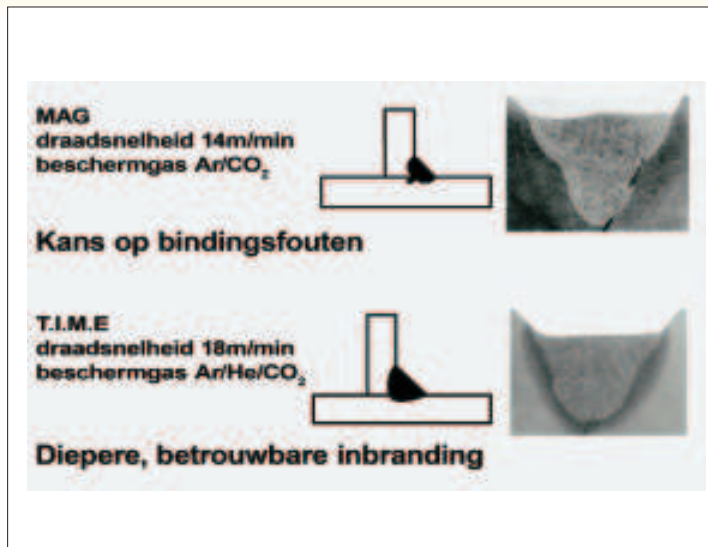


HAAL EEN HOGER RENDEMENT MET INNOVATIEVE LASPROCESSEN

BIL START COLLECTIEF ONDERZOEKSPROJECT 'HOOGRENDEMENTSLASSEN'

Het BIL gaat een collectief onderzoeksproject opstarten rond de innovatieve varianten van het TIG- en MIG/MAG-lassen. Het doel is na te gaan in hoeverre deze varianten kunnen bijdragen tot een verhoging van de productiviteit en het rendement en de verlaging van de productiekosten (laskosten). Verder kunnen een aantal van deze lasprocessen leiden tot nieuwe producten uit bijvoorbeeld dunnere plaat, verzinkt staal aan aluminium, enz. Door dit project zullen de deelnemende bedrijven inzicht krijgen in de mogelijkheden van deze nieuwe lasprocessen, zodat ze op een verantwoorde manier kunnen worden ingezet in hun productie.

 Door Koen Faes, BIL; Bart Verstraeten, BIL; Kurt Broeckx, BIL



Figuur 1: Vergelijking van het T.I.M.E.-lassen met het conventionele MIG/MAG-lassen

Aanleiding

Het overgrote deel aan laswerk wordt al decennia lang uitgevoerd met de klassieke lasprocessen zoals TIG en MIG/MAG. De laatste jaren zijn er heel wat innovatieve varianten op de markt gekomen. Deze bieden een waaier aan nieuwe productiemogelijkheden. Zo kan in sommige gevallen het klassieke TIG-lassen vervangen worden door een nieuwe variant van het veel productievriendelijke MIG/MAG-lassen, met hetzelfde kwaliteitsvolle laswerk als resultaat. Deze nieuwe processen kunnen de laskosten drukken, de productiviteit verhogen en een versnelling van de

productontwikkeling betekenen. Deze voordelen zullen bijdragen tot de ontwikkeling van producten met een hogere toegevoegde waarde of met een lagere productiekost en zo de concurrentiepositie van de bedrijven verstevigen.

Beschrijving project

In het recente verleden zijn er op de markt een aantal nieuwe en veelbelovende varianten verschenen van de conventionele lasprocessen (vnl. het MIG/MAG-lassen en het TIG-lassen). Voor het MIG/MAG-lassen zijn deze beter bekend onder hun acroniemen: T.I.M.E., Rapid Melt, Cold Metal

Transfer, ColdArc, Surface Tension Transfer (STT), ForceArc enz. Ook op het vlak van het TIG-lassen zijn er recent een aantal veelbelovende ontwikkelingen gerealiseerd. Zo werden het TOPTIG- en het A-TIG-lasproces ontwikkeld. Ook wat betreft de stroombronnen is er een hele evolutie gebeurd. De nieuwe elektronisch geregelde stroombronnen leveren een betrouwbaarder lasresultaat en een beter lasuiterlijk op.

Doelstellingen

Op korte termijn zullen de bedrijven vooral een inzicht krijgen in de mogelijkheden van de

nieuwe varianten. Zij zullen in staat zijn om een inschatting te maken of deze lasprocessen inzetbaar zijn voor hun specifieke toepassing, rekening houdend met de te verwachten eigenschappen van de lassen, de nodige investeringen, de rendementsverhoging ten opzichte van de huidige toegepaste techniek, de betrouwbaarheid van het proces enz.

Recente ontwikkelingen

Hieronder volgt een overzicht van de recente ontwikkelingen op het gebied van het MIG/MAG-lassen, TIG-lassen en de stroombronnen.

Figuur 2: Principe van het ForceArc-lasproces

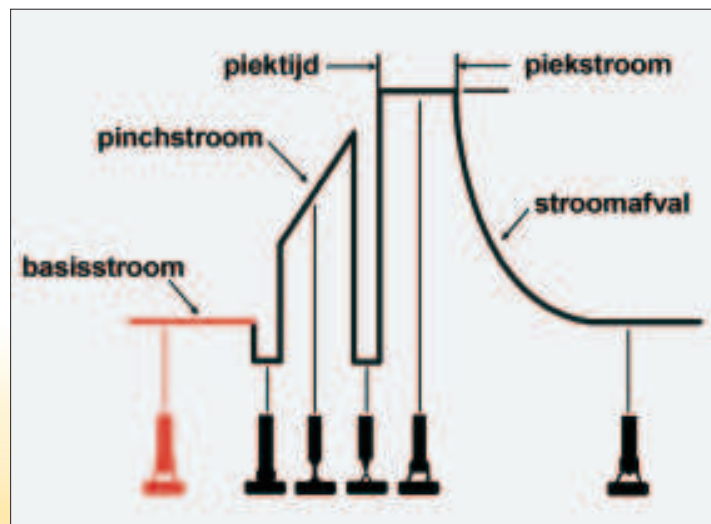


Figuur 3: verbinding uitgevoerd met het ForceArc-lasproces

Figuur 4: verbinding uitgevoerd met het conventionele MIG/MAG-lasproces



Figuur 5: spannings- en stroomverloop tijdens het STT-lassen





Figuur 6: druppelovergang tijdens het STT-proces

MIG/MAG-lassen
Het T.I.M.E.- en het Rapid-Melt-lasproces (*1,2)

T.I.M.E. of Transferred Ionized Molten Energy is inmiddels een ingeburgerde naam voor het MIG/MAG-lassen met verhoogde neersmeltsnelheid. De hogere neersmeltsnelheid wordt bereikt door te werken met een grotere uitsteeklengte van de lasdraad en door het toepassen van beschermgassen waaraan helium is toegevoegd.

Het T.I.M.E.-lasproces is de eerste variant van het MIG/MAG-lasproces waarbij gebruik gemaakt wordt van 'rotating transfer'. Dit is een materiaaltransport in de lasboog die optreedt bij hoge waarden van de stroom en de spanning. Het materiaaltransport gebeurt in een spiraal van vloeibaar metaal.

Met deze variant van het handmatig MIG/MAG-lassen is het mogelijk staalplaten te lassen met minimaal 30% hogere afsmeltsnelheid dan gebruikelijk economisch. Toepassingen zijn staalconstructies, scheeps- en ketelbouw, algemene machine- en staalbouw en de constructie van bouwmachines. Een hoogwaardige draadaanvoer garandeert draadaanvoersnelheden tot 30 m/min. De hogere draadaanvoersnelheden bieden de mogelijkheid een hogere lassnelheid of voortloopsnelheid toe te passen. Ook kan de hogere neersmeltsnelheid worden gebruikt om een laslaag met een grotere dikte neer te smelten. Volgens de referentie (*1) kan met het T.I.M.E.-proces een besparing van 18% gerealiseerd worden. (Figuur 1: Vergelijking van het T.I.M.E.-lassen met het conventionele MIG/MAG-lassen)

Een ander proces waarbij gebruik gemaakt wordt van een

spiraalvormige metaaloverdracht in de boog is het Rapid-Melt-lasproces.

Het ForceArc-lasproces (*3)

Bij het ForceArc lassen wordt gewerkt met een lage boogspanning bij een korte sproei-boog, zodat de booglengte sterk beperkt wordt. De plasmadruk zorgt voor een diepe inbranding. Er stelt zich een materiaaloverdracht van fijne tot middelgrote druppels in, waarbij de druppels elkaar snel opvolgen. Bij een dergelijke materiaaloverdracht is het natuurlijk niet te vermijden dat er af en toe een kortsluiting optreedt, die zonder het regelen ingrijpen bij het herontsteken tot een versterkt sproeigedrag zou leiden. Tijdens een kortsluiting wordt de spanning verlaagd, omdat de materiaalweerstand nu geringer is dan de weerstand van de elektrische boog. Daarna stijgt de stroom terug tot het niveau van de kortsluitstroomsterkte. Tijdens de 'geforceerde' sproei-boog wordt een schadelijke toename van de energie (stroom x spanning x tijd) verhinderd, die in dit vermogensbereik bij het herontsteken tot een sterke sproeivorming zou leiden. Bij de conventionele stroombronnen is het niet mogelijk om in een heel kort tijdsbestek de stroom te doen dalen. Met de nieuwe inverterstroombronnen is dit echter wél mogelijk. Een principeschets wordt getoond in **figuur 2**. Een vergelijking van een lasnaad met het ForceArc-proces en met het conventionele MIG/MAG-proces wordt getoond in resp. **figuur 3** en **figuur 4**. Het proces is geschikt voor het lassen van plaatdikten vanaf 5 mm en biedt een aantal belangrijke voordelen. De belangrijkste zijn de hoge productiviteit bij het lassen met massieve draad, een diepe

inbranding en een geringe warmte-inbreng. Daarnaast komen lasverbindingen met het ForceArc-proces sneller tot stand, met een hogere kwaliteit en lagere kosten dan bij het conventionele MIG/MAG-lassen. De lassnelheid ligt circa 30% hoger. Door de lagere warmte-inbreng treedt minder vervorming op en is narichten niet meer nodig. De spatvorming is minimaal tot afwezig, waardoor nabewerking niet meer nodig is en gasmondstukken langer meegaan. De diepe inbranding verlaagt de kans op bindingsfouten en maakt het toepassen van een vooropening, bijvoorbeeld bij 1/2V-naad of K-naden, overbodig. Daardoor kan de lasdoorsnede kleiner worden, wat lastoefmateriaal bespaart en minder lastijd vergt.

Het STT-lasproces (*4,5)

Voor het kortsluitbooglassen bestaan er een aantal varianten van het MIG/MAG-proces. Het spatgedrag dat zeer typerend is voor het kortsluitbooglassen kan sterk onderdrukt worden door gebruik te maken van de moderne stroombronnen. Kortsluitbooglassen zonder spatten is niet alleen gunstig in verband met het uiterlijk en de corrosiewerende eigenschappen van de lasverbindingen. Met het beperken van de stroomsterkte tijdens de kortsluitfase wordt ook de warmte-inbreng vermindert. Hoe geringer de warmte-inbreng, des te geringer de lasspanningen en de vervormingen. De ontwikkelingen op het gebied van het kortsluitbooglassen zijn begonnen met de introductie van het STT-systeem, de afkorting voor 'Surface Tension Transfer'. Dit is een booglasproces dat gebruik maakt van het zogenaamd 'arc wave form control' om de oppervlaktenspanning en het stroomverloop te controleren. STT is

een variant op de conventionele kortsluitboog en maakt gebruik van een inverterstroombron die noch een constante stroom, noch een constante spanning nodig heeft. Hierdoor kan de warmte-inbreng onafhankelijk van de draadsnelheid gecontroleerd worden.

In **figuur 5** is schematisch het stroomverloop tijdens een kortsluitfase en de druppelafplitsing van dit proces weergegeven. Tijdens een kortsluiting wordt de kortsluitstroom beperkt. De basisstroom bepaalt in de open-boogfase de totale warmte-inbreng en voorkomt dat de boog dooft. Met de 'boogspanningssensor' wordt het eerste moment van de kortsluiting geregistreerd en wordt bij het contact tussen druppel en lasbad de stroom tot bijna nul herleid. De extreem lage stroom voorkomt het afstoten van de aan de lasdraad hangende druppel vloeibaar metaal. De druppel bevochtigt als het ware het lasbad en gaat daarin over. Om de druppelafplitsing verder te bevorderen wordt een geleidelijk oplopende stroompuls gebruikt, de zgn. pinchstroom.

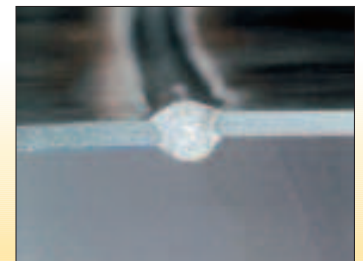
Als samenvatting bij **figuur 6** (van links naar rechts):

- Afbeelding A: het STT-proces produceert een uniform gesmolten druppel en behoudt deze tot de druppel kortsluiting maakt met het smeltbad.
- Afbeelding B: wanneer de druppel kortsluiting maakt met het smeltbad, wordt de stroom vermindert tot een laag niveau, zodat de druppel kan overvloeien in het smeltbad.
- Afbeelding C: Een afknijpstroom zorgt voor het zorgvuldig beëindigen van de kortsluitfase.
- Afbeelding D: Het STT-proces zorgt dat de boog opnieuw ontstaat bij een laag stroomniveau.

Figuur 7: schematische voorstelling van het CMT-proces met hierbij geïllustreerd het terugtrekken van de lasdraad



Figuur 8: lasverbinding (AlMg3) uitgevoerd met het CMT-proces



• Afbeelding E: Het STT-proces merkt dat de boog hersteld is en stuurt de piekstroom aan, die zorgt voor de geschikte booglengte. Na deze piekstroom wordt de achtergrondstroom aangestuurd, die voor de fijnregeling van de warmte zorgt.

Het Cold Metal Transfer (CMT) en ColdArc-proces (*6,7)

Na het STT-proces volgden andere varianten, maar het principe van het beperken van het spatgedrag tijdens het kortsluitbooglassen door de stroomsterkte praktisch tot nul te brengen, blijft hetzelfde. Cold Metal Transfer (CMT) en het ColdArc-proces zijn naast STT-proces de bekendste varianten van het kortsluitbooglassen.

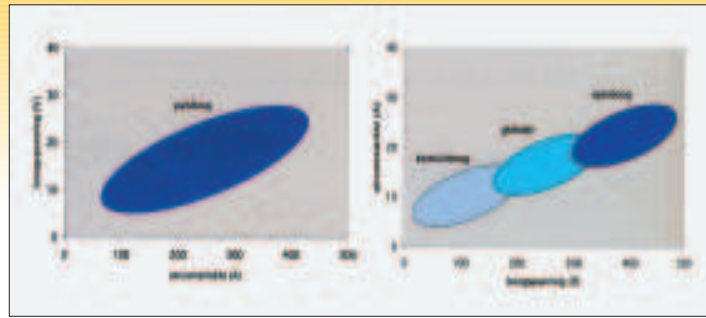
CMT is een kortsluitbooglasproces met een compleet nieuwe methode van het afsplitsen van druppels van de lasdraad. Hierbij kunnen uiterst geringe warmte-inbreng smeltlasverbindingen uitgevoerd worden. Bij het conventioneel kortsluitbooglassen wordt de kortsluitstroom beperkt met behulp van een shunt. Bij de moderne stroombronnen wordt de stroom na kortsluiting door een elektronische regeling beperkt. Dit wordt gedaan om het spatten tijdens de materiaalafsplijting zoveel mogelijk te beperken. Het nieuwe aan het CMT-proces is dat voor het eerst ook de aanvoer van de draad in het lasproces is betrokken.

Verder is het proces zo geregeld dat tijdens de materiaaloverdracht van draad naar lasbad de stroom bijna gelijk aan nul wordt. Door na het contact met het werkstuk de lasdraad een klein stukje terug te trekken en door de beperking van de lasstroom kan de materiaaloverdracht zonder spatten worden gerealiseerd. De elektrische boog zal als gevolg van de opgelopen temperatuur en na het verhogen van de spanning automatisch weer ontsteken. Na de materiaaloverdracht wordt de draad terug aangevoerd en de stroomsterkte verhoogd. Het principe wordt schematisch weergegeven in **figuur 7**.

De volgende fasen kunnen onderscheiden worden:

- Tijdens het branden van de boog wordt het toevoegmateriaal in de richting van het smeltbad bewogen.
- Wanneer het toevoegmateriaal het smeltbad raakt wordt de boog gedoofd. De lasstroom wordt vermindert.
- De lasdraad wordt teruggetrokken, waarbij er een druppel afgescheiden wordt. De kortsluitstroom wordt laag gehouden.
- De lasdraad wordt verder teruggetrokken, en de cyclus start opnieuw.

Het lasproces verloopt zonder spatten, omdat de stroomsterkte tijdens de overdracht van het materiaal uiterst laag is. Het unieke



Figuur 9: werkinggebied van het dubbel gepulseerd MIG/MAG-las

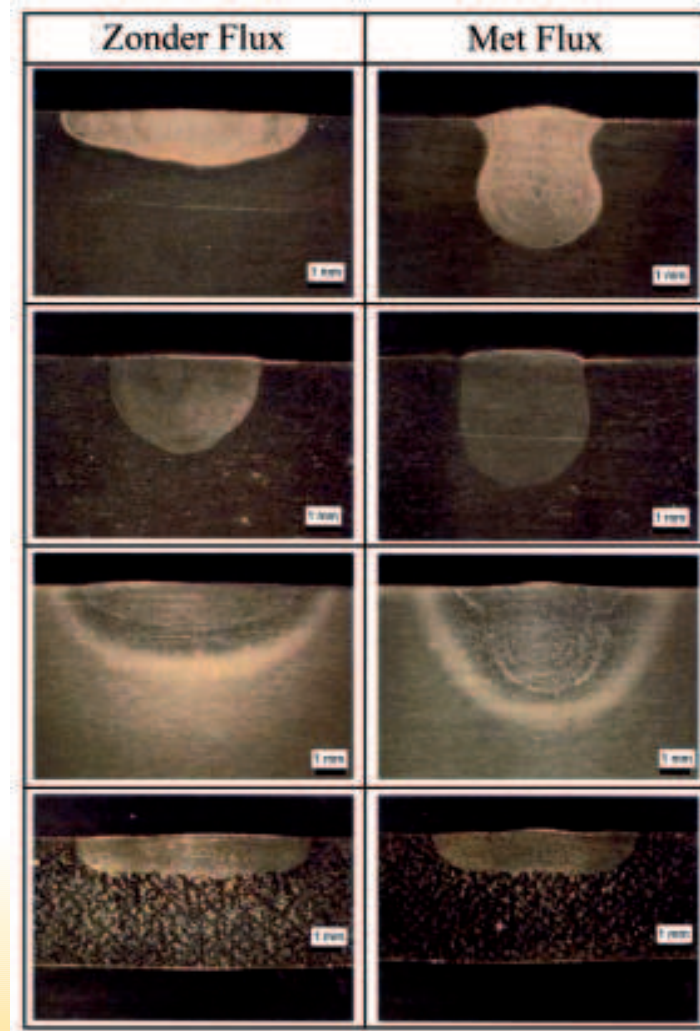
aan het CMT-proces is de koppeling van stroom- en spanningsverloop aan de draadaanvoer. Door de draad terug te trekken wordt slechts een geringe hoeveelheid materiaal naar het lasbad getransporteerd, een eigenschap die dit lasproces uitermate geschikt maakt voor het lassen van materialen met geringe dikte.

De gebruikelijke lasnaadvoorbereidingen kunnen worden toegepast bij het CMT-proces: overlapverbindingen, stompe lassen, lassen met een opstaand kantje en hoeklassen voor de gebruikelijke lasposities. Daarnaast is het proces geschikt voor het boogsolderen. Onder de naam ColdArc werd een

nieuw proces voorgesteld voor het verbinden met geringe warmte-inbreng van zeer dunne materialen (vanaf 0,3 mm) en van tot dusverre 'onmogelijke' combinaties van staal en aluminium of magnesium en aluminium. Een andere mogelijkheid is het met geringe warmte-inbreng solderen van bijvoorbeeld verzinkte panelen zonder aantasting van de zinkcoating, aluminium op staal, roestvast staal op aluminium. Dit kan vanaf een plaatdikte van 0,3 mm, voor stompe en niet-stompe verbindingen zoals: binnenhoek-, buitenhoek-, overlappen en T-lasnaden.

Bij het ColdArc-proces wordt het stroomverloop gemodificeerd door gebruik te maken van een nieuw

Figuur 10: vergelijking van het TIG en het A-TIG-proces



type hoog dynamische invertorschakeling, gecombineerd met een snelle, digitale procescontrole. Bij het ColdArc-proces wordt de lasdraad niet teruggetrokken om materiaaloverdracht te laten plaatsvinden. Voordelen zijn de geringe vervorming en spatvrije lassen door de digitale regeling. Het proces leent zich zowel voor geautomatiseerd als handmatig lassen.

MIG/MAG-las met dubbele puls (*8,9)

Voor kwalitatief hoogwaardig laswerk is pulserend MIG/MAG-las niet meer uit onze industrie weg te denken. Het proces wordt voornamelijk toegepast voor het lassen van aluminium en roestvast staal. De warmte-inbreng bij gepulseerd lassen is gering zodat deze techniek van het MIG/MAG-las geschikt is voor het lassen van dun materiaal.

De meeste fabrikanten hebben recent programma's ontwikkeld waarbij er kan gelast worden met een 'dubbele puls'. Met deze variant van het gepulseerd lassen kan men voor elke draad-gascombinatie een ideale lasinstelling vinden vanaf het kortsluitbooggebied tot in het open booggebied. Hierdoor wordt het werkinggebied aanzienlijk vergroot. Bovendien produceert dit type lasproces minder lasrook dan het conventionele MIG/MAG-lasproces.

De warmte-inbreng kan zeer nauwkeurig worden beheerst en dit is bijvoorbeeld van belang bij het lassen van dunne of dikke platen in roestvast staal of aluminium. Toepassingen die momenteel met het TIG-proces moeten gelast worden, kunnen voortaan ook met MIG worden gelast. Daarmee neemt de productiviteit aanzienlijk toe.

Verschillende lasstroombronproducenten hebben zo hun eigen varianten ontwikkeld: Spray modal, Aristo Superpuls, Double Pulse, Variable Pulse Mig Welding (VPMW), DIP-puls enz.

• Het Spray Modal-systeem is een lasproces ontwikkeld voor het lassen van aluminiumlegeringen, met een speciaal pulsprogramma. In plaats van één druppel worden bij deze variant van het lassen met gepulseerde stroom circa tien druppels per puls afgesplitst. Daarmee wordt bereikt dat het lasbad langer vloeibaar blijft waardoor de in de smelt opgenomen gassen over een langere periode kunnen ontsnappen. Op deze manier zal de kans op porositeiten gevoelig verkleinen.

• Het Aristo Superpuls-proces is een dubbelpulserend MIG/MAG-lasproces waarbij er een keuze kan gemaakt worden tussen: - een instelling waarbij met twee verschillende pulsbogen wordt

gewerkt die elkaar afwisselen (puls/puls);
 - een instelling waarbij een pulsboog wordt afgewisseld met een kortsluitboog (puls/kortsluitboog);
 - een instelling waarbij een pulsboog wordt afgewisseld met een open boog (open boog/puls).
 • Het Double Pulse-lassen werkt met twee periodiek wisselende booglasvermogens. Er wordt voortdurend gewisseld tussen een lage-stroom-pulsfase en een hoge-stroom-pulsfase. Tijdens het gepulseerd lassen op het hoger vermogenniveau wordt de doorlassing gerealiseerd, terwijl het lager vermogenniveau zorgt voor een beperking van de vervorming, aangezien het werkstuk tijdens deze fase kan afkoelen. De overgang van de lage stroompuls naar de hoge stroompuls gebeurt geleidelijk om ongewenste lasspatten te vermijden. Hiermee is het mogelijk om een gelijkaardig lasuitzicht en laskwaliteit te verkrijgen als met het TIG-lasproces, maar aan een aanzienlijk lagere kostprijs.
 • Het VPMW-lasproces is zeer gelijkaardig aan het Double Pulse-lasproces. Ook hier wordt gebruik gemaakt van twee frequenties waarbij een eerste frequentie zorgt voor een goede verticale inbranding en een tweede frequentie de zijdelingse inbranding garandeert. Door het kiezen van een goede balansregeling tussen de twee frequenties kan een gecontroleerde doorlassing bekomen worden. Bij het VPMW-lassen kan gewerkt worden met een kleine vooropening zodat het lasvolume

beperkt wordt.
 • Bij het DIP pulse-lassen kan een dynamische softwarecontrole van het lasproces toevallige onvolkomenheden zoals hechtlassen, uit-positie-lassen, walshuid en andere problemen detecteren en hierop reageren door de vorm en aard van de pulsen tijdens het lassen aan te passen.
TIG-lassen
Het A-TIG-proces (*10)
 Het A-TIG-lassen is eigenlijk geen proces, maar een proceshulpmiddel bij het TIG-lassen.
 Door gebruik van een speciaal, actief poeder (flux) dat voorafgaand aan het lassen op de lasplaats wordt aangebracht, blijkt het mogelijk de inbrandingsdiepte bij het TIG-lassen van roestvast staal aanzienlijk te vergroten. De inbranding kan hierbij 1,5 tot 2,5 maal groter worden. Het poeder is in het PATON-Hasinstituut (Rusland) ontwikkeld en gepatenteerd. Het TWI (The Welding Institute, UK) heeft de licentierechten en brengt het poeder commercieel op de markt. De benaming A-TIG komt van Active TIG waarmee de actieve werking van het poeder bedoeld wordt. In de beginperiode was het aanbrengen van het poeder nogal omslachtig (kwast) maar tegenwoordig is het poeder verkrijgbaar in een spuitbus en kan op deze manier eenvoudig aangebracht worden. Het zeer dunne poederlaagje verdampt in de lasboog en de actieve componenten penetreren direct in de lasboog. Het principe van het poeder is gebaseerd op het insnoeren van de lasboog

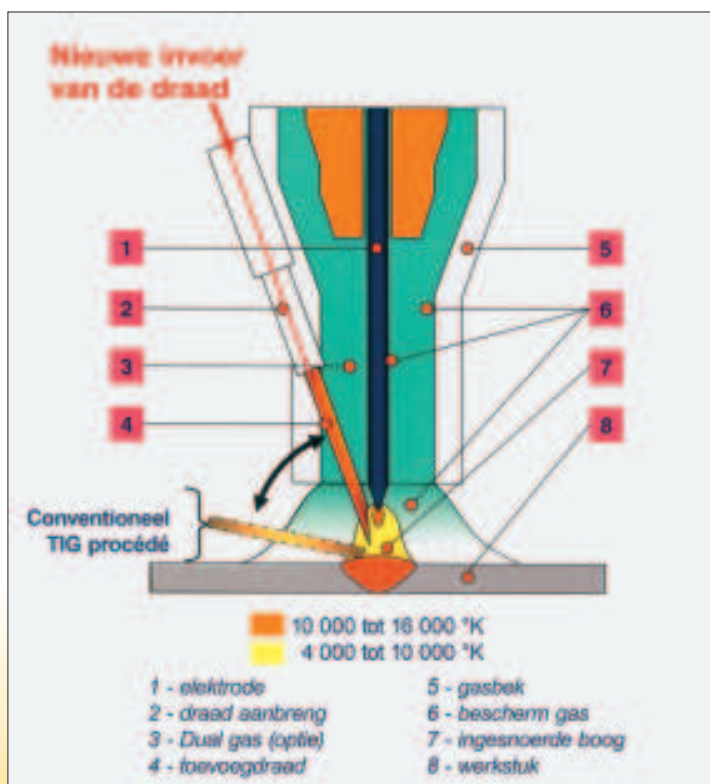
waardoor in de kern van de boog een hogere energiedichtheid wordt verkregen. Vermoedelijk wordt ook de oppervlaktespanning van het lasbad beïnvloed. Dit vertaalt zich in de praktijk tot een veel grotere inbrandingsdiepte. Toepassingen zijn bekend waarbij met behulp van het TIG-lassen in roestvast staal een inbrandingsdiepte gerealiseerd wordt van 10 tot 12 mm, wat vergelijkbaar is met het plasma keyhole-lassen. Het poeder kan overigens ook gebruikt worden bij het plasmalassen. Het geeft bij dit lasproces geen noemenswaardige vergroting van de inbranding maar zorgt ervoor dat de kenmerkende smalle paddenstoelvormige inbranding breder wordt. Hierdoor wordt een belangrijk nadeel van het plasmalassen, namelijk de noodzakelijke nauwkeurige lasnaadvoorbewerking, minder kritisch bij het gebruik van dit poeder. Ook bij het laserlassen met deze flux zijn gunstige effecten op de vorm van de inbranding geconstateerd. De belangrijkste ingrediënten bestaan uit siliciumoxide, natriumfluoride, titaanpoeder, titaanoxide en chroomoxide. Overigens zijn er inmiddels meer aanbieders van laspoeder op de markt. Deze poeders hebben een andere (geheime) samenstelling dan A-TIG, maar dezelfde werking. A-TIG en aanverwante mengsels kunnen dus het toepassingsgebied van TIG-lassen vergroten (vooral TIG-lassen zonder toevoegmateriaal). Een vergelijking van de inbranding bij het conventionele TIG-proces

en het A-TIG-proces wordt getoond in **figuur 10**.
Het TOPTIG-proces (*11)
 Vandaag worden de meeste gerobotiseerde lastoepassingen gerealiseerd met het MIG/MAG-procedé. Dit lasproces is hiervoor uitstekend geschikt, maar heeft wel één groot nadeel, namelijk de aanwezigheid van spatten, die afbreuk doen aan de kwaliteit van de verbindingen. Met TOPTIG is het nu mogelijk om lasnaden te realiseren van een zeer hoge kwaliteit, met snelheden die niet moeten onderdoen voor deze bij het MIG/MAG-lassen. De voordelen van het TOPTIG-procedé zijn: een zuiver procedé, het is een 'hot-wire-proces' maar zonder extra elektrische stroombron, geen lawaai, geen spatten, zeer weinig rook, goede lasmorfologie en aspect, flexibiliteit in naad positionering. **Figuur 11** toont het principe van het proces.

Conclusie

Deze innovatieve varianten van de klassieke lasprocessen bieden heel wat nieuwe mogelijkheden. Om deze in kaart te brengen en aan de praktijk te toetsen, is de inbreng van de industrie noodzakelijk. Bedrijven die interesse hebben om deel te nemen aan dit onderzoeksproject kunnen contact opnemen met het Onderzoekscentrum van het Belgisch Instituut voor Lastechniek. Contactpersonen zijn Prof. Ir. Alfred Dhooze, EWE; Ing. Bart Verstraeten, IWE en ir. Koen Faes, EWE. □

Figuur 11: principe van het TOPTIG-proces



REFERENTIES

- (*1) 'T.I.M.E.-lassen. Deel 1 - Een hoog rendement uit het werkkapitaal.' Lastechniek, maart 2006.
- (*2) 'T.I.M.E.-lassen. Deel 2 - Praktijkvoorbeelden'. Lastechniek, april 2006
- (*3) 'ForceArc - Een krachtige variant op het MIG/MAG-lassen'. Lastechniek, sept. 2006.
- (*4) 'Koud en spatloos lassen.' De nieuwste ontwikkelingen. Lastechniek, november 2005.
- (*5) 'Recente ontwikkelingen MIG/MAG-lassen.' Lastechniek, september 2006.
- (*6) 'Cold metal transfer, een revolutie in kortsluitbooglassen'. Lastechniek, maart 2005, Theo Luijendijk, TU Delft.
- (*7) 'Technische en economische evaluatie van lasprocessen voor het verbinden van pijpleidingen bij de firma Denys NV', Ragnar Verhoeven & Christoph Vorrsselmans. Casestudy voorgedragen tot het behalen van de graad en het diploma van lasingenieur/master na master Academiejaar 2005-2006.
- (*8) 'MIG/MAG-lassen met dubbele puls.' Hans Wolters, Lastechniek, september 2006.
- (*9) 'MIG/MAG-lassen blijft werkpaard constructeur. Halfautomaat lassen, ontwikkeling en tendensen.' Metallerie 52, augustus 2003.
- (*10) 'Basic understanding of A-TIG process'. IIW Doc. XII-1802-04.
- (*11) 'TOPTIG, een nieuw lasprocedé dat snelheid en hoge kwaliteit doen samengaan.' E. Streckx, Air Liquide Welding, Belgium. Bil-Studienamiddag, 18 mei 2006