

Laser-MIG/MAG hybride lassen

Dit Tech-Info-blad is tot stand gekomen binnen het kader van het kennisoverdracht-project "Fabricage van producten met geavanceerde productiemiddelen voor het omvormen en verbinden - FPGP". In dit kader zijn ook de volgende publicaties uitgegeven: TI.07.37 - "Laserlassen van complexe producten" en TI.07.38 - "Geautomatiseerd buigen". Uitgebreide informatie betreffende het laserlassen is tevens te vinden op de websites www.dunneplaat-online.nl en www.verbinden-online.nl, waarop tevens de volgende relevante Tech-Info-bladen vrij gedownload kunnen worden: TI.99.08 - "Laserlassen van beklede plaat", TI.00.11 - "Oppervlaktebehandelingen met de laser (cladden, legeren en dispergeren)", TI.00.12 - "Laser- en waterstraalsnijden van gelamineerde en beklede plaat", TI.07.34 - "Laserlassen vs. conventionele lastechnieken", TI.07.35 - "Omvormen", IOP 7.2 - "Lasertransformatiehardening", alsmede de praktijkaanbeveling PA.02.13 - "Oppervlaktebewerkingen met hoogvermogen lasers".

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Laser-MIG/MAG hybride lassen	2
2.1	Principe laser-MIG/MAG hybride lassen	2
2.2	Kenmerken laser-MIG/MAG hybride lassen	3
2.3	Voordelen en beperkingen van het laser-MIG/MAG hybride lassen	4
2.4	Onderlinge relatie (las)parameters bij het laser-MIG/MAG hybride lassen	5
2.4.1	Positioneringstoleranties	5
2.4.2	Inbrandingsdiepte en voortloopsnelheid	5
3	Systeemintegratie	6
4	Eigenschappen van laser-MIG/MAG gelaste verbindingen	7
4.1	Kwaliteit en mechanische eigenschappen	7
4.2	Warmte-inbreng	7
4.3	Beschermgassen	8
4.4	Procescomplexiteit	8
5	Toepassingsvoorbeelden	8
6	Toekomstige ontwikkelingen	9
7	Normen	10
8	Literatuur	11
9	Websites	11

1 Inleiding

Het combineren van het laser- en booglassen is al in de jaren zeventig van de vorige eeuw ontwikkeld en is dus bepaald geen nieuwe verbindingstechnologie. Het onderzoek naar de combinatie van laser- en booglassen werd in die periode vooral op laboratoriumschaal uitgevoerd en het heeft lang geduurd voordat het tot verdere ontwikkeling en toepassing kwam. Het combineren van een laser met ander lasprocessen kreeg nieuwe aandacht vanuit de behoefte om zowel dunne als dikke plaat met hoge snelheden en een goede kwaliteit te lassen. Het is dan ook niet verwonderlijk dat de verdere ontwikkelingen voortkomen uit de automobieliindustrie en de scheepsbouw.

De techniek waarbij we lasertechnologie combineren met een ander verbindingproces wordt laser hybride verbinden genoemd. Hoewel verschillende verbindingprocessen kunnen worden gekoppeld aan een laser, beperkt dit tech-info-blad zich tot de meest interessante variant en wel de combinatie van het MIG/MAG lassen met een laser, ofwel het laser-MIG/MAG hybride lassen.

Het lassen van metalen met behulp van een laser brengt een aantal voordelen met zich mee. Door de geconcentreerde warmte-inbreng kan met hoge snelheden worden gelast en wordt er weinig warmte in het materiaal gebracht. Hierdoor ontstaan geringe vervormingen van de productdelen en worden relatief hoge mechanische eigenschappen van de verbindingen verkregen. De laser heeft echter ook een aantal beperkingen. Allereerst is het procesrendement laag. Slechts een zeer gering deel van het uit het elektriciteitsnet opgenomen vermogen wordt benut voor het verkrijgen van de laserbundel.

Door reflectie van het laserlicht aan het oppervlak van de te lassen materialen gaat nogmaals een deel van de energie verloren en komt er nog minder warmte in het werkstuk. Met de door het werkstuk opgenomen warmte wordt overigens door de kleine spotgrootte van de bundel (hoge energiedichtheid) wel bijzonder effectief omgesprongen.

Andere beperkingen ten aanzien van het laserlassen liggen vooral op het vlak van de hoge investeringen en het feit dat de te lassen productdelen aan nauwkeurige toleranties moeten voldoen.

Een hulpmiddel bij het berekenen van de investeringen ten aanzien van een laser is hierbij het laserkostprijs-berekeningsprogramma dat beschikbaar is op de website www.verbinden-online.nl en www.dunneplaat-online.nl. Aan het eerste valt weinig te doen, lasers zijn geavanceerde productiemiddelen die geld kosten om te ontwikkelen en vervaardigen; een vijf-assige CNC gestuurde freesmachine is eveneens geen goedkoop productiemiddel.

Ten aanzien van de tweede beperking is het laser-MIG/MAG hybride lassen een interessant alternatief ten opzichte van het traditionele laserlassen om de toelaatbare toleranties met betrekking tot de voorbereiding van productdelen te verruimen. Door het gebruik van lastoevoegmateriaal (MIG/MAG) wordt het lassen veel minder kritisch ten aanzien van de toleranties van de voorbereide onderdelen.

Bij de toepassing van het laser hybride lassen wordt het laserlassen gecombineerd met een ander lasproces. Hierbij worden de voordelen van beiden verenigd, waarbij aangetoond is dat met het hybride lassen het toepassingsgebied voor het laserlassen in belangrijke mate kan worden verruimd. Deze innovatieve technologische ontwikkeling zorgt er tevens voor, dat er een kwaliteitsverbetering van de gelaste producten optreedt in termen van sterkte, visuele aspecten en minder uitval. Daarnaast liggen de productiesnelheden aanzienlijk hoger ten opzichte van de traditionele gasbooglasprocessen. Toepassing van het hybride lassen vergroot verder de inzetbaarheid van de lasertechnologie, doordat producten met grotere (vorm)on nauwkeurigheden kunnen worden gelast.

Hybride verbindingstechnieken hoeven echter niet beperkt te blijven tot het lassen, ook andere combinaties van verbindingstechnieken komen hiervoor in aanmerking (bijvoorbeeld puntlassen en lijmen).

Relatief veel onderzoek is in het recente verleden gedaan naar de combinatie van het laser-TIG hybride lassen. De complicerende factor bij deze combinatie is het gebruik van lastoevoegmateriaal, hiervoor is vaak een extra besturingsas noodzakelijk. Deze extra besturingsas moet ervoor zorgen dat het lastoevoegmateriaal altijd op de juiste plaats en onder de juiste hoek in het smeltbad wordt ingevoerd. Voor de combinatie laser-MIG/MAG

hybride lassen bestaat op dit moment de meeste industriële belangstelling. In het vervolg van dit Tech-Info-blad zal dan ook de focus worden gelegd op het laser-MIG/MAG hybride lassen.

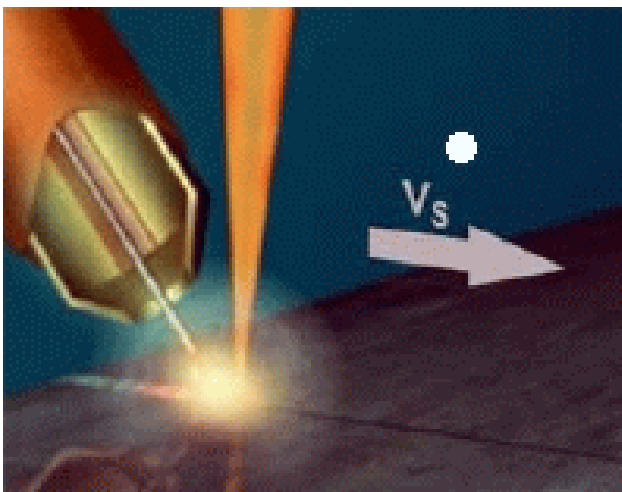
Ondanks dat er uiteraard ook beperkingen zijn, is het de verwachting dat het laser-MIG/MAG hybride lasproces zijn weg zal vinden in de industrie. Het proces heeft vele voordelen door de combinatie van twee lasprocessen. De toepassingen worden in eerste instantie gevonden in kapitaalcrachtige industrieën, waar of de kwaliteit van de gelaste producten voorop staat, ofwel het accent ligt op grote series en hoge productiesnelheden.

2 Laser-MIG/MAG hybride lassen

In de achterliggende jaren is er een enorme vooruitgang geboekt ten aanzien van enerzijds het laserlassen en anderzijds het booglassen en het MIG/MAG lassen in het bijzonder. Nieuwe type lasers zijn beschikbaar gekomen (diode, fiber, disk) en aanzienlijke verbeteringen (vermogen, bundelkwaliteit) ten aanzien van de "oude" type lasers zijn gerealiseerd. Door het laserlassen met het MIG/MAG lassen te combineren ontstaan nieuwe mogelijkheden en kunnen vaak de afzonderlijke beperkingen van de beide processen geëlimineerd worden.

2.1 Principe laser-MIG/MAG hybride lassen

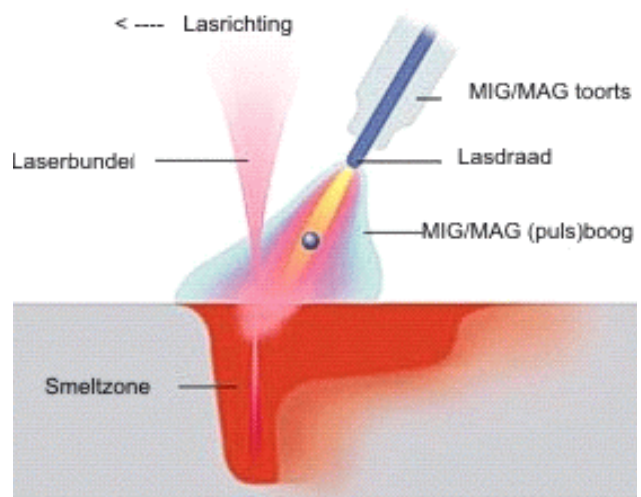
Het hybride laser-booglassen is een combinatie van een laser met een plasma, TIG- of MIG/MAG lasproces/laskop. Het laser-MIG/MAG hybride lassen wordt uitgevoerd met een laser (Nd:YAG, CO₂, fiber of diode) en een MIG/MAG lastoorts. Bij het laser-MIG/MAG hybride lassen is de laser (vrijwel altijd) vóór het MIG/MAG lasproces geplaatst, met andere woorden de laser "loopt" voorop (zie figuur 1).



figuur 1 Laser "loopt" voor op MIG/MAG proces

In figuur 2 is schematisch het laser-MIG/MAG hybride lassen weergegeven. Zowel het laserlassen als het MIG/MAG lassen worden afzonderlijk toegepast, waardoor in principe de lasparameters van de beide lasprocessen afzonderlijk kunnen worden ingesteld. Dit maakt het mogelijk te kiezen of de laser, dan wel het MIG/MAG lassen leidend is. Hierdoor ontstaat een gevarieerd aanbod van mogelijkheden met betrekking tot de warmte-inbreng en penetratie.

Figuur 2 laat zien dat bij voldoende laservermogen de bekende diepe (key-hole) inbrandingsvorm wordt verkregen. De MIG/MAG toorts staat onder een hoek met de loodrecht invallende laserbundel, waarbij de afsplitsende druppels naar de laserbundel gericht zijn en worden opgenomen door de laserpluim. Het MIG/MAG lassen kan zowel met continue als met pulserende stroom worden uitgevoerd.



figuur 2 Schematische weergave van het laser-MIG/MAG hybride lassen [7]

Afhankelijk van het gebruikte beschermgas wordt naar analogie bij het MIG/MAG lassen gesproken van het laser-MIG hybride (inert beschermgas), dan wel het laser-MAG hybride (actief beschermgas) lassen.

Het doel van het combineren van twee lasprocessen is om de nadelen van de afzonderlijke processen te elimineren en de voordelen te versterken. Op deze manier kunnen de toepassingsgebieden van beide lasprocessen verruimd worden. Een beperking van het laserlassen is bijvoorbeeld de nauwkeurige toleranties die aan de vóorbewerkte productdelen worden gesteld of in het verlengde hiervan, de nauwkeurigheid van het positioneren van de productdelen ten opzichte van de laserbundel. Deze beperkingen kunnen slechts tegen hoge kosten worden opgelost.

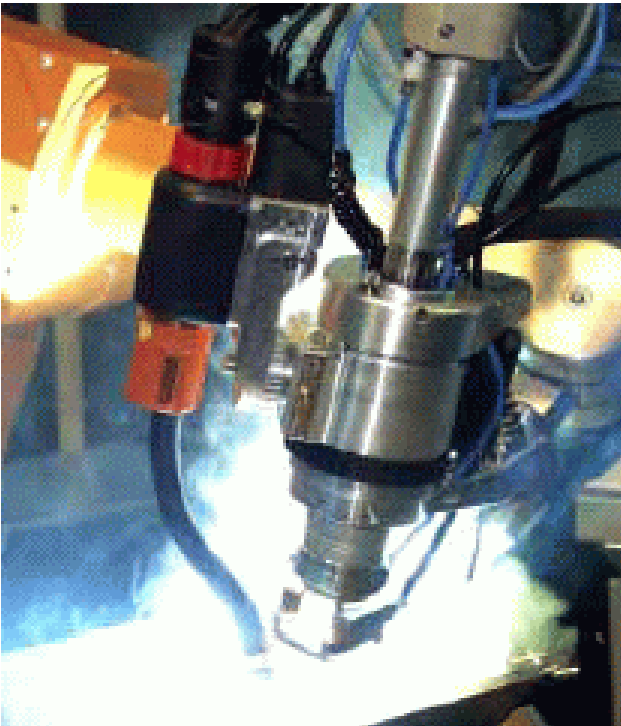
Bij het laser-MIG/MAG hybride lassen wordt voor een belangrijk deel tegemoet gekomen aan deze beperkingen van het laserlassen, waarbij geringe afwijkingen door uitzetting en krimp van de lasnaad eveneens gemakkelijk kunnen worden opgevangen. Bij het lassen van een I-naad met het laser-MIG/MAG hybride proces kan bijvoorbeeld ruwweg met een tweemaal zo grote tolerantie worden gewerkt dan bij het laserlassen alleen. Let wel, dit is slechts een indicatie van de verruiming van de toleranties, want vele factoren spelen een rol, zoals de materiaaldikte, de gewenste inbrandingsvorm, de lasnaad geometrie en de positie waarin wordt gelast. Voor het MIG/MAG lassen geldt dat de maximale lasnelheid wordt begrensd door een goede bevochtiging tussen het lasbad en de te verbinden materialen. Dit wordt onder andere bepaald door de energiebalans tussen smeltbad en basismateriaal. Door extra energie toe te voeren (laser) wordt een gunstiger energiebalans verkregen, waardoor een betere bevochtiging van het basismateriaal ontstaat en dus hogere lassnelheden kunnen worden bereikt.

De meeste leveranciers kiezen ervoor hun apparatuur qua hardware te integreren, zoals te zien is in de figuren 3 en 4. Uit deze figuren blijkt dat de laser met het bijbehorende lenzensysteem samen met de MIG/MAG lastoorts geïntegreerd is in één hybride laskop.

De twee lasprocessen kunnen afzonderlijk worden ingesteld, dan wel via een geïntegreerde processturing gekoppeld worden; afhankelijk van de behoefte van de gebruiker.



figuur 3 Geïntegreerde laskop van laser en MIG/MAG las-toorts (Fronius)



figuur 4 Geïntegreerde laskop van laser en MIG/MAG las-toorts (Cloos)

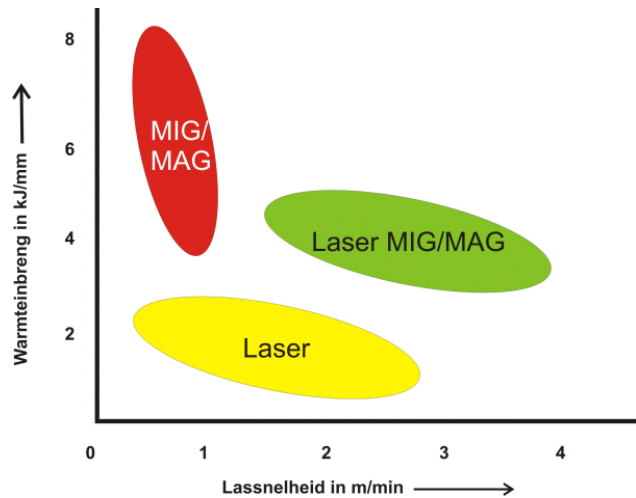
2.2 Kenmerken laser-MIG/MAG hybride lassen

Het laser-MIG/MAG hybride lassen wordt op dit moment toegepast in onder meer de automotive industrie (Volkswagen, BMW, Audi), in de scheepsbouw (Meyer, Odense, Schuler Held scheepswerven) en consumentenelektronica (ondermeer Toshiba). De diversiteit van deze bedrijven geeft al aan dat het laser-MIG/MAG hybride lassen een flexibel lasproces is. Immers de automotive en consumenten elektronica zijn sectoren waar uitsluitend geringe materiaaldikten worden toegepast, terwijl de scheepsbouw een representant is van het verwerken van relatief dik materiaal.

Verder geldt dat in alle sectoren vele verschillende materialen gelast worden, waaronder staal, roestvast staal en aluminium.

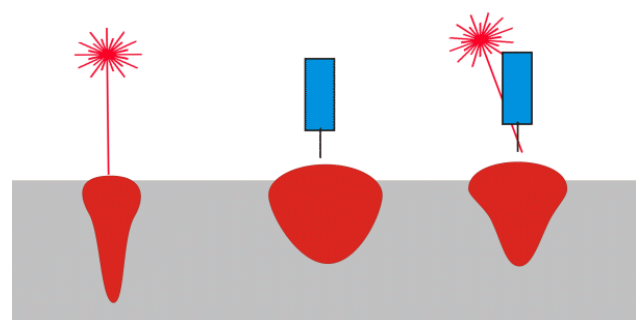
De combinatie van het laserlassen en het MIG/MAG las-sen zorgt, ten opzicht van het MIG/MAG las-sen, voor een

verlaging van de warmte-inbreng en verhoging van de lassnelheid. Ten aanzien van het laserlassen wordt een verhoging van de lassnelheid verkregen, zoals schematisch is weergegeven in figuur 5.



figuur 5 Relatie tussen de warmte-inbreng en lassnelheid voor het MIG/MAG las-sen, het laserlassen en het laser-MIG/MAG hybride las-sen [23]

Bij hoge vermogens kenmerkt het laserlassen zich (afhankelijk van het ingestelde vermogen) door diepe en smalle lassen. Dit maakt het proces kwetsbaar voor afwijkingen ten aanzien van de lasnaadvorm en de positionering van de lasnaad. Een MIG/MAG las echter geeft een veel bredere las en is hierdoor verhoudingsgewijs veel minder gevoelig voor variaties in de lasnaadvoorbewerking of de positie van de lasnaad. De combinatie van het laser- en MIG/MAG las-sen zorgt ervoor dat de kwetsbaarheid voor toleranties afneemt (ten opzichte van het laser-las-sen) terwijl de lassnelheid aanzienlijk hoger ligt (ten opzichte van het MIG/MAG las-sen). In vele gevallen kan er voor worden gezorgd dat, door een juiste instelling van de lasparameters, de inbranding gewaarborgd blijft. Figuur 6 geeft een schematische weergave van het inbrandingsprofiel dat wordt verkregen bij het laser-, het MIG/MAG- en het laser-MIG/MAG hybride las-sen.

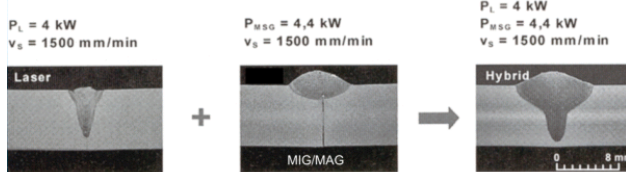


figuur 6 Schematische weergave van het inbrandingsprofiel bij het laser-, het MIG/MAG- en het laser-MIG/MAG hybride las-sen

Uit figuur 6 blijkt duidelijk dat het inbrandingsprofiel van het laser-MIG/MAG hybride las-sen veel gunstiger is ten opzichte van het laserlas-sen wat zich in de praktijk vertaalt naar ruimere toleranties ten aanzien van de te las-sen onderdelen en hun positionering ten opzichte van het lasproces.

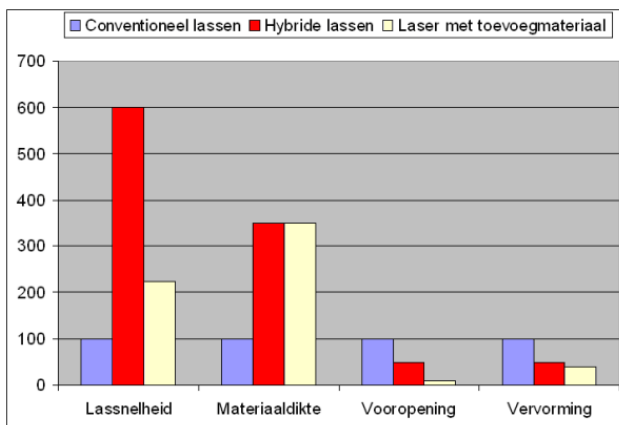
Figuur 7 toont de verschillende inbrandingsprofielen die worden verkregen bij de diverse lasprocessen. Deze figuur laat een drietal las-sen zien, waarbij tussen de verschillende processen het vermogen en de ingebrachte

warmte zoveel mogelijk gelijk zijn gehouden. In figuur 7 is goed te zien dat het inbrandingsprofiel van het laser-MIG hybride lassen (rechts) veel minder kwetsbaar is ten aanzien van de lasnaad geometrie (toleranties). Ook is te zien dat het totale inbrandingsprofiel bij het laser-MIG/MAG lassen is opgebouwd uit de beide profielen die met de afzonderlijke processen worden verkregen.



figuur 7 Inbrandingsprofiel van het laser-, MIG- en laser-MIG lassen bij een vrijwel gelijk vermogen en lassnelheid. Materiaal aluminium EN AW-5083 O (AlMg4,5Mn). Materiaaldikte 8 mm. Lastoevoegmateriaal AlMg5 [15]

Figuur 8 toont een relatieve vergelijking tussen het laser-MIG/MAG hybride lassen, het MIG/MAG lassen (conventioneel lassen) en het laserlassen met toevoegmateriaal op een aantal essentiële punten, waaronder de lassnelheid, te lassen materiaaldikte, gevoeligheid voor vooropeningen en vervormingen van de te verbinden delen. Uit figuur 8 blijkt dat het laser-MIG/MAG hybride lassen op vrijwel alle aspecten meerwaarde heeft ten opzichte van het MIG/MAG lassen. Ten opzichte van het laserlassen zijn er voordelen waar het de lassnelheid en de gevoeligheid voor vooropeningen betreft.

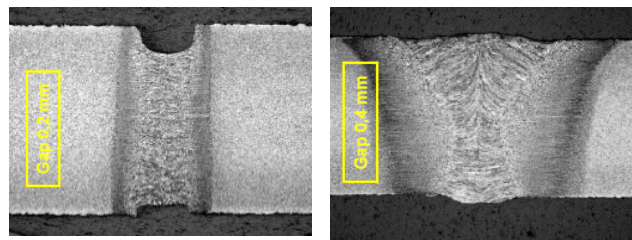


figuur 8 Relatieve vergelijking tussen de verschillende lasprocessen met betrekking tot een aantal criteria [6]

2.3 Voordelen en beperkingen van het laser-MIG/MAG hybride lassen

De combinatie van het laser- en MIG/MAG lassen kent een aantal specifieke voordelen ten aanzien van de afzonderlijke lastechnieken. Beschouwen we het laser-MIG/MAG hybride lassen ten opzichte van het laserlassen, dan kunnen de volgende voordelen genoemd worden:

- verruiming van de proces- en producttoleranties;
 - betere mogelijkheid tot de overbrugging van spleten waardoor de voorbereiding van productdelen en hulpgereedschappen minder kritisch wordt, wat kostenbesparingen met zich meebrengt;
 - ten aanzien van de procestoleranties ontstaat de mogelijkheid de extra mogelijkheden van het MIG/MAG lassen toe te voegen aan het laserlassen;
- ten gevolge van de additionele draadtoevoer;
 - betere vulling van de lasnaad (zie figuur 9);
 - verbetering materiaalkundige en mechanische eigenschappen.



figuur 9 Links een laser gelast proefstuk (vooropening 0,2 mm) en rechts een laser-MAG hybride gelast proefstuk met een vooropening van 0,4 mm. Ongelegeerd staal 6 mm dikte [21]

Figuur 9 laat duidelijk zien dat er bij het laserlassen van grotere materiaaldikten zonder toevoegmateriaal materiaal te weinig is om de lasnaad voldoende op te kunnen vullen.

De voordelen van het laser-MIG/MAG hybride lassen ten opzichte van het MIG/MAG lassen zijn de volgende:

- verhoging van de lassnelheid;
 - verbetering productiviteit;
- kleinere WBZ (warmte beïnvloedde zone);
 - vermindering van de vervorming van het product;
 - beter mechanische eigenschappen van de verbinding;
- verhoging van de penetratiediepte;
 - verbetering reproduceerbaarheid van het proces;
 - de lasnaadvoorbewerking kan achterwege gelaten worden;
- verbetering van de processtabiliteit;
 - de laserbundel ioniseert het (bescherm)gas vòòr de lasboog, waarbij dit, in combinatie met het boogplasma, voor een extra stabilisatie van het lasproces zorgt;
 - het ontsteken van de MIG/MAG lasboog in de laserbundel voorkomt spatvorming ten gevolge van kortsluiting;
 - verbetering van de laskwaliteit ten gevolge van een vermindering van de poreusheid en scheurgevoeligheid wat resulteert in een verlaging van nabewerkingskosten;
- uniforme warmte-input van begin tot eind van de lasnaad;
 - het aanbrengen en aanhouden van een vooropening is niet noodzakelijk.

Naast deze voordelen zijn er aan het laser-MIG/MAG hybride lassen ook beperkingen verbonden. De laskop bij het laser-MIG/MAG hybride lassen is een relatief ingewikkelde constructie die, om praktische redenen, niet te groot van afmetingen mag zijn vanwege de bereikbaarheid van de lasnaden.

Verder betekent de combinatie van het MIG/MAG en laserlassen dat voor beide processen de parameters ingesteld en geoptimaliseerd moeten worden. In tabel 1 wordt een overzicht van enkele van deze parameters weergegeven om aan te geven dat er rekening moet worden gehouden met vele parameters.

tabel 1 Opsomming van de parameters waarmee rekening moet worden gehouden bij het laser-MIG/MAG hybride lassen

laserparameters	MIG/MAG-parameters
type laser	type lasboog (pulsboog, continu)
focuslengte optiek	stroomsterkte/draadsnelheid
focuspositie	boogspanning
laservermogen	pulsfrequentie
lassnelheid	draaduitsteek
afstand tussen laserbundel en MIG/MAG boog	draadpositionering (t.o.v. laserspot)

Verder is het belangrijk dat er bij het laser-MIG/MAG hybride lassen naar wordt gestreefd de inschakelduur te maximaliseren om de hoge investeringskosten binnen de gewenste termijn af te kunnen schrijven. Dit houdt in dat de apparatuur zoveel mogelijk in bedrijf moet zijn om het proces rendabel te maken (er moeten zoveel mogelijk meters gelast worden). Dit is overigens inherent aan alle kapitaalsintensieve investeringen. De hoge lassnelheden die bij het laser-MIG/MAG hybride lassen haalbaar zijn, helpen natuurlijk enorm om het proces rendabel te maken.

Samenvattend kent het laser-MIG/MAG hybride lassen de volgende beperkingen:

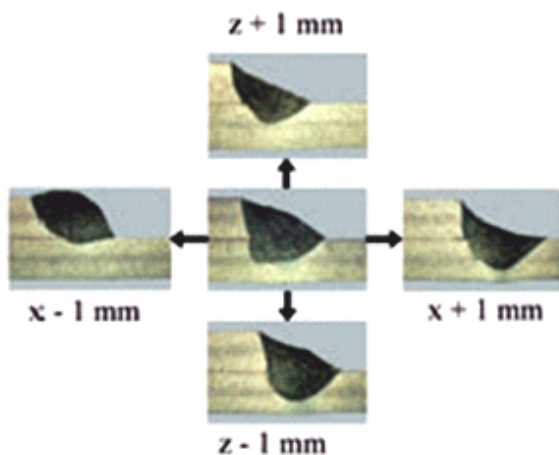
- ▶ hoge investeringskosten;
 - inherent aan laserlassen;
 - het proces wordt alleen rendabel bij hoge inschakelduren;
 - de inzet bij kleine series producten werkt alleen indien zeer flexibel omgesteld kan worden;
- ▶ alleen gemechaniseerd toe te passen;
- ▶ kennis noodzakelijk van zowel laser- als lastechnologie;
- ▶ logistieke consequenties onderkennen en oplossen;
- ▶ extra investering in scholing.

Het laser-MIG/MAG hybride lassen zal naar verwachting zijn weg vinden in de laswereld. Het proces heeft, zoals hierboven aangegeven, veel voordelen door de combinatie van twee interessante lasprocessen. Het laser-MIG/MAG hybride lasproces heeft een uitstekende potentie voor wie veel meters laswerk moet maken.

2.4 Onderlinge relatie (las)parameters bij het laser-MIG/MAG hybride lassen

2.4.1 Positioneringstoleranties

De extra speelruimte die wordt verkregen in de uitlijning bij het laser-MIG/MAG hybride lassen van overlapverbindingen komt goed tot uiting in figuur 10. Uit figuur 10 blijkt dat een uitlijnfout van 1 mm in de X- of Z-richting nog steeds acceptabele lassen oplevert. De speelruimte bij het laserlassen is aanzienlijk kleiner ($< 0,5$ mm), waarmee aangetoond is dat het laser-MIG/MAG hybride lassen ruimere toleranties toelaat ten opzichte van het laserlassen.

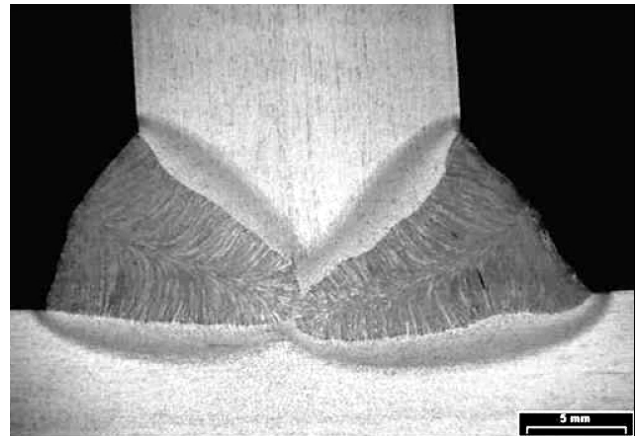


figuur 10 Invloed van een foutieve uitlijning van 1 mm haaks op de lasrichting (x) en in hoogterichting (z) [7]

Overigens gelden deze waarden bij hoge lassnelheden, als de lassnelheden afnemen wordt het verschil in toelaatbare toleranties tussen het laser-MIG/MAG hybride lassen en het laserlassen nog veel duidelijker.

In de plaatverwerkende industrie wordt veel gebruik gemaakt van hoeklassen. Met het laser-MIG/MAG hybride lasproces kan een diepe inbranding worden verkregen, zodat een negatieve hoekinbranding kan worden voor-

komen en zelfs een stompe lasverbinding mogelijk is. Verder levert de combinatie van het laser en MIG/MAG lassen fraai aangevloeide hoeklassen op, zoals te zien is in figuur 11.



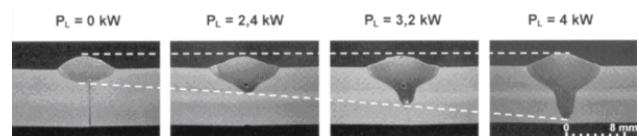
figuur 11 Materiaaldikte: 16 mm; Materiaal: S355J2G3; Laspositie PB; Draadsnelheid 11,5m/min (450 A); Lasspanning: 33V; Laservermogen: 4,4 kW (Nd-YAG); Lassnelheid: 50 cm/min; Lastoevoegmateriaal: G3S1 [5]

2.4.2 Inbrandingsdiepte en voortloopsnelheid

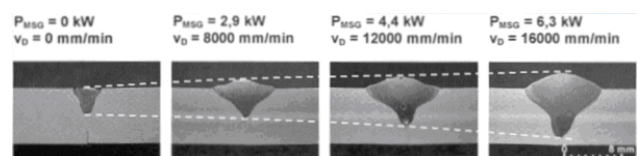
De gunstige vorm van de inbranding bij het laser-MIG/MAG hybride lasproces is dus één van de voordelen van dit lasproces, een voorbeeld hiervan wordt in figuur 12 en 13 getoond. In deze figuren zijn lasverbindingen gemaakt in 8 mm dik aluminium (EN AW 5083-0 = AlMg4,5Mn). Zoals te zien is in figuur 12 ontstaat vanuit het MIG lassen (Laservermogen $P_L = 0$ kW, meest links) een inbrandingspatroon met een steeds diepere penetratie als het laservermogen toeneemt tot 4 kW (meest rechts). Duidelijk is ook te zien dat boven de 2,4 kW laservermogen een vingervormige inbranding ontstaat ten gevolge van de hoge energiedichtheid van de laserbundel.

Figuur 13 toont de variaties van het inbrandingsprofiel, maar nu bij een wisselend vermogen van de MIG boog. Het kenmerkende inbrandingsprofiel, als er alleen met de laser gelast wordt, is helemaal links te zien ($P_{MSG} = 0$ kW). Naarmate het vermogen van de MIG boog toeneemt, nemen zowel de penetratie als de breedte van het smeltbad toe.

De vingervormige inbranding wordt hier veroorzaakt door de MIG boog, omdat bij het MIG lassen met hoge stroomsterkten de overgaande metaaldruppels hoge snelheden krijgen die resulteren in deze karakteristieke vorm van de inbranding.



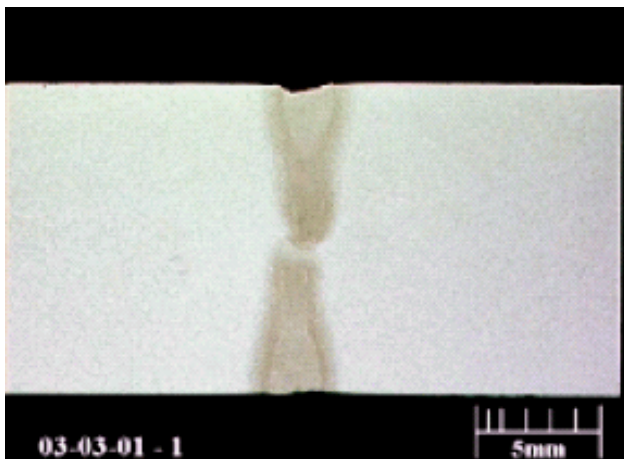
figuur 12 Invloed van het laservermogen op het inbrandingsprofiel bij het MIG lassen met variërend laservermogen. Draadsnelheid = 12 m/min en lassnelheid = 1,5 m/min. (P_L = laservermogen) [15]



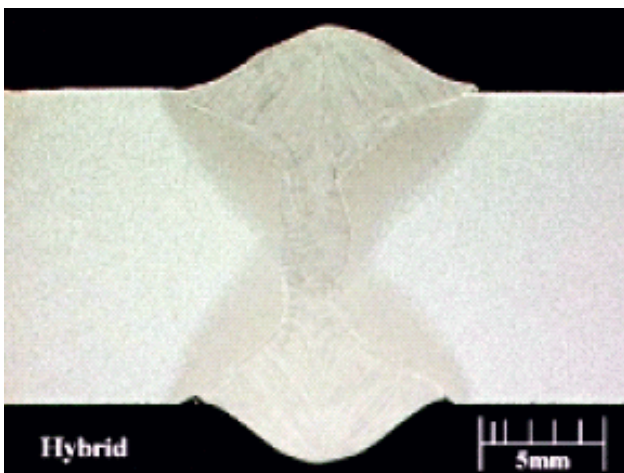
figuur 13 Invloed van het vermogen bij het MIG lassen op het inbrandingsprofiel bij een vermogen van de laser van 3,2 kW en een lassnelheid van 1,5 m/min. (P_{MSG} = vermogen MIG lassen in kW, V_D = draadsnelheid in mm/min) [15]

De gebruiker kan dus door het instellen van de juiste parameters zijn inbrandingsprofiel zelf bepalen van aan de ene kant het profiel dat wordt verkregen door alleen met de laser te lassen en aan de andere kant het profiel dat wordt verkregen door alleen de MIG boog, dan wel een combinatie van beiden. Hierdoor heeft de gebruiker dus een grote vrijheid om te kiezen welke inbrandingsvorm voor zijn specifieke toepassing de meest gunstige is.

Het verschil in inbrandingsprofiel ten aanzien van laserlassen en het laser-MIG/MAG hybride lassen wordt nog eens duidelijk weergegeven in de figuren 14 en 15. Deze figuren tonen lassen die met de beide lasprocessen zijn gelegd in 12 mm koud gewalst staal met een lassnelheid van 1 m/min. In figuur 14 is het resultaat te zien als dit materiaal alleen met een laser wordt gelast, terwijl in figuur 15 de las is te zien die verkregen wordt bij het laser-MAG hybride lassen met dezelfde lassnelheid.



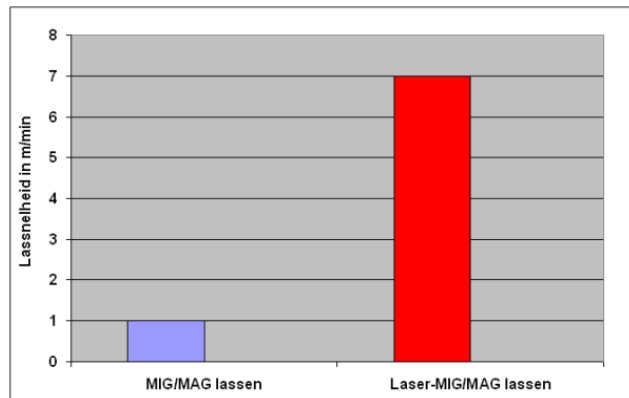
figuur 14 Koud vervormd staal, dikte 12 mm, lassnelheid 1 m/min, gelast met een Nd:YAG-laser [6]



figuur 15 Koud vervormd staal, dikte 12 mm, lassnelheid 1 m/min, gelast met het laser-MAG hybride lassen (Nd:YAG-laser) [6]

Een ander voordeel van het laser-MIG/MAG hybride lassen ten opzichte van het MIG/MAG lassen is, dat er aanzienlijk hogere lassnelheden bereikbaar zijn. Dit was al zichtbaar in figuur 9 maar blijkt ook uit figuur 16. Vooral bij grotere materiaaldikten worden deze verschillen in lassnelheid duidelijker zichtbaar.

Uit figuur 16 blijkt dat in potentie met het laser-MAG hybride lassen 7 × zo hoge lassnelheden bereikt kunnen worden ten opzichte van het traditionele MIG/MAG lassen. In de praktijk wordt, afhankelijk van de toepassing,



figuur 16 Verschil in maximum lassnelheid tussen het MIG/MAG lassen en het laser-MAG lassen. Laser- vermogen 3 kW, MIG/MAG lasstroom 100 A. Materiaal ongelegeerd staal. Materiaaldikte 1,6 mm [14]

materialen, lasposities, omstandigheden, enz. een winst in lassnelheid gerapporteerd die ligt tussen de 250 en 700%.

Lasnaadvormen

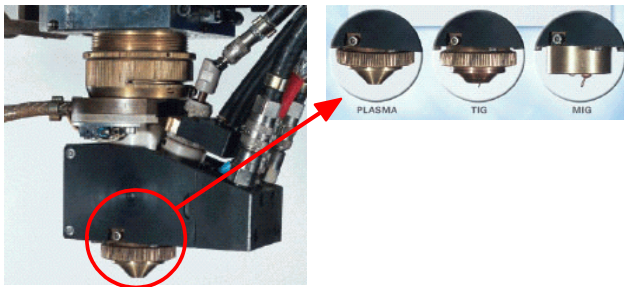
Ten aanzien van de lasnaadvormen geldt, dat over het algemeen gebruik kan worden gemaakt van de lasnaadvormen die ook bij het MIG/MAG lassen worden gebruikt. Afhankelijk van de toepassing en instellingen van de lasparameters kunnen de vooropeningen van de lasnaden bij het laser-MIG/MAG hybride lassen soms iets kleiner worden genomen ten opzichte van het MIG/MAG lassen. De toleranties voor het voorbereiden van de lasnaadkanten zijn ook gelijk aan de toleranties die bij het gemechaniseerd MIG/MAG lassen toelaatbaar zijn.

3 Systeemintegratie

Op dit moment zijn er in West-Europa verschillende firma's die hybride laserlassystemen op basis van de combinatie laser-MIG/MAG aanbieden. Dit zijn onder meer Fronius, Cloos, Kuka, HighYAG, Precitec en OTC/Panasonic. De hybride lasersystemen onderscheiden zich vaak ten aanzien van het concept tot op detailniveau. In de figuren 3 en 4 zijn al een aantal geïntegreerde, laser-MIG/MAG laskoppen getoond. Het aantrekkelijke van deze oplossingen is, dat de MIG/MAG-toorts gemonteerd is op een roterende as, waarmee vooral de mogelijkheid om in positie te lassen wordt verbeterd. Sommige fabrikanten ontwikkelen zelf de laserkop en maken voor de (conventionele) lasapparatuur (bijv. MIG/MAG apparatuur) gebruik van bestaande apparatuur (Precitec). Andere leveranciers kiezen ervoor om alles zelf te ontwikkelen zoals de firma HighYAG, die een compleet modulaire hybride laskop ontwikkeld heeft, waaraan stroombronnen van verschillende leveranciers kunnen worden gekoppeld.

Vrijwel alle hybride laskoppen zijn integratieoplossingen op basis van fiber-geleidende laserbronnen (cw Nd:YAG-, disc- en fiber laser). Ontwikkelingen (Liquide/SAF Oerlikon) zijn gaande waarbij, op basis van een modulair hybride systeem, door middel van opzetstukken, verschillende gasbooglasprocessen toegepast kunnen worden (MIG/MAG, TIG en plasma), zie figuur 17. Dit systeem is in principe geschikt voor verschillende lasertypen (cw Nd:YAG- en CO₂-laser).

Al deze ontwikkelingen zijn veelal "vraag gestuurd", wat wil zeggen dat er door fabrikanten wordt ingespeeld op vragen of problemen vanuit de markt. Deze vragen kunnen dan leiden tot specifieke en soms tot generieke oplossingen.



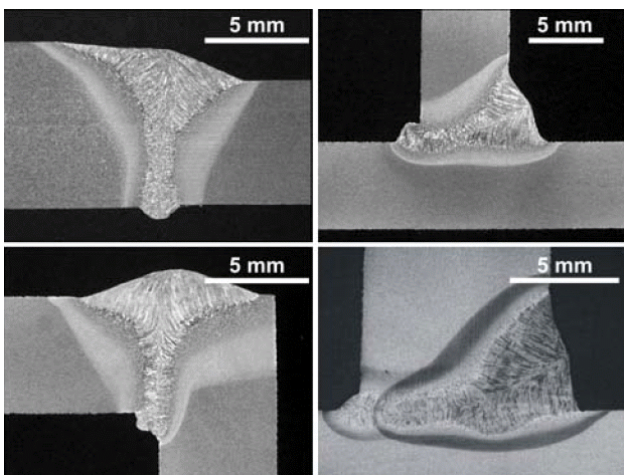
figuur 17 Air Liquide/SAF Oerlikon modulair laser MIG/MAG/TIG/Plasma hybride lassysteem

Belangrijk bij de keuze van het juiste systeem is, dat de gebruiker goed definieert wat de eisen zijn. Op basis van deze systeem-eisen kan met fabrikanten worden overlegd welk systeem het best aansluit op de wensen van de gebruiker. Belangrijk is ervoor te zorgen dat er één systeemverantwoordelijke komt, die aanspreekbaar en verantwoordelijk is bij tekortkomingen van het systeem. Ook is het noodzakelijk van te voren goede afspraken te maken ten aanzien van het onderhoud aan dergelijke complexe systemen.

4 Eigenschappen van laser-MIG/MAG gelaste verbindingen

4.1 Kwaliteit en mechanische eigenschappen

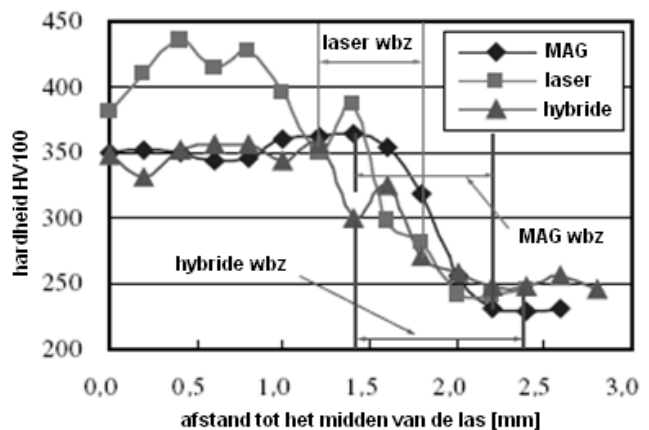
Uit onderzoek naar de kwaliteit en de mechanische eigenschappen van de lasverbinding blijkt dat bij het hybride lasproces minder poreusheid voorkomt en dat betere mechanische eigenschappen worden verkregen dan bij het MIG/MAG lassen. De laser stabiliseert het MIG/MAG-lasproces, waardoor een rustiger boog wordt verkregen, wat tot uitdrukking komt in fraai aangevloeide lassen met minder kans op poreusheid. Belangrijk is dat het constructiedetail geschikt is voor het laser-MIG/MAG hybride lassen. Figuur 18 geeft een aantal voorbeelden van constructiedetails die zich uitstekend en met goede kwaliteit met het laser-MIG/MAG hybride lassen laten verbinden.



figuur 18 Kenmerkende lasnaadvormen voor het laser-MIG/MAG hybride lassen [21]

De mechanische eigenschappen van de laser-MIG/MAG hybride gelaste verbindingen zijn over het algemeen beter dan de mechanische eigenschappen verkregen bij het MIG/MAG lassen en soms zelfs vergelijkbaar met de sterkte van laserlassen. Vooral bij het laserlassen bestaat altijd het gevaar dat er scheuren optreden ten gevolge van te hoge afkoelsnelheden. Het laser-MIG/MAG hybride lassen kan dan gunstiger uitpakken doordat de af-

koeltijden langer zijn. Ook bij het lassen van hoge sterkte stalen zijn de mechanische eigenschappen bij het laser-MIG/MAG hybride lassen beter dan van gelijksoortige MAG gelaste verbindingen, doordat er minder warmte in het materiaal wordt ingebracht. Een voorbeeld hiervan wordt weergegeven in figuur 19, waar de relatie is weergegeven van het verloop van de hardheid over de las en warmte beïnvloede zone voor het MAG-, laser- en laser-MAG hybride lassen. Zoals te zien is in deze figuur geeft het laser-MAG hybride lassen een hardheidsprofiel dat overeenkomt met het MAG lassen, terwijl bij het laserlassen aanzienlijk hogere hardheden verkregen worden in de las met hierdoor een verhoogde kans op scheurvorming.



figuur 19 Verloop van de hardheid bij het MAG-, laser- en laser-MAG hybride lassen. Materiaal: hoge sterkte staal met een vloeigrens van 590 MPa [20]

4.2 Warmte-inbreng

Omdat bij het laser-MIG/MAG hybride lassen met een hogere voortloopsnelheid kan worden gelast dan met de laser alleen, zou hieruit de conclusie kunnen worden getrokken, dat de warmte-inbreng bij het laser-MIG/MAG hybride lassen altijd lager is dan bij het traditionele laserlassen. Dat deze zaak gecompliceerder is, heeft onderzoek van Dilthey [22] uitgewezen. In dit onderzoek is het laser-MIG/MAG hybride lassen vergeleken met het laserlassen met koude draadtoevoer voor het lassen van een 6 mm dikke ongelegeerde staalplaat. In tabel 2 zijn de resultaten vermeld.

tabel 2 Vergelijking van de warmte-inbreng bij verschillende lasprocessen voor het lassen van 6 mm staalplaat [7,22]

criterium	onder poeder	laser + koude draad ¹⁾	laser	MAG	laser/MAG = tandem arc
lassnelheid (m/min)	0,5	1,2	2,7	3	4
warmte-inbreng (kJ/cm)	15,8	3	1,33	3,42	2,58

1) "Koude draad" wil zeggen dat het toevoegmateriaal niet in het stroomcircuit is opgenomen

Het blijkt dat de warmte-inbreng bij het laserlassen met koude draadtoevoer 14% lager ligt dan bij het laser-MIG/MAG hybride lassen. Door eventueel gebruik te maken van het MAG lassen met twee lasdraden, wordt de ingebrachte warmte nog verder verlaagd; dit maakt het proces echter onnodig gecompliceerd. Het traditionele MAG lassen van 6 mm plaat wordt gemiddeld uitgevoerd met een warmte-inbreng van circa 1 kJ/mm.

Dit maakt dat het laser-MAG hybride lassen met een bijna 3 × zo lage warmte-inbreng werkt dan het tradi-

tionele MAG lassen. Uiteraard komt dit de kwaliteit (mechanische eigenschappen, vervormingen) van de gelaste verbindingen ten goede.

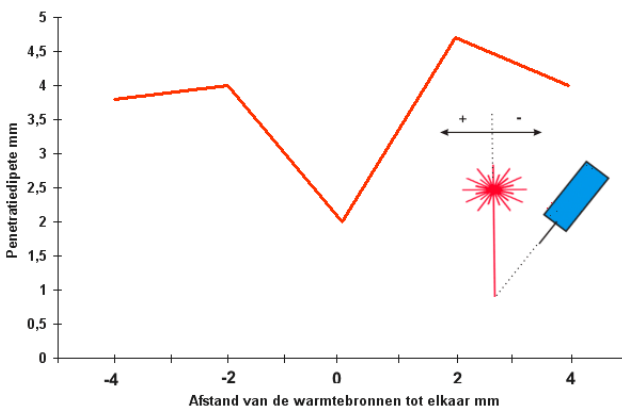
4.3 Beschermgassen

Plasma absorptie (kenmerkend voor het laserlassen bij hogere energiedichtheden) is over het algemeen geen groot probleem bij het laser-MIG/MAG hybride lassen. Hierdoor kan het beschermgas worden afgestemd op de primaire functie van het afschermen van het smeltbad en de stabiliteit van de boog. Bij het laser-MIG hybride lassen worden alleen inerte beschermgassen of beschermgasmengsels gebruikt, terwijl bij het laser-MAG hybride lassen actieve beschermgasmengsels worden gebruikt. Voor het toevoegen van actieve componenten gelden dezelfde regels als voor het traditionele MAG lassen. Ook bij het laser-MAG hybride lassen zullen actieve componenten (O_2 en CO_2) ervoor zorgen dat de oppervlaktespanning wordt verlaagd, waardoor de druppelafsplitting wordt bevorderd en de aanvloeiing van het smeltbad wordt verbeterd, terwijl de kans op spatten vermindert.

Voor het laser-MAG hybride lassen van hoge sterkte stalen zijn succesvolle resultaten gemeld, waarbij met drie componenten beschermgassen gewerkt wordt met helium als belangrijkste component ($He/Ar/CO_2$ en $He/CO_2/O_2$).[9].

4.4 Proces complexiteit

Zoals reeds eerder vermeld, moet bij de combinatie van het laser- en MIG/MAG lassen rekening worden gehouden met de procesparameters van beide processen. Verder wordt men door de combinatie van beide lasprocessen geconfronteerd met nieuwe procesinstellingen. Wat moet bijvoorbeeld de optimale hellingshoek van de MIG/MAG toorts zijn ten opzichte van de laserbundel? Met welk type MIG/MAG boog kan het beste worden gelast, een sproeihoog of een pulsboog? Wat is de optimale verhouding tussen het vermogen van de laser en het vermogen van het MIG/MAG-proces? In tabel 1 is al een opsomming gegeven van de verschillende lasparameters waarmee de gebruiker rekening moet houden. Echter ook aspecten die bij de afzonderlijke lasprocessen geen rol spelen kunnen belangrijk zijn als de lasprocessen gecombineerd worden gebruikt. Eén van die aspecten is bijvoorbeeld de positie waar de laserbundel in het smeltbad wordt ingevoerd in relatie tot de positie van de MIG/MAG boog. Figuur 20 laat schematisch zien dat deze afstand onder andere van invloed is op de penetratiediepte van de las.



figuur 20 Schematische weergave van de relatie tussen de inbrandingsdiepte en de positie van de laserbundel en MIG/MAG boog ten opzichte van elkaar (een positief getal betekent het voorlopen van de laserbundel op de MIG/MAG bron) [8]

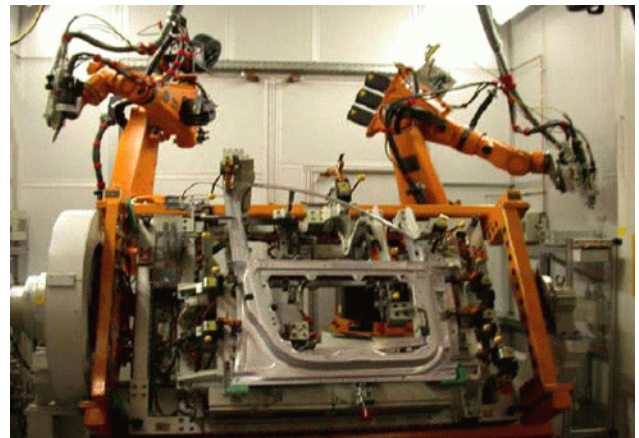
Ten aanzien van het instellen van de parameters van de afzonderlijke lasprocessen leveren fabrikanten van laser-MIG/MAG hybride apparatuur gelukkig geïntegreerde procesbesturingen waarmee de gebruiker zich niet meer druk hoeft te maken welke afzonderlijke lasparameters hij in moet stellen en vooral wat hun onderlinge relaties zijn.

5 Toepassingsvoorbeelden

Het laser-MIG/MAG hybride lassen heeft vele voordelen door de combinatie van de twee lasprocessen. De toepassingen worden in eerste instantie gevonden in kapitaalcrachtige industrieën, waar of de kwaliteit van de gelaste producten voorop staat, ofwel het accent ligt op het lassen van grote series producten met hoge productiesnelheden. Dit maakt dat de meeste gebruikers op dit moment worden gevonden in de automotive industrie en de scheepsbouw.

De verwachting is dat vooral de dunne plaat industrie van deze systemen gebruik zal gaan maken. Er moeten echter veel meters gelast worden om dit soort systemen rendabel in te kunnen zetten.

In figuur 21 is het lassen van een deurportier te zien met een laser gekoppeld aan een robot (rechts) en een laser-MIG/MAG hybride lastoorts (links) eveneens gekoppeld aan een robot. In dit product wordt het laser-MIG/MAG hybride lassen ingezet vanwege de verhoging van de lassnelheden en dus verkorten van de cyclustijden.



figuur 21 Lassen van een deurportier met een laser gekoppeld aan een robot (rechts) en een laser-MIG/MAG hybride lastoorts (links).
[<http://aluminium.matter.org.uk>]

In het tweede voorbeeld wordt het laser-MIG/MAG hybride lassen toegepast voor het lassen van sandwich constructies van hoge sterkte staal (zie figuur 22). In dit geval wordt het laser-MIG/MAG hybride lassen gebruikt om de vereiste sterkte en gewenste productiesnelheden te halen.

Bij de Meyer en Odense scheepswerven wordt het laser-MAG hybride lassen toegepast voor het lassen van plaatvelden en het lassen van verstijvers op deze plaatvelden. Het resultaat is te zien in figuur 23.

De Meyer werf geeft de volgende voordelen met betrekking tot het laser-MAG hybride lassen van plaatvelden en verstijvers ten opzichte van het traditionele MAG lassen:

- ▶ betere mechanische eigenschappen;
- ▶ hogere vermoeiingssterkte;
- ▶ verhoging van de taaiheid van de verbindingen;
- ▶ betere lasbaarheid van hoge sterkte staal;
- ▶ hogere productiviteit en lassnelheden;
- ▶ afname van het narichten en strekken van onderdelen.

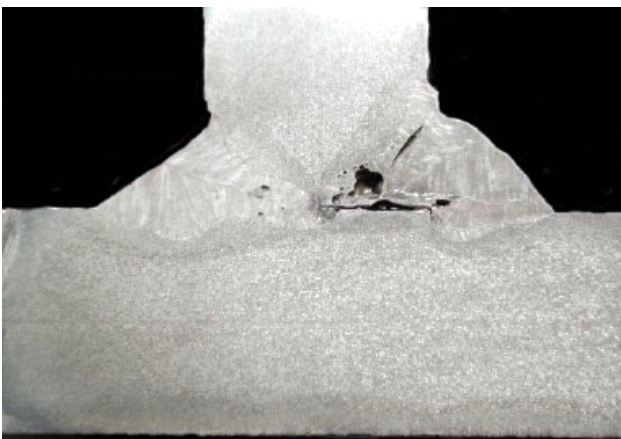


figuur 22 Laser MAG hybride lassen van een sandwich constructie van hoge sterkte staal



figuur 23 Lassen van plaatvelden en verstijvers op plaatvelden door middel van het laser-MAG hybride lassen [21]

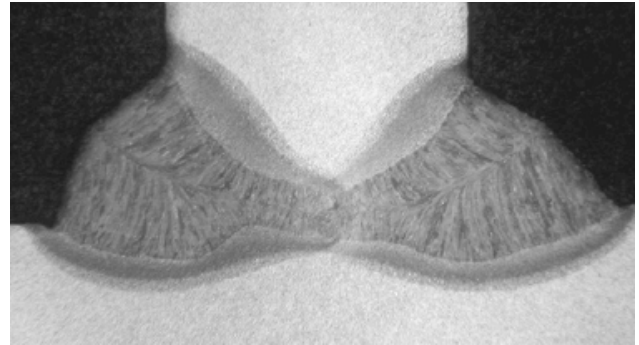
Een voorbeeld van de verbeterde kwaliteit van de verbinding wordt weergegeven in de figuren 24 en 25. Figuur 24 geeft het MAG lassen weer van een staande hoeklas, waarbij de plaatdelen voorzien waren van een primer. Figuur 25 laat dezelfde verbinding zien, maar nu gelast met het laser-MAG hybride proces. Bij het laser-MAG hybride lassen is de combinatie van de laserbundel en de MAG-boog duidelijk zichtbaar in staat de aanwezige primer adequaat te verwijderen (verdampen, verbranden), voordat deze aanleiding kan geven tot gasinsluitels. Het verschil in kwaliteit van de las spreekt voor zichzelf.



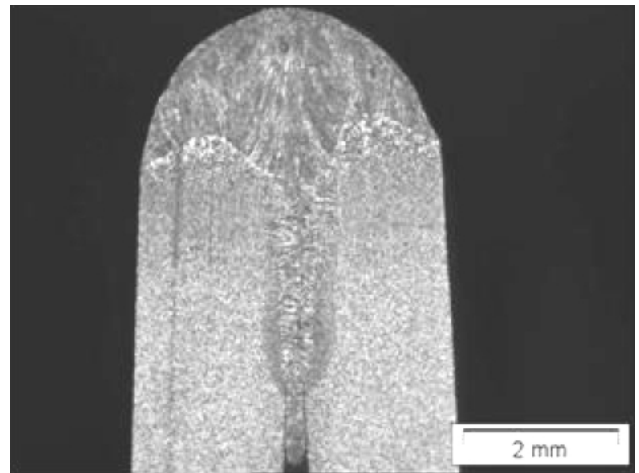
figuur 24 MAG lassen van een staande hoeklas waarbij de plaatdelen voorzien waren van een primer [6]

Een ander voorbeeld van de toepassing van het laser-MIG/MAG hybride lassen van dunne plaat is te zien in figuur 26. Het gaat hierbij om een randlas in 1,8 mm staal met als belangrijkste eis, dat de verbinding dicht moet zijn. In deze figuur is goed te zien dat de laser

voor de penetratie gebruikt wordt, terwijl de MAG las voor het opvullen van de lasnaad wordt gebruikt. Op deze manier wordt een verbinding verkregen die maximaal voldoet aan de gewenste eisen.



figuur 25 Laser-MAG hybride lassen van een staande hoeklas waarbij de plaatdelen voorzien waren van een primer [6]



figuur 26 Voorbeeld van de toepassing van het laser-MIG/MAG hybride lassen van een I-naad (randlas) in dunne plaat [5]

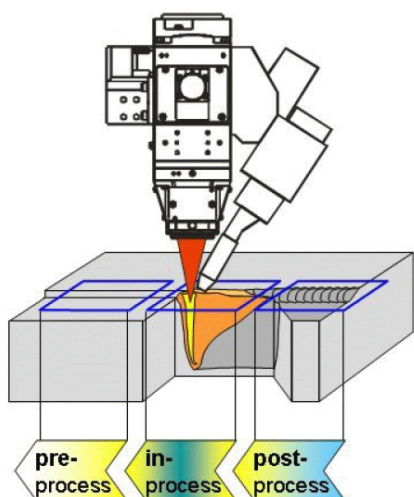
De inzet van het laser-MIG/MAG hybride lassen voor kleine series kan slechts dan slagen, indien men in staat is, de hybride lasconfiguratie modulair als onderdeel van de laser-lascel op te nemen, waarbij de omsteltijden van zowel configuratie van de laskop, opspanmal als manipulatorprogramma zeer klein gehouden moeten worden. Alles moet zodanig op elkaar worden afgestemd, dat de inschakelduur van de apparatuur wordt gemaximaliseerd, alleen dan is het mogelijk voor het lassen van kleine series producten dergelijke kapitaalsintensieve investeringen terug te verdienen.

Fabrikanten zitten echter niet stil en zullen proberen hun producten zo flexibel te maken dat uiteindelijk het lassen van kleine series producten met deze apparatuur tot de mogelijkheden gaat behoren.

6 Toekomstige ontwikkelingen

De ontwikkeling van het laser hybride lassen zal vooral gericht zijn op een verdere beheersing van het proces en een verhoging van de efficiency. Een verdere beheersing van het proces zal ertoe leiden dat de kwaliteit, reproduceerbaarheid en dus voorspelbaarheid van de verbindingen toe zal nemen.

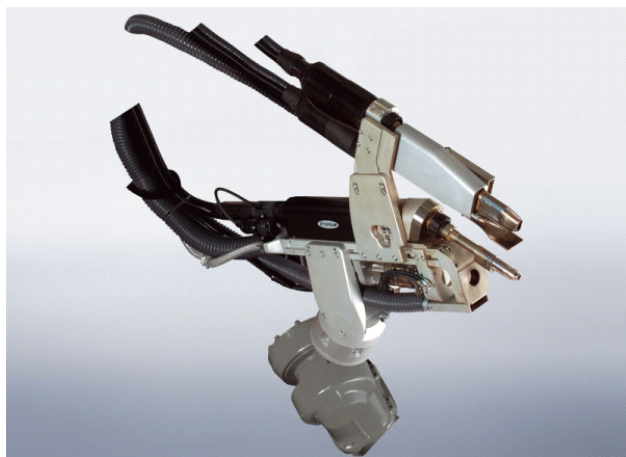
Ontwikkelingen in deze richting zijn te zien bij Cloos, waar sensortechnieken geometrische en procesparameters (zie figuur 27).



figuur 27 Proces- en kwaliteitscontrole met behulp van sensoren bij het laser-MIG/MAG hybride lassen [5]

In het "pre-process" deel wordt de aandacht besteed aan het lasnaadvolgen en de lasnaad geometrie (voorbewerking/afwijkingen/vorm), het "in-process" deel geeft informatie betreffende bijvoorbeeld de temperatuur, de plasmavorming, de inkoppeling van de laserbundel, het laservermogen en de procesparameters van het MIG/MAG lassen. Tenslotte wordt in het "post-process" deel aandacht besteed aan de inspectie van de gemaakte las, waarbij informatie wordt verkregen ten aanzien van de vorm van de las, de aanvloeiing en de aanwezigheid van visuele lasfouten.

Het verhogen van de efficiency wordt mogelijk gemaakt door het MIG/MAG lassen niet met één lasdraad, maar met twee lasdraden uit te voeren (tandem-arc of twin-arc). Hierdoor kunnen aanzienlijk hogere las- en neersmeltsnelheden worden bereikt. Figuur 28 geeft een voorbeeld van een laskop die hiervoor is ontwikkeld.



figuur 28 Laser-MIG/MAG hybride + tandem-arc laskop (Fronius)

7 Normen

De lijst van Nederlandse normen op het gebied van het (laser)lassen is inmiddels zodanig van omvang dat het ondoenlijk is deze allemaal te noemen. Hier wordt slechts volstaan met het noemen van een aantal algemene normen die betrekking hebben op het (laser)lassen en die ook relevant zijn voor de inhoud van deze publicatie.

Meer gedetailleerde bibliografische informatie is te vinden op www.nen.nl onder: Normshop.

Woordenlijst E/F/D

Termen en definities lassen

NEN-EN 1792:2003; NEN-EN 1792:1997; NPR-CR 14599; NEN 2064.

Lasprocessen

Definities

EN ISO 17659; NEN-EN 12345 (nl).

Nummering lasprocessen

EN 14610; NEN-ISO 857-1; NEN-EN-ISO 4063 (nl); NEN-ISO 4063 (nl).

Lasposities

Definities

NEN-EN-ISO 6947 (nl)

Vergelijking van Europese. en Amerikaanse lasposities

CEN/TR 14633 DTR

Laserlasnormen

Deel 6 van de Europese standaard NEN-EN 1011 geeft een overzicht en richtlijnen voor de productie van goede laserlassen, alsook een overzicht van mogelijke (las)problemen en hoe die te voorkomen. De nadruk ligt op het lassen van metalen, maar ook niet-metalen worden behandeld. In de NEN-EN-ISO 15609 norm zijn vergelijkbare procedures vastgelegd. De definitie van de kwaliteit van laserlassen (in staal en aluminium) is vastgelegd in de NEN-EN-ISO 13919 norm. Hierbij worden kwaliteitsniveaus gedefinieerd op basis van het aantal scheuren, poreusheid en een aantal geometrische defecten, waaronder ondersnijding. Afnametests voor twee-dimensionale CO₂ lasersnij- en lasinstallaties zijn vastgelegd in de NEN-EN-ISO 15616 norm. In de voorlichtingspublicatie VM121 'Hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen' wordt nader ingegaan op de mogelijkheden en beperkingen van lasers, inclusief tabellen en figuren met procesinstellingen.

Verder zijn de volgende normen relevant voor het laserlassen:

NEN-EN-ISO 15609-4:2004 en

Beschrijven en goedkeuren van lasmethoden voor metalen - Lasmethodebeschrijving - Deel 4: Laserlassen.

NEN-EN-ISO 15613:2004 nl

Beschrijven en goedkeuren van lasmethoden voor metalen - Goedkeuring op basis van een lasproef voor aanvang van de productie Lassen - Elektronenbundellas- en laserlasverbindingen - Richtlijn voor het vaststellen van kwaliteitsniveaus voor onvolkomenheden - Deel 2: Aluminium en zijn lasbare legeringen.

NEN-EN-ISO 5817:2003 nl

Lassen - Smeltlasverbindingen in staal, nikkel, titanium en hun legeringen (laserlassen en elektronenbundellasen uitgezonderd) - Kwaliteitsniveaus voor onvolkomenheden.

NEN-EN-ISO 15616-3:2003 en

Afnamebeproevingen voor CO₂-laserbundelmachines voor lassen en snijden - Deel 3: Kalibratie van instrumenten voor meting van de gasstroom en -druk.

NEN-EN-ISO 15616-2:2003 en

Afnamebeproevingen voor CO₂-laserbundelmachines voor lassen en snijden - Deel 2: Meting van de statische en dynamische nauwkeurigheid.

NEN-EN-ISO 15616-1:2003 en

Afnamebeproevingen voor CO₂-laserbundelmachines voor lassen en snijden - Deel 1: Algemene principes, afnamevoorwaarden.

NEN-EN-ISO 15614-11:2002 en

Beschrijven en goedkeuren van lasmethoden voor metalen - Lasmethodebeproeving - Deel 11: Elektronenbundel- en laserlassen.

NEN-EN-ISO 13919-2:2001 en

Lassen - Elektronenbundellas- en laserlasverbindingen - Richtlijn voor het vaststellen van kwaliteitsniveaus voor onvolkomenheden - Deel 2: Aluminium en zijn lasbare legeringen.

NEN-EN-ISO 13919-1:1997 en

Lassen - Elektronenbundellas- en laserlasverbindingen - Richtlijn voor het vaststellen van kwaliteitsniveaus voor onvolkomenheden - Deel 1: Staal.

NEN-EN-ISO 5817:2003/C1:2006 en;fr;de

Lassen - Smeltlasverbindingen in staal, nikkel, titanium en hun legeringen (laserlassen en elektronenbundellassen uitgezonderd) - Kwaliteitsniveaus voor onvolkomenheden.

NEN-EN 1011-6:2006 en

Lassen - Aanbevelingen voor het lassen van metalen - Deel 6: Laserlassen.

NEN-EN-ISO 22827-1:2005 en

Afnamebeproevingen voor Nd:YAG-laserbundelmachines voor lassen - Machines met optische draadaanvoer - Deel 1: Lasersamenstelling.

NEN-EN-ISO 22827-2:2005 en

Afnamebeproevingen voor Nd:YAG-laserlas machines - Machines met optische draadaanvoer - Deel 2: Bewegingsmechanisme.

8 Literatuur

- [1] T. Graf en H. Stauffer, Laser hybrid process at Volkswagen, IIW Doc. XII-1730-02.
- [2] F. Roland, T. Reinert en G. Pethan, Laser welding in shipbuilding - an overview of the activities at Meyer Werf, IIW Internat. Conf. Advanced processes and technologies in welding and allied processes, 2002 Kopenhagen.
- [3] K. Minami, S. Asai, Y. Makinl, K. Shiihara en T. Kanehara, Laser-MIG hybrid welding process for stainless steel vessels. IIW Doc. XII-1704-02.
- [4] D.L. Downs en S.J. Mulligan, Hybrid CO₂ laser/MAG welding of carbon steel, 2002, TWI Internet Report.
- [5] MSG - Laser - Hybridschweissen. Pt presentatie van Cloos Schweisstechniek.
- [6] Aup Denney Dennis Harwig Larry Brown Edison. 2001 Ship production Symposium and Expo. Powerpoint presentatie. June 14-15 2001, Michigan. Edison Welding Institute
- [7] T. Luijendijk. Lastechniek jaargang 69 juli/augustus 2003, TU Delft, blz. 11 t/m18.
- [8] Claus Bagger and Flemming O. Olson. Review of laser hybrid welding. Journal of laser applications volume 17 number. 1 February 2005; p 2 to 14.
- [9] Hans Engström et all. Laser Hybrid welding of High Strength Steels. Prgs 8th Nordic Conference on Laser Material Processing Copenhagen 2001 Aug 13-15.
- [10] A. Mahrle. E. Beyer. Hybrid Laser beam welding. Classification, characteristics, and applications. Journal of laser applications Volume 18, number 3, august 2006, page 169 to 180.
- [11] Y.Yao, M. Wouters J. Powel et all. Influence of joint geometry and fit-up on hybrid laser-metal active gas (MAG) welding. I. Journal of laser applications. Volume 18, number 4, November 2006, page 283 to 288
- [12] T.Graf and H.Stauffer. Laser hybrid welding. Welding. Journal. January 2003, page 42 to 48.
- [13] H. Stauffer, M. Rühnössl. Für grosse Blechdicken und hohe Schweissgeschwindigkeiten: Laserhybrid- + Tandemschweissen. Der Parktiker 10 2006, p 300 tot 302.
- [14] Moriaki Ono et all. Development of laser-arc Hybrid Welding. NKK Technical Review no 86 2002 p 8 to 12.
- [15] Dr.-Ing Jianchun Ji; Dipl.-Ing Ulf Jasnau, Prof.Dr.-Ing. Habil. Peter Seyffarth, Rostock Nahtgeometrie beim Nd:YAG-laserstrahl-MSG-Hybridschweissen von aluminiumlegierungen. Schweissen und Schneiden, 3-007. p 130 - 137.
- [16] U. Jasnau, J. Hoffmann und P. Seyffarth, Rostock Nd:YAG-Laser-MSG-Hybridschweissen von Aluminiumlegierungen im Schiffbau. Veröffentlicht im DVS-Berichte Band 225 (ISBN 3-87155-683-1).
- [17] "Schweißen und Schneiden 2003"; Vorträge der gleichnamigen Großen Schweißtechnischen Tagung In Berlin vom 17. bis 19. September 2003.
- [18] A. Jahn, B. Winderlich, A. Zwick, R. Imhoff, B. Brenner, Dresden und S. Trümper, Laserstrahl-Hybridschweißen schwingend belasteter Bauteile aus dem hochfesten Feinkornbaustahl S1100QL. Schweißtechnische Fachtagung, SLV Halle, 2002.
- [19] Dipl.-Ing. André Sumpf, Dipl.-Ing. Ulf Jasnau, Prof. Dr.-Ing. Habil. Peter Seyffarth; Rostock Laser-MSG-Hybridschweissen mit einem Schweißtraktor Erfahrungen und Ergebnisse4. Kolloquium Laserstrahlhandbearbeitung, Halle, 24.11.2004; Beitrag der SLV M-V.
- [20] LIU Zhongjie, KUTSUNA Muneharu and Sun Lian CO2 Laser-MAG Hybrid welding of 590 MPa High Strength Steel. Study on laser-Arc hybrid welding of high strength steel (Report 1) 2006. page 17-25.
- [21] Ralf Moeller. Laser and cutting & welding at European shipyards. ShipTech 2004. Powerpoint presentation.
- [22] U. Dilthey, Laser arc hybrid welding an overview, IIW Dopc-XII-1720-02.
- [23] Dipl.-ing Karen Stelling; Dipl.-Ing Thomas Michael, Dipl.-Phys.Helmut Schobbert. Erstarrungsverhalten und Schweißseignung austenitische Stähle beim Laserstrahl- un Hybridschweissen.

9 Websites

Op de volgende websites is meer informatie te vinden met betrekking tot het (laser)lassen dan wel het laser hybride lassen.

www.dunneplaat-online.nl
www.verbinden-online.nl
www.ewf.be
www.iiw-iis.org
www.fme.nl
www.fdp.nl
www.tno.nl
www.nimr.nl
www.nil.nl
www.utwente.nl
www.tudelft.nl
www.syntens.nl
www.awl.nl
www.hollandia.s3c.nl
www.las-online.nl
www.demarlaser.nl
www.plaatbewerker.nl
www.ewf.be
www.iiw-iis.org
<http://info.tuwien.ac.at/ift/leonardo/ela.html>
www.lac-online.nl
www.mikrocentrum.nl
<http://www.moller-metaal.nl>
www.trumpf-laser.com
www.rofin.com
www.ipgphotonics.com/
www.laserline.de
www.alphatron.nl
www.fronius.com
www.cloos.nl
www.highyag.de
www.precitech.com
www.meyerwerft.de
www.oss.dk/
www.schulergroup.com
www.saf-airliquide.com
www.valkwelding.com
www.rolan-robotics.nl
www.nen.nl

Auteur

Deze voorlichtingspublicatie is opgesteld in opdracht van de Vereniging FME-CWM in het kader van het project 'Fabricage van producten met geavanceerde productie-middelen voor het omvormen en verbinden - (FPGP)'. Hierbij waren de volgende organisaties betrokken: SenterNovem, FDP, NIL, NIMR, Syntens, TNO, Universiteit Twente en de Vereniging FME-CWM/Industrieel Technologie Centrum (ITC).

De auteurs, J. Olde Benneker (NIMR) en A. Gales (TNO) werden ondersteund door een begeleidingsgroep bestaande uit: R.G.K.M. Aarts (Universiteit Twente), H.J.M. Bodt (NIL), P. de Boer (Cloos Nederland B.V.), M.J.M. Hermans (TU Delft), H.J.M. Raaijmakers (FDP), J. van de Put (Syntens), C. Kriebel (Interlas B.V.), P.F. Senster (TNO Industrie en Techniek), T. Luijendijk, G.H.G. Vaessen (GVA) en P. Boers (FME).

Technische informatie:

Voor technisch inhoudelijke informatie over de in deze voorlichtingspublicatie behandelde onderwerpen kunt u zich richten tot de auteurs J. Olde Benneker (tel.: 053-4892432, e-mail: j.oldebenneker@nimr.nl), A. Gales (tel.: 040-2650247, e-mail: anton.gales@tno.nl) en:

Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL)

Bezoekadres: Boerhaavelaan 40,
2713 HX Zoetermeer
Correspondentie-adres: Postbus 190,
2700 AD Zoetermeer
Telefoon: 088 - 400 85 60
Fax: 079 - 353 11 78
E-mail: info@nil.nl
Internet: 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,
2713 HX Zoetermeer
Correspondentie-adres: Postbus 190,
2700 AD Zoetermeer
Telefoon: (079) 353 11 00/353 13 41
Fax: (079) 353 13 65
E-mail: info@fme.nl
Internet: www.fme.nl

© Vereniging FME-CWM/november 2007 - 01

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd 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 en Innovatie
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon 079 - 353 11 00/353 13 41
telefax 079 - 353 13 65
e-mail: info@fme.nl
internet: www.fme.nl



Netherlands Institute
for Metals Research



SenterNovem



Universiteit Twente
de ondernemende
universiteit



Federatie
dunne plaat

