de breedte te verkleinen. In plaats van een V-naad wordt het dan een naad met twee parallelle kanten. Ook deze is in de figuur aangegeven.



figuur 6.4 De naadvorm zoals die wordt gebruikt bij TIG Narrow Gap lassen

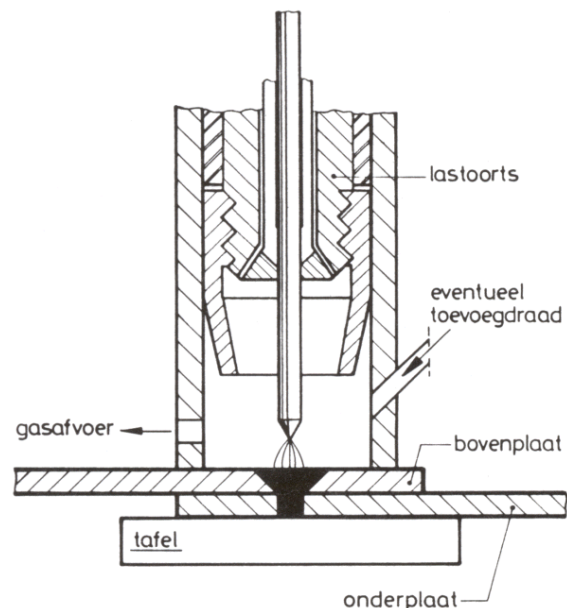
Het is duidelijk dat de hoeveelheid lasmetaal aanmerkelijk minder is dan bij de gebruikelijke V-naad. In dit geval is dat zo'n 35% minder. In vergelijking met een snel lasproces, als het lassen onder poeder, is het TIG Narrow Gap lassen sneller. Deze grotere lassnelheid gaat op tot een

plaatdikte van 40 mm. Daarboven is het onder poeder lassen sneller.

Er moet hier wel worden opgemerkt dat deze methode erg kritisch is wat betreft het omsmelten van de zijanten van de naad. De boog is naar beneden gericht. De zijanten moeten smelten tengevolge van de zijdelingse convectorie en straling van de boog. Beter zou het zijn om de boog naar de zijanten te richten. Dit kan worden gedaan door de boog met een transversaal magneetveld te pendelen. Dat pendelen gebeurt loodrecht op de lasrichting. Deze methode is beperkt tot plaatdikten kleiner dan 20 mm. En dan is het nog moeilijk als het te lassen metaal ferromagnetisch is. Daarom is bij de wat grotere plaatdikten de naad niet parallel, maar is boven iets wijder dan onderin. Uiteraard wordt deze methode volledig gemechaniseerd toegepast. De elektrode moet zeer precies gepositioneerd worden. Vaak wordt er met sensorsystemen gewerkt om de positie van de elektrode te handhaven.

6.5 TIG-puntlassen

Dunne metalen platen, die op elkaar liggen en goed op elkaar aansluiten, kunnen met behulp van het TIG-proces door middel van een puntlas aan elkaar worden verbonden. In tegenstelling tot het weerstandlassen wordt de las niet tussen de plaatdelen gelegd, maar wordt de bovenste plaat doorgelast op de onderste plaat. Vooral op die plaatsen, die moeilijk en slechts van een zijde bereikbaar zijn, heeft TIG-puntlassen zijn kansen in plaats van het gebruikelijke weerstandpuntlassen. In figuur 6.5 is het proces schematisch weergegeven.



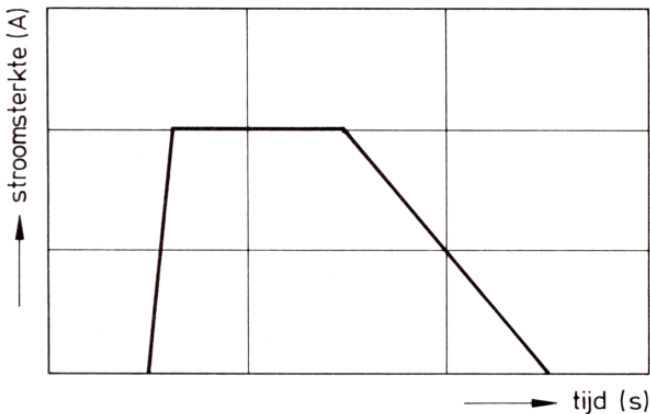
figuur 6.5 Schematische weergave van het TIG-puntlassen

Tussen de wolfraamelektrode en het werkstuk wordt een boog ontstoken. Deze boog wordt zolang onderhouden, tot dat beide plaatdelen over een bepaalde diameter zijn gesmolten. Het contact tussen de platen wordt zo goed mogelijk gegarandeerd, doordat het mondstuk van de toorts op de bovenste plaat drukt.

Meestal wordt gebruik gemaakt van een speciaal gasmondstuk. Dit gasmondstuk kan op het werkstuk worden geplaatst, waarbij de afstand tussen de elektrode en het plaatmateriaal gefixeerd is.

De pulstijd van de boog wordt gestuurd met een elektronische timer. Zo'n stroompuls kan eruit zien zoals in fi-

guur 6.6 is afgebeeld. De up-slope van de stroom is eigenlijk niet nodig. Het is zelfs beter om deze zo klein mogelijk te kiezen. Dat is bevorderlijk voor een goede start. De down-slope is echter bijna altijd noodzakelijk om kraterscheuren te voorkomen. Zelfs is het in sommige gevallen nodig om gedurende de down-slope wat draad in het smeltbad te voeren.



figuur 6.6 De stroom van een TIG-puntlas als functie van de tijd

Hoewel TIG-puntlassen ook met wisselstroom mogelijk is, wordt het proces in de regel met gelijkstroom uitgevoerd. De elektrode is dan negatief. De vorm van de doorsnede van de puntlas (nugget) is afhankelijk van de warmtegeleidbaarheid van de te lassen platen, de oppervlaktetoestand van de platen, de lasstroom, de vorm van de elektrodepunt en de afstand tussen de elektrode en de plaat. De dikte van de plaat aan de zijde van de toorts is uiteraard aan een limiet gebonden. Deze grens ligt bij 2-2,5 mm.

6.6 *Single Puls TIG-lassen*

In feite verschilt de uitvoering hiervan slechts weinig met die van het hiervoor beschreven puntlassen. Alleen wordt voor het single puls TIG-lassen een normale TIG-toorts gebruikt. Deze methode wordt zeer veelvuldig toegepast in de elektrotechnische en fijnmechanische industrie. Voorbeelden van toepassingen zijn: het verbinden van dunne draadjes aan dunne plaat, bijvoorbeeld koperdraad aan messing plaat. De draden en de platen kunnen in dikte variëren van 0,1 tot 1 mm. Hierbij worden stroompulsen gebruikt zoals afgebeeld in figuur 6.6. De stroom wordt zeer nauwkeurig gedimensioneerd, en heeft een waarde tussen 1 en 50 A, terwijl de pulstijd ligt tussen 10 en 100 ms. Bij dikkere materialen (bijvoorbeeld 1-2 mm) zijn de lasparameters in de orde van grootte van 100 - 200 A en 0,5-2 s.

6.7 *"A-TIG-lassen"*

Bij het A(ctivated)-TIG-lassen wordt een pasta of spray op de te lassen naad gesmeerd. De pasta of spray zorgt ervoor, dat tijdens de passage van de boog, er met name een verlaging van de oppervlaktespanning van het smeltbad en een verhoging van de ionisatiegraad van het beschermgas ontstaan, zodanig, dat een diepere inbranding wordt verkregen.

Hoofdstuk 7

Toepassingen van TIG-lassen

Bij de toepassingen van TIG-lassen moet er onderscheid worden gemaakt tussen handlassen en gemechaniseerd lassen. In alle gevallen moet er een aantal lasparameters zeer precies worden ingesteld, om de hoge kwaliteit, waarvoor TIG-lassen juist gebruikt wordt, ook te halen. Zowel voor handlassen als gemechaniseerd lassen zal daar een aantal voorbeelden van worden gegeven.

7.1 Handlassen

De fabrikanten van lasapparatuur hebben er alles aan gedaan om de lastoorts voor de TIG-handlasser zo compact, licht en handzaam mogelijk te maken. Zoals reeds bleek in figuur 3.3 is er een groot aantal mogelijkheden om voor een bepaalde toepassing de juiste TIG-toorts te kiezen. Er wordt van de TIG-lasser een gespecialiseerde opleiding verlangd. Hij is dan in staat te beantwoorden aan de specifieke eisen die aan het TIG-lassen met de hand worden gesteld. Zo moet bijvoorbeeld de lasser een constante booglengte aanhouden van ongeveer 1,5 mm. Dit is om een tweetal redenen erg belangrijk. In de eerste plaats zal een verandering van booglengte van bijvoorbeeld 0,5 mm reeds een verandering van de lasbreedte van ca. 15% veroorzaken. Zijn de schommelingen in de afstand tussen elektrode en werkstuk nog groter, dan kan de elektrode het werkstuk of het lastoefoegmateriaal raken. De vervuiling van de elektrode die hierdoor ontstaat kan aanzienlijke veranderingen van de booigeigenschappen tot gevolg hebben.

Wanneer met een toevoegdraad wordt gelast, moet de lasser er voor zorgen, dat het gesmolten uiteinde niet in contact kan komen met de lucht. De punt van het lastoefoegmateriaal wordt gesmolten door hem in contact te brengen met de boog, terwijl het afsmelten moet gebeuren wanneer de draad in het smeltbad wordt gedoopt.

In deze voorlichtingspublicatie zal de houding van de lasser tijdens het TIG-lassen niet worden besproken. Toch moet worden opgemerkt dat bij het voorbereiden van het lassen er zorg voor moet worden gedragen, dat het bewegen van de toorts zonder schokken gebeurt. Het spangereedschap moet corresponderen met de vereiste las kwaliteit. Het optreden van zijwind moet worden voorkomen. Om voldoende zicht op de lasnaad, het smeltbad en de tip van de elektrode te hebben, is het aan te bevelen dat de lasser, indien mogelijk, naar zich toe last. Kortom, een goede lasopleiding is onontbeerlijk!

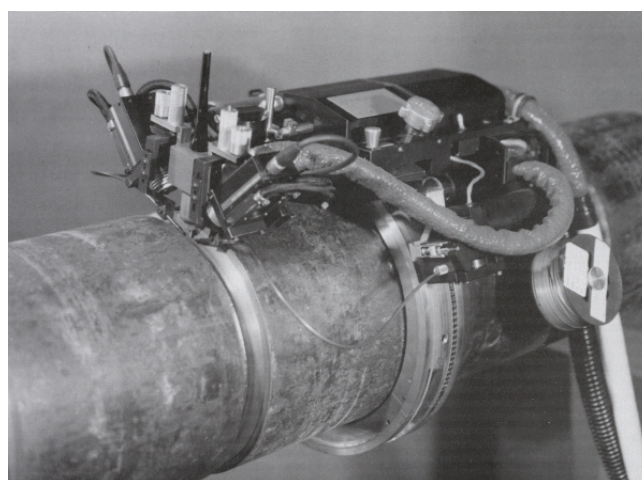
Het Nederlands Instituut voor Lastechniek heeft in de loop der jaren een uitgebreide opleidingsstructuur opgezet, die bewezen heeft ruimschoots aan de eisen van de industrie te voldoen. Daarnaast zijn er sedert 2000 ook internationale handvaardigheidsopleidingen, opgezet door het internationale lasinstituut IIW, die door het NIL in ons land worden aangeboden. Meer inlichtingen hierover zijn te verkrijgen op de website van het NIL (www.nil.nl).

Het TIG lassen met de hand is een relatief langzaam proces met name als de materiaaldikte boven de 4 mm komt. Tevens is de inschakelduur van het TIG-lassen laag (< 15%). Beide factoren maken het TIG-handlassen economisch niet aantrekkelijk. Toch wordt er veel TIG met de hand gelast. De reden hiervan is dat het handlassen zeer beheerst verloopt, waardoor een uitstekende kwaliteit van de verbinding verkregen wordt.

7.2 Gemechaniseerd TIG-lassen

TIG-lassen is een proces dat zich uitstekend leent om gemechaniseerd toe te passen. Vooral wanneer een hoge en constante las kwaliteit wordt vereist, worden met gemechaniseerd TIG-lassen uitstekende resultaten bereikt. Een voorbeeld hiervan is de petrochemische industrie, waar het proces reeds vele jaren met succes wordt toegepast. In vergelijking met het TIG-handlassen, moet bij gemechaniseerd lassen meer aandacht worden besteed aan de naadvoorbereiding. Als een algemene richtlijn geldt, dat de naadafwijkingen (opening en hoogteverschil van de laskanten), niet groter mogen zijn dan 15% van de plaatdikte. Bij dunne plaat, 1 mm en dunner, zelfs niet groter dan 10% van de plaatdikte. Het is duidelijk dat dan wel zeer goede inklemparaatuur vereist is.

Een goed voorbeeld van gemechaniseerd TIG-lassen is het orbitaal lassen van pijpen. Hierbij worden de twee aan elkaar te lassen pijpen in een spanmechanisme centrisch ten opzichte van elkaar geplaatst. Het proces wordt toegepast wanneer de pijpen niet gedraaid kunnen worden. Om de pijp wordt een tandkrans of geleiderail bevestigd. Met een motor wordt de lasunit langs deze tandkrans of geleiderail aangedreven. Wanneer de omhulling van het spanmechanisme voldoende ten opzichte van de lucht is afgesloten, kan een wolfraamelektrode aan de tandkrans worden bevestigd. Anders wordt een aangepaste TIG-toorts aan de tandkrans gemonteerd. Wat betreft de gasbescherming verdient de laatste constructie de voorkeur. De TIG-toorts kan nu via de tandkrans langs de rondnaad van de te verbinden pijpen worden gevoerd. In figuur 7.1 is een dergelijk pijplasmaapparaat afgebeeld.



figuur 7.1 Orbitaal pijplassen van grotere diameters. De TIG-toorts en de toevoerdraad worden om de te lassen pijp gevoerd. De apparatuur is tevens voorzien van een pendelmechanisme

Deze pijplassystemen worden in allerlei uitvoeringen geleverd. Er zijn eenvoudige systemen, waarbij alleen de las snelheid en de lasstroom in te stellen zijn, maar ook apparaten met vele stuur- en regel mogelijkheden. Zo zijn er systemen, waarbij de booglengte geheel automatisch constant wordt gehouden. Ook kan de boog magnetisch gependeld worden. Verder bevatten ze draadaandrijvingen voor toevoegdraad, afkomstig van een kleine haspel. Wel heel geavanceerd is de pijplasmaapparaat die op afstand bedienbaar is. Hierbij zit de lasser achter een TV-scherm waarop de lasnaad en boog worden afgebeeld. Van daaruit stuurt hij de toortspositie en de lasparameters. Ten behoeve van de bouw van warmtewisselaars bestaan er TIG-las systemen voor het lassen van de pijp in de bodem van de wisselaar (pijp/plaat verbindingen). Ook hier is er

een aantal varianten. De centrering van het lasapparaat geschiedt bij voorkeur vanuit de binnenwand van de te lassen pijp. Om lasfouten te voorkomen is het hier heel belangrijk de te lassen oppervlakken goed te reinigen.

Bij het orbitaal pijplassen wordt in een groot aantal posities gelast. Hierbij is het van groot belang dat het gesmolten metaal van het lasbad steeds goed beheersbaar blijft. Een goed hulpmiddel hierbij is het pulseren van de lasstroom. Tijdens de lage stroomperiode krijgt het smeltbad immers steeds weer de gelegenheid te stollen, terwijl tijdens de puls de benodigde penetratie van de las wordt behaald. In de moderne pijplasma-apparatuur zijn deze pulsmogelijkheden dan ook vaak ingebouwd.

Andere voorbeelden van gemechaniseerd TIG-lassen zijn te vinden in de apparatenbouw, in de fijnmechanische industrie, de petrochemische industrie en bij de fabricage van lampen.

Robotlassen

Tenslotte nog iets over TIG-lassen met robots. In tegenstelling tot MIG/MAG-lassen, heeft het TIG-lassen nog niet zo'n wijdverbreide toepassing bij het robotlassen gevonden. Hiervoor is een aantal redenen aan te wijzen:

- ▶ De TIG-boog werd vaak gestart met een H.F.-ontsteking. De programmering van de robot kon daardoor onregelmatig raken. De huidige generatie TIG-robots zijn afgeschermd voor ongewenste H.F.-spanningen of starten contactloos.
- ▶ Doordat de stroombron een steile, soms zelfs loodrechte karakteristiek heeft, is de boog niet zelf regulerend wat betreft de lengte ervan. Dit betekent dat de robot een voorziening voor het constant houden van de booglengte moet hebben.
- ▶ Doordat de doorsnede van de doorlassing bij TIG-lassen nogal smal is, kan de afwijking van de toorts ten opzichte van de lasnaad niet erg groot zijn. Daarom is een lasnaadvolgsysteem noodzakelijk.

7.3 Lasnaadvoorbereiding

TIG-lassen is een proces dat zeer geschikt is voor die lasnaden, waar geen toevoegmateriaal hoeft te worden gebruikt. Dit geldt uiteraard slechts dan, wanneer dat metaalkundig ook mogelijk is. Met andere woorden: de lasnaad moet, indien mogelijk, zo worden ontworpen, dat een deel van de laskanten in de smelt opgaat en zo mede de lasrups vormt. Een aantal voorbeelden daarvan wordt in § 8.3 (figuur 8.1) gegeven. Ook I-naden kunnen, wanneer de platen niet te dik zijn, zonder toevoegmateriaal worden gelast. De ondersteuning aan de achterzijde moet dan wel goed zijn, terwijl er dan toch nog enige "verjonging" optreedt.

Hieronder volgen enige algemene richtlijnen voor de lasnaadvoorbereiding bij TIG-lassen.

I-NAAD

Bij staal kan tot 3 mm plaatdikte nog eenzijdig worden gelast.

Bij aluminium geldt dat nog tot 5 mm.

Tweezijdig lassen tot 8 mm plaatdikte, al of niet met vooropening.

V-NAAD OF DUBBELE V-NAAD MET STAAND BEEN

Plaatdikten > 8 mm.

Staal: openingshoek staal: 60°. Staande been: 2-4 mm.

Aluminium: openingshoek: 70°. Staande been: 2-3 mm.

Ook wordt wel het staande been 0 mm gekozen, dus V-naad of dubbele V-naad, waarbij de scherpe kanten iets "gebroken" zijn.

U-NAAD OF DUBBELE U-NAAD

Plaatdikten > 8 mm.

Bij de dikkere platen met V- of U-naden, wordt het TIG-lassen in de regel slechts gebruikt voor het lassen van de grondlaag.

Het verder vullen van deze naden gebeurt dan met een MIG-lasproces of met onder poeder lassen. In hoofdstuk 4 zagen we reeds dat TIG Narrow Gap lassen hier ook een alternatief is. Bij ongelegeerd en laaggelegeerd staal worden de naden doorgaans gevormd met behulp van autogeen snijden. Bij roestvast staal en non-ferro metalen gebeurt dat met plasmasnijden. Ook worden daarbij verspanende bewerkingen toegepast. Natuurlijk moet in al deze gevallen worden gelet op de zuivere oppervlaktegesteldheid van de snijkanten. Zo nodig moeten deze worden nabewerkt met een borstel of een slijpschijf. Vooral bij aluminium is dat noodzakelijk. De behandeling moet dan vlak voor het lassen gebeuren.

7.4 Lasonvolkomenheden

Met lasonvolkomenheden worden in deze paragraaf die onvolkomenheden bedoeld, die binnen de invloedssfeer van de lasser liggen, dus bijvoorbeeld door onjuiste instellingen van de lasparameters, een verkeerde positie van de lastoorts en dergelijke. Deze lasfouten zijn dus door de lasser te voorkomen. Voorwaarde daarvoor is echter dat de lasser de fouten herkent en de oorzaak ervan kan opsporen. Baum en Fischer [lit.5] hebben daar een fraai overzicht van gegeven (zie figuur 7.2).

Nog een aantal andere veel voorkomende lasfouten zijn:

▶ Poreusheid in de las

Er moet onderscheid worden gemaakt tussen metallurgische poreusheid en poreusheid die gevormd wordt tengevolge van vet- en olieresten. Dit laatste kan natuurlijk worden voorkomen door het werkstuk goed te reinigen. De poreusheid tengevolge van reacties in het lasbad is afhankelijk van de aard van het materiaal. Bij ongekalmteerd staal (voor zover dat nog gebruikt wordt) is het vaak de vorming van CO die tot gaatjes in de las leidt. Zeker wanneer geen toevoegmateriaal wordt gebruikt, bestaat er alle kans op dit soort poreusheid. Men kan deze poreusheid bij staal voorkomen, door een toevoegdraad met een hoog Si-gehalte te nemen.

Wanneer aluminium wordt gelast, is de poreusheid bijna altijd een gevolg van waterstof. Dit waterstof is afkomstig uit de oxidehuid van het werkstuk of van het eventuele toevoegmateriaal, maar kan ook weer afkomstig zijn van vet- en olieresten.

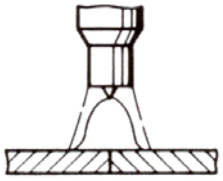
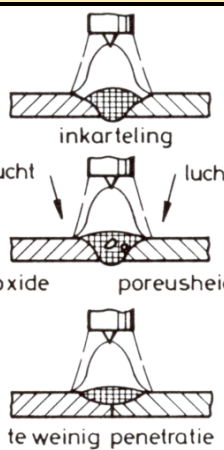

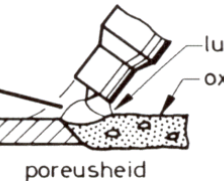
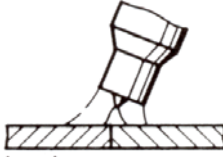

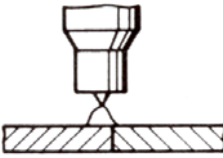
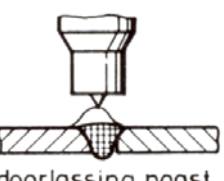
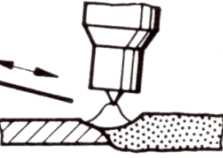
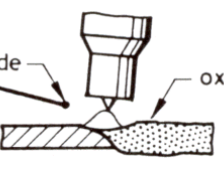


▶ Lasoppervlak heeft een geoxideerd uiterlijk

Hiervoor kan er een aantal oorzaken zijn. In de eerste plaats moet de gasbescherming worden gecontroleerd. De gasslang of koppelingen kunnen gebreken hebben, het gasmondstuk kan gescheurd zijn, maar de oxidatie kan ook worden veroorzaakt door vocht (wanneer de toorts watergekoeld wordt).

Tenslotte kan de gasstroming in de toorts niet goed zijn. De gasstroom kan bijvoorbeeld slechts aan een zijde van de toorts plaatsvinden, of hij is niet voldoende laminair. Hiervoor bestaat een eenvoudige test!

▶ Test voor gasstroming uit de toorts

Houdt de toorts loodrecht boven een glas water. De afstand van de onderkant van de toorts tot het wateroppervlak moet enkele millimeters bedragen. Zorg dat er voldoende liters gas uit de toorts stromen, zodanig dat er een lichte indeuking in het wateroppervlak ontstaat. Aan de indeuking en de omtrek ervan is te zien of de stroming over de gehele toortdoorsnede hetzelfde is. Aan de wervelingen in het water is te zien, in hoeverre de stroming turbulent of laminair is. Dit laatste, dus een rustige, egale indeuking is natuurlijk het beste.

fouten	mogelijk gevolg
 <p>te grote booglengte</p>	 <p>inkarteling oxide poreusheid te weinig penetratie</p>
 <p>te kleine hoek toorts - werkstuk</p>	 <p>lucht oxide poreusheid</p>
 <p>toorts naar een laskant gericht</p>	 <p>niet symmetrische las</p>
 <p>toorts niet boven de naad</p>	 <p>doorlassing naast de naad</p>
 <p>toevoegdraad verlaat gasbescherming</p>	 <p>oxide oxide</p>
 <p>wolfram elektrode raakt las</p>	 <p>wolframinsluiting: kerfwerking, corrosie</p>

figuur 7.2 Een aantal mogelijke lasfouten bij TIG-lassen

7.5 Hechten

De lassnelheden bij TIG-lassen zijn betrekkelijk laag, met name bij materiaaldikten boven de 3 mm. Hierdoor is de warmte-inbreng in de regel hoog. De optredende krimpspanningen in het werkstuk zijn diengevolge groot. Hechten op een aantal plaatsen langs de naad, voordat met het lassen wordt aangevangen, is dan ook noodzakelijk. Bij lange naden moet met het hechten vanuit het midden worden begonnen. De grootte van de hechtlassen is afhankelijk van de afmetingen van het werkstuk, evenals de onderlinge afstand. Vaak worden de hechtlassen weer verwijderd door te slijpen. Over gescheurde hechtlassen mag in ieder geval niet worden gelast. Een goede inkleminrichting verdient de voorkeur boven hechten.

Hoofdstuk 8

TIG-lassen van verscheidene metalen

8.1 Lastoevoegmaterialen, algemeen

Bij het TIG-lassen van staal is de samenstelling van het toevoegmateriaal steeds ongeveer gelijk aan het basis-materiaal.

Bij non-ferro materialen zijn er soms redenen waarom men van deze regel moet afwijken. Voorbeelden zijn bepaalde aluminiumlegeringen: Een aantal AlMg, AlMgSi en AlSi-legeringen met een legeringsgehalte beneden de 1% zijn sterk warmscheurgevoelig. Het lastoevoegmateriaal moet een aanmerkelijk hoger legeringsgehalte hebben om deze materialen scheurvrij te kunnen lassen.

Het element Mg (magnesium) - dat in bepaalde Al-legeringen voorkomt - verdampst snel in de argonboog. Om nu een bepaald Mg-gehalte in de las te garanderen, moet het toevoegmateriaal een extra hoeveelheid van dit element bevatten.

Zie voor classificatie van lasdraden bijvoorbeeld (NEN-)EN 1668 (lasdraden voor het lassen van ongelegeerd en fijnkorrelstaal).

Een classificatie van alle materialen op basis van hun lasbaarheid wordt gegeven in de ISO/TR 15608 "Lassen - Leidraad voor een groepsindeling van metallische materialen".

8.2 Staal

IJzer heeft een smeltpunt van 1536 °C. Alle staalsoorten hebben een lager smeltpunt.

Voor ongelegeerd staal is TIG-lassen niet de meest voor de hand liggende lasmethode. Het proces is voor de grotere materiaaldikten betrekkelijk traag, terwijl het gevaar voor optredende poreusheid zeker niet denkbeeldig is. Toch kan er een aantal redenen zijn om ook bij ongelegeerd en laaggelegeerd staal voor het TIG-lassen te kiezen. Deze redenen zijn:

- ▶ het lasoppervlak is steeds glad;
- ▶ er zijn geen spatten;
- ▶ er kunnen stroomsterkten worden gekozen in een zeer wijd gebied;
- ▶ bij handlassen kan een vooropening goed worden overbrugd;
- ▶ kwaliteit en zuiverheid van de las.

Staal wordt gelast met gelijkstroom. De wolfram-elektrode is negatief. Als beschermgas wordt in de regel argon gebruikt. De gasbescherming is hier heel belangrijk. Niet alleen ter voorkoming van oxidatie van het staal door de zuurstof uit de lucht, maar ook tegen de opname van stikstof in het smeltbad. Deze stikstofopname kan niet alleen de oorzaak zijn van poreusheid in de las, maar ook aanleiding geven tot slechte mechanische eigenschappen; vooral lage kerfslagwaarden van het lasmetaal bij lage temperatuur.

De gebruikte stroomsterkte is uiteraard sterk afhankelijk van de materiaaldikte. In tabel 8.1 wordt een indruk gegeven van een aantal lasparameters bij het TIG-lassen van een gesloten I-naad.

De verschillende staalsoorten kunnen worden onderverdeeld in een drietal groepen:

- ▶ ongelegeerd staal of koolstofstaal;
- ▶ laaggelegeerd staal. Hiervan bedraagt het totale legeringspercentage < 5%;
- ▶ hooggelegeerd staal. Hiervan bedraagt het totale legeringspercentage > 5%.

tabel 8.1 Typische lasparameters voor TIG-lassen van een gesloten I-naad in ongelegeerd of laaggelegeerd staal

plaatdikte	lasstroom	eventuele dikte toevoeg draad	lassnelheid	argon
mm	A	mm	m/min	l/min
1,0	100	1,6	0,5	6
1,2	115	1,6	0,5	6
1,5	130	1,6	0,4	7
2,5	170	2,4	0,4	8
3,0	200	3,2	0,25	9

Staal met een hoog koolstofgehalte (meer dan 0,22% C), vaak met chroom, mangaan en andere elementen gelegeerd, zijn nogal scheurgevoelig bij het lassen. Door het overschrijden van bepaalde afkoelsnelheden worden deze staalsoorten aanmerkelijk harder. Dit kan worden voorkomen door deze stalen voor het lassen voor te verwarmen (tussen 150 en 400 °C) en na het lassen langzaam te laten afkoelen.

8.2.1 Ongelegeerd staal

Samenstelling van ongelegeerd staal:

C	0,09 - 0,18%;
Mn	0,25 - 1,9%;
Si	0,07 - 1,0%
S	< 0,065%;
P	< 0,07%;
Cu	< 0,5%.

Hoewel ongelegeerd staal met een groot aantal lasprocessen aan elkaar kan worden verbonden, is er toch een aantal gevallen, waarbij TIG-lassen de voorkeur verdient. Vooral bij het lassen van dun staal (plaat, pijp-, plaat- en stafmateriaal) is het TIG-proces aantrekkelijk. Bij ongelegeerd staal moet een onderscheid worden gemaakt tussen:

- ▶ niet gekalmeerd staal. Hierbij is de kans op poreusheid tijdens het lassen het grootst. Wanneer toevoegmateriaal gebruikt wordt met een redelijke hoeveelheid Si (bijvoorbeeld 1%) is poreusheid te vermijden, anders is TIG-lassen ervan problematisch;
- ▶ half gekalmeerd staal. Hierbij is de hoeveelheid Mn, Si en Al in het staal zodanig, dat de vorming van CO tijdens het lassen niet zo groot is, dat er poreusheid ontstaat;
- ▶ gekalmeerd staal. Mn, Si en ook vaak Al is hierin in zo'n hoeveelheid aanwezig, dat poreusheid niet optreedt.

Voorbeelden van TIG-lassen van ongelegeerd staal zijn:

- ▶ behuizingen en motoronderdelen van huishoudelijke apparaten;
- ▶ de grondlagen van V-naden in ongelegeerd staal;
- ▶ rondnaadlassen van dunwandige pijpen;
- ▶ puntlassen. Bijvoorbeeld bij het lassen van liftkooien, liftdeuren en andere dubbelwandige stalen deuren. Een aantal richtwaarden voor lasstroom en lastijd bij TIG-puntlassen is gegeven in tabel 8.2.

8.2.2 Laaggelegeerd staal

De legeringselementen in staal kunnen dienen voor:

- ▶ verhogen van de hittebestendigheid. Hiervoor dienen vooral Cr en Mo;
- ▶ verhogen van de trekvastheid en de vloeigrens van het staal;
- ▶ betere bestendigheid tegen snel afkoelen.

Hier is een van de belangrijkste toepassingen van TIG-lassen het aanbrengen van de grondlaag in V-naden of U-naden. Het vullen van de naden kan dan naderhand

tabel 8.2 De lasstroom en lastijd voor puntlassen in ongelegeerd staal

plaatdikte [mm]	lasstroom [A]	lastijd [s]
0,9	115	2
	130	1,5
	160	1
1,25	125	2
	160	1,75
1,5	145	5
	160	4
	190	2

geschieden met een ander proces (bijvoorbeeld MAG-las-sen). De meeste laaggelegeerde staalsoorten zijn goed lasbaar, mits aan een aantal voorwaarden wordt voldaan. Zo moeten materialen afhankelijk van hun chemische samenstelling en materiaaldikte soms gedurende de gehele lasprocedure worden verwarmd op bijvoorbeeld 150 °C. De hoogte van deze temperatuur en de noodzaak tot voorwarmen moet van geval tot geval worden bekeken. Verder moet er nog een warmtebehandeling na het lassen plaatsvinden. Boven 12 mm wanddikte worden normaalgegloeide fijnkorrelige staalsoorten (bijvoorbeeld S355) voorgewarmd tussen 50 en 150 °C. Soms wordt na het lassen weer normaalgegloeid; in enkele gevallen kan worden volstaan met spanningsarm gloeien op zo'n 550 °C. Het mag duidelijk zijn, dat voor het TIG-las-sen van deze staalsoorten de eventueel benodigde toevoegdraad met zorg gekozen moet worden. In principe moet het toevoegmateriaal minimaal gelijk van samenstelling zijn als het moedermateriaal.

8.2.3 Hooggelegeerd staal

De hooggelegeerde staalsoorten bevatten meer dan 5% legeringselementen. Ze worden om een aantal redenen gebruikt:

- ▶ vanwege de hittebestendigheid en vanwege de corrosiebestendigheid;
- ▶ vanwege de slijtvastheid;
- ▶ de bijzondere elektrische en magnetische eigenschappen van enkele;
- ▶ de hoge trekvastheid van sommige bij lage temperaturen.

Ni - C - Cu - Mn - N zijn austenietvormers,
Cr - Mo - Si - Al - W - Ti - Nb - V zijn ferrietvormers.

In het algemeen:

Ferritische staalsoorten:

- ▶ roestvaste staalsoorten bevatten 13 - 17% Cr;
- ▶ hittebestendige staalsoorten bevatten tot 24% Cr;
- ▶ boven 900 °C korrelgroei;
- ▶ tussen 450 en 525 °C verbrossing. Verhitting op ca. 750 °C, waarna afschrikken, heft de verbrossing weer op;
- ▶ snel afkoelen vanaf 900 °C doen ferritische chroomstalen gevoelig worden voor interkristallijne corrosie. Gloeien op ca 1050 °C, waarna snel afkoelen, doet deze gevoeligheid weer teniet.

Austenitische staalsoorten:

- ▶ de som van het nikkel- en chroomgehalte bedraagt minstens 26%;
- ▶ de bekendste legering is die van de 18/8 chroomnikkel staalsoorten;
- ▶ geen uitgesproken korrelvergroting boven 900 °C. Boven 1150 °C treedt echter weer korrelgroei op;
- ▶ geen verbrossing tussen 450 en 525 °C;
- ▶ wel mogelijke interkristallijne corrosie. Als het Cr-gehalte maar boven 12% blijft, bestaat er geen gevaar. Door vorming van chroomcarbiden tussen 650 en 750 °C

kan het Cr-gehalte echter beneden de veilige grens dalen! Oplossingen: Laag C-gehalte, het staal stabiliseren met Ti of Ti+Nb, of het metaal na het las-sen gloeien op 1050 °C waarna afschrikken.

Hittebestendige staalsoorten:

- ▶ 12% chroomstaal + Mo, V, W, Nb, en B. Moeilijk lasbaar. Voorwarmen op 425 °C. Harden bij 1100 °C. Ontlaten bij 730 °C
- ▶ 13-18% chroomstaal met een hoog C-gehalte. Als gevolg van het hoge C-gehalte bestaat er gevaar voor scheuren. 350 °C voorwarmen, direct na het las-sen 700 °C ontlaten en vervolgens langzaam afkoelen. Indien mogelijk is het beter las-sen te vermijden.

Duplex roestvast staal:

- ▶ verenigt een aantal eigenschappen die noch in ferritisch, noch in austenitisch roestvast staal zijn te verenigen. Deze staalsoorten zijn magnetiseerbaar en niet hardbaar;
- ▶ bevat de hoofdlegeringselementen chroom (18 - 28%) en nikkel (4 - 10%). Verder is 1,5 - 4% molybdeen toegevoegd, terwijl de moderne duplexsoorten gemiddeld 0,15% N bevatten. Ook koper wordt in de moderne staalsoorten toegevoegd (0,7 - 3%) voor de verhoging van de corrosiebestendigheid in met name zeewater. De lasbaarheid wordt hier echter weer door beperkt;
- ▶ Onderscheid wordt gemaakt tussen duplex en superduplex staalsoorten. Het verschil is (nog) niet gestandaardiseerd, maar in het algemeen spreekt men van superduplex wanneer PRE = 40 (Pitting Resistance Equivalent);
- ▶ heeft een grotere mechanische sterkte en een betere algemene en spanningscorrosie bestendigheid dan austenitische roestvaste staalsoorten;
- ▶ voorkom "arc-strikes" op het oppervlak van het materiaal;
- ▶ voorkom grote lasnaadinhouden in verband met krimpen en vervormingsaspecten;
- ▶ voorkom oververhitting door het zorgvuldig bewaken van de tussenlagetemperatuur (150 - 180 °C) en de warmte-inbreng (gevaar voor korrelgroei, ontstaan van sigma-fase);
- ▶ bescherm het lasmetaal en het basismateriaal daarmee tegen overmatige oxidatie;
- ▶ voorkom slakresten aan de corrosiezijde.

Hardbare staalsoorten:

Dit zijn staalsoorten uit de groep Ni/Co/Mo/-staal. Een voorbeeld hiervan is: 18 Ni - 8 Co - 5 Mo. Het zijn martensiet uithardende staalsoorten. Ontlaten wordt bij 480 °C. Hierbij treedt uitharden op, terwijl de goede kerftaaiheid behouden blijft. Een goede mogelijkheid, bij het las-sen van dit type staal, is voor te verwarmen op 480 °C en dan meteen te harden.


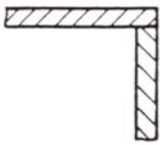

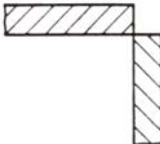
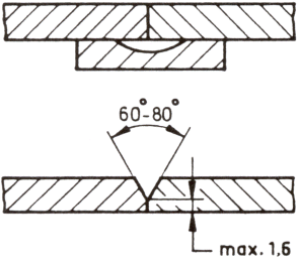
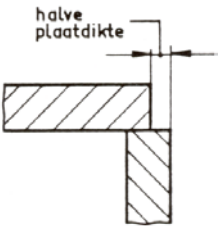
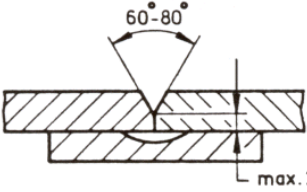
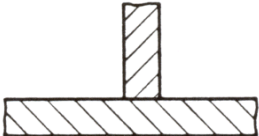
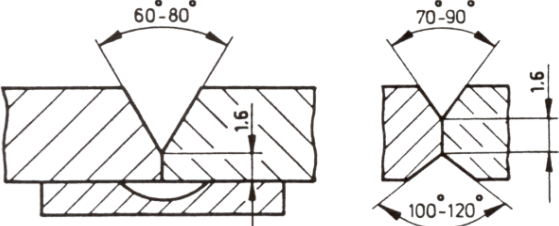
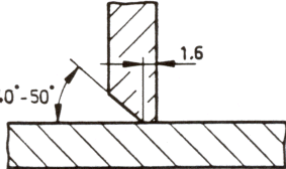
Staal voor lage temperaturen:

- ▶ 9% Ni-staal. Goed lasbaar. Tot - 196 °C;
- ▶ austenitisch mangaanstaal. Tot - 196 °C;
- ▶ austenitisch Cr/Ni-staal. Tot - 253 °C.

Het TIG-las-sen van hooggelegeerde staalsoorten

Ook hier geldt weer dat het TIG-las-sen beperkt blijft tot een plaatdikte van 6 mm en dunner; verder wordt bij dickere platen wel de grondlaag met het TIG-proces gelast. In tabel 8.3 is voor een aantal plaatdikten de naadvorbereiding van staalplaat gegeven. Hierbij is de dikte van de plaat beperkt tot 6 mm. Het al of niet gebruiken van toevoegmateriaal hangt van de omstandigheden af. Bij las-sen van 1 mm dikke plaat of dunner in een verticale positie, wordt neerwaarts gelast. Hierbij wordt geen toevoegdraad gebruikt. Bij dickere plaat wordt opwaarts gelast, al of niet met toevoegdraad. In tabel 8.4 zijn nog een aantal mogelijkheden voor het las-sen van dickere plaat (>6 mm) geschetst. Voor TIG-las-sen is daarbij vooral de grondlaag van belang.

tabel 8.3 Naadvoorbereiding voor TIG-lassen in staalplaat. Dikte tot 6 mm




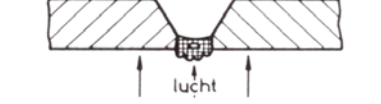
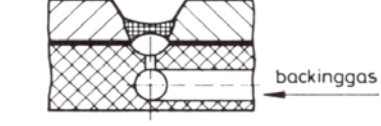
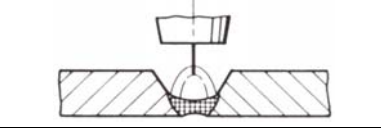

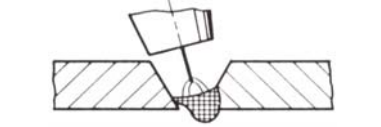
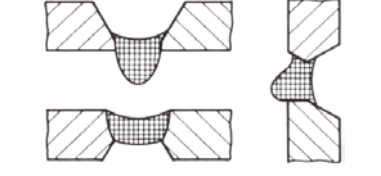
<p>< 1 mm</p> 	<p>< 1,5 mm</p> 
<p>< 2 mm</p> 	<p>> 1,5 mm</p> 
<p>3 - 5 mm</p> 	<p>> 3 mm</p> 
<p>5 - 6 mm</p> 	<p>0,5 - 6 mm</p> 
<p>6 mm</p> 	<p>5 - 6 mm</p> 

tabel 8.4 De naadvoorbereiding voor het TIG-lassen van plaat dikker dan 6 mm (met toevoegdraad)

The diagrams in this table illustrate various groove and T-joint preparations for TIG welding on plates thicker than 6 mm. The diagrams include dimensions for groove angles (50, 10, 20, 60 degrees), root radii (R4, R6), and gap widths (2-3.5, 0-2, 2, 2-3, 1.5-3, 15-3, 3-20, 6-20, 15-40, 8-40, >=12, >=16).

Wanneer de grondlaag met gemechaniseerd TIG-lassen wordt gemaakt, wordt er geen vooropening gebruikt. Bij handlassen van de grondlaag moet de vooropening zo groot zijn, dat de toevoegdraad er nog net tussen past. De staaf wordt nu niet boven in het smeltbad ingevoerd, maar voorin in het smeltbad tussen de opstaande rand. De hete punt van de draad moet natuurlijk wel goed in het gasscherm blijven. In tabel 8.5 is een aantal mogelijke lasfouten bij het leggen van de grondnaad met de hand weergegeven.

tabel 8.5 Oorzaken van lasfouten bij TIG-lassen van de grondlas in V- en U-naden

lasfouten	oorzaak
	te kleine openingshoek en te grote "high-low"
	te grote en te kleine vooropening
	niet symmetrische lasnaad
	lucht bij las
	te hoge druk bij backinggas
	te lange boog
	verontreiniging van de wolframelektrode
	toorts naar één kant gericht
	te hoge stroom

8.3 Nikkel en nikkellegeringen

Nikkel en nikkellegeringen worden voornamelijk in de chemische apparatenbouw gebruikt, wanneer hoge eisen aan de weerstand tegen corrosie en aan de hittebestendigheid worden vereist. Het smeltpunt van nikkel ligt in de buurt van dat van staal: 1456 °C.

Hoewel nagenoeg alle nikkellegeringen goed lasbaar zijn, is er een tweetal mogelijkheden tot lasfouten:

1. De geringste aanwezigheid van zwavel kan aanleiding zijn tot het optreden van warmscheuren. Het warm-

2. Poreusheid. Dit wordt veroorzaakt door zuurstof, stikstof en vooral waterstof. Het kan echter worden voorkomen door het goed reinigen van het werkstuk en een goed gasscherm.

In tabel 8.6 worden een aantal veel voorkomende nikkellegeringen weergegeven.

tabel 8.6 Een aantal veel voorkomende nikkellegeringen

percentage	Ni	Cu	Fe	Al	Ti	Cr	Mo	Co	W
Monel	> 63	28-34	1-2,5	2-4	0,3-1				
Inconel	> 72		6-10			14-17			
Nimonic	rest		1-5			18-21		0-23	
Hastelloy B	> 62		4-7				26-30		
Hastelloy C	> 52		4-7			14-18	15-18		3-5

Al deze legeringen worden gebruikt bij de bouw van chemische apparaten.

Bij het lassen van nikkel en zijn legeringen moet de openingshoek van V-naden groter worden gekozen dan bij het lassen van staal, want het smeltbad is nogal viskeus en nikkel heeft een slechte warmtegeleidingscoëfficiënt. Nikkel en nikkellegeringen worden TIG-gelast met gelijkstroom; de elektrode is negatief. Er moet voor een zeer goede gasbescherming worden gezorgd. Er moet altijd met een backinggas worden gewerkt. Eventueel toevoegmateriaal heeft in de regel weer dezelfde chemische samenstelling als het werkstuk.

8.4 Koper en koperlegeringen

Koper, waaraan moet worden gelast, moet vrij zijn van zuurstof. Wanneer er toch aan zuurstof bevattend koper wordt gelast, zal er koperoxide (Cu_2O) worden gevormd. Bij 1065 °C vormt dit met koper een eutecticum. Een bijzonder brosse verbinding is het resultaat. Wanneer er ook nog waterstof in de buurt is (bijvoorbeeld gebonden aan de oxidehuid of door tocht), zal het waterstof met het koperoxide waterdamp vormen:

$\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$. Dit is niet oplosbaar in het gesmolten koper, maar vormt daar holtes met een zeer hoge druk. Verbrossing is het gevolg. Er ontstaan scheuren in de las en in de overgangszone. Dit wordt ook wel "waterstofziekte" van koper genoemd.

Koper heeft een smeltpunt van 1083 °C. De warmtegeleiding van koper is 5 maal zo groot als die van ijzer. Hiermee moet bij het lassen uiteraard rekening worden gehouden. Koperlegeringen hebben al snel, wanneer het legeringspercentage niet te laag is, een aanmerkelijk lagere warmtegeleidbaarheid. Bij het lassen van zuiver koper moet, vanaf een plaatdikte van 4 mm, worden voorgewarmd. Dit gebeurt bij temperaturen van 200 - 700 °C. Wanneer er toevoegdraad moet worden gebruikt, is dat geen zuiver koper, maar koper met zilver, tin of silicium. Bij TIG-lassen wordt gelijkstroom gebruikt, met de elektrode negatief. Het beschermgas kan argon zijn, maar in een aantal gevallen wordt helium gebruikt. Vooral bij het lassen van grotere werkstukken is helium, vanwege de heterere boog, aantrekkelijk. Ook bij het lassen met grote snelheden van dunne koperband, bijvoorbeeld langsnaden van uit band gevormde koperen buis, wordt helium gebruikt. Zoals reeds in § 5.1 is vermeld, wordt dan eerst de boog gestart in argon, waarna er wordt overgeschakeld op helium.

Hieronder zullen de eigenschappen en het TIG-lassen van de meest voorkomende koperlegeringen kort worden besproken:

► **messing:**

Koper - zink legering, minstens 50% Cu. Niet goed lasbaar wegens het "uitdampen" van het zink. Damppunt zink is 907 °C.

Gelijkstroom, elektrode negatief of wisselstroom.

► **nieuw zilver:**

Koper - nikkel - zink legering. Eveneens niet goed lasbaar, behalve dunne plaat (zie messing).

► **tinbrons:**

Goed lasbaar wanneer de wanddikte niet te groot is (tot 10 mm). Het damppunt van Sn is 2450 °C, dus nogal hoog.

Niet voorverwarmen. De eventuele toevoegdraad moet tot 0,5% P bevatten. Gelijkstroom, elektrode negatief.

► **aluminiumbrons:**

Goed lasbaar. Niet voorverwarmen. Gelijkstroom, elektrode negatief (eventueel vloeimiddel gebruiken) of wisselstroom.

► **koper-nikkel:**

Goed lasbaar. Gelijkstroom, elektrode negatief of wisselstroom.

► **koper-silicium en koper-silicium-mangaan:**

Zeer goed lasbaar. Gelijkstroom, elektrode negatief. Korte boog.

Omdat vooral bij het lassen van koper de voorwarmtemperaturen zo'n belangrijke rol kunnen spelen, volgt in tabel 8.7 nog eens een globaal overzicht hiervan.

tabel 8.7 Voorwarmtemperaturen voor TIG-lassen van koper en koperlegeringen

materiaal-dikte	Cu	CuAl	CuZn	CuSn	CuSi
mm	°C	°C	°C	°C	°C
< 3	-	-	-	-	-
3 - 6	100-200	-	-	-	-
6 - 12	150-400	max.100	150-300	max.150	max.100
12 - 15	300-600	max.100	max.300	150-250	max.100
> 15	400-700	max.100	max.300	150-250	max.100

8.5 Aluminium en aluminiumlegeringen

Aluminium heeft, naast een goede verwerkbaarheid, een aantal fysische eigenschappen, die het metaal in een breed gebied inzetbaar maakt. In tabel 8.8 is een aantal van deze eigenschappen naast elkaar gezet, in vergelijking met die van ijzer en koper.

tabel 8.8 Enkele fysische eigenschappen van Fe, Cu en Al

metaal	smeltpunt	soortelijke massa	warmtegeleiding	elektrische weerstand
	°C	g/cm ³	W/m.K	Ω mm ² /m
ijzer	1536	7,8	75	0,1
koper	1083	8,9	399	0,017
aluminium	660	2,7	240	0,027

In vergelijking met staal, is aluminium licht en heeft een uitstekende elektrische geleidbaarheid. Ook de warmtegeleiding is zeer goed. Er bestaat een grote verscheidenheid aan aluminiumlegeringen. De eerder genoemde ISO/TR 15608 geeft een indeling voor aluminium en zijn legeringen (zie tabel 8.9).

tabel 8.9 Indeling van aluminium en zijn legeringen naar ISO/TR 15608

groep	sub-groep	type aluminium en aluminium legeringen
21		zuiver aluminium ≤1% onzuiverheden of legeringselementen
22		niet veredelbare legeringen
	22.1	aluminium-mangaan legeringen
	22.2	aluminium-magnesium legeringen met Mg ≤1,5%
	22.3	aluminium-magnesium legeringen met 1,5% < Mg ≤3,5 %
	22.4	aluminium-magnesium legeringen met Mg > 3,5 %
23		veredelbare legeringen
	23.1	aluminium-magnesium-silicium legeringen
	23.2	aluminium-zink-magnesium legeringen
24		aluminium-silicium legeringen met Cu ≤1%
	24.1	aluminium-silicium legeringen met Cu ≤1% en 5% < Si ≤15%
	24.2	aluminium-silicium-magnesium legeringen met Cu ≤1 %; 5 % < Si ≤15% en 0,1% < Mg ≤ 0,80%
25		aluminium-silicium-koper legeringen met 5% < Si ≤14 %; 1% < Cu ≤5 % en Mg ≤0,8%
26		aluminium-koper legeringen met 2% < Cu ≤6%

Groep 21 tot 23 zijn doorgaans kneedlegeringen en de groepen 24 tot 26 zijn meestal gietlegeringen.

Enkele voorbeelden van veel gebruikte aluminium legeringen wordt in tabel 8.10 gegeven.

tabel 8.10 Samenstelling, nummers en chemische symbolen van enkele veel toegepaste aluminium legeringen. Alleen de belangrijkste legeringselementen zijn gegeven. Alle legeringen bevatten verder min of meer geringe hoeveelheden Fe, Si, Cu, Mn, Cr, Ti en Zn

nummer	chemisch symbool	ISO/TR 15608 groep	samenstelling (rest = Al):
1050	Al99,5	21	> 99,5 % Al
1200	Al99,0	21	> 99,0 % Al
3103	AlMn1	22.1	0,9-1,5 % Mn
5052	AlMg2,5	22.3	2,2-2,8 % Mg
5083	AlMg4,5Mn	22.4	4,0-4,9 % Mg, 0,4-1,0 % Mn
5086	AlMg4Mn	22.4	3,5-4,5 % Mg, 0,2-0,7 % Mn
5251	AlMg2Mn0,3	22.3	1,7-2,4 % Mg, 0,1-0,5 % Mn
5454	AlMg2,7Mn	22.3	2,4-3,0 % Mg, 0,5-1,0 % Mn
5754	AlMg3	22.3	2,6-3,6 % Mg
6005	AlMgSi0,7	23.1	0,4-0,7 % Mg, 0,5-0,9 % Si
6060	AlMgSi0,5	23.1	0,3-0,6 % Mg, 0,3-0,6 % Si
6061	AlMg1SiCu	23.1	0,8-1,2 % Mg, 0,4-0,8 % Si, 0,15-0,4 % Cu
6082	AlMgSi1	23.1	0,6-1,2 % Mg, 0,7-1,3 % Si
7020	AlZn4,5Mg1	23.2	1,0-1,4 % Mg, 4,0-5,0 % Zn

De toevoegdraden, die eventueel bij het TIG-lassen van de legeringen uit tabel 8.10 worden gebruikt, kunnen worden onderscheiden naar het doel ervan: Het toevoegma-

teriaal 5356 wordt verreweg in de meeste gevallen gebruikt. Vooral als er moet worden gelet op voldoende sterkte van de las, is 5356 een uitstekende keuze. Speelt de lasbaarheid een belangrijke rol - is er bijvoorbeeld gevaar voor warscheuren - dan verdient het toevoegmateriaal 4043 de voorkeur.

Voor een uitgebreid overzicht wordt verwezen naar VM 83 "Lassen van aluminium en aluminium legeringen".

Zoals reeds in § 4.7 is beschreven, moeten er bijzondere maatregelen worden getroffen om aluminium en zijn legeringen met het TIG-proces te lassen. Aluminium heeft zelfs bij kamertemperatuur een hoge affiniteit tot zuurstof. Dat betekent dat aluminium, dat enige tijd aan de lucht is blootgesteld, altijd bedekt is met een oxidelaag. Al_2O_3 heeft een hoog smeltpunt, 2054 °C, en is in gesmolten toestand erg viskeus. Wanneer er een smelt ontstaat, zonder dat het Al_2O_3 verwijderd is, vermengt dit oxide zich met het gesmolten aluminium (het is zwaarder dan aluminium) en zorgt zo voor insluitels in de las. Verder ontstaan er bindingsfouten. Ook krijgt de las vaak een lelijk, geschubd uiterlijk. Verder geldt dat Al_2O_3 hygroscopisch is. Dit houdt in dat als de oxidehuid niet goed verwijderd wordt, de kans groot is dat tijdens het lassen de waterstof vrijkomt en poreusheid in de las veroorzaakt.

Een andere moeilijkheid bij het lassen van aluminium vormt waterstof. In figuur 8.1 is de oplosbaarheid van waterstof in aluminium weergegeven als functie van de temperatuur.

Hieruit blijkt dat gesmolten aluminium een grote oplosbaarheid heeft voor waterstof. Door de grote warmtegeleiding van het aluminium is de afkoelsnelheid van de las zeer groot. Als er waterstof in de vloeistoffase is opgelost, kan dit, bij het stollen, nog maar moeilijk ontwijken. De oplosbaarheid beneden het smeltpunt is gering. Er ontstaan gasinsluitingen: dus poreusheid.

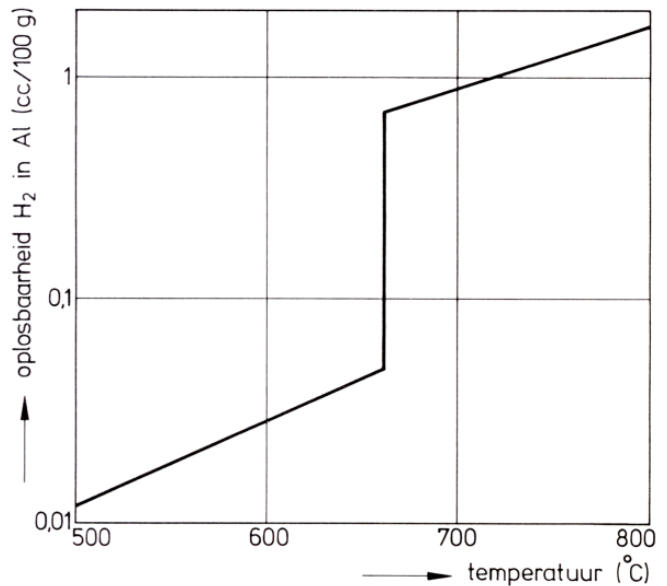
Behalve dat er waterstof (of water) bij de las kan komen door een slechte gasbescherming, vochtig gas, of een lek in de lastoorts, bevat de oxidelaag op het werkstuk ook vaak vocht.

De hoogsmeltende oxidehuid kan slechts met behulp van een zeer hoge energiedichtheid ter plaatse worden doorbroken. Hierom is het aantal mogelijkheden, om aluminium met het TIG-proces te lassen, beperkt.

Deze mogelijkheden worden hier nog eens genoemd:

► **Lassen met wisselstroom**

Hierbij wordt meestal een elektrode van zuiver wolfram gebruikt. Deze is bij vergelijkbare stroomsterkte iets dikker dan wanneer met gelijkstroom (elektrode negatief) wordt gelast. Een H.F.-ontsteekspanning is gedurende het gehele lasproces nodig, om de boog bij iedere nuldoorgang van de stroom te herontsteken.



figuur 8.1 De oplosbaarheid van waterstof in aluminium als functie van de temperatuur

In tabel 8.11 is een aantal lasparameters voor het lassen van aluminium met wisselstroom gegeven.

► **Lassen met een blokvormige wisselstroom ("square wave")**

Ook dit type stroombron is in § 4.7 beschreven. Hiermee kan, al naar gelang de behoefte, de tijd dat het werkstuk positief of negatief is, worden gevarieerd. Penetratie van de las in het werkstuk of het verwijderen van de oxidelaag kunnen hiermee de voorkeur krijgen. De waarden in tabel 8.11 gelden ook voor het lassen met een blokvormige wisselstroom, mits de positieve periode niet te veel afwijkt van de negatieve periode.

Boven zo'n 30 A is geen H.F. meer nodig voor het herontsteken van de boog tijdens het lassen. Dit is uiteraard bijzonder prettig voor de omgeving; vooral op die plaatsen, waar elektronische meet- en regelapparatuur aanwezig is.

► **Lassen met gelijkstroom, elektrode positief**

Het werkstuk is nu negatief. Dat betekent dat het betrekkelijk koud is. Deze vorm van TIG-lassen wordt daarom beperkt tot dunne aluminium plaat; 1,5 mm is wel het maximum. De reinigende werking van zo'n TIG-boog is natuurlijk zeer goed. Een nadeel is echter weer, dat de elektrode dik is en de lasboog minder stabiel. In tabel 4.2 zijn de waarden hiervan gegeven. Voor 80-125 A wordt al een 6,4 mm dikke wolframelektrode vereist.

tabel 8.11 Enige lasparameters voor het lassen van aluminium met wisselstroom

materiaaldikte mm	diameter elektrode mm	diameter mondstuk mm	stroom A	diameter lasdraad mm	argon l/min	opmerkingen
1	1,6	9,5	60	-	5	geen toev.draad, randaarde
1,5	2,4	9,5	90	1,6	5	I-naad, geen ondersteuning
1,5	3,2	9,5	135	2,4	5	I-naad, met ondersteuning
2,0	2,4	9,5	110	2,4	6	I-naad, geen ondersteuning
2,0	3,2	9,5	150	2,4-3,2	6	I-naad, met ondersteuning
4,0	4,0	12,7	175	2,4-3,2	7	I-naad, geen ondersteuning
4,0	4,0	12,7	210	3,2	8	I-naad, met ondersteuning
6,0	5,0	12,7	225	3,2-4,0	9	I-naad, geen ondersteuning
6,0	5,6	12,7	320	5,0	10	I-naad, met ondersteuning
8,0	5,6	12,7	280	5,0	10	I-naad, geen ondersteuning
8,0	5,6	12,7	330	5,0	10	I-naad, met ondersteuning

Het beschermgas bij deze wijze van lassen is meestal argon.

► **Lassen met gelijkstroom, elektrode negatief, in helium: Helium TIG-lassen**

Deze bijzondere methode van het TIG-lassen van aluminium wordt, voor zover bekend, in Nederland niet meer toegepast. Voor de volledigheid wordt hij hier echter wel beschreven.

Bij het TIG-lassen met gelijkstroom onder helium beschermgas is het werkstuk positief. Dat wil zeggen dat de elektronen uit de boog zorgen voor voldoende energieoverdracht aan het werkstuk, en daarom voor voldoende penetratie. Wanneer argon als beschermgas zou worden gekozen, is die hoeveelheid energie echter nog niet voldoende om de oxidelaag op het aluminium te doorbreken. Het is gebleken dat de boog in helium wel voldoende energie heeft om de oxidelaag af te breken. Bovendien zorgt de grote warmtegeleiding van het helium dat de boog samentrekt (insnoert). Dat betekent nog een extra vergroting van de energiedichtheid op het werkstuk. Dit heeft tot gevolg dat nu wel de oxidelaag op het aluminium doorbroken wordt. Toch blijft er nog wat oxide achter. Na het lassen heeft de las vaak een dun "film" laagje met een grijze kleur. Dit verdwijnt snel na borstelen. Door de contractie van de boog is de penetratie van de las zo diep, dat aanmerkelijk dickere plaat in een I-naad kan worden gelast. Dat is zowel van voordeel voor de lassnelheid, als voor materiaalbesparing (geen of minder toevoegmateriaal). In tabel 8.12 is een aantal lasparameters voor Helium TIG-lassen van aluminium vermeld.

tabel 8.12 Enkele lasparameters voor het Helium TIG-lassen van aluminium met de elektrode negatief

dikte materiaal	naad- vorm	stroom	diameter		helium	lassnel- heid
			elektrode	lasdraad		
mm		A	mm	mm	l/min	m/min
0,5	T	30	1,0	0,5	10	1,3
1,0	T	60	1,0	1,2	10	1,0
2,0	T	170	1,6	1,6	12	0,8
4,0	T	250	3,0	3,0	14	0,7
6,0	T	320	3,0	4,0	16	0,6

De waarden van tabel 8.12 gelden voor gemechaniseerd lassen. Handlassen is met Helium TIG-lassen niet goed mogelijk. Ook bij gemechaniseerd Helium TIG-lassen moet een korte booglengte gehandhaafd blijven: 1,5 - 3 mm, dit kan alleen maar met een booglengte regeling (bijvoorbeeld AVC = Arc Voltage Control).

De diameters van de wolfraamelektroden zijn wat dikker dan bij het lassen in argon. De hoeveelheden heliumgas zijn ook hoger dan de argon-hoeveelheden. De verklaring hiervoor is reeds gegeven in § 5.1.

Tengevolge van de grote energiedichtheid van de heliumboog, is het optreden van inkarteling aan de zijkanten van de las mogelijk. Wanneer in twee lagen gelast wordt, moet de eerste goed geborsteld worden. Bij het lassen met helium ontstaat in de regel een las met een glanzend midden (na het borstelen) en wat donker "aangeslagen" zijkanten. De hoge lassnelheid bij Helium TIG-lassen heeft nog een belangrijk gevolg: De warmte beïnvloede zone naast de las is smaller dan bij aluminium TIG-lassen met wisselstroom.

BELANGRIJK:

Bovengenoemde mogelijkheden om tijdens het lassen de oxidelaag te verwijderen, zijn slechts secundaire hulpmiddelen.

Primair geldt: Voor het lassen altijd eerst de aanwezige oxidelaag mechanisch verwijderen!

In de praktijk kan hier uitstekend een roesvast stalen borstel voor worden gebruikt.

Hieronder volgen nog een aantal voorkomende verschijnselen van de lasboog en fouten in de las bij het TIG-lassen van aluminium. Waar mogelijk, wordt getracht een oplossing ter verbetering voor te stellen.

► *Booginstabiliteit*

Deze kan verschillende oorzaken hebben:

- Te lange boog. De booglengte moet in de orde van de elektrodediameter zijn. Echter niet langer dan 3 mm. Bij het lassen in helium mag de booglengte zelfs iets kleiner zijn dan de elektrodediameter.
- Smalle V- of U-naad. De boog springt van de ene naar de andere plaatkant. Wijdere groef of kortere boog zou de oplossing kunnen zijn.
- Te dikke wolfraamelektrode wanneer deze kathode is (met helium). De kathodevlek verplaatst zich dan over de onderzijde van de elektrode. Dit kan ook een te brede las veroorzaken. Oplossing: gebruik bij het TIG-lassen met de elektrode negatief altijd de (qua maximum stroom toelaatbare) dunste elektrode. Goed aanpunten!
- Elektrodevervuiling. Veroorzaakt instabiliteit van de boog. Geen contact maken met het smeltbad of het toevoegmateriaal. Goede gasbescherming.
- Elektrode op de + pool aangesloten.

► *Slecht begin van de las*

Houd de boog na de start enige tijd op de (koude) startplaats gericht, tot er voldoende metaal gesmolten is.

► *Wolframinsluitingen op de startplaats*

Oorzaak is het contact tussen elektrode en werkstuk. Start daarom met één van de eerder genoemde mogelijkheden zoals H.F. of met een hoogspanningspuls. Neem eerst voor een proefstart een startblokje. Daarna direct starten op het werkstuk. Als de wolframpunt warm is, gaat het starten gemakkelijker. Wanneer het starten moeilijk gaat bij het gemechaniseerd lassen, windt dan een koperen stripje om het (keramische) mondstuk en verbindt dat (elektrisch) met het werkstuk. Hierdoor wordt een eventuele capacatieve werking van het mondstuk opgeheven.

► *Slechte kratervulling.*

Maak bij het einde van de las geleidelijk de boog korter. Indien mogelijk: verlaag de stroom geleidelijk. Bij veel lasapparaten gaat dat automatisch. Eventuele toevoegdraad blijven aanvoeren. Draai tenslotte de toorts in een horizontale positie, zodat de boog dooft. Houdt de toorts nog enkele seconden op het lasbad gericht.

► *"Gerimpeld" of geschubd uiterlijk*

Verlaag de lastroom of verhoog de lassnelheid. Zorg voor een betere gasbescherming.

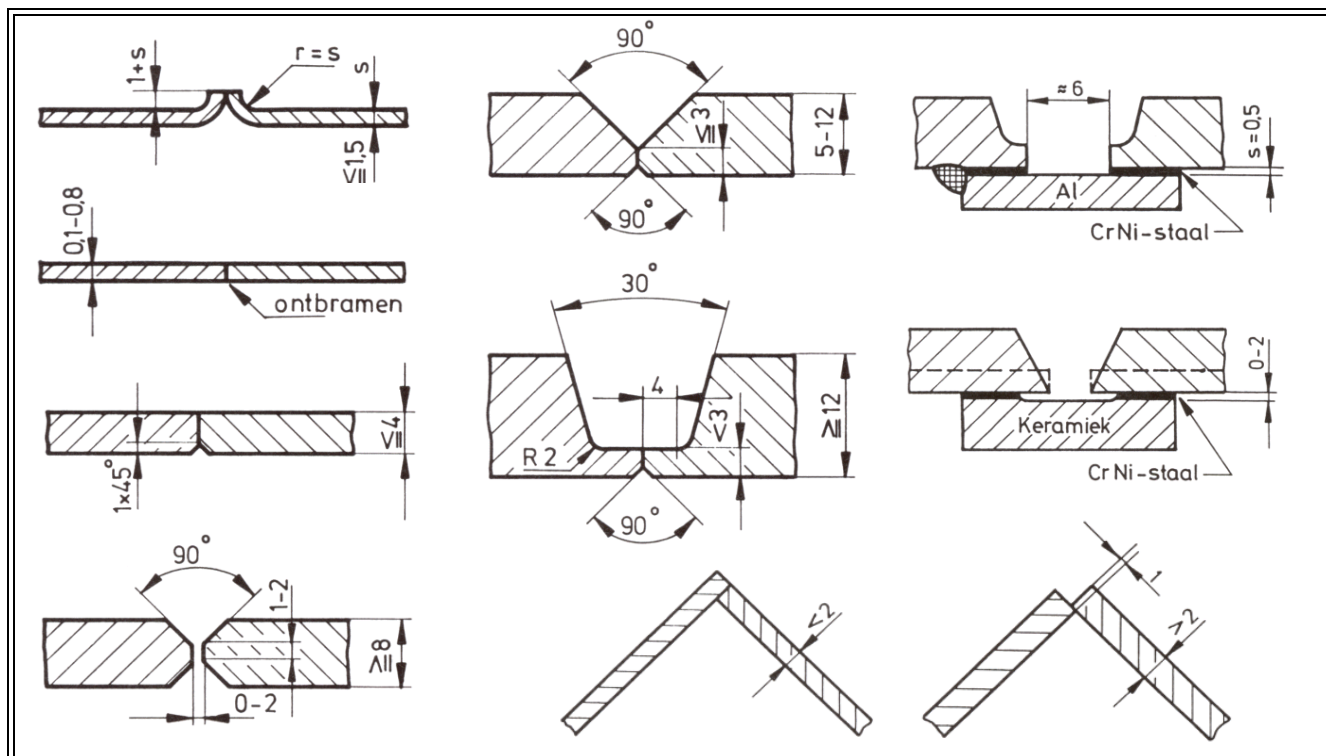
► *Poreusheid*

De oxidehuid is onvoldoende verwijderd. De gasbescherming is onvoldoende (tocht, onjuiste hoeveelheid gas, lekkage in slangen of toorts). Vet en vuil op oppervlak.

► *Zwarte aanslag*

Onvoldoende gasbescherming. Gaslek of een verkeerde stand van de lastoorts, altijd minimaal 10-15° stekend lassen!

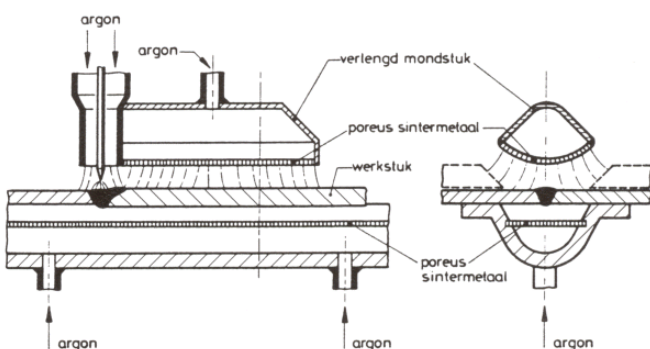
In tabel 8.13 is een aantal lasnaadvormen weergegeven, zoals die vooral voor TIG-lassen van aluminium worden gebruikt.



tabel 8.13 Lasnaadvoorbewerking voor het TIG-lassen van aluminium

8.6 TIG-lassen van een aantal bijzondere metalen

Metalen zoals titaan, zirkoon, molybdeen, niobium, tantaal en wolfram moeten worden gelast met een zeer goede gasbescherming. Reeds bij 300 °C kunnen zij verbindingen aangaan met de gasen uit de omgevende lucht. Zeker in de vloeibare fase hebben ze een grote affiniteit voor waterstof, zuurstof en stikstof. Dat betekent dat ze eigenlijk niet lasbaar zijn met de gewone voorzieningen als een lastoorts en een simpele voorziening voor backing-gas. Contact van deze metalen boven 300 °C met de lucht moet volledig worden uitgesloten. Vindt er toch opname van zuurstof, stikstof of waterstof plaats, dan is een desastreuze verbrossing van het metaal het gevolg. Dat betekent dat er gelast moet worden met zeer geavanceerde gasbacking, zoals die ook is afgebeeld in de figuren 5.8 en 5.9. Verder moet een verlengd gasmondstuk worden toegepast, zoals is geschetst in figuur 8.2.



figuur 8.2 Een verlengd mondstuk voor de gasbescherming tijdens TIG-lassen van reactieve metalen, zoals titaan

Beter is het nog deze metalen te lassen in een volledig afgesloten ruimte, die geheel met het beschermgas gevuld

is: een couveuse, ook wel "glove box" genoemd. Van te voren worden de te lassen oppervlakken goed gereinigd. Bij titaan kan voor het verwijderen van oxidelaagjes een oplossing van 2 vol.-% HF + 30 vol.-% HNO³ worden gebruikt. Voor het mechanisch reinigen gebruikt men borstels van roestvast staal of zelfs borstels van titaan.

In tabel 8.14 is een aantal fysische eigenschappen van deze metalen vermeld.

tabel 8.14 Een aantal fysische eigenschappen van reactieve metalen

metaal	smeltpunt	soortelijke massa	warmtegeleiding	elektrische weerstand
	°C	g/cm ³	W/m.K	Ω mm ² /m
titaan	1700	4,5	17	0,42
niobium	2468	8,7	54	0,145
molybdeen	2620	10,2	142	0,057
tantaal	2980	16,6	54	0,135
wolfram	3410	19,3	165	0,059

Zoals uit de tabel wel blijkt, zijn het metalen met een aantal zeer bijzondere eigenschappen. Vooral de lage elektrische weerstand van een enkele van deze metalen, gekoppeld aan zeer hoge smeltpunten, maakt deze metalen voor een aantal toepassingen zeer geschikt. Daarentegen koppelt titaan een laag soortelijk gewicht aan een betrekkelijk hoog smeltpunt en een hoge sterkte. Hiervan wordt vooral bij de vliegtuigbouw en in de ruimtevaart gebruik gemaakt. Maar ook andere industrieën, zoals bijvoorbeeld de medische industrie kent toepassingen van titaan. TIG-lassen van deze metalen gebeurt met gelijkstroom, de elektrode is dan negatief. Als beschermgas wordt bijna altijd argon gebruikt. Wanneer de gasbescherming voldoende is, zijn titaan, niobium en tantaal redelijk goed lasbaar. Molybdeen en wolfram worden dan toch nog bros, vooral ook in de overgangszone. Voorwarmen is dan ook noodzakelijk.

Hoofdstuk 9

Plasmalassen

9.1 Algemeen

Het plasmalassen kan worden gezien als een verdere ontwikkeling van het TIG-lassen. Het belangrijkste verschil tussen TIG-lassen en plasmalassen is, dat bij plasmalassen de boog wordt ingesnoerd.

In het begin van deze eeuw werden er reeds bogen ingesnoerd met behulp van een waterscherm dat de boog omhulde.

De eerste echte toepassingen voor zo'n plasmastraal werden in de jaren vijftig gevonden. In oktober 1955 werd een plasmaproces geïntroduceerd voor het snijden van metalen. Vooral voor het snijden van niet-ijzer metalen, zoals aluminium, bleek dit proces een uitstekende methode. Later werd plasmasnijden ook toegepast voor hooggelegeerde staalsoorten.

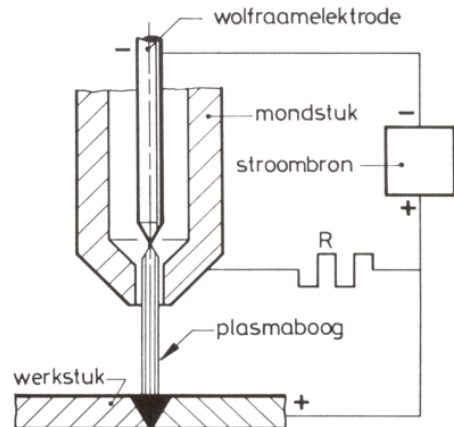
In 1960 werd voor de eerste keer melding gemaakt van het gebruik van plasmatoortsen voor lassen. De eerste echte industriële toepassingen dateren uit 1963 en 1964. Dat betekent, dat het plasma lasproces nu zo'n 42 jaar oud is. Het plasmalassen van dunne plaat en buis staat onder druk door de komst van de laser. Plasmalassen is echter nog steeds een concurrerend alternatief waar het kleinere series betreft. De investeringskosten liggen immers veel lager dan bij het laserlassen.

9.2 Procesbeschrijving

Zoals reeds in § 4.2 is beschreven, bestaat een gas van zeer hoge temperatuur uit neutrale deeltjes, zoals moleculen en atomen, en uit geladen deeltjes: vrije elektronen en positieve ionen. Hoe hoger de temperatuur van het gas, des te meer geladen deeltjes er zijn. Zo'n gas heeft de eigenschap elektrische stroom goed te geleiden. Een gas, met zo'n hoge temperatuur, wordt plasma genoemd. Bij elk booglasproces bestaat de boog voor het grootste deel uit een dergelijk plasma.

Bij plasmalassen wordt de zuil van een TIG-boog, het plasma dus, ingesnoerd met een watergekoeld koperen mondstuk. Hierdoor wordt de energiedichtheid van de boog een veelvoud van die van de oorspronkelijke TIG-boog.

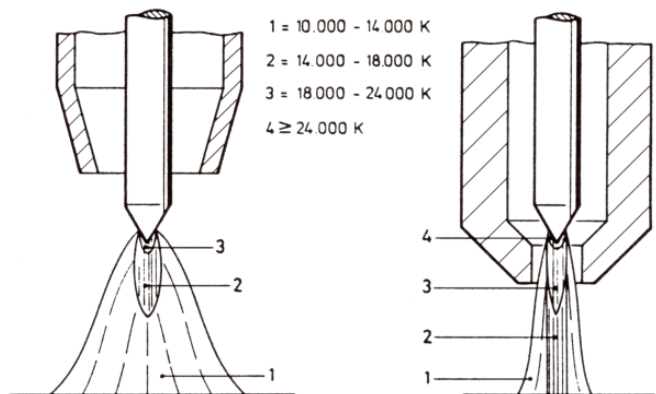
In figuur 9.1 is het plasma lasproces schematisch weergegeven. In een lastoorts is een wolframelektrode axiaal boven de opening van een koperen mondstuk geplaatst. Het mondstuk heeft een cilindervormige opening met een diameter van één tot enkele millimeters. De diameter is afhankelijk van de toepassing en de gebruikte stroomsterkte. Het mondstuk is via een weerstand verbonden met de stroombron. Met behulp van een hoogfrequent ontlading wordt een hulpboog ontstoken tussen de elektrode en het koperen mondstuk. Dit is een boog met een betrekkelijk lage stroom. Afhankelijk van de uitvoering van de lastoorts bedraagt die stroom 1 tot 8 A. Een deel van het boogplasma wordt met het plasmagas, 0,1 tot 6 l/min argon, door de opening naar buiten geblazen. Wanneer de toorts de te lassen naad tot op enkele millimeters naderd, vormt deze hulpboog een geleidend pad tussen de wolframelektrode en het werkstuk. Door nu de spanning van de hoofdstroombron in te schakelen, kan de plasmaboog worden ontstoken. Dit noemen we de "overgedragen" lasboog.



figuur 9.1 Schematische weergave van het insnoeren van de boog bij het plasmaproces

De boog bij TIG-lassen heeft een conische vorm: Vanaf de elektrodepunt wordt de boog naar het werkstuk toe steeds wijder. Dat houdt in, dat de stroomdichtheid van de boog op het werkstuk aanmerkelijk geringer is dan bij de elektrodepunt. Bij plasmalassen wordt de boog vlak bij de elektrodepunt reeds omgeven door de wand van de boring (verder plasma-opening genoemd) in het koperen mondstuk. Hierdoor neemt de boog een cilindrische vorm aan, met een diameter die nagenoeg gelijk is aan de diameter van de plasma-opening. Na het verlaten van de plasma-opening behoudt de boog in belangrijke mate de cilindrische vorm.

De temperatuur van een plasmaboog is aanmerkelijk hoger dan die van een TIG-boog. Vooral daar waar de plasmaboog het werkstuk treft, is dat het geval. De temperatuur is immers een functie van de stroomdichtheid in de boog. In figuur 9.2 is de temperatuurverdeling van een plasmaboog naast die van een TIG-boog weergegeven. De stroom bedraagt in beide gevallen 200 A, het gas is argon en de diameter van de plasma-opening is 5 mm.



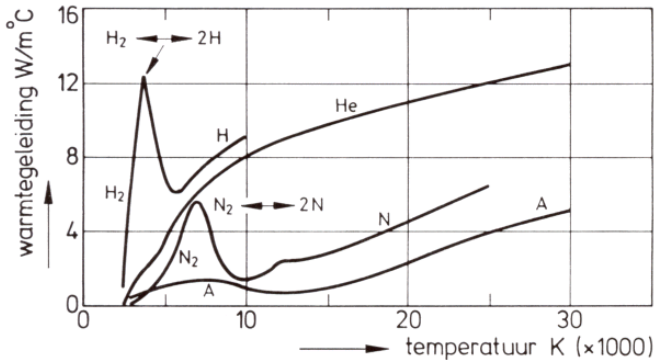
figuur 9.2 Het effect van de contractie op de temperatuur van de boog. TIG-boog: 200A, 15 V. Plasma-boog: 200A, 30V. In beide gevallen 6 liter argon per minuut. De diameter van de plasma-opening is 5 mm

Hieruit blijkt dat de kern van de plasmaboog, die het werkstuk raakt, zo'n 4.000 °C hoger in temperatuur is dan de TIG-boog. Een ander verschil met de TIG-boog is, dat de snelheid van het hete plasmagas aanmerkelijk groter is. Dat verschil kan wel een factor 4 bedragen.

De plasmaboog wordt omgeven door een beschermgas. De plasma-opening is in de regel zo klein, dat het smeltbad op het werkstuk, zonder extra beschermgas, niet vol-

doende tegen de inwerking van de lucht beschermd zou zijn. Daarom heeft de toorts een extra gasmondstuk, waarmee het beschermgas wordt toegevoerd. Deze omgeeft het plasmamondstuk.

Behalve de bescherming van het smeltbad, kan dit gas nog een tweede functie vervullen. Zoals in § 5.1 reeds even is besproken, zijn er gassen met een grotere warmtegeleiding dan argon. In figuur 9.3 is voor een aantal gassen de warmtegeleiding uitgezet als functie van de temperatuur.



figuur 9.3 De warmtegeleiding van enkele gassen bij hoge temperatuur

In de regel bestaat het beschermgas bij plasmalassen uit een mengsel van argon + waterstof of argon + helium. De grote warmtegeleiding van beide toevoegingen aan het argon zorgt er mede voor dat de plasmaboog de cilindervorm blijft behouden; soms heeft de toevoeging zelfs een extra insnoering van het plasma tot gevolg. De buitenste rand van de boog wordt door het beschermgas gekoeld, waardoor de stroomgeleiding in het binnenste deel van de boog moet plaats vinden. Waterstof in het beschermgas heeft een zeer nauwe boog tot gevolg. Het gas moet eerst dissociëren. De hiervoor benodigde dissociatiewarmte koelt de buitenrand van de boog nog eens extra, waardoor de lasboog extra wordt ingesnoerd.

9.2.1 Enige procesvarianten

Zoals dat ook bij TIG-lassen het geval is, wordt plasmalassen meestal uitgevoerd met gelijkstroom. In verreweg de meeste gevallen is dan de wolfraamelektrode negatief. Maar ook in deze configuratie bestaat er een aantal verschillende mogelijkheden. In deze paragraaf zullen de verschillende procesvarianten van plasmalassen achtereen worden beschreven.

a. Plasmalassen met een overgedragen boog, gelijkstroom en de elektrode negatief

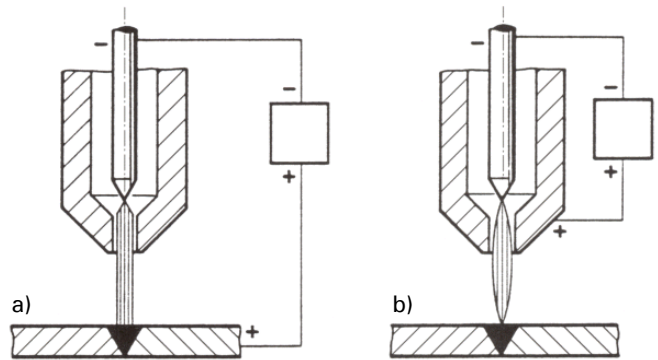
Dit is in feite de meest gebruikte opstelling. In figuur 9.4 is dat de eerst geschetste variant. Er loopt in dit geval een stroom door de plasmaboog naar het werkstuk. Het werkstuk is anode (+).

b. Plasmalassen met een niet overgedragen boog

Hierbij fungeert het mondstuk als anode. Het werkstuk is dan niet verbonden met de stroombron.

Het mag duidelijk zijn dat er een groot verschil is in warmteoverdracht tussen beide boogtypen. In het laatste geval, bij het niet overgedragen plasma, krijgt het werkstuk alleen maar warmte door stroming van het hete plasmagas. Wanneer het plasma wel overgedragen is, wordt daar nog de extra anodewarmte aan toegevoegd. Deze is zeer aanzienlijk.

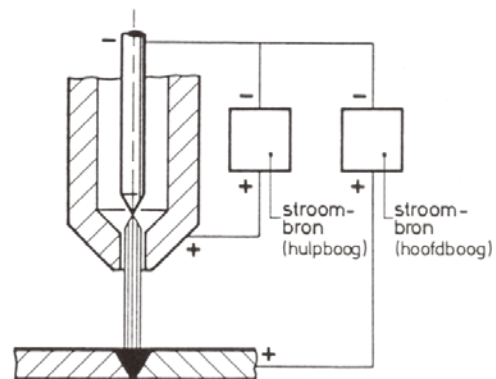
De variant met het niet-overgedragen plasma wordt slechts zeer sporadisch toegepast en is meer van belang wanneer het werkstuk een niet geleidend materiaal is (bijvoorbeeld lassen van kunststoffen).



figuur 9.4 Een tweetal mogelijkheden voor plasmalassen.
a) Plasmalassen met een overgedragen boog;
b) Plasmalassen met een niet overgedragen boog

c. Combinatie van a en b

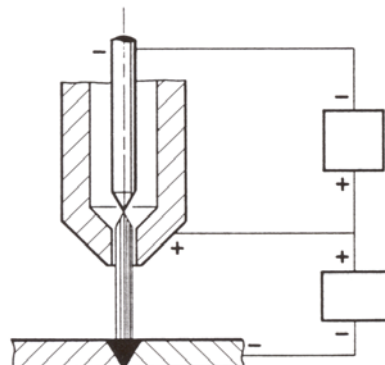
Een veelgebruikte schakeling voor plasmalassen wordt getoond in figuur 9.5. Hierbij wordt een combinatie toegepast van de beide vorige schakelingen. De niet overgedragen plasmaboog wordt eerst gestart. Deze wordt vervolgens gebruikt als een krachtige hulpboog. Wanneer deze het werkstuk raakt, wordt de hoofdboog ontstoken. De stroom, die door het werkstuk gaat, kan nu onafhankelijk van de plasmastroom worden geregeld.



figuur 9.5 Plasmalassen met een overgedragen boog en een stabiliserende hulpboog

d. Er is ook nog een schakeling, die hoofdzakelijk bij het lassen van aluminium wordt toegepast (figuur 9.6)

Hierbij is de wolfraamelektrode weer negatief en wordt er een boog tussen de elektrode en het koperen mondstuk ontstoken. Het mondstuk is nu echter verbonden met de positieve pool van een tweede stroombron, terwijl het werkstuk negatief is. In tegenstelling tot het lassen met wisselstroom, vindt hierbij een continue reiniging van het aluminium plaats.



figuur 9.6 Plasmalassen met het werkstuk negatief

- e. **Er is nog een aantal minder gebruikte schakelingen**
Deze zullen hier niet worden genoemd. Eén uitzondering maken we voor de zogenaamde omgekeerde schakeling. Hierbij is de wolframelektrode positief en het werkstuk negatief. Net als bij de vorige opstelling is deze manier van plasmalassen geschikt voor aluminium. De wolframelektrode wordt echter erg heet. Hij is daarom betrekkelijk dik (6 mm bij iets hogere stromen, bijvoorbeeld bij 100 A) en moet zeer direct met water worden gekoeld. En dan nog smelt de punt van de elektrode enigszins.

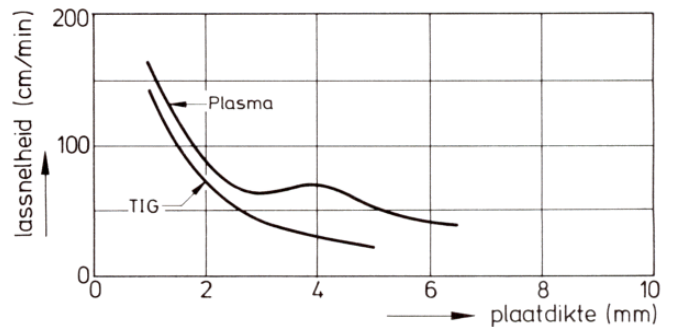
9.3 Enige voor- en nadelen van plasmalassen in vergelijking met TIG-lassen

De betrekkelijk grote afmetingen van de lastoorts bij grotere stroomsterkten vormen een beperking voor plasmalassen. De waterkoeling van het mondstuk en de extra gascup hebben een grote diameter van de toorts tot gevolg. Dit is soms nadelig voor de toegankelijkheid tot de lasplaats. Verder moet de lasnaadvoorbewerking (vooral bij het "keyhole lassen" (zie § 12.3)) zeer nauwkeurig zijn. Een andere beperking vormt het feit dat de apparatuur nogal gecompliceerd is. Verder is de prijs van de apparatuur circa 2 tot 3 maal zo hoog als van TIG-apparatuur.

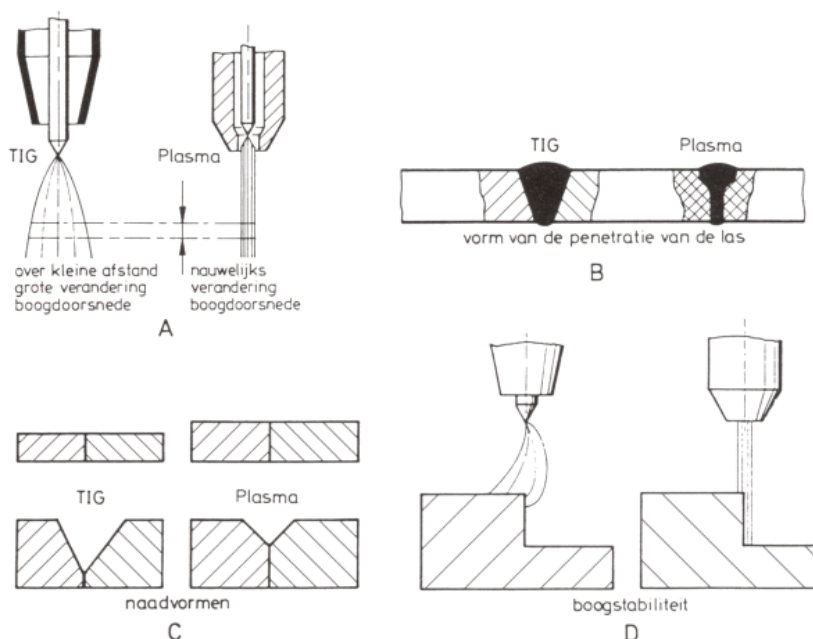
Voordelen zijn er natuurlijk ook te noemen:

1. De divergentie van de TIG-boog is betrekkelijk groot. Deze kan wel 45° bedragen. Bij de plasmaboog is er nauwelijks van enige divergentie sprake (figuur 9.7A). Dat betekent dat bij plasmalassen de gevoeligheid voor booglengte veranderingen kleiner is dan bij TIG-lassen.
2. Veranderingen van de stroomsterkte hebben bij plasmalassen slechts een gering effect op de boogdiameter en vorm. Bij TIG-lassen wordt de boog bij grotere stroomsterkte groter in diameter. Is daarentegen de voortloopsnelheid van beide processen gelijk, dan kan de stroom bij plasmalassen aanmerkelijk lager worden gekozen (ca. $2/3$ van de TIG-stroom). De in het werkstuk gebrachte warmte is bij plasmalassen geringer, waardoor de warmte beïnvloede zone kleiner is (figuur 9.7B). De vervorming van het materiaal is bij plasmalassen eveneens geringer.

3. Door de geringe divergentie en de hoge mate van contractie is de energiedichtheid van de plasmaboog erg groot. De lassnelheid van plasmalassen kan dan ook vaak groter worden gekozen dan bij TIG-lassen. Dit komt eveneens tot uiting bij het lassen van I-naden en V-naden. Bij het gebruik van I-naden kan de plaatdikte bij plasmalassen aanmerkelijk groter zijn dan bij TIG-lassen (plasmalassen tot 10 mm materiaaldikte zonder afschuining van de lasnaadkanten). Bij V-naden kan het staande deel groter zijn. In beide gevallen kan het wel een factor 2 à 3 uitmaken. Dit is schematisch weergegeven in figuur 9.7C.
4. De plasmaboog is erg stabiel en zeer stijf. Dit wordt gedemonstreerd in figuur 9.7D. De plasmaboog is moeilijk af te buigen. Ook bij lage stroomsterkten (bijvoorbeeld < 1 A) is de boog nog stabiel. Vooral wanneer er gewerkt wordt met een opstelling zoals in figuur 9.5 is afgebeeld.
5. Het gevaar van wolframverontreinigingen in de las bij plasmalassen aanmerkelijk kleiner, omdat de elektrode in het toortshuis opgesloten zit.
6. Wanneer eenmaal de hulpboog is ontstoken, hoeft er voor verdere ontsteking van de plasmaboog geen gebruik meer worden gemaakt van H.F.
7. De standtijd van de wolframelektrode is groter dan bij TIG-lassen.
8. Vooral bij het lassen van plaatdikten groter dan 3 mm, is het plasma lasproces sneller dan het TIG-lassen. In figuur 9.8 is dat weergegeven.



figuur 9.8 Vergelijking van de lassnelheden van TIG- en plasmalassen

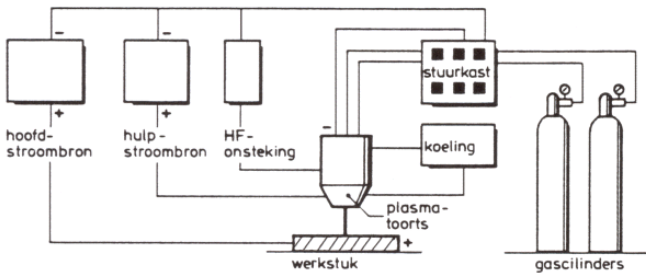


figuur 9.7 Vergelijking tussen TIG- en plasmalassen

Hoofdstuk 10

De apparatuur voor plasmalassen

De plasmalassapparaat bestaat uit een stroombron, een lastoorts met slangenpakket, voorzieningen voor gas en koelwater en een stuurkast voor de processturing. In figuur 10.1 is een opstelling voor plasmalassen schematisch weergegeven.



figuur 10.1 Opstelling voor plasmalassen

Afhankelijk van de toepassingen en de leverancier worden de stuurkast en de stroombron apart geleverd, of zijn ze in één kast verenigd.

10.1 De stroombron

Net als bij TIG-lassen heeft de stroombron voor plasmalassen een dalende karakteristiek. De regelbereiken van plasmastroombronnen kan men in drie verschillende groepen verdelen:

- 0,1 - 20 A. Deze apparatuur wordt gebruikt voor microplasmalassen. De stroombron is meestal een transistorbron, waarvan de stroom elektronisch regelbaar is.
- 1 - 150 A. Deze apparatuur wordt gebruikt voor plasmalassen met de zogenaamde "melt-in techniek". Zie hiervoor §12.2.
- 5 - 350 A of hoger. Het toepassingsgebied hiervan is het "keyhole lassen".

Bij de stroombronnen voor plasmalassen is in de regel een aantal andere voorzieningen ingebouwd, zoals: Stroombron voor de hulpboog, H.F.-ontsteking, sturing voor gas en water, gashoeveelheidsmeters, waterbeveiliging, en dergelijke.

Ook zijn er stroombronnen voor plasma-wisselstroomlassen. Met een sinusvormige wisselstroom is plasmalassen niet goed uitvoerbaar. De boog moet immers ook hier bij iedere nuldoorgang van de stroom worden herontstoken. Bij plasmalassen is dat niet goed mogelijk.

Anders is het met een blokvormige wisselstroom ("square wave"). Hierbij is, net als bij TIG-lassen, het herontsteken bij stromen > 50 A niet nodig. Door het sturen van de positieve en negatieve stroomperiodes van de elektrode (bijvoorbeeld wanneer de elektrode 30% van de tijd positief is) kan de levensduur ervan zeer acceptabel zijn, terwijl er goede lasresultaten bij het lassen van aluminium worden verkregen.

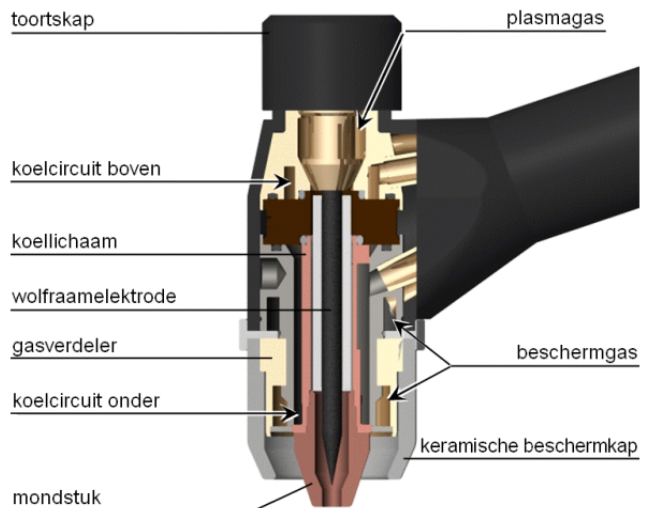
Het plasmawisselstroom lassen wordt slechts op zeer beperkte schaal toegepast voor het lassen van aluminium en zijn legeringen.

Tenslotte zijn er gelijkstroombronnen waarmee een gepulseerde stroomvorm kan worden verkregen. Hierop wordt in het verdere verloop van deze voorlichtingspublicatie nog terug gekomen (§ 13.5).

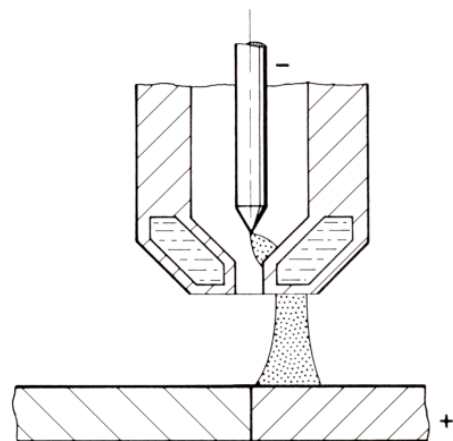
10.2 De plasmatoorts

De toorts voor plasmalassen wordt uiteraard met water gekoeld. Vooral het koperen mondstuk zou zonder koeling meteen smelten. Er bestaan, wat betreft de koeling, nogal verschillen tussen de toortsen onderling. Sommige mondstukken worden direct met vloeistof gekoeld. Dat wil zeggen, dat de koelvloeistof direct in contact is met het mondstuk. Andere toortsen, die voor lagere stroomsterkten worden gebruikt, hebben een indirecte koeling. Hierbij wordt het mondstuk op een gekoeld plasmahuis geschroefd. Deze laatste koeling is natuurlijk veel minder effectief, aangezien de warmtestroom eerst het grensvlak tussen de twee koperdelen moet passeren. Voor het verwisselen van het mondstuk is dit systeem echter veel gemakkelijker. Er wordt hierbij immers geen vloeistofkanaal geopend, waardoor er minder kans is dat er vocht in de lastoorts kan komen.

In de toorts is de elektrode over een groot deel van de lengte afgeschermd (voor overslag van hoogfrequent bogen) ten opzichte van het plasmahuis. Voor een schematische weergave van een plasmatoorts, zie figuur 10.2. Ook de verdere elektrische isolatie ten opzichte van het plasmahuis is optimaal. Dit moet gebeuren, om "dubbelbogen" te voorkomen. Toch kan "dubbelbogen" dan nog wel eens voorkomen. In figuur 10.3 is het verschijnsel schematisch weergegeven.



figuur 10.2 Schematische weergave van een plasmatoorts

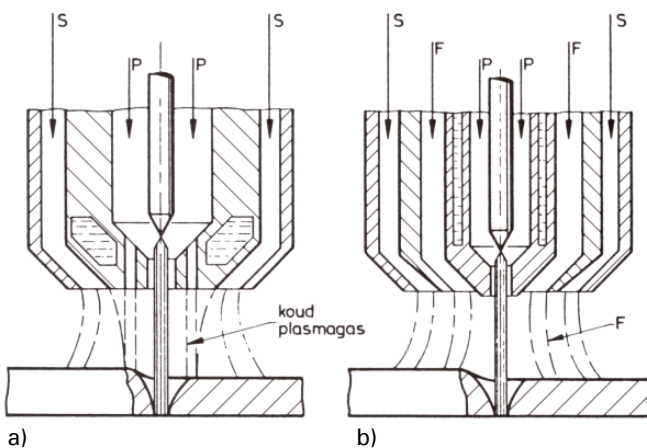


figuur 10.3 "Dubbelbogen" via het mondstuk van de plasmatoorts

Dit "dubbelbogen" treedt vooral op wanneer de boog, die door de plasma-opening zou moeten gaan, om de een of andere reden verstoord wordt. Voorbeelden: Een te nauwe en/of te lange plasma-opening. Of wanneer de plasma-opening vervuld is. Of wanneer de tophoek van de elektrode niet goed geslepen is.

Een belangrijke taak van de plasmatoorts is de geleiding van de verschillende gassen:

1. Het **plasmagas**. Dit is het gas dat langs de elektrode in de plasmaboog wordt gevoerd. Het is van groot belang dat dit gas vóór het lassen alle lucht uit de toorts verdreven heeft. Dat kan op een aantal manieren effectief gebeuren: Door bijvoorbeeld boven in het plasmahuis een gaslens aan te brengen (zie ook § 3.1.1). Een andere methode is het gas boven in het plasmahuis tangential in te voeren.
2. Het **beschermgas**. Ook hiervoor is het van groot belang om het gas op een juiste wijze aan te voeren. Dit gas moet de boog en het smeltbad beschermen tegen de omringende lucht. Daarom mag er zeker geen turbulentie optreden, omdat dan juist lucht uit de omgeving zou worden aangezogen. Dus ook hier is een gaslens op zijn plaats.
3. **Focusseergas**. In figuur 10.4 is een tweetal methoden geschetst om de plasmaboog nog eens extra in te snoeren. In figuur 10.4a wordt deze extra contractie bereikt door een deel van het koude plasmagas door een tweetal gaatjes, terzijde van de plasma-opening, te laten stromen. De denkbeeldige verbindingslijn tussen de gaatjes staat loodrecht op de lasrichting. De plasmaboog wordt daardoor aan de buitenzijde gekoeld. Hierdoor vindt een extra contractie plaats. Het voordeel hiervan is, dat er grotere lassnelheden haalbaar zijn.
Een andere methode voor een extra contractie van de boog is gegeven in figuur 10.4b. Hierbij wordt tussen de plasma-opening en het beschermgas ringvormig een extra gas aangevoerd. Dit gas bevat helium of een goed warmtegeleidend twee-atomig gas.
Deze toortsen met extra focussering worden vooral toegepast bij het zogenaamde "keyhole" lassen, waarover in § 12.3 meer.



figuur 10.4 Plasmatoortsen met een extra focusseergas
P = plasmagas; S = beschermgas; F = focusseergas

Een belangrijk onderdeel van de toorts is uiteraard de elektrode. Net zoals bij TIG-lassen is deze elektrode van wolfram, "gelegeerd" met een metaaloxide als dope. Ze wordt eveneens puntvormig geslepen. Dit moet machinaal te gebeuren, zodat de punt van de elektrode steeds in het midden van de plasma-opening zit. Een belangrijk voordeel van plasmalassen is, dat tijdens het lassen de

elektrode moeilijker in contact komt met metaaldamp en zuurstof uit de lucht dan bij TIG-lassen. De slijtage van de wolframelektrode is daarom geringer dan bij TIG-lassen. Voor het lassen met gelijkstroom, negatieve pool, worden de elektroden puntvormig geslepen tot een hoek van bijvoorbeeld 30°. In de regel bevatten ze als dope 1 - 4% lanthaanoxide afhankelijk van de toepassing.

10.3 Processturing voor plasmalassen

Een plasma lasinstallatie bevat, naast de stroombron en de toorts, nog een aantal gascilinders, een koelvloeistofvoorziening en, als die al niet bij de stroombron is ingebouwd, een processturing.

Zo'n processturing is natuurlijk afhankelijk van de mogelijkheden van de apparatuur. Bij de meest eenvoudige installaties is er in ieder geval een mogelijkheid om de gasstroom aan en uit te schakelen (met elektrisch bedienbare gaskleppen). Nadat het gas enige seconden heeft gestroomd, wordt met behulp van een H.F.-ontlading of een hoogspanningspuls de hulpboog ontstoken tussen de elektrode en het mondstuk. Nu kan op elk gewenst ogenblik de hoofdboog worden ontstoken, door de hulpboog in contact te brengen met het werkstuk en vervolgens met behulp van een schakelaar de open spanning aan te brengen.

Afhankelijk van het type stroombron kan de lasstroom worden gepulseerd. Met behulp van de processturing kunnen dan alle pulsparameters worden ingesteld. Dit wordt o.a. toegepast bij lassen in positie.

Tenslotte zijn er nog mogelijkheden in de processturing om het proces op de juiste wijze te doen aflopen: downslope van de stroom, gasnastroming, enz.

Hoofdstuk 11

Gassen voor plasmalassen

Bij plasmalassen worden nagenoeg dezelfde gassen gebruikt als bij TIG-lassen. Alleen wordt bij plasmalassen onderscheid gemaakt tussen de binnenste gasstroom, het plasmagas, en het buitengas, het beschermgas. Soms wordt ook nog een gefocusseerd gas gebruikt.

11.1 Plasmagas

Natuurlijk moet het plasmagas een inert gas zijn. Het mag geen chemische reactie aangaan met de wolfram-elektrode. Verder moet het plasmagas makkelijk ioniseerbaar zijn. Is dat laatste niet het geval, dan zou de plasma-spanning te hoog oplopen en zou de plasmaboog doven. Ook hier is argon het aangewezen gas.

Voor het lassen van chroomnikkelstalen en van nikkellegeringen wordt aan het argon iets waterstof toegevoegd. De hoeveelheid waterstof varieert van 2 - 8%. Zo'n waterstof bevattende boog is heter dan een boog van zuiver argon. De lassnelheid is daarom hoger. Bij het plasmalassen van titaan en zirkoon wordt wel helium aan het plasmagas toegevoegd. Ook hiermee wordt een hogere lassnelheid bereikt.

De uitstroomsnelheid van het plasmagas is eveneens van belang. Te hoge stroomsnelheid kan het gesmolten materiaal uit het smeltbad blazen. Te lage gassnelheid is vaak de oorzaak van snelle erosie van het plasmamondstuk. De gewenste gashoeveelheden worden in de tabellen 12.1, 13.1, 13.2 en 13.4 vermeld.

11.2 Beschermgas

Als beschermgas wordt bij austenitische staalsoorten en nikkellegeringen, mengsels van argon en waterstof gebruikt. Voor het lassen van ongelegeerd en laaggelegeerd staal worden ook wel mengsels van argon en CO₂ gebruikt. Aluminium en reactieve metalen, zoals titaan en zirkoon worden gelast met argon/helium mengsels als beschermgas.

De toevoegingen aan het argon bij beschermgassen hebben vaak een dubbele functie. In de eerste plaats zorgen ze voor een extra bescherming van het smeltbad tegenover de zuurstof en stikstof uit de omringende lucht. Waterstof wordt toegevoegd om als reducerend gas een extra bescherming ten opzichte van zuurstof te geven. CO₂ is een meeratomig gas. Door de dissociatie biedt CO₂ een extra bescherming tegen stikstof (Verklaring: door dissociatie van CO₂ wordt het aantal deeltjes $\frac{3}{2} \times$ zo groot: $2 \text{ CO}_2 \rightarrow 2 \text{ CO} + \text{ O}_2$. De lucht wordt daardoor extra verdrongen). Verder zorgen deze gassen, net als helium, voor een extra contractie van de boog; helium ten gevolge van de grote warmtegeleiding, H₂ eveneens, en H₂ en CO₂ ten gevolge van de dissociatie en de daarbij behorende dissociatiewarmte.

In tabel 11.1 is een aantal gassamenstellingen gegeven voor beschermgassen bij het lassen van verscheidene metaalsoorten.

11.3 Focuseergas

Wanneer een focuseergas wordt gebruikt, dan is dat in de regel een mengsel van argon en helium, of een mengsel van argon en waterstof.

tabel 11.1 Beschermgassen voor plasmalassen

metaal	beschermgas
on- en laaggelegeerd staal	argon, argon + 5 - 25% CO ₂ , argon + O ₂
austenitische staalsoorten	argon, argon + 2 - 8 % H ₂ , argon-helium mengsels
nikkel en nikkellegeringen	argon, argon + 2 - 8 % H ₂ , argon-helium mengsels
titaan	argon, argon - helium mengsels
koper en koperlegeringen	argon, argon - helium mengsels
aluminium	argon, argon - helium mengsels

Hoofdstuk 12

Enkele veel gebruikte procesvormen van plasmalassen

In § 9.2.1 werd reeds een aantal procesvarianten besproken. Hierbij werd vooral de nadruk gelegd op de onderlinge schakeling van de elektrode, het mondstuk en het werkstuk. De belangrijkste varianten waren:

- Elektrode negatief, overgedragen plasmaboog.
- Elektrode negatief, niet overgedragen plasmaboog.
- Elektrode positief, overgedragen plasmaboog.
- Elektrode negatief, mondstuk positief, werkstuk negatief, overgedragen plasmaboog.
- Wisselspanning tussen elektrode en werkstuk, overgedragen plasmaboog.

De procesvormen, die in dit hoofdstuk worden besproken, hebben betrekking op de eerste en tevens de meest voorkomende variant: elektrode negatief + een overgedragen plasmaboog. De procesvormen zijn voornamelijk ingedeeld naar stroomsterktegebieden (zie tabel 12.1).

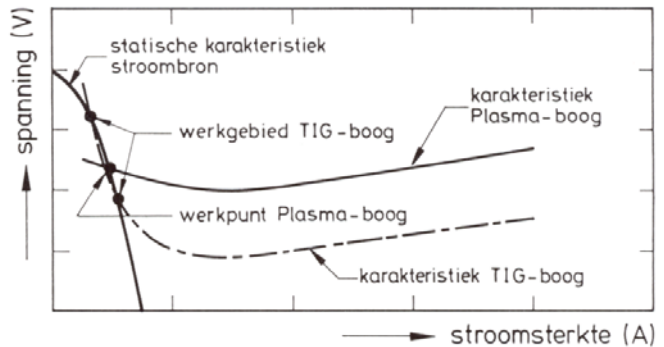
12.1 Microplasmalassen

Deze vorm van plasmalassen wordt vooral gekenmerkt door de lage stroomsterkte van de plasmaboog en dus door de geringe materiaaldikte die ermee kan worden gelast. De minimaal bereikbare plaatdikte gaat wel tot 0,025 mm, terwijl draaddikten tot 0,010 mm ermee kunnen worden verbonden. Dit gebeurt bij stroomsterkten tussen 0,1 - 20 A.

Ook bij TIG-lassen kunnen dergelijke lage stroomsterkten worden gebruikt. De boog is dan echter minder stabiel. De anode "wandelt" over het werkstukoppervlak, zoekend naar een goed aangrijpingspunt. Bij plasmalassen met zo'n lage stroom is de boog veel strakker gericht naar de te lassen plaats. De TIG-boog is in dit lage gebied ook veel meer diffuus.

De grotere stabiliteit van de plasmaboog kan onder andere worden afgeleid uit figuur 12.1. Hierin is de statische ka-

rakteristiek van een stroombron gegeven. Tevens is er de karakteristiek van een plasmaboog en die van een TIG-boog getekend. Het is duidelijk, dat het werkpunt (het snijpunt van de twee karakteristieken) bij TIG-lassen met lage stroom veel onduidelijker is dan bij plasmalassen met lage stroom. Bij TIG-lassen is meer sprake van een vaag werkgebied, terwijl bij plasmalassen er een duidelijk gedefinieerd werkpunt is.



figuur 12.1 De statische karakteristiek van de stroombron en de karakteristieken van de bogen bij TIG- en bij plasmalassen en de "werkpunten"

12.2 Plasmalassen met de "melt-in" techniek

Deze techniek komt veel overeen met het TIG-lassen. Hierbij moeten we denken aan plasmalassen met een stroomsterkte tussen 1 en 150 A. Hoewel de stijfheid van de boog bij deze stroomsterkten ook in belangrijke mate aanwezig is, is het in dit gebied moeilijker de voordelen van plasmalassen te laten opwegen tegen de nadelen. Er is eveneens het grote voordeel dat de wolfram-elektrode minder aan slijtage onderhevig is, dan bij TIG-lassen. De toorts is echter veel gecompliceerder en groter in omvang.

Bij deze stroomsterkten is het veel meer een afwegen van de voor- en nadelen van beide processen. Toch verdient het plasmaproces in een aantal gevallen de voorkeur. Een voorbeeld hiervan is het lassen van roestvast stalen pijpen.

tabel 12.1 Elektrodediameter, tophoek, plasma-opening, gascupdiameter en gashoeveelheden

stroomsterkte gebied		elektrode diam.	tophoek elektrode	diameter plasma-opening	plasmagas	diameter gascup	beschermgas	
A		mm		mm	l/min	mm	l/min	
micro	0,1 - 3	1,0	15°	0,6	0,1	8	4 - 7	
	5			0,8	0,2			
	10			0,8	0,3			
	15			1,0	0,5			
"melt-in"	30	1,5	30°	1,0	0,5	12	4 - 7	
	50			1,2	0,7			
	75			1,6	1,0			
	100			2,0	1,2			
keyhole	100	2,4	30°	2,0	1,2	17	8 - 15	
	150			2,4	1,5			
	200			2,4	1,5			
	200	3,2	60°	3,0	2,5	18	15 - 30	
	250			4,0	3,0			
	300			4,8	3,5			3,5
	350				4,0			4,0

12.3 Plasmalassen met de "keyhole" techniek

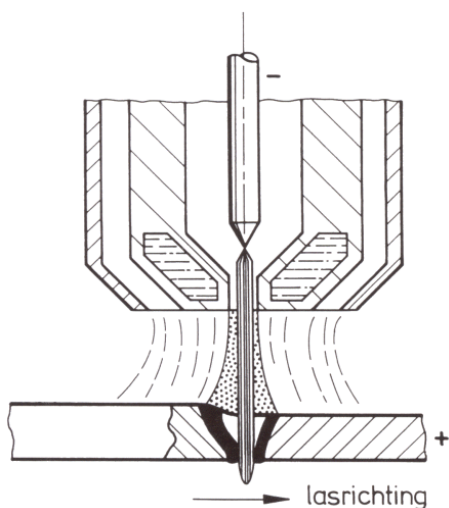
De naam keyhole lassen is zo ingeburgerd in de laswereld, dat een vertaling in "sleutelgatlassen" verder achterwege wordt gelaten.

Deze wijze van plasmalassen wordt gebruikt voor het lassen van I-naden vanaf een plaatdikte van 3 mm en een stroomsterkte > 150 A. Belangrijk is hierbij de juiste combinatie van lasstroom, booglengthe, lassnelheid en de hoeveelheid plasmagas. Er wordt door de gehele dikte van de plaat een gat gevormd tengevolge van de boogenergie en de plasmastroming. De diameter van het gat is afhankelijk van de stroom, de diameter van de plasma-opening en de hoeveelheid gas; hij is tussen 1 en 3 mm. Het gesmolten materiaal vóór het gat wordt door de plasmastraal verdrongen en vloeit achter de boog in het gat. Tengevolge van de oppervlaktespanning zakt het smeltbad niet onder uit het gat, maar er ontstaat een fraaie doorlassing, zowel aan de onderzijde als aan de bovenzijde. In één keer kunnen plaatdikten van 3 - 10 mm worden gelast.

Omdat de doorlassing geheel wordt beheerst door de oppervlaktespanning van de smelt, is er aan de onderzijde geen ondersteuning nodig. De lasparameters lasstroom, gassnelheid en lassnelheid moeten gedurende het proces wel uitstekend met elkaar in evenwicht zijn, alsmede mag de afstand lastoorts werkstuk tijdens het lassen niet veranderen. Instabiliteiten veroorzaken gemakkelijk het "verloren raken van het sleutelgat", waardoor er een onvollende penetratie ontstaat.

In figuur 12.2 is het plasma keyhole lassen schematisch afgebeeld. Om het proces goed te laten verlopen, moet de plasmastraal zodanig zijn afgesteld, dat het gat - naar onder toe - conisch toeloopt. Pas dan kan met behulp van de oppervlaktespanning worden voorkomen dat het materiaal uit het gat vloeit.

Doordat de plasmastraal, bij een goede "keyhole vorming" onder uit het gat komt, kan tijdens het lassen worden gemeten of de doorlassing voldoende is. Voor een eventuele procesregeling is dat van belang.



figuur 12.2 Schematische voorstelling van plasma keyhole lassen

Zoals reeds werd vermeld, wordt keyhole lassen vooral gebruikt voor het lassen van I-naden. Plaatdikten van 3 - 10 mm kunnen op deze wijze uitstekend worden gelast. In de praktijk komt men tegenwoordig zelfs lassen tegen met dikten oplopend tot 12 mm. In figuur 12.3 is een doorsnede afgebeeld van een las in 7 mm dik roestvast staal. In figuur 13.3 van het volgende hoofdstuk worden andere voorbeelden getoond.



figuur 12.3 Doorsnede van een las gemaakt met het keyhole effect in 7 mm dik roestvast staal

Wanneer toevoegmateriaal wordt gebruikt, is het eveneens mogelijk V- en Y-naden met het keyhole effect te lassen. Door geringe toevoegingen van draad wordt het evenwicht niet verstoord. Lassen met de hand is bij keyhole lassen niet mogelijk. Zoals reeds is gezegd, moeten alle lasparameters nauwkeurig met elkaar in evenwicht zijn. Een kleine snelheidsverandering of booglengthe verandering zou voor de vorming van het gat al fataal zijn.

Hoewel bij keyhole lassen de plasmaboog (en dus ook het plasmagas) door het gat onder de plaat uitkomt, moet er een backinggas worden gebruikt. Vooral bij het lassen van hooggelegeerde staalsoorten is dat noodzakelijk.

Hoofdstuk 13

Toepassingen van plasmalassen

Zoals in het vorige hoofdstuk werd beschreven, worden er drie gebieden voor plasmalassen onderscheiden. Voor elk van deze gebieden bestaan er lastoortsen met een aantal specifieke afmetingen, elektroden en benodigde gashoeveelheden. Deze zijn vooral afhankelijk van de gebruikte lasstroom. De fabrikant van de apparatuur geeft in een handleiding aan, welke elektroden, mondstukken, enz. moeten worden gebruikt. Tabel 12.1 is dan ook slechts een globaal overzicht om enige indruk te krijgen van het onderlinge verband tussen de verschillende lasparameters, elektroden, mondstukken, enz.

Voor de zeer lage stromen bij microplasmalassen wordt de elektrode aan de punt scherp aangeslepen. In het melt-in gebied en voor het keyhole gebied wordt de punt aangeslepen met de in de tabel vermelde hoek, tot er nog een vlakje met een diameter van 20% van de elektrodediameter overblijft.

De plasma-opening moet zeer zorgvuldig worden gekozen. Een te kleine opening kan leiden tot dubbelbogen, terwijl een te grote opening onvoldoende contractie van de boog tot gevolg heeft.

Dergelijke overwegingen gelden ook voor de hoeveelheid plasmagas. Een te lage hoeveelheid heeft extra slijtage van het plasmamondstuk tot gevolg. Een te hoge hoeveelheid kan doven van de boog tot gevolg hebben. Soms treedt er "dubbelbogen" op. Voor het kiezen van de juiste hoeveelheid plasmagas, zijn de plasmamondstukken met de extra gaatjes om de plasma-opening zeer geschikt: Wanneer in zo'n geval de hoeveelheid plasmagas iets overgedimensioneerd wordt, gaat door de plasma-opening net zoveel gas als door de plasmastroming wordt aangezogen. De rest van het gas verlaat de toorts door de ring van gaatjes om de plasma-opening.

13.1 Enkele naadvormen voor plasmalassen

In tabel 13.1 is een aantal naadvormen voor plasmalassen geschetst. Uiteraard kan dat slechts in z'n algemeenheid worden aangegeven. Voor de verscheidene metalen komen er nogal wat verschillen voor. Toch is er een aantal algemene regels. Zo mag een eventuele opening in een naad niet meer bedragen dan maximaal 10% van de materiaaldikte. Dit brengt met zich mee dat er bij plasmalassen in de regel goede klemrichtingen voor het werkstuk moeten worden gebruikt. Zeer dunne plaatdikten, 0,2 mm en dunner, worden bij voorkeur met opgezette kanten (tabel 13.1, 2e naadvorm) gelast. Bij de "melt-in" methode worden de I-naden ondersteund met een koperen onderlegstrip.

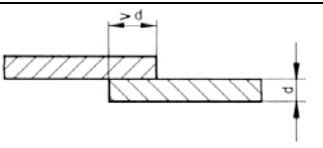
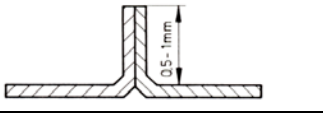
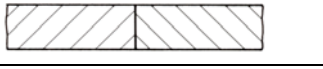
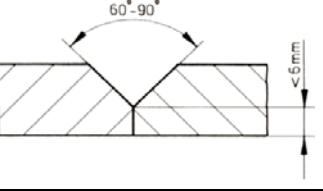
Bij het bespreken van de toepassingen van plasmalassen zullen we ons beperken tot microplasmalassen en keyhole lassen. In deze gebieden zijn vooral de toepassingen te vinden. Immers het gebied van de "melt-in" methode wordt voor een belangrijk deel gedekt door TIG-lassen.

13.2 Enige toepassingen van micro plasmalassen

Een aantal toepassingsgebieden voor microplasmalassen zijn:

- ▶ fabricage van kleine apparatuur en toepassingen bij lage temperaturen. Hier worden onder andere gelast: metalen balgen, pijp, folies;

tabel 13.1 Een aantal naadvormen voor plasmalassen

0,1 - 1,0 mm		micro-plasma
0,1 - 1,5 mm		micro-plasma
1,5 - 6,0 mm		1,5 - 3,0: melt-in 3,0 - 6,0: keyhole
6,0 - 12 mm		keyhole 2 of meer lagen

- ▶ fabricage van zeven;
- ▶ fabricage van meetapparatuur: meetdozen, thermokoppels, temperatuurvoelers;
- ▶ sieradenindustrie: armbanden, kettingen;
- ▶ elektrotechnische en elektronische industrie: contacten, lampen, spoelen, behuizingen van relais.

Een van de bekendste toepassingen van microplasmalassen is het vervaardigen van balgen uit metaalfolie. Het materiaal is in de meeste gevallen roestvast staal. De dikte van het metaal is vaak $< 0,1$ mm. Het is met dit proces eveneens mogelijk zo'n dunwandige balg weer op een veel dikkere flens te lassen.

Een ander voorbeeld van microplasmalassen is het verbinden van draden in draadgevlochten zeven. Het materiaal is roestvast staal of brons. De draaddikte bedraagt 0,2 mm, de plasmastroom is dan 0,3 A. Op deze wijze kunnen (gemechaniseerd) 7 lassen per seconde worden gemaakt.

Het lassen van draden van thermokoppels is een ander voorbeeld. Platina draadjes worden bijvoorbeeld gelast aan een legering platina-rhodium.

In de sieradenindustrie wordt microplasmalassen onder andere toegepast voor het lassen van armbanden van gevlochten chroomnikkelstaal draad (0,5 mm diameter).

In figuur 13.1 is een voorbeeld van verbindingen met microplasmalassen afgebeeld.

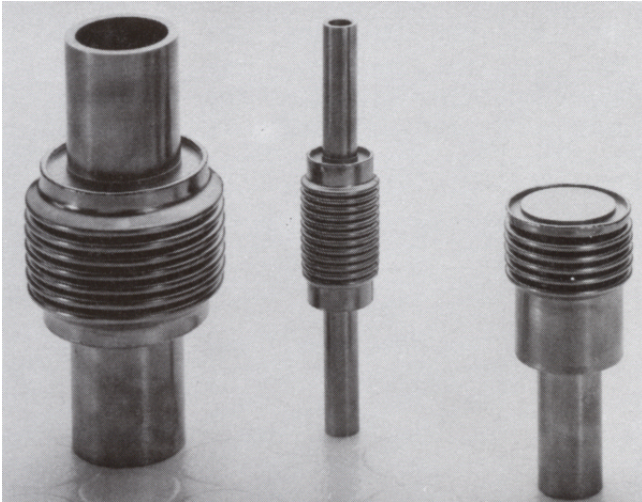
Voor enkele metalen zijn in tabel 13.2 de lasparameters van micro-plasmalassen weergegeven.

Het gebied van het microplasma lassen wordt bij grotere series steeds meer ingenomen door het laserlassen. Voor kleine series is het microplasmalassen nog steeds een uitstekend alternatief voor het laserlassen.

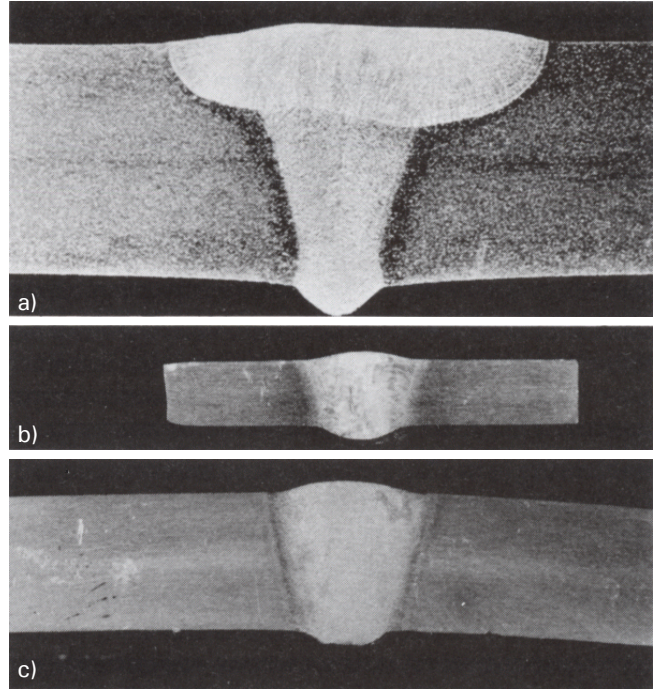
13.3 Enkele toepassingen van keyhole plasmalassen

Keyhole plasmalassen wordt o.a. toegepast bij:

- ▶ fabricage van pijpen: Er worden bijvoorbeeld roestvast stalen pijpen vervaardigd, door de langснаad te lassen met plasma keyhole. Verder worden met dit proces pijpflens verbindingen gelast, evenals rondnaden in de pijp;
- ▶ het lassen van brons in de chemische apparatenbouw;
- ▶ lassen van titaan en monel.



figuur 13.1 Micro-plasmalassen van balgen. Wanddikte balg 0,3 en 0,2 mm, wanddikte lasstuk 0,6 en 0,4 mm. Gelast werd met een stroomsterkte van 8 A. De diameter van de nozzle was 0,8 mm. Het plasmagas was argon (0,2 l/min); het beschermgas was een argon-waterstof mengsel: 85% A + 15% H₂. Materiaal: roestvast staal 316L



figuur 13.2 Doorsnede van een keyhole las:
 a. In Cr-Ni staal. Dikte 10 mm. V-naad. Staand been 5 mm. 2 lagen;
 b. In een aluminiumlegering. Materiaal AlMg3. Dikte 5 mm. Lasstroom 160 A; lassnelheid 10 cm/min;
 c. In een aluminiumlegering. Materiaal AlMg3. Dikte 11 mm. Lasstroom 240 A; lassnelheid 12 cm/min

tabel 13.2 Lasparameters voor micro plasmalassen van verscheidene metalen. Het plasmagas is argon

metaal	plaatdikte	stroom	lassnelheid	beschermgas	
	mm			A	cm/min
roestvast staal	0,025	0,3	12,5	Ar + 0,5% H ₂	9
	0,075	1,6	15	Ar + 0,5% H ₂	9
	0,125	2,0	12,5	Ar + 0,5% H ₂	9
	0,25	6,0	20	Ar + 0,5% H ₂	9
	0,25	5,6	38	Ar + 3% H ₂	8
Inconel 718	0,3	6	38	Ar + 75% He	9
	0,4	3,5	15	Ar + 5% H ₂	9
koper	0,075	10	15	Ar + 75% He	9
titaan	0,2	5	12,5	Ar	9
	0,38	6	12,5	Ar	9
	0,55	10	18	Ar + 75% He	9

In tabel 13.3 is een aantal lasparameters gegeven voor het keyhole plasmalassen van enkele metalen.

De waarden in deze tabellen zijn slechts bedoeld om een indruk te geven van de mogelijkheden met plasmalassen. Wanneer de gegevens uit de literatuur met elkaar worden vergeleken, dan komen er nogal wat verschillen voor. Daaruit blijkt weer dat vooral bij plasma keyhole lassen de lasparameters van groot belang zijn voor het uiteindelijke resultaat. Kleine verschillen, bijvoorbeeld in plasma-opening of gassamenstelling, kunnen grote verschillen in lasresultaat tot gevolg hebben.

In figuur 13.2 is een aantal toepassingen van keyhole plasmalassen afgebeeld.

tabel 13.3 Plasma keyhole lassen van roestvast staal, ongelegeerd staal en titaan

plaatdikte	naadvorm	stroom	lassnelheid	diameter plasma-opening	plasmagas		beschermgas		
					A	cm/min	mm	l/min	l/min
roestvast staal									
3,2	T	145	80	3	4,5	Ar	15	Ar + 5% He	
5	T	165	40	3,5	2,0	Ar	24	Ar + 5% He	
6,3	T	240	20	3,5	2,7	Ar	27	Ar + 5% He	
10	V, staand been 5 mm	230	22	3,5	2,0	Ar	24	Ar + 5% He	
ongegeerd staal									
3,2	T	185	30	3	5,5	Ar	27	Ar	
4,5	T	220	25	3,5	6,0	Ar	27	Ar	
titaan									
3,2	T	185	50	3	3,6	Ar	27	Ar	
10	T	225	25	3,5	15	Ar + 75% He	27	Ar + 75% He	

Bij het lassen van nikkel en zijn legeringen wordt bij voorkeur een waterstof bevattend plasmagas gebruikt. In tabel 13.4 zijn voor nikkel en een aantal nikkellegeringen de lasparameters vermeld.

tabel 13.4 Lasparameters voor keyhole plasmalassen van nikkel en nikkellegeringen. Plasma-opening 3,5 mm, met twee extra gaten; Beschermgas: 20 l/min: 95% Ar + 5% H₂; Plasmagas: 95% Ar + 5% H₂

legering	plaatdikte	plasmagas	stroom	spanning	lassnelheid
	mm	l/min	A	V	cm/min
99,5 Ni	3,2	4,5	160	31	50
	6	4,5	245	31,5	35
	7,3	4,5	240	31,5	25
76% Ni + 16% Cr + 7% Fe	5	5,5	155	31	43
	6,6	5,5	210	31	43
32% Ni + 46% Fe + 20% Cr	3,2	4,5	115	30	46
	4,6	4,5	185	27	41
	5,8	5,5	185	32	43

Omdat een van de belangrijkste toepassingen van plasma keyhole lassen het verbinden van roestvast staal is, is in tabel 13.5 een aantal lasparameters uit de literatuur verzameld. De plasma-openingen waren niet steeds opgegeven, maar, voor zover te achterhalen, varieerden ze tussen 2,5 en 3,5 mm. Als in de tabel in de kolom plasmagas de letter M staat, betekent dat, dat er een plasma-mondstuk met meer gaten (focussieergaten) was toegepast. Uit de hoeveelheid plasmagas blijkt dat eveneens: Bij plasma-openingen, met focussieergaten gaten er om heen, wordt meer plasmagas gebruikt: 3 à 4 maal zoveel. De bedoeling van tabel 13.5 is niet een volledige handleiding te geven voor het plasmalassen van roestvast staal. Wanneer de tabel wat nader bestudeerd wordt, is de invloed van een aantal parameters echter duidelijk te onderscheiden.






tabel 13.5 Verzamelde lasparameters van plasma keyhole lassen van roestvast staal. Plasma-opening 2,5 - 3,5 mm diam.; M=Meervoudige plasma-opening

plaatdikte	plasmagas	beschermgas	stroom	lassnelheid	afstand toorts-werkstuk
mm	l/min	l/min	A	cm/min	mm
2	0,8 Ar	14 Ar + 0,3 H ₂	140	80	4
2,4	M 2,6 Ar + 0,15 H ₂	14,7 Ar + 0,8 H ₂	115	61	4,8
3	0,8 Ar	13 Ar + 0,7 H ₂	180	62	5
3,2	0,9 Ar	13,5 Ar + 2,3 H ₂	150	38	6,3
3,2	1,8 Ar	18 Ar + 2 H ₂	220	85	7
3,2	M 4,3 Ar + 0,3 H ₂	14,7 Ar + 0,8 H ₂	145	76	4,8
4	1 Ar	14 Ar + 0,4 H ₂	240	45	4
4,8	1,4 Ar + 0,1 H ₂	23 Ar + 2 H ₂	165	37,5	7
4,8	M 4,3 Ar + 0,2 H ₂	19 Ar + 1 H ₂	165	40	4,8
5	1,9 Ar	19 Ar + 1 H ₂	165	23	7
5	M 5,6 Ar	19 Ar + 1 H ₂	165	26,5	7
5	1 Ar	14 Ar + 0,6 H ₂	260	41	4,8
6	1 Ar	13 Ar + 0,5 H ₂	285	30	6,3
6,3	M 7,6 Ar + 0,4 H ₂	13,5 Ar + 2,3 He	200	20	6,3
6,3	M 7,6Ar + 0,4H ₂	21 Ar + 1,1 H ₂	240	35	4,8
9,5	1,4Ar	13,5Ar + 2,3He	250	15	6,3
9,5	M 5,1Ar + 0,3H ₂	19Ar + 1H ₂	240	23	4,8

13.4 Oorzaken van fouten bij plasma keyhole lassen

Een aantal malen is reeds opgemerkt dat er met plasma keyhole lassen gemakkelijk fouten kunnen worden gemaakt. In tabel 13.6 is een aantal plasma keyhole lassen met fouten afgebeeld. De mogelijke oorzaken van de lasfouten zijn erbij vermeld.

tabel 13.6 Oorzaken van lasfouten bij plasma keyhole lassen

lasfouten	mogelijke oorzaken
	te weinig plasmagas te lage lasstroom of onregelmatig te grote lassnelheid of onregelmatig te sterke koeling door onderlegstrip afstand toorts-werkstuk te groot
	te veel plasmagas te kleine plasma-opening staand been te groot te hoge stroomsterkte te lage lassnelheid
	te grote lassnelheid geen toevoegmateriaal
	te veel plasma- en/of beschermgas te veel gas in werkstukmateriaal verontreinigingen in beschermgas gasturbulentie
	te grote mechanische spanning scheur gevoelig werkstukmateriaal scheur gevoelig toevoegmateriaal te grote afkoelsnelheid

13.5 *Plasmalassen met een gepulseerde lasstroom*

Dezelfde voordelen die een pulserende stroom bij TIG-lassen heeft (§ 4.7), gelden ook voor plasmalassen met een pulserende stroom. In het bijzonder voor plasma keyhole lassen gaat dit op. De hoge stroompuls veroorzaakt een diepe penetratie van de las in het werkstuk. Indien de hoge stroom gehandhaafd zou worden, zou het proces in snijden ontaarden. Daarom wordt de stroom na een korte tijd teruggebracht naar een laag niveau. Het gesmolten metaal kan nu stollen. De plasmagasstroom blijft gehandhaafd, zodat het gat (keyhole) blijft. Wanneer vervolgens de stroompuls weer volgt, vindt de boog weer het gat en smelt de plaat in de lasrichting weer verder op.

Toch wordt het plasmalassen met gepulseerde stroom slechts weinig gebruikt. De reden hiervoor is waarschijnlijk, dat het toch al gecompliceerde plasmaproces dan nog gecompliceerder wordt, zodat er in de praktijk moeilijk mee te lassen is. Intelligente procesregeling, maakt een uitgebreidere toepassing mogelijk.

Hoofdstuk 14

Vergelijking van enkele smeltlasprocessen met hoge energiedichtheden

Bij smeltlasprocessen wordt het te lassen metaal op de plaats van de lasnaad tot smelten gebracht. De gesmolten delen vloeien in elkaar over en zo komt de lasverbinding tot stand.

Deze lasprocessen zijn:

- ▶ TIG-lassen;
- ▶ Plasmalassen;
- ▶ Laserlassen;
- ▶ Elektronenbundellassen.

14.1 TIG- en Plasmalassen

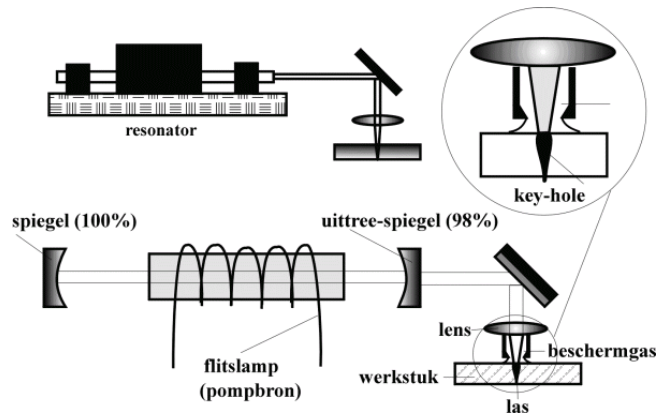
De warmte, die het metaal in de omgeving van de lasnaad tot smelten moet brengen, wordt bij beide processen in belangrijke mate veroorzaakt door de anodewarmte. Dit is de kinetische energie van de elektronen die het werkstuk treffen (aannemend dat het werkstuk positief is). Deze kinetische energie wordt omgezet in warmte. Een tweede warmtestroom is die tengevolge van convectorie van de boogwarmte naar het werkstuk. Tenslotte is er de straling van het hete gas van de boog. Deze laatste levert in verhouding de geringste bijdrage. Onderzoek heeft uitgewezen dat de anodewarmte en de warmte tengevolge van straling en convectorie in gelijke mate bijdragen aan het warmtetransport naar het werkstuk. Bij TIG-lassen is de plaats van treffen op het werkstuk in doorsnede (oppervlakte) echter 5 tot 12 maal zo groot als bij plasmalassen. Dat wil dus zeggen, dat de energiedichtheid van TIG-lassen evenzoveel kleiner is.

14.2 Laserlassen

Het laserlassen is een lasmethode om metalen delen tot smelten te brengen door een geconcentreerde monochromatische coherente lichtbundel met een zeer hoge energiedichtheid en valt onder de groep smeltlasprocessen. Monochromatisch betekent licht van één golflengte en coherent, dat de lichtgolven met elkaar in fase zijn. Door de aard van de constructie van de laser versterkt de laserbundel zichzelf, als gevolg van zogenaamde gestimuleerde emissie. De laserbundel treedt uit het laserapparaat, wordt door spiegels of glasvezelkabels naar de gewenste plaats getransporteerd en daar met behulp van een lens gefocuseerd.

Laser is een afkorting van: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Het principe van een laser is schematisch weergegeven in figuur 14.1. Een laser zorgt dus voor lichtversterking door gestimuleerde emissie van straling. De golflengte waarmee de laser werkt is afhankelijk van het lasermedium en bepaalt in belangrijke mate het toepassingsgebied van de laser. Voor de materiaalbewerking en voor het lassen in het bijzonder komen vier type lasers in aanmerking.

1. De **CO₂-laser**, een gaslaser die continue of gepulst werkt bij een golflengte van 10,6 μm . Beschikbare continue vermogens: 1 tot 25 kW. Op de lasemarkt hebben de CO₂-lasers hun plaats gevonden voor het snijden, lassen, harden en boren.
2. De **Nd:YAG-laser**, een vaste stof laser die in het begin vooral gepulst wordt gebruikt maar tegenwoordig



figuur 14.1 Het principe van een laser

steeds meer als continu laser wordt gebruikt. De golflengte van dit type lasers is een factor 10 (1,06 μm) korter dan de CO₂-lasers hetgeen voor een specifiek toepassingsgebied zorgt ten aanzien van te bewerken metalen en nauwkeurigheden.

Continu Nd:YAG-lasers met vermogens tot ca. 6 kW zijn tegenwoordig industrieel verkrijgbaar.

3. De **excimeerlaser**, een gaslaser, die gepulst werkt bij een golflengte van bijvoorbeeld 0,353 μm of 0,248 μm (UV) met een gemiddeld vermogen tot circa 200 W. Deze lasers worden nog op beperkte schaal voor materiaalbewerking toegepast.
4. De **diodelaser**, een vaste stoflaser die werkt met een golflengte van 0,94 μm en die voor de metaalbewerking nog beperkt wordt ingezet. Dit type laser lijkt echter voor de metaalbewerking zeer interessant vanwege de simpele, compacte opbouw en lage kosten. De huidige generatie diodelasers zijn inmiddels verkrijgbaar tot 3 kW. Verdere ontwikkelingen zullen hoogstwaarschijnlijk liggen op het vlak van grotere vermogens en het verbeteren van de kwaliteit van de bundel.

Lasers worden in de metaalindustrie toegepast voor onder andere:

- ▶ snijden;
- ▶ lassen;
- ▶ boren/perforeren;
- ▶ markeren;
- ▶ textureren;
- ▶ oppervlakte veredelen;
- ▶ oppervlakte harden;
- ▶ solderen.

14.3 Elektronenbundellassen

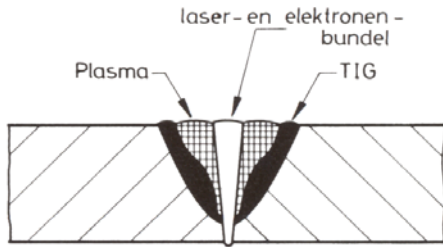
Hierbij worden in vacuüm elektronen, afkomstig van een kathode, door middel van een hoge veldsterkte versneld in de richting van het werkstuk. Met behulp van elektromagnetische en elektrostatische lenzen wordt deze elektronenbundel ingesnoerd tot een bundel met een zeer hoge energiedichtheid. Hiermee wordt de lasnaad tot smelten gebracht.

Vergelijking van enige energiedichtheden:

De maximaal bereikbare energiedichtheden bij de verschillende processen zijn:

TIG-boog	10 ⁸ W/m ²
Plasmaboog	10 ¹⁰ W/m ²
Elektronenbundel	10 ¹⁴ W/m ²
Laserbundel	> 10 ¹⁴ W/m ²

In figuur 14.2 zijn schematisch de lasdoorsneden voor de verschillende processen weergegeven. Elektronenbundel en laserbundel veroorzaken, tengevolge van de zeer hoge energiedichtheden, een diepe, smalle las. Het TIG-proces maakt een aanmerkelijk bredere en ook ondiepere las. De plasmalase ligt hier tussen in.



figuur 14.2 Karakteristieke lasdoorsneden van enkele smeltlasprocessen

Hoofdstuk 15

Veiligheid

De beroepsrisico's die kleven aan TIG- of plasmalassen zijn nagenoeg gelijk aan die van elk booglasproces:

- Gevaren tengevolge van de elektrische spanning.
- Straling van de boog.
- Gassen, damp en rook.

Voordat in deze publicatie specifiek voor het TIG- en plasmalassen wordt ingegaan op deze drie punten, wordt allereerst verwezen naar de "Praktijkrichtlijn - Beschrijving doeltreffende maatregelen bij blootstelling aan rook en/of gassen afkomstig van lassen en/of verwante processen" die gratis is te downloaden op www.lasrookonline.nl. Op deze site is bovendien meer aanvullende informatie te vinden ten aanzien van de veiligheids- en gezondheidsaspecten bij het lassen algemeen.

Kleding

De kleding mag zeker niet vervaardigd zijn van synthetische kunststoffen zoals nylon of perlon. Dit geldt niet alleen voor de bovenkleding, maar zeker ook voor ondergoed en sokken. Bij aanraking met vuur, spatten verandert de kunststof in een kleverige massa (als teer) en zeer pijnlijke brandwonden kunnen het gevolg zijn. Het dragen van een speciale lasoverall, vervaardigd uit brandvertragend materiaal, is te allen tijde aan te bevelen, hoewel het TIG-lassen gekenmerkt wordt als een spatarm proces. Aanvullend kunnen leren armstukken, een leren voorschoot en andere beschermingsmiddelen worden gedragen.

De lasser moet leren handschoenen te dragen. De ogen en het hoofd worden tegen straling beschermd door een helm die het gehele hoofd bedekt.

15.1 Gevaren ten gevolge van elektrische spanning

Het is begrijpelijk dat vooral TIG- en plasmalassers de handschoenen wel eens willen uitdoen. Vooral als het om zeer fijn werk gaat met kleine lastoortsen, kunnen de handschoenen hinderlijk zijn. Toch moet dat vermeden worden. Juist voor deze gevallen zijn er handschoenen van zeer soepel leer. Bij het aanraken van metalen delen die onder elektrische spanning staan, zijn het juist dit soort voorzorgsmaatregelen die letsel kunnen voorkomen. Natuurlijk moet de lasapparatuur zodanig zijn ontworpen, dat het aanraken van gevaarlijke elektrische spanning niet mogelijk is. De hoogste spanning waarmee de lasser bij TIG- en plasmalassen in aanraking kan komen, is de open spanning van de stroombron. Deze mag de volgende waarden hebben:

- ▶ Voor de wisselspanning van lastransformatoren 80 V. (Voor zgn. "hobby" lastransformatoren is dat 70 V). Voor lassen met verhoogd elektrisch risico is de toelaatbare open spanning slechts 42 V. Heeft de wisselstroom een frequentie hoger dan 60 Hz, dan is de toelaatbare open spanning slechts 24 V.
- ▶ De meeste gelijkstroom vertoont nog een rimpel. Hoe groter de rimpel, des te gevaarlijker is de gelijkstroom bij aanraking. De toelaatbare open spanning is bij gelijkspanning met een grote rimpel: 80 V, en bij een geringe rimpel: 110 V. In kleine, besloten ruimtes mogen geen stroombronnen worden opgesteld.

15.2 Straling van de boog

Voor de TIG- en plasmalasser zijn drie soorten straling uit de boog van belang:

- ▶ **De ultraviolette stralen.** Wanneer deze de onbeschermdde huid treffen, kunnen in betrekkelijk korte tijd verbrandingsverschijnselen optreden. Deze zijn geheel vergelijkbaar met zonnebrand. De verschijnselen moeten dan ook als zodanig worden behandeld. Treffen de UV-stralen onbeschermdde ogen, dan werken de stralen zeer snel in op het netvlies van de ogen. Na een aantal uren worden de ogen rood en raken zeer geïrriteerd (als zand in de ogen). In de meeste gevallen kan de pijn met speciale oogdruppels worden bestreden. In extreme gevallen moet toch de oogarts geraadpleegd worden. Lashelmen met genormeed filterglas moeten dan ook steeds worden gedragen. In de lashelm zit uiteraard een dergelijk kijkglas. Hoe hoger de stroom, des te intensiever is de UV-straling. Verder wordt bij het lassen van aluminium en roestvast staal meer straling gevormd, dan bij het lassen van laaggelegeerd staal.
- ▶ Het lassen zonder adequate oogbescherming kan leiden tot onherstelbare schade aan de ogen. De straling hoeft niet direct uit de boog te komen, maar kan ook gereflecteerd worden door wanden en voorwerpen. Hierop moet worden gelet bij de aanschaf van een lasbril of lashelm.
- ▶ **De infrarode straling.** Vooral bij het optreden van grote smeltbaden kunnen onzichtbare warmtestralen voorkomen. Deze zijn extra gevaarlijk voor de ogen, want ze richten onherstelbare schade aan het hoornvlies van het oog aan. De werking is cumulatief, dat wil zeggen dat bij herhaald treffen van deze straling met de ogen de schade bij elkaar opgeteld wordt. Dus ook hiervoor is een goede lasbril of een goed lasglas nodig.
- ▶ **Lichtstralen.** Bij lassen wordt meestal wel opgelet dat deze straling de ogen niet treft. Immers de hiervoor beschreven lasogen zijn maar al te bekend. De ogen worden dan zodanig beschermd, dat ook de gewone lichtstralen worden vermeden. Maar bij voorbereidende werkzaamheden, zoals het autogeen snijden van het metaal, moeten de ogen eveneens worden beschermd. Want ook deze warmte- en lichtstralen kunnen gevaarlijk voor de ogen zijn. Het pupillenmechanisme kan hierdoor worden verstoord, waardoor het gezichtsvermogen achteruit kan gaan. Langdurig blootstellen aan fel licht kan leiden tot oververmoeidheid van de lasser.

15.3 Gas, damp en rook

In principe is het meest gebruikte gas bij TIG- en plasmalassen, argon, niet gevaarlijk. Hooguit kan het gas in besloten, kleine ruimtes de lucht verdringen, waardoor er zuurstoftekort kan optreden. Vooral omdat argon zwaarder is dan lucht, kan dit zuurstoftekort zeer plaatselijk zijn. Dus moeten in kleine ruimten altijd lucht toegevoerd en lasrook afgezogen worden.

Ozon ontstaat tengevolge van de UV-straling van de boog. Vooral in de directe omgeving van de boog (10 - 60 cm) kan de concentratie van de ozon nogal hoog oplopen. Te veel ozon kan irritaties en ziekten van de luchtwegen tot gevolg hebben.

Stikstofoxiden. Ook deze gassen ontstaan tengevolge van UV-straling. Bij TIG- en plasmalassen komen deze gassen meestal niet in verontrustende mate voor.

Metaaldampen en lasrook. Ook deze komen bij het normale TIG- en plasmalassen niet zoveel voor. Anders is het wanneer met geen of te weinig gas wordt gelast. De wolfram-elektrode kan dan oxideren en het aldus ont-

stane wolframoxide, WO, is zeer giftig. Ook het lassen van metalen met een laag damppunt moet worden vermeden. Bijvoorbeeld messing, waar het zink zeer snel uitdamppt. De lasrook, als die al voorkomt, is in geen verhouding met die welke ontstaat bij het handlassen met beklede elektroden.

Lasrook, een mengsel van gassen en stof, kan de gezondheid van de lasser bij inademing schaden. Het fijne inadembare stof maakt de lasrook zichtbaar. De gassen zijn onzichtbaar. 90% van de lasrook is afkomstig van de stroomvoerende en afsmeltende elektrode. Daar bij het TIG de elektrode niet afsmelt, zal nauwelijks lasrook ontwikkeld worden. In de eerder aangehaalde Praktijkrichtlijn staan de maatregelen vermeld die minimaal moeten worden genomen om de blootstelling aan lasrook van de lasser en de overige werknemers in de laswerkplaats te beperken. De te nemen maatregel is: ruimtelijke afzuiging. Het dragen van aanvullende persoonlijk beschermingsmiddelen is niet verplicht, tenzij er TIG aluminium gelast wordt met een inschakelduur van meer dan 15%. In dat geval is het dragen van minimaal een filterend halfmasker dan wel een wegwerpmasker type FFP2 verplicht.

In de praktijkrichtlijn (tabel 3) is aangegeven de minimale hoeveelheid lucht die moet worden geventileerd. Wordt bronafzuiging toegepast, dan mag de hoeveelheid ruimteventilatie tot een vijfde van de opgegeven hoeveelheid worden verlaagd, daar er van uit wordt gegaan dat een juist gebruikte bronafzuiging 80% van de ontwikkelde lasrook vangt.

Gebruikte literatuur

Dit is in de praktijk gebleken enorm leerzaam te zijn voor beginnende lassers en zelfs voor ervaren TIG-lassers (zie www.nil.nl voor meer informatie).

- [1] Aichele, G. "Schutzgasschweissen". Messer Griesheim GmbH. Frankfurt am Main.
- [2] Baum und Fischer. "Der Schutzgasschweisser. WIG Schweissen/Plasmaschweissen".
- [3] Beschermgassen voor het gasbooglassen. Hoek Loos, brochure.
- [4] Colloquium "Physik und Technologie des Plasmastrahls in der Schweisstechnik". DVS-Berichte 23.
- [5] Colloquium "Der Plasmastrahl in der Schweisstechnik". DVS-Berichte 14.
- [6] Goes J. van der. "TIG-lassen en plasmalassen". Cursusboek Teleac.
- [7] Houldcroft, P. "Welding process technology". Cambridge University Press.
- [8] Killing, R. "Handbuch der Schweissverfahren". DVS Dusseldorf.
- [9] Lafebre, D.R.J. "MIG/MAG, TIG en Plasma". Voorlichtingsbrochure. Hoek Loos, Schiedam.
- [10] Lucas, W. "TIG and Plasma welding in the 80s". Metal Construction, 1982.
- [11] Ludwig, H.C. "Plasma-energy transfer in Gas-Shielded Welding Arcs", *Welding J.* 1959, p.296s
- [12] Marchandise, H. "Plasmatechnologie, Grundlagen und Anwendung". DVS-Berichte 8.
- [13] Mawson, M. "Plasma welding in the fabr. industry". *Weld.& Met.Fabr.* 1988, p.298.
- [14] Merkblatt DVS 0920. Wolfram-Inertgasschweissen. Allgemein Übersicht.
- [15] O'Brien. R.L. "Plasma Arc Metalworking Processes". A.W.S. 1967.
- [16] Ranke, P. "Vergleich zwischen WIG- und Plasmaschweissen". DVS-Berichte 43.
- [17] Ruge, J. "Handbuch der Schweisstechnik". Springer Verlag, Berlin.
- [18] Shielding the Top and Rootside of the weld in GMA-welding. AGA, brochure.
- [19] The Procedure Handbook of Arc Welding. Lincoln, Cleveland, Ohio. TIG-Welding. AGA, brochure.
- [20] Tomsic, M.J. e.a. "Applications of Keyhole Plasma Arc Welding". Hobart Brothers Co.
- [21] Welding Handbook, AWS, Section 2: Welding Processes, Gas, Arc and Resistance.

CD-ROM TIG-lassen "Proces 141"

In een Europees Leonardo da Vinci project is in 2001 een CD-ROM beschikbaar gekomen, die een inzicht verschaft in de mogelijkheden en onmogelijkheden van het TIG-proces. De CD-ROM is in vele talen uitgegeven, ook in het Nederlands.

In 9 hoofdstukken wordt het proces van alle kanten belicht:

1. Basis- elektriciteit;
2. Elektriciteit en TIG-lassen;
3. TIG-apparatuur;
4. Lastoevoegmateriaal en beschermgassen;
5. Veiligheidsaspecten;
6. Lasnaadvoorbewerkingen;
7. Lasonvolkomenheden;
8. Normen.

Het meest interessante deel van deze CD-ROM is wel de grote hoeveelheid van parameters die kunnen worden gevarieerd. Zo is de invloed van stroomsterkte, voortloop-snelheid, elektrode-uitsteek, hoeveelheid beschermgas, enz. te variëren vanaf een nominaal niveau "goed" in meestal twee stappen naar lager, langzamer, korter, enz. en in eveneens meestal twee stappen naar hoog en té hoog, resp. snel, langer.

Trefwoorden

	Hoofdstuk		Hoofdstuk
Afkoelsnelheid	8.5, 13.4	Gascup	3.1.1, 9.3
Afstandsbediening	3.2.1	Gasgekoelde toorts	3.1.2, 3.1.3
Aluminium	3.2.1, 4.5, 4.6, 4.7, 5.1, 7.3, 7.4, 8.5, 9.1, 9.2.1, 10.1, 11.2, 15.2, 15.3	Gaslens	3.1.1, 10.2
Aluminiumbrons	4.7, 8.4	Gasmengsels	5, 5.1, 5.2
Aluminiumlegeringen	4.7, 8.1, 8.5	Gasmondstuk	3.1.1, 5.1, 5.3, 6.5, 7.4, 8.6, 9.2
Analoog stuursignaal	3.2.2	Gasnastroming	10.3
Anode	4.4, 9.2.1, 12.1	Gassamenstelling	5.1, 11.2, 13.3
Anodewarmte	9.2.1, 14.1	Gasslof	3.1.1
Anodegebied	4.1	Gassnelheidsmeter	5.2
Apparatenbouw	7.2, 8.3, 13.3	Geïoniseerd gas	4.2
Argon	2.1, 2.3, 4.2, 5.1, 5.3, 8.2, 8.5, 9.2, 11, 15.3	Gelijkrichteffect	3.2.1, 4.5, 4.6, 4.7
Argon-arc	2.1	Gelijkstroom	3.2.1, 4.7
A-TIG	6.7	Gelijkstroomcomponent	3.2.1
Austenietvormers	8.2.3	Gemechaniseerd TIG-lassen	3.1.4, 6.1, 7.2, 8.2.3
Austenitische staalsoorten	5.1, 8.2.3, 11.2	Gepulseerde gelijkstroom	4.7
Autogeen lassen	2.3	Gesloten koelsysteem	3.2.1
Backinggas	5.3, 5.4, 8.2.3, 8.3, 8.6, 12.3	Glove box	8.6
Basisstroom	4.7	Grondlaag	7.3, 8.2.2, 8.2.3
Beschermgas	2.3, 4.6, 5, 6.2, 6.7, 8.2, 8.4, 8.5, 8.6, 9.2, 10.2, 11.2	GTAW	2.1
Bindingsfouten	8.4	Handlassen	3.1.3, 3.2.1, 7.1
Blokvormige wisselstroom	3.2.1, 3.2.2, 4.7, 8.5, 10.1	Handtoorts	3.1.4
Boog	2, 4.1	Hastelloy	8.3
Booginstabiliteit	8.5	Hechtlassen	7.5
Boogkolom	4.1, 4.2	Heli-arc lassen	2.1
Booglassen	1	Helium	5.1, 8.4, 8.5, 9.2, 10.2, 11.1, 11.2, 11.3
Boogplasma	9.2	Helium TIG-lassen	8.5
Boogspanning	3.2.1, 4.5, 5.1	Herontsteken	4.6, 8.5, 10.1
Boogstabiliteit	5.1	H.F.-ontsteking	3.2.1, 7.2, 10.1
Ceriumoxide	4.5	High-low	8.2.3
Chroomnikkel staalsoorten	8.2.3.	Hittebestendige staalsoorten	8.2.3
Condensatorbatterij	3.2.1	Hittebestendigheid	8.2.2, 8.2.3, 8.3
Contactbuis	6.1	Hoogfrequent	3.2.2, 4.6, 4.7, 9.2
Contractie	8.5, 9.2, 9.3, 10.2, 11.2, 13	Hoogfrequentgenerator	4.6
Convectie	6.4, 14.1	Hooggelegeerd staal	8.2, 8.2.3
Corrosiebestendig staal	8.2.3	Hoogspanningspuls	8.5, 10.3
Corrosieweerstand	5.1	Hot wire	6.1
Couveuse	3.1.1, 5.4, 8.6	Hulpboog	9.2, 9.2.1, 9.3, 10.1, 10.3
Dendrietvorming	4.5	I-naden	4.7, 6.1, 7.3, 8.2, 8.5, 9.3, 12.3, 13.1
Diodebrug	3.2.2	Impulsgenerator	3.2.1, 4.6
Dissociatie	4.7, 11.2	Inconel	8.3, 13.3
Dissociatie-energie	5, 5.1	Inert gas	2.1, 5.1, 6.2, 11.1
Dissociatiewarmte	6.2, 9.2, 11.2	Inklemapparatuur	7.2
Divergentie	9.3	Inschakelduur	3.1.4, 3.2.1, 7.1, 15.3
Dope	4.5, 10.2	Insnoeren	6.2, 9.2
Down-slope	3.1.2, 3.1.3, 6.5, 10.3	Interkristallijne corrosie	8.2.3
Dubbelbogen	10.2, 13	Inverter	3.2.2, 4.7
Dubbelgas TIG-lassen	6.2	Ionisatie	4.2, 4.6, 5.1, 6.7
Dubbelstroom TIG-bron	3.2.1, 3.2.2	Ionisatie-energie	4.2, 5.1
Edelgassen	5	Isolatie	3.1.1, 10.2
Elektrische geleidbaarheid	8.5	Kathode	4.3, 4.5
Elektrode	2, 3.1, 4.5	Kathodegebied	4.1, 4.3
Elektrode positief	4.5, 4.7, 8.5, 9.2, 12	Kathodemechanisme	4.3
Elektrodepunt	4.5, 4.6, 6.5, 9.2	Kathodevlek	4.7, 8.5
Elektrodesamenstellingen	4.3, 4.5	Keyhole lassen	9.3, 10.1, 10.2, 12.3, 13.1, 13.3, 13.4, 13.5
Elektrodevervuiling	8.5	Kinetische energie	4.2, 4.7, 14.1
Elektronen	4.1 - 4.4, 4.6, 4.7, 8.5, 9.2, 14.1, 14.3	Klemnippel	3.1
Elektronenemissie	3.2.1., 4.7	Kleurcodering	4.5
Elektronenbundellassen	14.3	Koeling	3.1.2, 3.1.4, 3.2.1, 4.5, 10.2
Elektronenstroom	4.1	Koper (legeringen)	8.4
Elektronisch gestuurde stroombronnen	4.7	Kopkleuren	4.5
Energiedichtheid	8.5, 9.2, 9.3, 14	Korrelgroei	8.2.3
Energiedrempel	4.3	Kratervulling	3.1.3, 8.5
Ferrietvormers	8.2.3	Laminaire gasstroom	3.1.1, 5.4
Ferritische staalsoorten	5.1, 8.2.3	Lanthaanoxide	4.5, 10.2
Flowmeter	5.2	Lasdoorsneden	14.3
Focusseergas	10.2, 11.3	Lasfouten	7.2, 7.4, 8.2, 8.3, 13.4
Formeren	5.3	Lasnaadvormen	8.5
Gas Tungsten Arc Welding	2.1	Lassnelheid	2.1, 5.1, 6.1, 6.4, 7.2, 8.5, 9.3, 11.1, 12.3, 13.4
Gasatomen	4.2, 5	Lastoorts	2.3, 3.1, 3.1.4, 10.2
Gasbescherming	3.1.1, 4.5, 5.1, 7.2, 7.4, 8.2, 8.3, 8.5, 8.6	Lastransformator	3.2.2, 15.1
Gasbooglasprocessen	1, 2	Legeringselementen	8.2.2, 8.2.3
Gascilinder	2.3, 5.2, 10.3	Machinetoortsen	3.1.3
		Mass-Flow-Controller	5.2
		Medische industrie	8.6

	Hoofdstuk		Hoofdstuk
Meerelektroden TIG-lassen	6.3	Staal, laaggelegeerd	8.2.2
Melt-in techniek	10.1, 12.1, 13.1	Staal, ongelegeerd	8.2.1
Messing	8.4, 15.3	Standtijd (van de elektrode)	3.1, 9.3
Microplasmalassen	10.1, 12.1, 13	Startmethoden	2.3, 4.6
MIG-lasproces	7.3	Startvoorzieningen	3.2.1
Migratie van dope	4.5	Statische karakteristiek	3.2.1, 12.1
Molybdeen	3.1.1, 5.3, 8.2.3, 8.6	Stikstof	5.1, 5.3, 8.2, 8.4, 11.2
Mondstuk	3.1.1, 3.1.4, 5.1, 5.4, 6.2, 6.5, 7.4, 8.5, 8.6, 9.2, 9.3, 10.2, 10.3, 12 8.3, 13.3	Straling	6.4, 14.1, 14.2, 15.2
Monel		Stroombron	2.3, 3.2, 4.6, 4.7, 6.1, 7.2, 8.5, 9.2, 10, 12.1
Naadafwijkingen	7.2	Stroomdichtheid	5.1, 9.2
Naadvolgsysteem	7.2	Stroomsoort	3.2.2, 4.3, 4.5, 4.7
Naadvoorbereiding	7.2, 7.3, 8.2.3	Switched mode	3.2.2, 4.7
Naadvormen voor plasmalassen	13.1	Synchroon-impulsgenerator	3.2.1
Neersmeltsnelheid	6.1	Tangentieel inblazen	5.4
Netspanningsveranderingen	3.2.1	Temperatuurverdeling (plasmaboog)	9.2
Niet overgedragen boog	9.2.1, 12	Thermische emissie	4.3, 4.5
Nieuw zilver	8.4	Thoriumoxide	4.3, 4.5
Nikkel	8.3	Thyristorbesturing	3.2.2
Nikkellegeringen	8.3	Thyristorbron	3.2.2, 4.7
Nimonic	8.3	TIG Hot Wire	6.1
Niobium	8.6	TIG Narrow Gap Lassen	6.4
Onderlegstrip	5.4, 13.1	TIG-boog	3.2.1, 4.1, 4.6, 5.1, 6.2, 7.2, 8.5, 9.2, 9.3, 12.1, 14.3
Onder poeder lassen	6.4, 7.3	TIG-(las)apparatuur	3.2.1, 5.2, 9.3
Ontsteek eigenschappen	5.1	TIG-lassen	2, 3, 14
Ontstekingsmechanisme	3.1.3, 4.7	TIG-puntlassen	6.5
Open spanning	2.3, 3.2.1, 4.6, 5.1, 10.3, 15.1	TIG-toorts	3.1.4, 6.6, 7.1
Openingshoek	7.3, 8.2, 8.3	Tinbrons	8.4
Oppervlaktespanning	6.7, 12.3	Titaan	3.1.1, 4.7, 5.1, 5.3, 8.6, 11.1, 11.2, 13.3
Orbitaal pijplassen	7.2	Tochtgevoelig	3.1.1
Overgangszone	8.4, 8.6	Toevoegmateriaal	2.1, 2.3, 5.4, 6.1, 7.1, 7.3, 7.4, 8.1, 8.2, 8.3, 8.5, 12.3, 13.4
Overgedragen boog	9.2, 9.2.1, 12	Toortsconstructie	3.1.3
Penetratiediepte	5.1	Tophoek van de (wolfram)elektrode	4.5, 5.1, 10.2, 12
Piekstroom	4.7	Transistorbron	3.2.1, 3.2.2, 4.7, 10.1
Pijplasapparatuur	7.2	Transversaal magneetveld	6.4
Plasma	4.2, 9.2	Trekvastheid	8.2.2, 8.2.3
Plasma-opening	9.2, 10.2, 12, 13	Tungsten Inert Gas	2.1
Plasmaboog	9.2, 9.3, 10.2, 11.1, 12	Turbulentie	3.1.1, 10.2, 13.4
Plasmagas	9.2, 9.2.1, 10.2, 11, 12.3, 13	(Uit)hardbare staalsoorten	8.2.3
Plasmahuis	10.2	Uittrede-energie	4.3
Plasmalassen	9	Up-slope	6.5
Plasmamondstuk	9.2, 11.1, 13, 13.3	Veldemissie	4.3, 4.5
Plasmasnijden	7.3, 9.1	Veldsterkte	4.6, 14.3
Plasmastroming	12.3, 13	Verbrossing	3.1.1, 5.1, 8.2.3, 8.4, 8.6
Plasmastroombron	10.1	Vliegtuigbouw	8.6
Plasmatoorts	10.2	Voetschakelaar	3.2.1
Poreusheid	5.1, 7.4, 8.2, 8.2.1, 8.3, 8.5	Vonkenbrug	4.6
Positieve elektrode	4.1, 4.7, 8.5	Voorwarmtemperaturen	8.4
Post-flow	3.1.3	Warmtscheuren	8.3, 8.5
Potentiaalgradiënt	4.1	Warmte beïnvloede zone	2.1, 8.5, 9.3
Pre-flow	3.1.3	Warmte-inbreng	7.5, 8.2.3
Primair geschakelde stroombron	3.2.2	Warmtebehandeling	8.2.2
Procesparameters	5.1	Warmtegeleiding	5.1, 6.2, 8.4, 8.5, 9.2
Processturing	10, 10.3	Warmtevisselaars	7.2
Procesvarianten van plasmalassen	9.2.1	Waterbeveiliging	3.1.2, 10.1
Pulserend TIG-lassen	4.7	Watergekoelde lastoorts	2.3, 3.1, 4.5, 5.4, 7.4
Pulsparameters	4.7, 10.3	Waterstof	5.1, 5.3, 6.2, 7.4, 8.3 - 8.6, 9.2, 11.1 - 11.3, 13.3
Puntlassen	4.7, 6.5, 8.2.1	Waterstofscheuren	5.1
Radio-activiteit	4.5	Waterstofziekte	8.4
Reduceerventiel	5.2	Weerstandverhitting	6.1
Remote control	3.2.1	WIG-Schweissen	2.1
Robotlassen	7.2	Wisselstroom	3.2.1, 3.2.2, 4.3 - 4.7, 6.1, 6.5, 8.4, 8.5, 9.2.1, 10.1, 15.1
Rondnaadlassen	8.2.1	Wolfram	2.3, 4.3, 4.5, 4.6, 8.6
Rotameter	5.2	Wolframelektrode	2, 2.3, 3.1, 3.1.2, 4.2, 4.3, 4.5, 4.6, 5, 5.1, 5.2, 6.2, 6.3, 6.5, 7.2, 8.2, 8.2.3, 8.5, 9.2, 9.2.1, 9.3, 10.2, 11.1, 12.2, 15.3
Ruimtevaart	8.6	Wolfram-Thorium	4.3, 4.5
Sensorsystemen	6.4	Wolframinsluitingen	4.6, 8.5
Single Puls TIG Lassen	6.6	Yttriumoxide	4.5
Sintermateriaal	5.4	Zijwind	5.1, 7.1
Slangenpakket	2.3, 3.1.2, 3.1.4, 5.2, 10	Zirkoon	3.1.1, 8.6, 11.1, 11.2
Slijtage wolframelektrode	4.5, 10.2, 12.2	Zuil	4.1, 9.2
Slijtvastheid	8.2.3		
Smeltlasprocessen	1, 14		
Smoorspoel	4.6, 4.7		
Spangereedschap	7.1		
Spanningsarm gloeien	8.2.2		
Spanningsgradiënt	4.1		
Spantang	3.1, 3.1.4, 4.5		
Spatten	2.1, 8.2, 15		
Square wave	3.2.2, 4.7, 8.5, 10.1		
Staal, hooggelegeerd	8.2.3		



Vereniging FME-CWM
vereniging van ondernemers in de
technologisch-industriële sector

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer

T (079) 353 11 00

F (079) 353 13 65

E alg@fme.nl

I www.fme.nl