

Lassen van metalen met hoogvermogen lasers

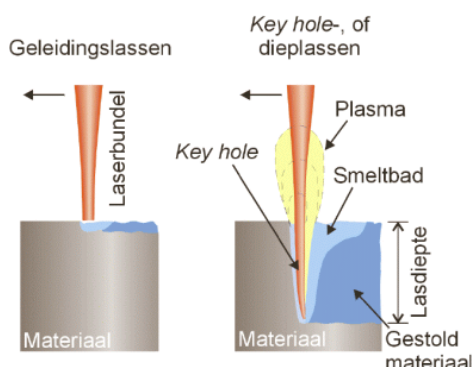
Het lassen van metalen componenten met behulp van een hoogvermogen laser biedt vele voordelen ten opzichte van conventionele lastechnieken. Zo is de lassnelheid hoger en is de warmtebeïnvloede zone in het materiaal kleiner, waardoor er minder vervorming van het product optreedt. In de voorlichtingspublicatie VM 121 "Hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen" [1] worden verschillende (theoretische) onderwerpen die een rol spelen bij het bewerken (snijden, lassen, oppervlaktebewerkingen, enz.) van metalen gedetailleerd(er) behandeld. Deze praktijk-aanbeveling wil met name inzicht geven in de praktische aspecten die bij het gebruik van een hoogvermogen laser voor het lassen aan de orde komen.

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Laserbronnen voor laserlassen	1
2.1	Opbouw van een laserbron	1
2.2	Eigenschappen van laserstraling en laserbundels	2
2.3	Machine-aspecten	3
3	Lasprincipes en -methoden	5
4	Parameterinvloeden	6
4.1	Laservermogen en lassnelheid	6
4.2	Focuspositie	7
4.3	Lasnaadvormen	7
4.4	Beschermgassen	8
4.5	Materiaaleigenschappen	9
5	Testen en beproeven van de laskwaliteit	9
6	Overige componenten van een laserlasinstallatie	10
6.1	Opspangereedschap (lasmal)	10
6.2	Naadvolgsensor	10
7	Praktijkvoorbeelden	10
7.1	Laserlassen van een achterlichtdrager	10
7.2	Lassen van een paneel met een diodelaser	12
7.3	Laskop met draadtoevoer	13
8	Veiligheid	13
9	Economische aspecten	13
10	Probleemoplosser	14
10.1	Lasdefecten bij voldoende laspenetratie	14
10.2	Lasdefecten bij onvoldoende laspenetratie	14
10.2.1	Onvoldoende laspenetratie over de gehele lengte van de las	15
10.2.2	Incidenteel gebrek of onvoldoende laspenetratie	15
11	Literatuur en normen	15
12	Referenties en bronvermelding	16

1 Inleiding

Laserlassen is een verbindingstechniek, waarbij met behulp van een laserbundel de te verbinden onderdelen tot smelten worden gebracht (zie figuur 1.1). Een sterke verbinding, die in het algemeen geen nabewerking vereist, is het gevolg.



figuur 1.1 Laserlassen; geleidingslassen (links) en keyhole of dieplassen (rechts)

In vergelijking met conventionele lastechnieken (TIG/MIG, puntlassen) voor plaat en pijp is het lassen met een hoogvermogen laser snel (tot wel 30 m/min) en nauwkeurig. Bovendien vertoont laserlassen een geringe warmtebeïnvloede zone in het materiaal (minder dan 0,5 mm). Dit laatste heeft als voordeel dat er minder vervorming van het product optreedt. In het algemeen behoeft een laserlas geen nabewerking (slijpen, polijsten).

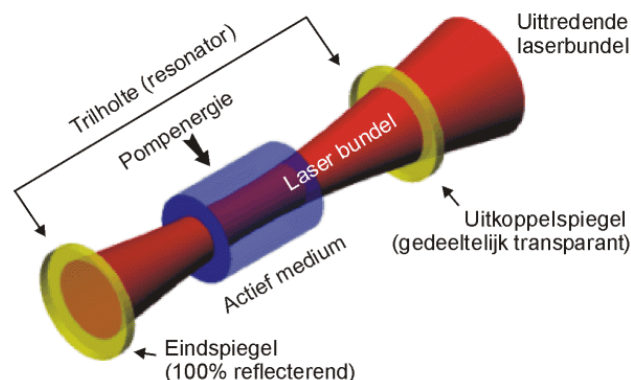
Bovendien is laserlassen flexibel in termen van materiaalkeuze, productgeometrie en automatisering. Nadelen van het lassen met een laser zijn de lage (product)toleranties (circa 0,2 mm en minder) en dus hogere eisen aan de productdelen en de productopspanning (lasmalen). De relatief hoge investering in een laserlasinstallatie kan echter in veel gevallen snel worden terugverdiend i.v.m. de hoge lassnelheden.

2 Laserbronnen voor laserlassen

2.1 Opbouw van een laserbron

Het woord LASER is een acroniem voor *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ofwel lichtversterking door gestimuleerde emissie van straling. Een laserbron waarin de laserstraling wordt opgewekt (zie figuur 2.1) bestaat uit:

- ▶ een trilholt (of resonator) die is opgebouwd uit spiegels, met daartussen
- ▶ een actief medium (CO₂-gas bij een CO₂-laser, een kristal bij een Nd:YAG- of fiberlaser en halfgeleidermateriaal bij een diodelaser) en
- ▶ een energiebron, die energie in het medium 'pompt'.



figuur 2.1 Principeopbouw van een laserbron

Bij de CO₂-laser en de diodelaser wordt de energie elektrisch in het actieve medium 'gepompt'. Bij de Nd:YAG-laser gebeurt dit 'pompen' d.m.v. licht van flitslampen (lampen-gepompte Nd:YAG-staaf- of schijf-laser). De toegevoerde energie wordt in de trilholt omgezet in 'laserlicht', waarvan een klein deel door één van de spiegels (uitkoppelspiegel) wordt doorgelaten (zie figuur 2.1). Dit afgetapte licht is de laserbundel waarmee materialen kunnen worden gelast. Het licht van de laserbundel heeft één of meerdere concrete golflengtes (zie ook tabel 2.1). De mate waarin laserlicht wordt geabsorbeerd door materialen, hangt af van deze golflengte en de optische eigenschappen van het materiaal (zie § 2.2). De keuze voor een bepaald type laserbron hangt dan ook met deze absorptie samen. Van de totale hoeveelheid toegevoerde (pomp)energie wordt wel 65 tot 97% omgezet in (verlies)warmte (zie tabel 2.1). Afhankelijk van de constructie van de laser en het pompmechanisme en de mogelijkheden van de aansturing van de laserbron, kan de toevoer van laserenergie aan het

te bewerken materiaal, gepulseerd of continue plaatsvinden. Continue werkende lasers worden cw-lasers (cw = *continuous wave*) genoemd. Bij laserlassen maakt men gebruik van zowel gepulste als cw-lasers (zie hoofdstuk 3). Tabel 2.1 geeft een overzicht van de belangrijkste eigenschappen van de lasertypen die geschikt zijn voor het laserlassen.

tabel 2.1 Overzicht eigenschappen laserbronnen die geschikt zijn voor laserlassen

laser-type	golflengte	energetisch rendement [%]	vermogen [kW]
CO ₂	10,6 [μm]	10 tot 15	> 20
Diode			
► direct	780-1100 nm	30 tot 50	< 10
► fiber	780-1100 nm	30 tot 50	< 8
Nd:YAG			
► staaf	1,06 [μm]	3 tot 10	4-4,5
► disc	1,06 [μm]	20 tot 25	8
Fiber	1,07-1,08 [μm]	30	< 20

Gezien de hoge beschikbare vermogens (meer dan 20 kW) worden CO₂-lasers veel toegepast voor het lassen van relatief dikke (2 tot 20 mm) metalen. De bundelkwaliteit (zie § 2.2) van een diode-gepompte Nd:YAG-laser (staaf) is beter dan die van een lampen-gepompte Nd:YAG-laser (staaf). Bovendien hebben diodes een langere standtijd (circa 10.000 uur) dan lampen (circa 1000 uur).

De disc-laser is een diodegepompte YAG laser, waarbij het actieve lasermedium uit een platte schijf bestaat. De disc-laser heeft in vergelijking met een staafvormige Nd:YAG laser een sterk verbeterde bundelkwaliteit. Hiermee kan een kleiner focus worden verkregen. Ook de fiberlaser is een diodegepompte laser, die onder de familie van vaste-stof lasers valt. Qua opbouw is de fiberlaser een verdere ontwikkeling op basis van een Nd:YAG laser. Het principe achter de fiberlaser is een fiber bestaande uit kern en een buitenmantel ('dual core fiber'). De kern is gedoopt met Ytterbium (Yb) ionen en kan als actief lasermedium worden gezien. De buitenmantel zorgt ervoor dat de toegevoerde pompenergie van de diode-array ingevangen en efficiënt geleid wordt, zodat de Yb-ionen optimaal worden aangeslagen.

Zowel de disc-laser alsook de fiberlaser bezitten een kleine focus waarmee bij dunne metalen hogere lassnelheden worden verkregen. De kleinere focus zorgt verder voor hogere intensiteiten bij het lassen waardoor met lagere vermogens de lasbewerking kan plaatsvinden. Voor dikkere metalen kan de verbeterde bundelkwaliteit worden omgezet in een grotere werkafstand tussen laskop en werkstuk (verbetering bereikbaarheid!) en een vergroting van de scherpte-diepte. Dit maakt de weg vrij voor de toepassing van 'remote-welding' technieken, waarbij de laserbundel middels een scankop zeer snel over het werkstuk gemanipuleerd kan worden (zie figuur remote lassen).

Diodes zijn echter duurder dan lampen. De voordelen van Nd:YAG-lasers t.o.v. CO₂-lasers zijn o.a. dat het Nd:YAG-laserlicht door een glasfiber kan worden getransporteerd (zie § 2.3), en dat het beter wordt geabsorbeerd door metalen (zie § 2.2).

Door de opbouw van de diodelaser is de laserbundel niet rond, maar rechthoekig en vertoont een grote divergentie (zie ook figuur 2.2). Dit betekent dus een lage bundelkwaliteit in vergelijking met de CO₂-laser en de Nd:YAG-laser. De voordelen van de diodelaser t.o.v. de CO₂- en Nd:YAG-laser zijn het hoge energetische rendement van circa 35%, het lage gewicht (circa 10 kg) en de kleine afmetingen (ter grootte van een schoenendoos). De relatief grote focusafmetingen en grote divergentie maakt dat de diodelaser met name geschikt is voor het gele-

dingslassen (hoofdstuk 3) van metalen tot een dikte van circa 5 mm. Tegenwoordig kan diodelaserlicht ook in een glasfiber worden gekoppeld.

2.2 Eigenschappen van laserstraling en laserbundels

Een laserbron is niets anders dan een lichtbron, maar wel één met een aantal bijzondere eigenschappen, waarmee het zich onderscheidt van 'normale' lichtbronnen. Eigenschappen, waarvan voor het lassen in het bijzonder gebruik wordt gemaakt, zijn de geringe bundeldivergentie en de hoge vermogensdichtheid.

Vermogensdichtheid

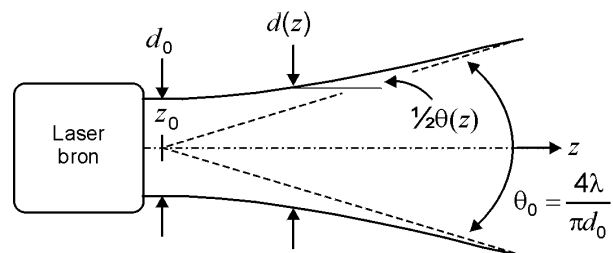
De vermogensdichtheid I [W/m²] is het laservermogen P [W] per oppervlak O [m²] van de bundeldoorsnede. Als d [m] de diameter is van de laserbundel, dan is de vermogensdichtheid gelijk aan:

$$I = \frac{P}{O} = \frac{4P}{\pi d^2} [\text{W/m}^2] \quad (2.1)$$

Met een laserbundel kunnen vermogensdichtheden tot circa 10²⁰ W/m² worden bereikt. Ter vergelijking, met autogeen lassen wordt circa 10⁷ W/m² bereikt en met een elektrische lasboog circa 10⁸ W/m². Het voordeel van de hoge vermogensdichtheid van de laser is, dat hoge lassnelheden kunnen worden bereikt. Daarnaast kan een relatief diepe en tegelijkertijd smalle las worden gerealiseerd met een zeer geringe thermische vervorming van het product.

Geringe bundeldivergentie

Vaak wordt gedacht dat een nog niet gefocuseerde laserbundel perfect evenwijdig is. Dit is echter niet het geval. Dat wil zeggen, de diameter d [m] van de laserbundel varieert langs de optische as (zie figuur 2.2).

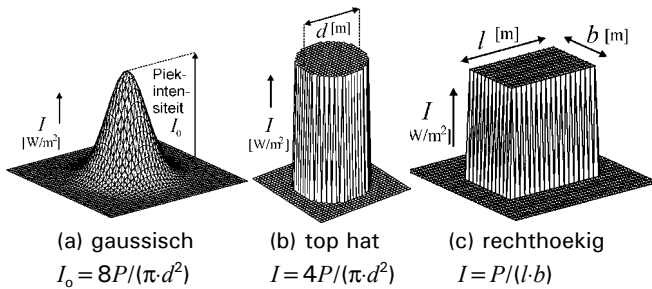


figuur 2.2 Verloop van de bundeldiameter d langs de z -as (optische as), voor een laserbundel met een gaussische energieverdeling (zie ook figuur 2.3)

De kleinste insnoering van de bundel d_0 [m], wordt *waist* (taille) genoemd. Vanaf de waist neemt de bundeldiameter toe. De divergentiehoek $\theta(z)$ [rad] bereikt op grote afstand van de waist de asymptotische waarde θ_0 [rad]. De divergentiehoek hangt af van de golflengte λ [m] van het laserlicht en de waist-diameter d_0 (zie figuur 2.2). In vergelijking met 'normale' lichtbronnen is de divergentie van een laserbron klein. Dit maakt het mogelijk om de laserenergie over grote afstanden te transporteren, zonder dat de vermogensdichtheid I [W/m²] afneemt. Tevens maakt dit het mogelijk om de bundel tot een kleine spot te focuseren.

Energieverdeling

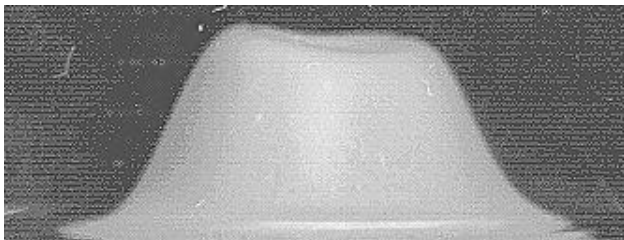
De energieverdeling (intensiteitsverdeling) van de laserstraling over de doorsnede van de bundel, wordt bepaald door de constructie van de resonator en de gebruikte optische componenten om de laserbundel te transporteren en te focuseren (zie ook de figuren 2.6 en 2.7). Figuur 2.3 toont een aantal veel voorkomende energieverdelingen van lasers die worden ingezet voor het laserlassen.



figuur 2.3 Veel voorkomende energieverdelingen (intensiteitsverdelingen) van laserbundels

De gaussische intensiteitsverdeling (zie figuur 2.3a) komt veel voor bij CO₂-lasers. De maximale intensiteit (piek-intensiteit) van deze energieverdeling treedt op in het centrum van de laserbundel. Diens diameter d [m] is gedefinieerd als die diameter waarbinnen 86% van het totale vermogen valt. De *top hat* (hoge hoed) intensiteitsverdeling (zie figuur 2.3b) ontstaat als het licht van een Nd:YAG-, fiber- of diodelaser door een glasfiber wordt getransporteerd (zie ook figuur 2.7). De diodelaser, zonder fiberkoppeling, heeft een rechthoekige intensiteitsverdeling (zie figuur 2.3c).

De intensiteitsverdeling van een CO₂-laserbundel kan zichtbaar worden gemaakt door gedurende korte tijd (circa 0,1 s) de laserbundel te laten 'inbranden' op perspex (zie figuur 2.4). Dit wordt een *mode burn* genoemd.



figuur 2.4 Een 'inbranding' van een CO₂-laser in perspex maakt diens energieverdeling zichtbaar

Met deze methode kan op een goedkope en snelle wijze de diameter en de vorm van de intensiteitsverdeling worden gemeten. Deze diameter en vorm hebben een grote invloed op de laskwaliteit. De methode is echter niet geschikt voor detailanalyse. Daarvoor is het beter om een zogenaamd bundelanalyse apparaat te gebruiken [1].

Bundelkwaliteit

Een laserbundel (en dus ook de laserbron) kan worden gekarakteriseerd met het kwaliteitsgetal M^2 :

$$M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} d_0 \cdot \theta_0 \quad (2.2)$$

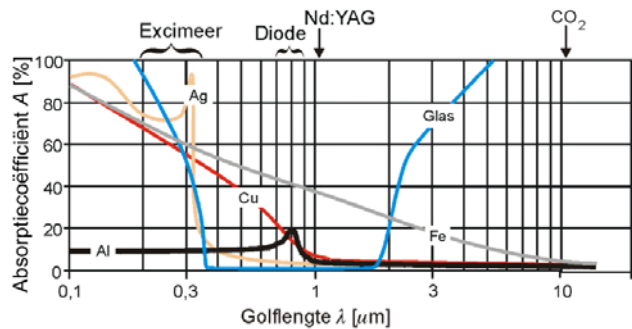
met d_0 de kleinste insnoering van de bundel en θ_0 de asymptotische waarde van de divergentiehoek (zie figuur 2.2). Voor de gaussische intensiteitsverdeling (zie figuur 2.3a) is $M^2 = 1$, voor alle andere energieverdelingen is $M^2 > 1$. Een bundelkwaliteit van ongeveer 1 is gunstig voor het laserlassen, omdat in dat geval:

- ▶ de laserbundel tot een (zeer) kleine spot kan worden gefocuseerd (zie ook figuur 2.8). Dit heeft als voordeel dat er op een hoge snelheid kan worden gelast, of met een laag laservermogen;
- ▶ de warmte-inbreng laag is (minder thermische vervormingen van het product);
- ▶ (focusseer)optiek (lenzen, spiegels) met kleine diameter kan worden ingezet;
- ▶ de werkafstand tussen focusseerlens/spiegel en het product groot is (zie ook figuur 2.9), wat gunstig is voor de bereikbaarheid van het product en veilig voor de optiek i.v.m. spatten.

Let op: Sommige leveranciers van laserbronnen specificeren i.p.v. het kwaliteitsgetal M^2 , diens reciproque $1/M^2$, of enkel het *bundelproduct*: $d_0 \cdot \theta_0$.

Absorptie van laserstraling

Bij het gebruik van lasers voor het lassen gaat het erom zo veel mogelijk laserenergie in het materiaal te krijgen, waar het wordt omgezet in warmte. Voor metalen vindt deze omzetting plaats in een dunne laag (circa 300 nm dik) aan het oppervlak. Echter, slechts een klein percentage (absorptiecoëfficiënt A) van de op het oppervlak vallende laserstraling wordt door het materiaal geabsorbeerd, de rest wordt gereflecteerd. De absorptiecoëfficiënt van een materiaal hangt o.a. af van de optische eigenschappen van het materiaal (zie figuur 2.5).



figuur 2.5 Absorptiecoëfficiënt A [%] als functie van de golflengte van laserstraling voor aluminium (Al), goud (Ag), koper (Cu), glas en ijzer (Fe)

Hoe hoger de absorptiecoëfficiënt voor een metaal/golflengte combinatie, des te beter het materiaal kan worden bewerkt. Voor metalen neemt de absorptiecoëfficiënt af met toenemende golflengte van het laserlicht. Zo is voor ijzer de absorptiecoëfficiënt van CO₂-laserstraling minder dan 20% en van Nd:YAG-laserstraling bijna 40%. Deze relatief hoge absorptiecoëfficiënt is één van de redenen waarom Nd:YAG-lasers in toenemende mate worden ingezet voor het lassen van metalen.

Nadat de laserenergie is getransformeerd in warmte in de oppervlaktelaag, vloeit de warmte door geleiding naar onderliggende lagen. De temperatuur zal hierdoor lokaal stijgen tot boven de smelttemperatuur en bij *keyhole* lassen tot boven de verdampingstemperatuur.

2.3 Machine-aspecten

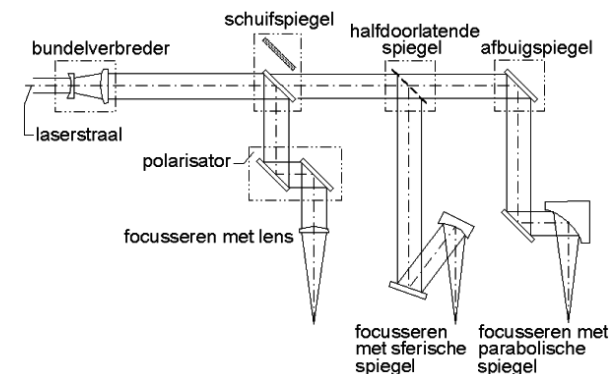
Behalve de eigenschappen van de laserbron en de laserstraling, bepalen ook de andere componenten van de laserlasinstallatie het resultaat van het laserlassen.

Bundeltransport d.m.v. spiegels en glasfibers

Nadat de laserbundel is uitgetreden uit de laserbron, moet deze worden getransporteerd naar de focusseer-optiek die zich op de bewerkingsplaats bevindt.

Bij de CO₂-laser wordt het laserlicht via (afbuig)spiegels van de laserbron naar de bewerkingsplaats getransporteerd (zie figuur 2.6).

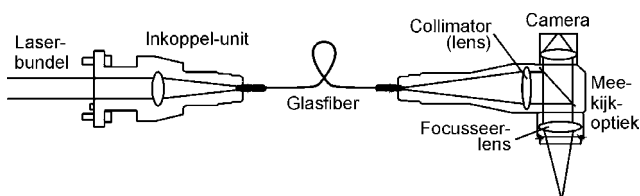
Met een schuifspiegel of een gedeeltelijk doorlatende spiegel kan de laserbundel naar afzonderlijke bewerkingsplaatsen worden geleid, zodat één laserbundel op verschillende werkstations kan worden ingezet. Spiegels voor CO₂-lasers zijn meestal van koper gemaakt en voorzien van waterkoeling. Per spiegel moet rekening worden gehouden met een vermogensverlies van 0,5 tot 4%. Als de bundel over grote afstanden (meerdere meters) wordt getransporteerd (bijvoorbeeld voor het lassen van grote platen), zal ten gevolge van de bundeldivergentie de bundeldiameter sterk toenemen. Dit pro-



figuur 2.6 Bundeltransport (en focussing) van laserstraling door middel van spiegels

bleem wordt opgelost door de toepassing van een bundelverbreder (of telescoop), zie figuur 2.6.

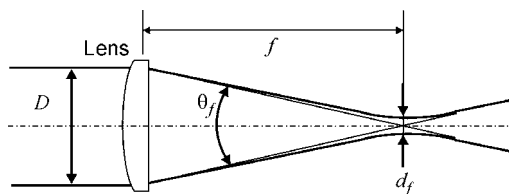
De straling van Nd:YAG-, fiber- en diodelasers kan, behalve met spiegels ook door glasfibers (kerndiameter van 0,1 tot 1 mm) worden getransporteerd (zie figuur 2.7). Het laserlicht blijft door interne reflecties 'gevangen' in de fiber. De energieverdeling van de uit de fiber uittrekkende laserbundel heeft een *top hat* intensiteitsverdeling (zie figuur 2.3b).



figuur 2.7 De straling van Nd:YAG- en diodelasers kan door een glasfiber worden getransporteerd van de laserbron naar de focusseerkop

Focussing

Om de vereiste hoge vermogensdichtheid te verkrijgen, die nodig is om metaal te smelten, wordt de laserbundel met behulp van lenzen of spiegels gefocuseerd (zie figuren 2.6 en 2.8).



figuur 2.8 Focussing van de laserbundel m.b.v. een lens. Voor de eenvoud is de ongefocuseerde laserbundel weergegeven als een parallelle bundel zonder divergentie

Lenzen voor CO₂-lasers zijn bijna altijd van zink-selenide (ZnSe) gemaakt. Deze lenzen kennen een vermogensverlies van circa 1% per lens, dat toeneemt met de standtijd (circa 3000 uur) van de lens. ZnSe is niet bestand tegen laservermogens van meer dan 3 kW. Daarom worden bij hoge vermogens spiegels ingezet (zie figuur 2.6). Per spiegel moet men rekenen op 0,5 tot 4% vermogensverlies.

Voor Nd:YAG-, fiber- en diodelasers maakt men gebruik van een samenstelling van meerdere kwartslenzen, waarvoor men moet rekenen op 1% vermogensverlies per lens.

Focusdiameter

De diameter d_f [m] van het focus wordt bepaald door de brandpuntsafstand f [m] van de focusseerlens (of spiegel), de golflengte λ [m] van het laserlicht, het kwaliteitsgetal M^2 en de diameter D [m] van de laserbundel vóór focussing en bedraagt:

$$d_f = \frac{4 M^2 \lambda \cdot f}{\pi D} \text{ [m]} \quad (2.3)$$

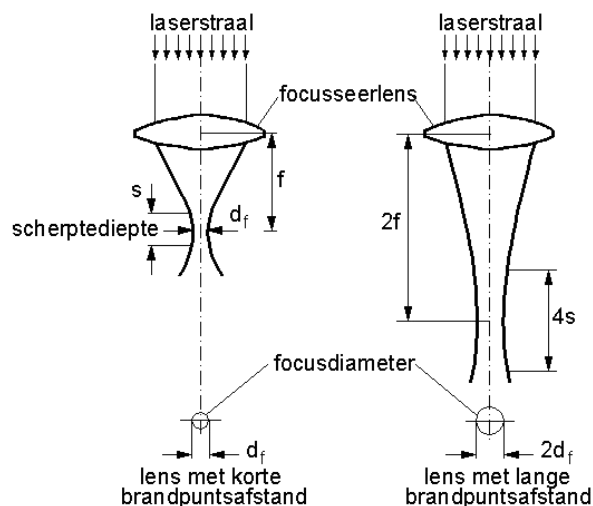
Hoe kleiner de focusdiameter, des te hoger de intensiteit (vermogensdichtheid, zie formule 2.1), des te hoger de lassnelheid en des te smaller de lasbreedte. Een kleine focusdiameter kan worden verkregen met een sterke lens (kleine brandpuntsafstand f). Een kleine brandpuntsafstand betekent echter ook een kleine werkafstand tussen focusseerlens/spiegel en het product. Met een veilige werkafstand van circa 5 tot 20 cm moet worden gerekend. Om de optiek te beschermen tegen spatten vanaf het product tijdens het lassen worden deze beschermd door langsstromende gassen (zie § 4.4).

De typische diameter van de laserspot bedraagt voor het laserlassen circa 0,1 tot 0,8 mm. Bij een diodelaser zonder fiberkoppeling wordt na focussing een recht-hoekig focus verkregen variërend van 0,6 bij 0,8 mm tot 1,5 bij 1,5 mm.

Scherptediepte

De scherptediepte s is gedefinieerd als twee maal die afstand tot het focus, waarover de bundeldiameter met een factor $\sqrt{2}$ groter is dan de diameter d_f van het focus (zie figuur 2.9). Dus op de afstand $s/2$ van het focus is de energiedichtheid nog maar de helft van die in het focus.

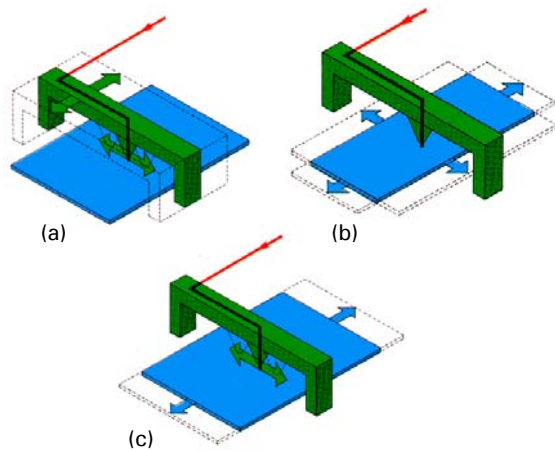
Een grote scherptediepte kan worden bereikt met een lens (of spiegel) met een lange brandpuntsafstand (zie figuur 2.9). Een grote scherptediepte is gewenst omdat dan, rondom het focus, de bundeldiameter relatief weinig toeneemt en dus de intensiteit weinig afneemt. Dit betekent dat de positionering van het te bewerken product t.o.v. het focus minder kritisch is (zie § 4.2). Met toenemende brandpuntsafstand neemt echter ook de diameter van het focus toe (zie figuur 2.9).



figuur 2.9 Invloed van de brandpuntsafstand op de scherptediepte

Optiek en/of werkstukmanipulatie

Laserlassen kan plaatsvinden op relatief hoge snelheden (tot meer dan 15 m/min). Samen met de nauwkeurigheid van de bewerking (in de orde van 0,05 tot 0,1 mm) stelt dit hoge eisen aan de manipulatoren. Om de laserspot over de lasnaad te bewegen kan men gebruikmaken van een productmanipulator met stilstaande optiek, van een stilstaand product met *flying optics*, of een hybride variant (zie figuur 2.10).



figuur 2.10 Optiek versus werkstukmanipulatie.

- (a) *Flying optics*, waarin de optiek (laserbundel) wordt bewogen en het product stil staat. Deze opstelling wordt meestal toegepast voor het lassen van grote of zware producten
- (b) Stilstaande optiek en bewegend product. Deze opstelling wordt meestal toegepast voor het lassen van lichte/kleine producten
- (c) Hybride manipulator, waarin zowel de optiek, als het product wordt bewogen

Bij lasers met een hoge bundelkwaliteiten kan de laserstraal via een spiegelscanner flexibel geleid worden binnen het bereik van het systeem. Het systeem is in combinatie met een industriële knikarmrobot voor Nd:YAG (schijf)- en fiberlasers geschikt. De koppeling met een CO₂-laser kan in een portaalopstelling worden gerealiseerd. De hoge bundelkwaliteit is vereist vanwege de grote werkafstand tussen optiek (scanner) en werkstuk.

Bij het systeem met knikarmrobot neemt de robot de grove positionering voor zijn rekening en bepaalt het bereik van de installatie, terwijl de scanner het fijne positioneerwerk voor zijn rekening neemt (zie figuur 2.11). Om de vereiste straalkwaliteit te bereiken, is voor de meeste toepassingen, een Nd:YAG-(schijf) of fiberlaser noodzakelijk.



figuur 2.11 Knikarmrobot met remote scansysteem

Afhankelijk van de dimensies van het product kiest men voor een 1D systeem, bijvoorbeeld voor het lassen van buizen, voor een 2D of een 2½D systeem voor het lassen van plaatmateriaal of een 3D systeem voor het bewerken van drie-dimensionale producten. Naarmate het systeem van meer assen is voorzien, zal het minder nauwkeurig en duurder zijn. Voor het bewerken van 3D producten kan men behalve de relatief nauwkeurige

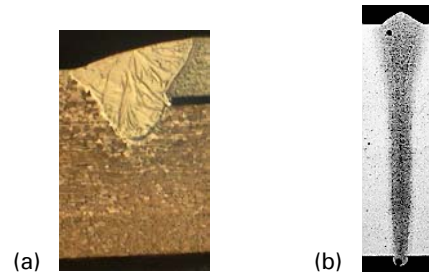
CNC- en gantry-manipulators ook een robot inzetten. Samen met een laserbron, voorzien van een glasfiber, vormt een robot een zeer flexibel productiemiddel (zie ook figuren 7.3 en 7.5).

3 Lasprincipes en -methoden

Men maakt onderscheid tussen twee lasprincipes: het *geleidingslassen* en het *keyhole* lassen (zie figuur 1.1). Dit laatste principe wordt ook wel *dieplassen* genoemd.

Geleidingslassen

Geleidingslassen vindt plaats bij relatief lage intensiteiten ($< 10^8$ W/m²), waardoor er een relatief ondiep (< 1 mm) smeltbad ontstaat in het product (zie figuren 1.1 (links) en 3.1a).



figuur 3.1 Voorbeeld van (a) een geleidingslaserlas en (b) een *keyhole* laserlas
 (a) RVS 304 (0,5 mm) op RVS 444 (2,0 mm) gemaakt met een 2 kW lampen-gepompte Nd:YAG-laser (cw), $f = 200$ mm, $v = 6$ m/min (schermgas Argon: 20 l/min)
 (b) In staal (dikte 20 mm) gemaakt met een 20 kW CO₂-laser, $M^2 \approx 3$, $f = 715$ mm, $v = 1,8$ m/min

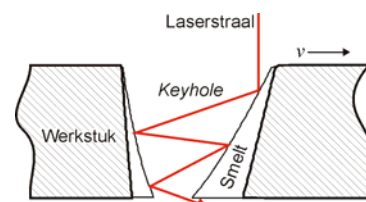
Het smeltfront breidt zich uit door middel van warmtegeleiding, vandaar de benaming 'geleidingslassen'. De dampdruk die boven het smeltbad ontstaat is zo laag, dat het oppervlak van het smeltbad niet wordt vervormd. Hierdoor ontstaat er een gladde las, die nagenoeg geen nabewerking vereist.

De relatief grote focusafmetingen en grote divergentie maakt dat de diodelaser met name geschikt is voor het geleidingslassen.

Keyhole lassen

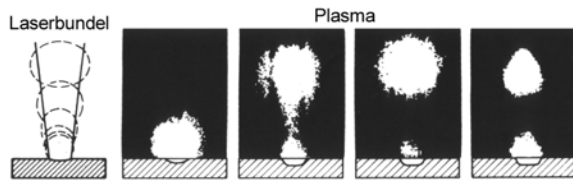
Keyhole lassen (ook wel dieplassen genoemd) vindt plaats bij hogere intensiteiten ($> 10^8$ W/m²), waardoor het materiaal lokaal verdampt. Ten gevolge van de dampdruk ontstaat er een gat (dampcapillair, *keyhole*) in het smeltbad, dat diep het materiaal indringt, zie figuur 1.1(rechts). De diameter van de *keyhole* is 1,5 tot 2 keer zo groot als de diameter van de laserspot (die in de orde van grootte ligt van 0,1 tot 0,8 mm).

De absorptie van laserstraling is groot (circa 80%), dankzij herhaalde reflecties (en dus herhaalde absorptie) van het laserlicht op de wanden van de *keyhole* (zie figuur 3.2). Hierdoor dringt de laserstraling diep het materiaal in (tot meer dan 25 mm in staal bij gebruik van een 20 kW CO₂-laser), zie figuur 3.1b. De lasdiepte is hierbij veel groter dan de lasbreedte.



figuur 3.2 Hoge absorptie door meerdere reflecties (en dus herhaalde absorptie) van het laserlicht op de wanden van de *keyhole*

De metaaldamp, die aan de bovenzijde van de *keyhole* ontsnapt (de pluim), absorbeert laserlicht (zie figuur 3.3).

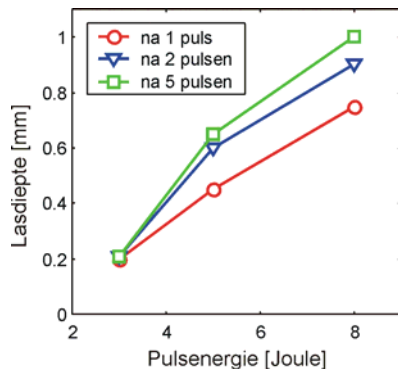


figuur 3.3 Vorming van een laser-geïnduceerde pluim. Tijd tussen de opnamen 50 ns, CO₂-laser, gaussische energieverdeling, staal, focus $\varnothing = 100 \mu\text{m}$, $I > 2 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$

De pluim staat een deel van de absorbeerde energie af aan de *keyhole* en beïnvloedt zo de vorm en (in)stabiliteit van de *keyhole*. Er worden beschermgassen gebruikt om de pluim te onderdrukken en de stabiliteit van het lasproces te verbeteren (zie § 4.4). De pluim absorbeert relatief weinig Nd:YAG-laserstraling ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$) in vergelijking met CO₂-laserstraling ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$). Dit maakt dat pluimvorming een groter probleem is bij CO₂-laserlassen dan bij Nd:YAG-laserlassen.

Laserpuntlassen en -naadlassen

Indien men met een enkele laserpuls een las maakt, spreekt men over *laserpuntlassen* (zie figuur 3.4).



figuur 3.4 Lasdiepte in RVS bij puntlassen met een Nd:YAG-laser als functie van de pulsenergie (Joule per puls = laservermogen $\times$ pulsduur). De lasdiepte wordt voornamelijk bepaald door de pulsenergie

Men spreekt over *lasernaadlassen* als met een gepulste laser overlappende laserpuntlassen worden gemaakt. Een overlap van 70% tot 80% is gebruikelijk. Voor het maken van naadlassen is het gebruik van een cw-laser echter meer voor de hand liggend, omdat in dat geval de *keyhole* niet steeds opnieuw behoeft te worden gevormd. In vergelijking met naadlassen is de hoeveelheid ingebrachte warmte tijdens het laserpuntlassen klein, wat van belang kan zijn bij het verbinden van thermisch gevoelige onderdelen. Tabel 3.1 geeft een overzicht van toepassingen van punt- en naadlassen.

4 Parameterinvloeden

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste parameters die het lasresultaat bepalen besproken.

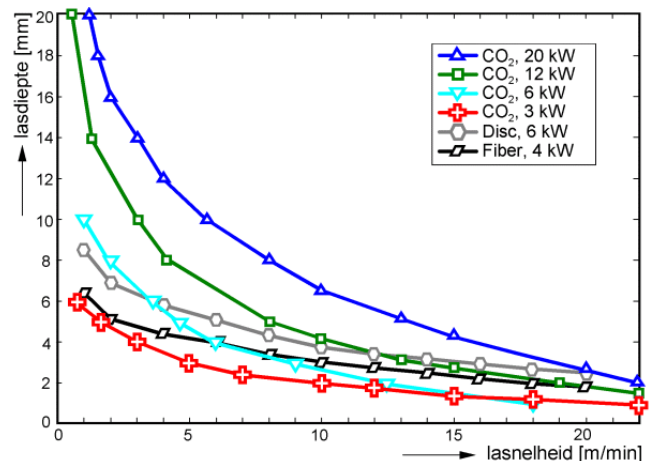
4.1 Laservermogen en lassnelheid

Het laservermogen (bij gegeven focusdiameter) en de lassnelheid zijn de belangrijkste parameters die de resultaten van een laserlas bepalen. Bij het laserlassen moeten het laservermogen en de lassnelheid zo worden gekozen, dat de las aan de kwaliteitseisen m.b.t. sterkte,

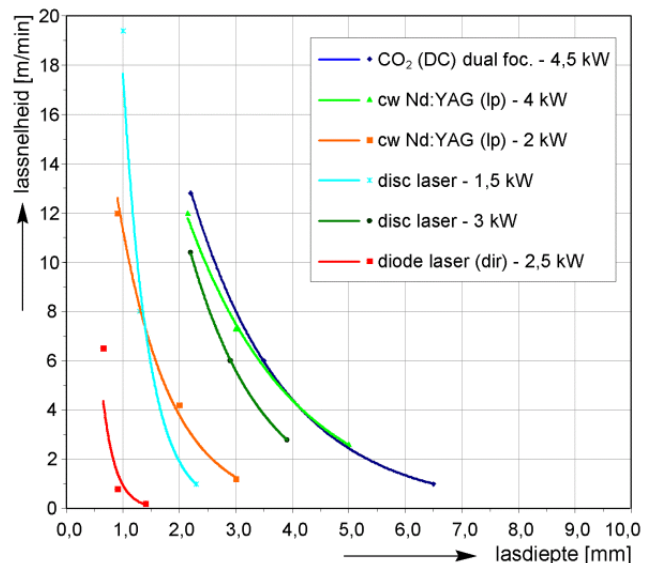
tabel 3.1 Toepassingsgebieden van de verschillende laserbronnen voor het lassen van metalen

producten	voorbeelden	methode	laserbron
precisiedelen	scheermesjes, electr. componenten	laserpuntlas	gepulste Nd:YAG
dunne folie	< 0,1 mm	naadlas	gepulste Nd:YAG
plaatdelen	> 0,5 mm	laserpuntlas	gepulste Nd:YAG gepulste CO ₂
plaatdelen	0,1 à 3 mm	naadlas	gepulste Nd:YAG cw CO ₂ , cw diode
plaatdelen	0,1 à 10 mm	naadlas	cw Nd:YAG cw CO ₂
plaatdelen	10 à 25 mm	naadlas	cw CO ₂

poreusheid, uiterlijk en afwezigheid van spatten enz. voldoet. In de praktijk blijkt dat, bij een gegeven materiaaldikte, het laservermogen en de lassnelheid slechts binnen bepaalde grenzen kunnen worden gevarieerd. Een te lage snelheid resulteert in het 'uitzakken' van de las (*undercut*, zie ook figuur 5.1c). Een te hoge snelheid kan aanleiding geven tot poreuze lassen (zie ook figuur 5.1a). *On line* procesbeheersing kan daarom, bij met name hoge lassnelheden, noodzakelijk zijn. Figuren 4.1 en 4.2 tonen de lasdiepte als functie van het laservermogen en de lassnelheid in staal en aluminium voor verschillende laserbronnen.



figuur 4.1 Lasdiepte in staal als functie van de lassnelheid



figuur 4.2 Lasdiepte in aluminium als functie van de lassnelheid

Een benadering van de lassnelheid wordt gegeven door de vergelijking:

$$v \approx \frac{P}{a \cdot H} \quad (4.1)$$

waarin P [W] het laservermogen is, a [m²] de oppervlakte van de lasdoorsnede en H [J/m³] de smeltwarmte (tabel 4.1). Bovenstaande formule is alleen een goede benadering voor hoge lassnelheden (d.w.z. als $v > \kappa/d$) en voor materialen die slecht warmte geleiden (kleine warmte-diffusiecoëfficiënt κ). Uit de formule volgt, dat voor een gegeven materiaal de lassnelheid toeneemt met toenemend laservermogen P , en afnemende (gewenste) lasdiepte. Bij doorlassen is de maximale diepte van de las (uiteraard) gelijk aan de plaatdikte. In dat geval volgt uit bovenstaande vergelijking dat de breedte van de las afhankelijk is van de lassnelheid.

Afwijkingen tussen formule 4.1 en praktische waarden voor de lassnelheid (figuren 4.1 en 4.2) worden onder andere veroorzaakt doordat in de formule de invloed van de absorptiecoëfficiënt A en de bundelvorm en -afmeting (figuur 2.3) niet zijn meegenomen.

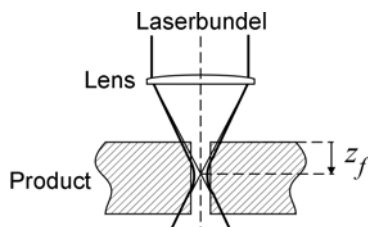
tabel 4.1 Smeltpunt en smeltwarmte van verschillende metalen

materiaal	smeltpunt T_m [C°]	smeltwarmte H [J/m ³] × 10 ⁹
aluminium	660	1,08
goud	1064	1,27
koper	1083	1,84
magnesium	649	0,64
nikkel	1453	2,76
ijzer	1530	2,17
RVS	≈1425	2,07
zilver	961	1,10

Voor een constante laskwaliteit dient de laserspot met constante snelheid over de lasnaad te worden bewogen. Afwijkingen in de versnelling en vertraging van de verschillende assen van de manipulator leiden tot snelheidsvariaties en afwijkingen t.o.v. de lasnaad. De positionauwkeurigheid kan worden vergroot door, ter plaatse van scherpe contouren in de lasnaad, de lassnelheid te verlagen. Door gelijktijdig het laservermogen te verlagen, kan men een constante laskwaliteit verkrijgen.

4.2 Focuspositie

Voor het maken van goede lassen is een precieze positionering van de laserbundel van belang. Dit betreft de diameter en de ligging van het focus t.o.v. het productoppervlak (zie figuur 4.3).



figuur 4.3 De focuspositie z_f is gedefinieerd als de afstand van de bovenzijde van het product tot aan het focus. Indien het focus onder het productoppervlak wordt gepositioneerd, is z_f positief ($z_f > 0$), als het focus boven het productoppervlak wordt gepositioneerd is z_f negatief ($z_f < 0$)

De optimale focuspositie hangt af van de lasconstructie (lasnaadvorm, spleetbreedte en uitlijning, zie § 4.3) en de eisen aan de las (diepte, breedte). Zo is de optimale

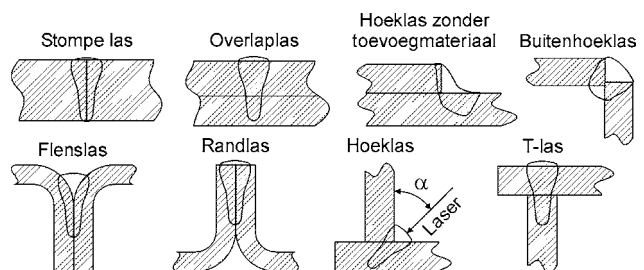
focuspositie voor een stompe las (figuur 4.4) die positie z_f waarbij maximale penetratie wordt verkregen. Voor het lassen van dunne materialen is de optimale focuspositie ongeveer $z_f = 0$ en voor dikke materialen (> 10 mm) wordt het focus onder het productoppervlak gepositioneerd. De optimale positie voor een overlapas (zie ook figuur 4.4) is die positie, die resulteert in een maximale lasbreedte op het raakvlak tussen de twee materialen. De machineleverancier stelt meestal tabellen met de optimale focuspositie voor verschillende materiaal(diktes) beschikbaar.

Zelf kan men de optimale focuspositie experimenteel bepalen in 3 stappen: Stap 1: bepaal de focuslocatie (*boven* het productoppervlak) die niet resulteert in een lasverbinding t.g.v. de te grote laserspot. Noem deze locatie z_1 . Stap 2: bepaal de focuslocatie (*onder* het productoppervlak) die ook niet resulteert in een lasverbinding t.g.v. de te grote laserspot. Noem deze locatie z_2 . Stap 3: bereken de optimale focuslocatie die (bij benadering) gelijk is aan $z_f = (z_1 + z_2)/2$.

Indien men de lasbreedte wil vergroten, kan men de laserbundel defocuseren. D.w.z. de focuspositie verder boven of onder het productoppervlak positioneren. Dit vereist wel een lagere lassnelheid om de laspenetratie op gelijke diepte te houden. Beter is het om in dat geval een lens te gebruiken met een langere brandpuntsafstand. Een dergelijke lens resulteert in een grote diameter van het focus (zie formule 2.3), én heeft een grotere scherptediepte (figuur 2.9) en werkafstand.

4.3 Lasnaadvormen

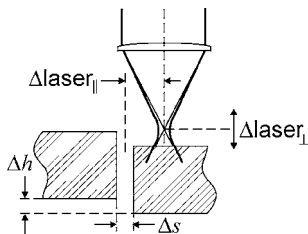
Veelvoorkomende lasnaadvormen zijn weergegeven in figuur 4.4. Welke lasconstructie het beste resultaat geeft, hangt af van het type belasting (statisch, dynamisch), vermoeiing, optische eisen, enz. Tabel 4.2 geeft een overzicht van toleranties (figuur 4.5) voor de verschillende lasnaadvormen, zonder toevoegmateriaal.



figuur 4.4 Lasnaadvormen

tabel 4.2 Toleranties van lasnaadvormen voor laserlassen (zonder draadtoevoer)

constructie van de las	max. spleet Δ_s [mm]	max. hoogteverschil Δ_h [mm]	maximum positiefout laserspot [mm]	
			haaks op naad $\Delta_{laser \parallel}$	loodrecht op naad $\Delta_{laser \perp}$
stompe las	0,1	0,2	± 0,05	± 0,25
overlappas	0,1	n.v.t.	niet kritisch	± 0,25
T-las	0,1	n.v.t.	niet kritisch, mits las binnen verticale plaat	± 0,25
hoeklas zonder toevoegmateriaal	0,25	n.v.t.	± 0,05	± 0,25
flenslas	0,125	± 0,5	± 0,15	± 0,25
randlas	0,125	± 0,25	± 0,1	± 0,25
hoeklas $40^\circ < \alpha < 60^\circ$	0,25	n.v.t.	± 0,125	n.v.t.
hoeklas $60^\circ < \alpha < 80^\circ$	0,25	n.v.t.	± 0,15	n.v.t.
buitenhoeklas	0,2	0,5	± 0,05	± 0,25



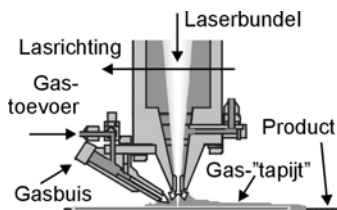
figuur 4.5 Definitie van toleranties in lasnaadvormen

De waarden in de tabel zijn indicatief en hangen af van de spotdiameter, de scherptediepte van de bundel en van de materiaaleigenschappen. Er gelden voor de stompe las en de overlaplas een aantal vuistregels. Zo is de stompe las lasbaar als de spleetbreedte niet groter is dan 0,05 à 0,1 keer de dikte van de dunste plaat, het hoogteverschil tussen de platen niet meer is dan 0,1 keer de dikte van die dunste plaat en de maximum positiefout van de laserspot haaks op de naad ook niet meer is dan 0,1 keer de dikte van die dunste plaat. De overlaplas is lasbaar als de spleet tussen de platen niet meer is dan 0,1 keer de dikte van de bovenste plaat. Voor aluminium bedragen de toleranties ongeveer het dubbele van die van staal. Aluminium stelt dus minder strenge eisen aan de lasmal en aan de positionering van de laserbundel. De T-las is, in vergelijking met conventionele technieken, met behulp van een laser zeer goed te lassen.

4.4 Beschermgassen

Tijdens laserlassen wordt er vrijwel altijd gebruikgemaakt van beschermgassen om:

- ▶ de optiek te beschermen tegen spatten vanaf het smeltbad. Dit is in het bijzonder nodig bij het lassen van met deklagen voorziene producten;
- ▶ pluimvorming te onderdrukken (of weg te blazen) en te stabiliseren, zodat een robuuster lasproces wordt verkregen. Het meest effectieve (maar duurste) gas voor dit doel is helium. Helium resulteert in een grotere lasdiepte, in vergelijking met argon of stikstof. Pluimonderdrukking is vooral noodzakelijk bij CO₂-laserlassen.
- ▶ het smeltbad en de afkoelende las tegen negatieve inwerking van de omgevingslucht (oxidatie) te beschermen. Daarvoor wordt meestal een 'slepende' gastoevoer toegepast (zie figuur 4.6). Een coaxiale gastoevoer (d.w.z. concentrisch met de laserbundel), is minder effectief dan de slepende gastoevoer, omdat de afkoelende las minder goed wordt beschermd. In het geval van een volledige doorlassing wordt soms ook aan de onderzijde een beschermgas (*backing gas*) toegevoerd.



figuur 4.6 Slepende gastoevoer, die niet alleen het smeltbad tegen negatieve inwerking van de omgevingslucht (oxidatie) beschermt, maar ook de afkoelende las

Gastype

De keuze van het beschermgas hangt ook samen met het te lassen materiaal. Zo kan argon aanleiding geven tot brose lassen in sommige staalsoorten en zal stikstof reageren met titaan. Tabel 4.3 geeft een overzicht van eigenschappen van de verschillende beschermgas-

sen. In het grijze kader wordt uiteengezet hoe de zuiverheid van de gassen wordt aangegeven in deze tabel.

tabel 4.3 Overzicht beschermgassen voor laserlassen

eigenschap	Helium (He)	Argon (Ar)	Stikstof N ₂	CO ₂	20% He + 80% Ar
zuiverheid	4.6	4.6	5.0	4.5	4.6
ionisatie-energie	hoog 25,4 eV	gem. 15,7 eV	gem. 15,5 eV	gem. 15,5 eV	gem. 15,5 eV
pluimonderdrukking	zeer goed	redelijk	redelijk	redelijk	goed
bescherming tegen oxidatie	goed	zeer goed	goed	slecht	zeer goed
typisch verbruik	20 à 30 l/min	30 à 45 l/min	30 à 45 l/min	30 à 45 l/min	23 à 35 l/min
effect op lasgeometrie	verdiepend	verbreedend	iets verdiepend	normaal	normaal
kosten	hoogst	gem.	laag	laagst	gem.

Notatie zuiverheden gassen

Behalve percentages is het gebruikelijk de zuiverheid van een gas met een cijfer aan te geven. Een dergelijk cijfer is opgebouwd uit een getal vóór en een getal ná de punt, bijvoorbeeld 4.6. Het cijfer voor de punt (in dit voorbeeld 4) geeft het aantal negens aan van de percentuele zuiverheid (dus 4 negens). Het getal achter de punt (6 in dit voorbeeld) geeft het laatste cijfer aan in de percentuele zuiverheid. Dus 4.6 betekent een zuiverheid van 99,996%.

In sommige gevallen wordt het beschermgas verrijkt met een geringe concentratie actieve componenten, zoals zuurstof en CO₂. Onderzoek heeft aangetoond dat de vorm en diepte van het smeltbad door deze actieve componenten positief wordt beïnvloed (zie figuur 4.7).



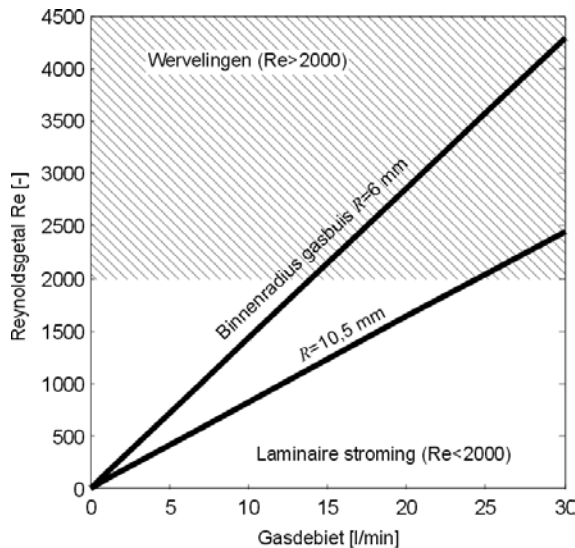
figuur 4.7 De invloed van de concentratie actieve component in het beschermgas op de vorm van het smeltbad bij het lassen van St37 met een 3 kW diodelaser, bij 8,3 mm/s. Van links (geen actieve component) naar rechts een oplopende concentratie van de actieve component

Gasnozzle

Zoals hiervoor reeds vermeld moet tijdens het lassen en bij het afkoelen van de las, zuurstof rondom het lasbad en de nog hete las verdreven worden, ter voorkoming van oxidatie. Behalve een voldoende hoog debiet van het beschermgas, is ook een *laminaire aanstroming* (geen wervelingen) aan het oppervlak van het werkstuk een voorwaarde. De gasstroming uit een gasbuis is laminair als het *Reynoldsgetal* (Re) kleiner is dan 2000, d.w.z. als:

$$Re = \rho \frac{2VR}{\eta} < 2000 \quad (4.2)$$

waarin ρ [kg/m³] de dichtheid van het gas is, η [Pa·s] de viscositeit van het gas, V [m/s] de stroomsnelheid van het gas in de buis en R [m] de binnenradius van de gasbuis. Als voorbeeld toont figuur 4.8 het Reynoldsgetal voor argon door een buis met twee verschillende buisradii. Voor een gasdebiet van meer dan 14 l/min is de gasstroming uit de buis met $R=6$ mm niet laminair. Daarom zal, als voor een optimale gasafscherming meer gas nodig is, een gasbuis met een grotere binnenradius moeten worden gebruikt. Figuur 4.9 toont een mogelijke uitvoering van een gasbuis.



figuur 4.8 Reynoldsgetal (Re) als functie van het gasdebiet voor gasstromingen (argon, $\rho = 1,78 \text{ kg/m}^3$, $\eta = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$) door een gasbuis met een binnenradius van 6 en 10,5 mm



figuur 4.9 Mogelijke uitvoering van een koperen gasbuis ter bescherming van het smeltbad en de las tegen negatieve inwerking van de omgevingslucht (oxidatie). Door het gat in de buis kan de laserbundel het werkstuk bereiken

4.5 Materiaaleigenschappen

Alle metalen die te lassen zijn met conventionele smeltlastechnieken zijn ook te verbinden door middel van laserlassen. Tabel 4.4 toont niet alleen de lasbaarheid van gelijke metalen, maar ook van metaalcombinaties. De lasbaarheid van ongelijksoortige metaalcombinaties wordt met name bepaald door de metallurgische aspecten. Zo geeft een aantal combinaties brosse lassen en/of kripscheuren. Brosse intermetallische verbindingen kunnen soms worden voorkomen door het aanbrengen van een tussenlaag. Galvanisch aangebrachte deklagen op staal- en nikkellegeringen en op verzinkte materialen geven meestal geen problemen [2].

Samengestelde plaatmaterialen van gelijke of verschillende metaalsoorten en/of dikte worden tailored blanks genoemd. In tailored blanks kunnen de verschillende materialen en dikten beter worden afgestemd op de functie van het plaatdeel in het uiteindelijke product. Bijvoorbeeld dik in het scharnier van een autodeur en dun voor de plaatdelen van de wielkast.

tabel 4.4 Lasbaarheid van metaal(combinaties)

	Ag	Al	Au	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	Pb	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	V	W	Zr
Ag	+																						
Al	±	+																					
Au	+	+	+																				
Be	-	±	-	+																			
Cd	±	-	-	-	+																		
Co	-	±	-	-	+																		
Cr	±	-	-	-	-	±	+																
Cu	±	±	+	-	-	±	±	+															
Fe	-	±	-	-	-	±	±	±	+														
Mg	-	±	-	-	-	+	-	-	-	+													
Mn	±	-	-	-	-	±	±	+	±	-	+												
Mo	-	±	-	-	-	-	-	-	-	±	+												
Nb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+											
Ni	±	-	+	-	-	±	±	±	±	-	±	-	+										
Pb	±	±	-	-	-	±	±	±	±	-	±	-	±	+									
Pt	+	+	+	-	-	+	±	+	+	-	-	±	-	+	+								
Re	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	±	+							
Sn	±	±	-	-	-	±	-	±	±	-	-	-	-	-	±	-	+						
Ta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+					
Ti	±	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+			
V	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+			
W	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	+	±	+	+	
Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	±	±	-	-	+

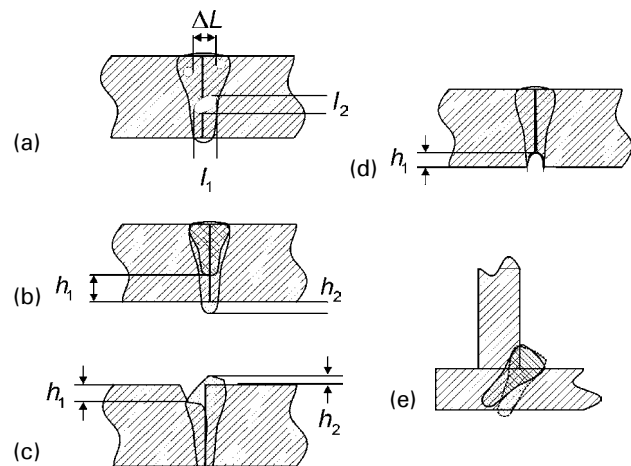
+ = zeer goed lasbaar;
 ± = redelijk lasbaar (kans op complexe structuren)
 - = ongewenste combinatie
 □ = weinig of geen gegevens bekend

Producten samengesteld uit twee delen van gelijk materiaal zijn goed te lassen, mits dit plaatsvindt in een voor het betreffende materiaal 'neutrale' gasomgeving. D.w.z. het gas mag niet reageren met het (gesmolten) materiaal.

5 Testen en beproeven van de laskwaliteit

In de norm NEN-EN-ISO 13919-1 "Elektronenbundellassen en laserlasverbindingen - Richtlijn voor het vaststellen van kwaliteitsniveaus voor onvolkomenheden" [3] wordt de kwaliteit van een laserlas gedefinieerd aan de hand van zijn geometrische eigenschappen (zie figuur 5.1). Zo worden scheuren niet geaccepteerd, tenzij het om microscheuren gaat van minder dan 1 mm^2 scheuoppervlak.

De norm kent drie kwaliteitsniveau's: matig, gemiddeld en hoog. Naarmate de onvolkomenheden minder voorkomen, is de laskwaliteit hoger. Indien de geometrische kwaliteitsniveaus niet voldoende de kwaliteit kunnen vastleggen (bijvoorbeeld lassen in producten die worden blootgesteld aan vermoeiing of waarin waterdichte verbindingen nodig zijn), kunnen andere testmethoden worden ingezet, zoals trekproeven, buigtesten of cuppingtesten.



figuur 5.1 Geometrische aspecten van de las ter bepaling van de laskwaliteit.
 (a) De grootte (l_1 en l_2) en concentratie (ΔL) van poriën;
 (b) Mate van laspenetratie (of het gebrek eraan h_1) en de mate van doorzakking (h_2);
 (c) Mate van ondersnijding (h_1) en mate van uitsteken van de las (h_2);
 (d) Mate van concaafheid van de onderzijde van de las (h_1);
 (e) Afwijkingen van de lasoriëntatie.

6 Overige componenten van een laserlasinstallatie

6.1 Opspangereedschap (lasmal)

Vanwege de kleine laserspot, de geringe scherptediepte (figuur 2.9) en de kleine toleranties (tabel 4.2) moeten de te lassen onderdelen nauwkeurig worden opgespannen. Bovendien kan, ondanks de geringe warmte-inbreng tijdens het laserlassen, het product thermisch vervormen. Een nauwkeurige lasmal is dus vereist. Bij het ontwerp van een lasmal dient men de volgende aspecten in acht te nemen:

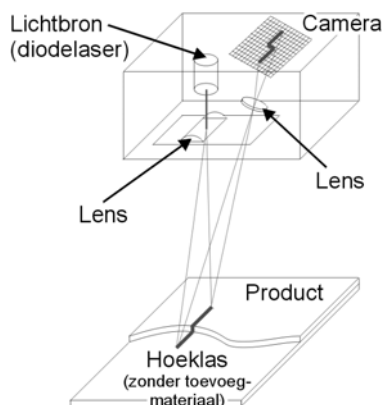
- ▶ De lasmal dient te worden gemaakt van een slijtvast staal om slijtage aan de lasmal (en dus verlies van opspanningsnauwkeurigheid), t.g.v. veelvuldig opspannen van producten, te voorkomen;
- ▶ Zorg voor een goede bereikbaarheid van de product-opspanning i.v.m. het verwijderen van spatten. Voorzie eventueel de lasmal van een spatwerende deklaag;
- ▶ Voorkom puntinklemming en/of hoge klemkrachten, waardoor het product en de lasnaad ter plaatse van de klem vervormt;
- ▶ Voorzie de lasmal van voldoende 'bulk materiaal' voor de afvoer van laswarmte, zodat thermische vervormingen worden geminimaliseerd. Een watergekoelde lasmal kan een oplossing zijn voor kritische producten. Thermisch vervormen van de lasnaad (d.w.z. het gaan openstaan van de lasnaad tijdens het lassen) kan worden voorkomen door de producten te voorzien van (laser)hechtlassen (puntlassen), alvorens een continue las wordt gelegd;
- ▶ Wanneer het product wordt bewogen, kan het onder invloed van massatraagheden vervormen;
- ▶ Zorg dat de laskop, de laserbundel en de buis voor gasafscherming vrij baan hebben langs de lasmal en klemmen (botsingsgevaar);
- ▶ Voorzie de lasmal van een gastoevoersysteem (bijvoorbeeld kanaaltjes) wanneer het product wordt doorgelast (backing gas, zie § 4.4). Zo wordt ook de onderzijde van de las beschermd.

6.2 Naadvolgsensor

Een naadvolgsensor kan worden ingezet om positioneerfouten van de laserbundel t.o.v. de lasnaad te corrigeren. Deze positioneerfouten kunnen het gevolg zijn van:

- ▶ producttoleranties;
- ▶ fouten in de lasmal en opspanning van de onderdelen;
- ▶ thermische vervorming van de onderdelen t.g.v. de ingebrachte warmte;
- ▶ positiefouten van de manipulator (robot).

Naadvolgsensoren voor laserlassen zijn optische sensoren, die werken op basis van het triangulatieprincipe. Daarbij wordt een lichtpatroon (een lijn in figuur 6.1) over de naad geprojecteerd. Uit een camerabeeld van het (door de lasnaad vervormde) lichtpatroon kan vervolgens de locatie en de oriëntatie van de naad worden bepaald.



figuur 6.1 Naadvolgsensoren die geschikt zijn voor laserlassen werken volgens het triangulatieprincipe

Meetnauwkeurigheden liggen in de orde van $\pm 50 \mu\text{m}$. De sensor wordt gefixeerd t.o.v. de laskop en meet met een hoge frequentie ($> 200 \text{ Hz}$) vooruitlopend aan het lasproces de locatie van de lasnaad. Vervolgens wordt tijdens het lassen de baan van de manipulator gecorrigeerd, opdat de laserspot op de naad blijft. Afhankelijk van prestaties van de sensor en de manipulator kunnen positiefouten tot circa 1,5 mm worden gecorrigeerd.

Behalve het corrigeren van de baan tijdens het lassen, kan de sensor ook *off line* worden gebruikt voor het programmeren van de baan. D.w.z. de sensor meet voorafgaand aan het lassen (op lage snelheid) de lasnaad op en genereert automatisch CNC data voor de manipulator. Daarnaast kan dezelfde sensor worden gebruikt voor inspectie, nadat de las gelegd is.

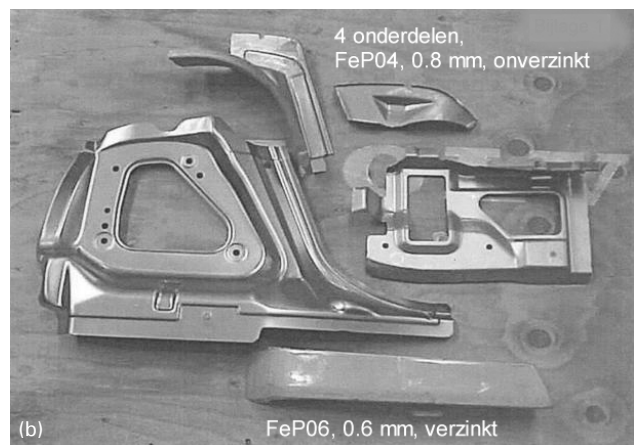
7 Praktijkvoorbeelden

7.1 Laserlassen van een achterlichtdrager

In deze paragraaf wordt het laserlassen van een achterlichtdrager van een auto uiteengezet (zie figuur 7.1a). Conventioneel worden de vijf onderdelen van deze achterlichtdrager met weerstandpuntlassen aan elkaar verbonden.

De achterlichtdrager bestaat uit vier onverzinkte onderdelen (FeP04, 0,8mm) en een verzinkt zichtdeel FeP06 van 0,6 mm (zie figuur 7.1b). Om de achterlichtdrager waterdicht te maken, wordt een kitlaag aangebracht tussen het zichtdeel en de overige delen. Het aanbrengen van de kit is zeer kritisch. Te weinig kit betekent waterlekage, te veel kit betekent vervuiling van het zichtdeel van de lasmal (dat op zijn beurt weer opspanfouten introduceert).

De nadelen van het handmatige puntlassen met een lastang zijn de vervormingen van de drager, die ontstaan t.g.v. onjuiste positionering van de lastang (tolerantie $\pm 0,3 \text{ mm}$) en 'losse' puntlassen als gevolg van kortsluitstromen (isolatoren van de lasmal en de *gun guides* moeten regelmatig vernieuwd worden). Daarnaast moeten de lasparameters regelmatig worden aangepast.



figuur 7.1 Achterlichtdrager (a): Achterlicht van een personenauto; (b) De achterlichtdrager bestaat uit 4 onverzinkte onderdelen en één verzinkt zichtdeel (zinklaag $75 \mu\text{m}$ dik)

Door al deze nadelen is er een extra kwaliteitsbewaking nodig. De totale procestijd (inleggen, kitten, lassen) bedraagt 64 seconden. Met 2 operators per shift worden 750.000 dragers per jaar gefabriceerd.

De kwaliteitseisen die worden gesteld aan het laserlassen zijn dat de laserlas minimaal dezelfde sterkte moet hebben als de weerstandpuntlas en het gebruik van een on line meetsysteem. Hiermee moet 100% van de gemaakte lassen worden bewaakt.

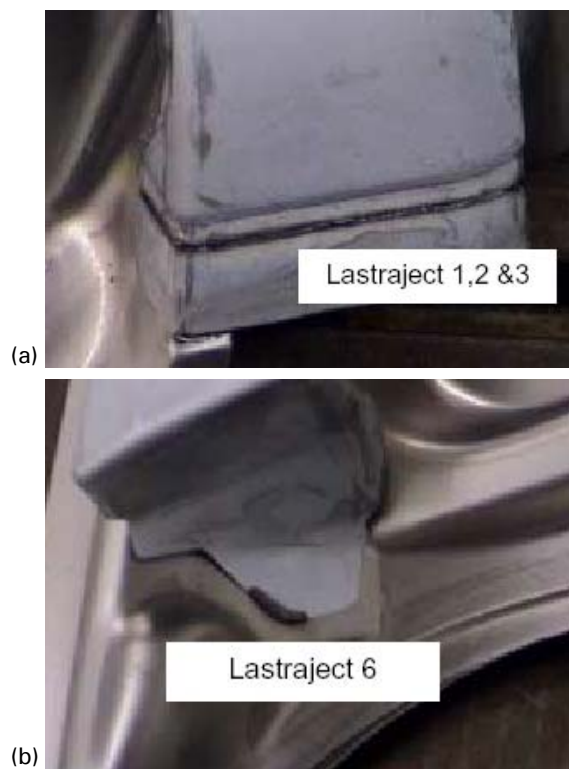
Door het zichtdeel met een doorlopende overlap-laserlas (figuur 7.2a) te verbinden met de overige delen, kan een waterdichte verbinding worden verkregen (zonder kitlaag).

Een probleem bij het laserlassen van deze overlaplas vormt echter de zinklaag van het zichtdeel. Door de hoge energiedichtheid van de laserbundel (en de lage verdampingstemperatuur van zink t.o.v. die van staal) zal namelijk het zink explosief verdampen, waardoor er gaten in de las ontstaan en de twee delen slecht hechten. Ook is in dat geval de achterlichtdrager niet meer waterdicht.

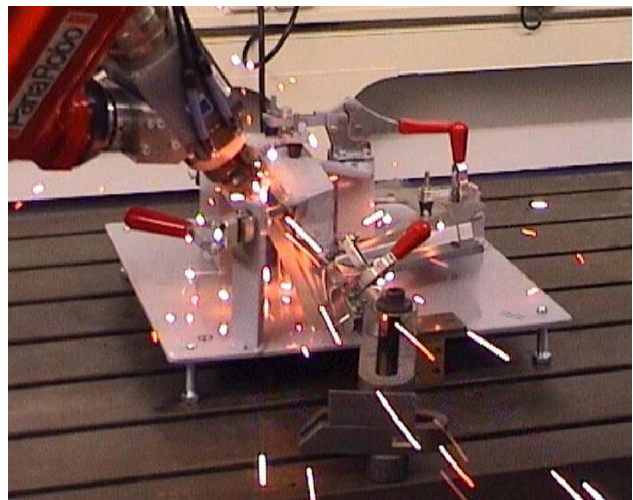
Een oplossing voor deze zinkexplosies is het creëren van een gedefinieerde spleet, bijvoorbeeld door afstandplaatjes, tussen de twee delen, of projecties in de persdelen. De expanderende zinkdamp kan dan ontsnappen in de spleet. Een andere oplossing is het toepassen van een afsmeltlas (hoeklas zonder toevoegmateriaal) op de randen van het zichtdeel (zie figuren 7.2b en 4.4).

Voor het lassen werd een Nd:YAG-laser ingezet (uitgerust met een glasfiber met een kerndiameter van 0,6 mm), die werd ingesteld op een laservermogen van 1200 W.

Er werd gebruikgemaakt van een focusseeroptiek met een brandpuntsafstand van $f=100$ mm. Gegeven de kerndiameter van de glasfiber resulteert dit in een focusdiameter van 300 μm . Dit focus werd op het werkstukoppervlak gepositioneerd (dus $z_f=0$, zie figuur 4.3) voor maximale laspenetratie. Als manipulator werd gebruikgemaakt van een 6-assige industriële robot, die de focusseeroptiek manipuleerde over de lasnaden met een lassnelheid van 40 mm/s (2,4 m/min), zie figuur 7.3.



figuur 7.2 Lassen van het verzinkte zichtdeel aan de overige delen: (a) Overlaplas; (b) Hoeklas zonder toevoegmateriaal



figuur 7.3 Lassen met een 6-assige robot en een Nd:YAG-laser voorzien van glasfiber

Als beschermgas werd gebruikgemaakt van stikstof (14 l/min, zuiverheid 3.0). De lasparameters werden geoptimaliseerd naar doorlassing, ontbreken van poreusheid aan het oppervlak, ontbrekende start- en eindkraters en minimale spatvorming. De lasmal werd opgebouwd uit eenvoudige (standaard) opspanmiddelen (zie figuur 7.3). Uit afpelproeven bleek dat de laserlas aan de gestelde sterkte-eisen voldoet. Ook de lasbreedte ter plaatse van de materiaalinterface bleek aan de eis van 0,8 keer de plaatdikte te voldoen.

Er zijn ook lasexperimenten uitgevoerd bij hogere en lagere laservermogens alsook bij hogere en lagere lassnelheden, op de overlapnaad met spleet. Uit die experimenten bleek dat bij hogere laservermogens (en lagere lassnelheid) de focuspositie minder kritisch is dan bij lagere vermogens (en hogere snelheid). Zeer opmerkelijk was dat de spleettolerantie in grote mate onafhankelijk was van focuspositie, laservermogen en lassnelheid. In de hoeken van het zichtdeel (figuur 7.2a) bleek echter de spleet, t.g.v. producttoleranties dermate groot, dat deze niet te overbruggen was m.b.v. de laser. Een productaanpassing is nodig om dit probleem op te lossen.

Ook de afsmeltlas (figuur 7.2b) leverde goede reproduceerbare resultaten. De tolerantie van de laspot t.o.v. de rand van het zichtdeel (Δ_{laser} in figuur 4.5) bleek maximaal 0,5 mm, afhankelijk van lassnelheid en laservermogen.

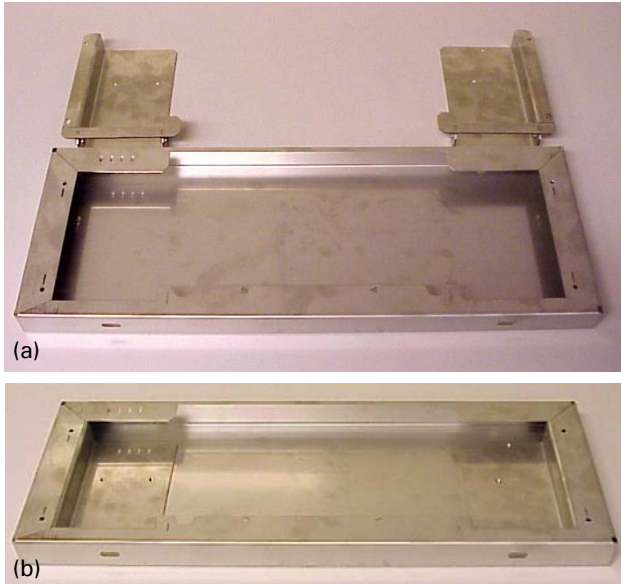
Voor de on line kwaliteitscontrole werd een *Weldwatcher* systeem ingezet [1]. Dit systeem meet, m.b.v. een sensor in de laserbron, het licht dat wordt uitgestraald door de pluim boven het smeltbad (figuur 3.3). Dit licht is een maat voor de kwaliteit van de las die geproduceerd wordt. In een kalibratiefase wordt het lichtsignaal van een aantal goede lassen gemeten. Tijdens de productie wordt het licht van de pluim vergeleken met deze kalibratiesignalen. Lasfouten zoals onvolledige laspenetratie en zinkdampexplosies konden zo tijdens het lassen geconstateerd worden.

De totale lastijd van de achterlichtdrager (totale laslengte 325 mm) bedraagt 7,5 s. Samen met de tijd nodig voor ijlängen, opspannen en uitnemen van het product, komt de totale cyclustijd van de achterlichtdrager op circa 25 s (dit is ruim $2\frac{1}{2}$ keer korter dan de cyclustijd van de conventionele methode op basis van weerstandpuntlassen). De bezettingsgraad van de laserbron is overigens hierbij zo laag, dat de bron gedeeld zou kunnen worden met nog een tweede bewerkingsstation, waarop dezelfde of een andere bewerking plaats kan vinden. Bovendien is voor het laserlassen slechts één operator nodig i.p.v. twee. Samen met de korte cyclustijd kan

daarom de investering (circa € 750.000) binnen één jaar worden terugverdiend.

7.2 Lassen van een paneel met een diodelaser

In deze paragraaf wordt het laserlassen van een paneel uit een waferstepper uiteengezet (zie figuur 7.4).



figuur 7.4 Paneel uit een waferstepper
(a) Het paneel bestaat uit 3 onderdelen van RVS. Het binnendeel heeft een dikte van 1,5 mm, het buitendeel 0,8 mm;
(b) Samengesteld paneel

Bij de huidige productiemethode wordt achtereenvolgens gebruikgemaakt van: lasersnijden, zetten, hechten (handmatig, zonder mal), handmatig TIG-lassen (lassen hoeken buitendeel- stomplasmaad; fixeren binnendelen aan buitendeel door middel van twee proplassen per binnendeel) en tenslotte nabewerken (verwijderen verkleuring en overdikte). Het lassen en nabewerken duurt circa 16':15'' minuten en kost (incl. overhead) circa € 11 per paneel.

Er worden geen bijzondere mechanische eisen aan de verbinding gesteld. De onderdelen van het paneel moeten slechts ten opzichte van elkaar worden gefixeerd. Statisch en dynamisch wordt het paneel namelijk nauwelijks belast. Voor wat betreft het uiterlijk van de las worden wel hoge eisen gesteld. Zo mag het oppervlak niet verkleurd zijn, moet het lasuiterlijk glad en strak zijn. Bovendien mag de las niet uitsteken boven het productoppervlak. Enige ondersnijding is wel toegestaan.

Voor het laserlassen is gebruikgemaakt van een diodelaser (max. 3000 W, golflengtes 800 en 940 nm), omdat deze laser visueel aantrekkelijke lassen maakt op basis van geleidingslassen (zie hoofdstuk 3). Een lens met een brandpuntsafstand van $f=100$ mm werd ingezet. Bij een focuspositie van $z_f=0$ mm resulteert dit in een lasspot ter grootte van $0,9 \times 2$ mm² op het werkstukoppervlak. De laserbron, compleet met optiek en gasafscherming (argon, 20 l/min) werd aan een 6-assige knikarmrobot gemonteerd (zie figuur 7.5). De te lassen onderdelen werden door middel van een klem en aanslagen opgespannen op een spantafel.

De spleet tussen het buitendeel en het binnendeel (hoeklas zonder toevoegmateriaal, zie figuur 4.4) werd gesloten door de delen op elkaar te drukken en twee hechtlassen (puntlas, 1000 W, 0,5 s puls) op de rand van het product aan te brengen. Vervolgens is iedere stompe las onder zijwaartse druk gesloten en met behulp van een hechtlas gefixeerd (1000 W, 0,2 s puls).



figuur 7.5 Opstelling van een 6-assige knikarmrobot met daaraan de diodelaser

Stompe lasnaden zijn gelast met een vermogen van 600 W bij een lassnelheid van 10 mm/s. De hoeklassen (zonder toevoegmateriaal) zijn gelast met 1000 W en ook bij 100 mm/s (zie figuur 7.6).



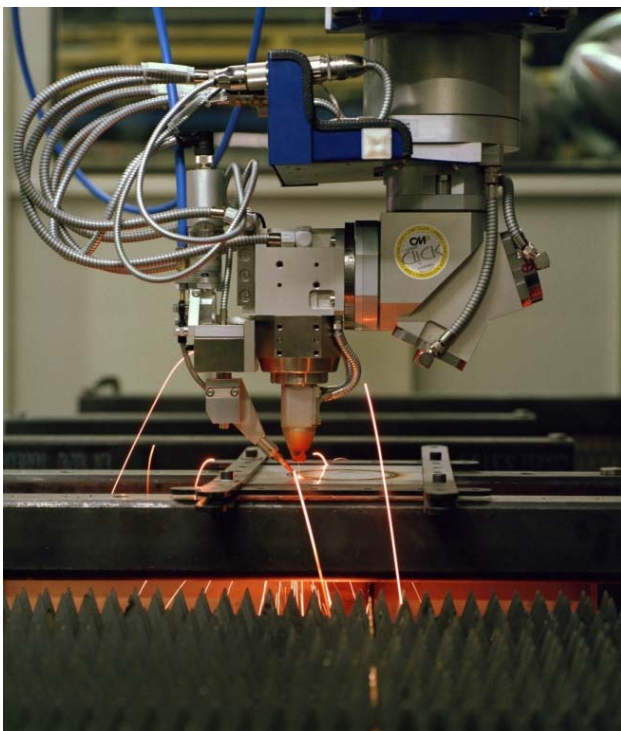
figuur 7.6 Hoeksegment van het gelaste paneel met daarin een stompe las en een hoeklas (zonder toevoegmateriaal)

Om er van verzekerd te zijn dat de las goed beschermd wordt tegen oxidatie, staat de bewerkingskop na het aanlopen van het begin van de las gedurende 1 seconde stil, zodat de gasstroom stabiel kan worden. Na afloop van het lassen blijft de bewerkingskop nog 2 seconden staan om de krater te beschermen tegen oxidatie.

Om de kostprijs te kunnen berekenen moet eerst het uurtarief van de laserlasinstallatie worden bepaald. De laserbron en de manipulator vormen de belangrijkste kostenposten van de investering. Uit de lasproeven blijkt, dat een laserbron met een vermogen van 1000 Watt voldoende is voor deze applicatie. Door de relatief lage lasnelheid is het mogelijk om gebruik te maken van een standaard lasrobot, waarbij de laser met een fiberkoppeling aan de robotflens gekoppeld is. Om de bezettingsgraad van de installatie te verhogen, kan het best worden gewerkt met twee bewerkingsplaatsen en twee malen op een draaitafel. Het laserlassen (waarbij geen nabewerking is vereist) neemt 2':19" minuten in beslag en resulteert, bij een uurtarief (van deze installatie) van € 90,75, in circa € 6 per paneel. Hierbij wordt uitgegaan van volledige bezetting in 1 ploegendienst. Dit is een besparing van 46% t.o.v. de conventionele bewerkingen. Met een laser is een aantal van 1000 stuks panelen binnen een week te lassen.

7.3 Laskop met draadtoevoer

Figuur 7.7 toont een laskop die met succes in de praktijk wordt gebruikt voor het lassen van plaatwerkproducten zoals frames, behuizingen, enz., opgespannen op een (lasergesneden) lasmal. De additionele draadtoevoer maakt het overbruggen van spleten en het lassen van verschillende materiaalcombinaties mogelijk. Voor een eenduidige positionering van de plaatdelen wordt gebruikgemaakt van uitstekende nokken, die in lasergesneden sleuven vallen. Voor de werkvoorbereiding wordt gebruikgemaakt van Toplas 3D software (off line programmeren). Dit verkleint de kans op botsingen met het product en de opspanning aanzienlijk.



figuur 7.7 Laskop met draadtoevoersysteem

8 Veiligheid

Zoals bij alle bewerkingsmachines moet ook bij laserinstallaties aandacht worden geschonken aan de veiligheid. Wanneer een complete laserinstallatie wordt aangeschaft zal in de meeste veiligheidsvoorzieningen reeds zijn voorzien. De gebruiker dient echter aandacht te besteden aan de volgende twee risico's:

- ▶ blootstelling aan laserstraling;
- ▶ blootstelling aan procesemissies (dampen, deeltjes).

Laserstraling

Laserbronnen en lasersystemen worden in vier risico-classes (1 t/m 4) ingedeeld. De indeling van een laser in een klasse is gebaseerd op de stralingschade die de laserbron bij het meest ongunstige gebruik kan veroorzaken (hoe hoger de klasse des te groter de schade). De betreffende laserklasse wordt door de fabrikant op het systeem aangegeven, of moet anders door de verantwoordelijke leiding worden vastgesteld. Hoogvermogen lasers voor het lassen van metalen vallen altijd in de hoogste gevarenklasse (klasse 4). Gevaar bestaat niet alleen bij het direct kijken in de laserbundel, maar ook nadat de bundel gereflecteerd is op bijvoorbeeld het smeltbad bij het laserlassen, of een verkeerd gepositioneerd product of op een opspangereedschap. Voldoende veiligheid wordt in alle gevallen geboden door een 'lichtdichte' afscherming, waarbinnen zich geen gebruiker bevindt tijdens de bewerking. Het een en ander is vastgelegd in de normen: NEN-EN 10825 [4], NEN-EN 12626 [5], en NEN-EN 12254 [6].

Procesemissies (dampen en deeltjes)

Bij metaalbewerkingen met lasers kunnen materiaalampen en stofdeeltjes vrijkomen die schadelijk zijn en bij onvoldoende afscherming en afzuiging snel tot boven de toelaatbaarheidsgrens (MAC-waarde) uitkomen. Ook (schadelijke) proces- en beschermgassen dienen te worden afgezogen, wanneer deze in grote hoeveelheden vrijkomen.

9 Economische aspecten

Een nadeel van het lassen met een laser, t.o.v. conventionele lastechnieken, is de relatief hoge investering voor een laserlasinstallatie. T.o.v. de conventionele technieken is de lassnelheid echter vele malen groter, zodat de investering snel kan worden terugverdiend. Daarnaast kan bij laserlassen vaak bespaard worden op de nabewerkingen van het product (slijpen, polijsten, richten). Zo blijkt een terugverdientijd van een investering van meer dan € 500.000 in een laserinstallatie in minder dan 1 jaar geen uitzondering.

De kosten van een laserlasinstallatie is opgebouwd uit *vaste* en *operationele* (of variabele) kosten. De vaste kosten, op hun beurt, bestaan uit investeringen in de benodigde apparatuur (laserbron, manipulator, enz.) en de zogenaamde *never*investeringen. Deze *never*investeringen hebben betrekking op de organisatie en de productie van een bedrijf. De voorlichtingspublicatie VM 121 "Hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen" [1] gaat dieper in op deze (neven)investeringen. Hier wordt volstaan met tabel 9.1 waarin de investeringskosten van een complete installatie voor diverse typen en vermogens worden aangegeven.

tabel 9.1 Prijsindicaties (2006) in Euro's van de verschillende typen lasers voor verschillende vermogens

type laser	vermogen [W]	investeringskosten (incl. koeler) [$\times 1.000$ €]
CO ₂ -laser diffusiegekoeld/slab	1000	90 - 130
	2000	130 - 170
	4000	225 - 270
	8000	350 - 410
cw Nd:YAG-laser lampengepompt	2000	220 - 240
	4000	400 - 450
cw Nd:YAG-laser diodepompt	2000	300 - 350
	4000	500 - 530
diodelaser direct	1000	75 - 100
	2000	100 - 150
	4000	200 - 225
diodelaser fiberkoppeling	1000	125 - 150
	2000	175 - 200
	4000	250 - 275
disc-laser	4000	380 - 400
	6000	510 - 530
fiber-laser	2000	210 - 230
	3000	290 - 310

De operationele (of variabele) kosten bestaan uit:

- loonkosten operator, incl. overheadkosten;
- stroomverbruik;
- gasverbruik;
- lasdraad (indien nodig);
- slijtdelen laserbron;
- slijtdelen installatie;
- gereedschapskosten.

De grootste kostenpost bij de operationele kosten zijn de loonkosten (incl. overhead) van de operator. Daar tegenover staat dat bij laserbewerkingen vaak bespaard kan worden op de nabewerkingen van het product. Er treden immers minder vervormingen op van de producten. Hierdoor kunnen er manuren gespaard worden. De post slijtdelen laserbron is sterk afhankelijk van het type laserbron. De CO₂-laser kent, behalve de lenzen, het uitkoppelenvenster (standtijd circa 3000 uur) en elementen van het koelsysteem, niet veel slijtdelen. Bij de diode-gepompte Nd:YAG-laser moeten de diodes om de circa 10.000 uur worden vervangen. Bij de lampen-gepompte Nd:YAG-laser moeten de lampen om de circa 1000 uur worden vervangen. Afhankelijk van het vermogen is het stroomverbruik van de Nd:YAG- en CO₂-lasers fors, vanwege het lage energetische rendement (3 en 10%) t.o.v. van de diodelaser (35%). Het gasverbruik is een kostenpost van vergelijkbare grootte als het stroomverbruik.

Gezien de hoge investeringskosten is het dus zaak het aantal uren dat de laser daadwerkelijk wordt gebruikt (bezettingsgraad) zo hoog mogelijk te houden. Om onvoorziene stilstand door onverwachte storingen te voorkomen, zal daarom onderhoud (vervangen slijtdelen) moeten worden ingepland. Daarnaast moet de lassnelheid zo hoog mogelijk worden gekozen, voor een snelle terugverdientijd. Om de bezettingsgraad van de laser zo hoog mogelijk te krijgen, kan worden gedacht aan het combineren van meerdere bewerkingen met één laserbron. Zo kan één laserbron worden gekoppeld aan twee robots, die om de beurt gebruikmaken van de bron (zie figuur 2.6). Men kan ook één laser inzetten voor meerdere bewerkingen bijvoorbeeld én lassen én snijden.

10 Probleemoplosser

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van oorzaken en oplossingen voor veel voorkomende lasdefecten. Lasdefecten kunnen worden ingedeeld in defecten die optreden bij voldoende penetratie van de las en defecten die optreden bij geen, of onvoldoende penetratie.

10.1 Lasdefecten bij voldoende laspenetratie

Lasdefect: Scheuren en poreusheid

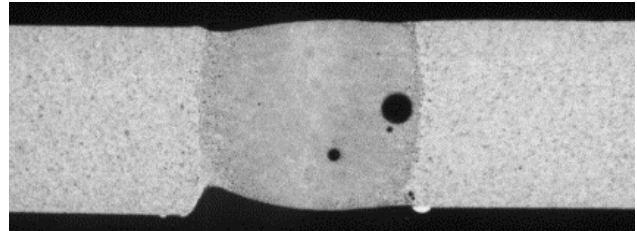
Scheuren en poreusheid (figuren 10.1 en 10.2) kunnen optreden als de te lassen onderdelen vervuild zijn of verontreinigingen bevatten.

Ga daarom het volgende na:

- Is het te lassen oppervlak schoon, droog en vrij van olie, roest, beschermende laag, water, oplosmiddelen, stof, reinigingsmiddelen, enz.?



figuur 10.1 Gescheurde hoeklas



figuur 10.2 Poreuze las in aluminium (1 mm)

- Is het niveau verontreinigingen (onzuiverheid) van het materiaal ongebruikelijk hoog? Een hoge graad van verontreinigingen zal resulteren in poreusheid en lasspatten, in het bijzonder bij aluminium. Dit probleem treedt dikwijls op bij een nieuwe batch, ogenschijnlijk van hetzelfde materiaal;
- Is het percentage koolstof in het staal meer dan 0,3%? Staalsoorten met meer koolstof hebben de neiging tot scheurvorming.

Defect: Oxidatie en/of verkleuring

Gesmolten metaal zal oxideren en/of verkleuren wanneer het wordt blootgesteld aan zuurstof (uit de omgeving). Oxidatie en/of verkleuring treedt dus op als de gasafscherming van het smeltbad (en het oppervlak er vlak achter) onvoldoende is. Controleer daarom de volgende punten:

- Staan alle relevante gaskleppen open?
- Wordt het juiste gastype met de juiste zuiverheid gebruikt?
- Is het gasdebiet te laag (beschermgas op?) of te hoog?
- Is de gasnozzle goed uitgelijnd op het smeltbad met de juiste stand-off?
- Is de gasnozzle vrij van lasspatten en andere vervuiling?
- Wordt de gasstroming verstoort door klemmen en ander opspangereedschap?

Defect: ondersnijding

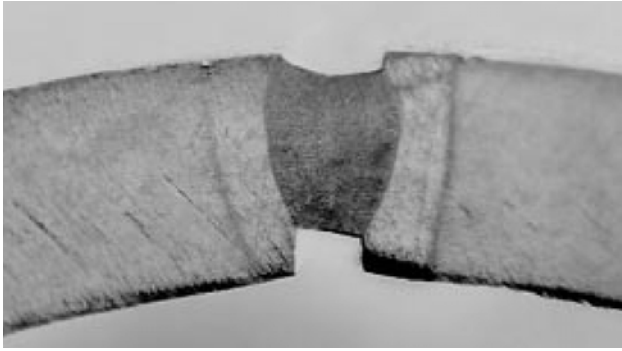
Ondersnijding (zie hoofdstuk 5 en figuur 10.3) treedt onder andere op als er onvoldoende materiaal is om de lasnaad te vullen. Dit is het geval als de uitlijning van de te lassen onderdelen t.o.v. elkaar onvoldoende is (zie § 4.3).

Ondersnijding kan ook optreden als het debiet van het beschermgas te hoog is, of als het laservermogen te hoog is. Controleer daarom de volgende punten:

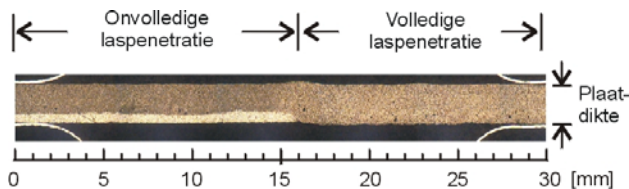
- Valt de spleetbreedte Δs en hoogteverschil Δh tussen de onderdelen binnen de toleranties (zie figuren 4.4 en 4.5, en tabel 4.2)?
- Is de lasmal schoon en adequaat? Is de lasmal vrij van (las)spatten? Is de klemkracht van de lasmal voldoende?
- Is het debiet van het beschermgas te hoog? Een te hoog debiet (en dus te hoge druk) van het beschermgas kan namelijk het gesmolten metaal uit het smeltbad 'blazen' en ondersnijding veroorzaken;
- Is het piekvermogen per puls te hoog? Ondersnijding kan namelijk ook optreden als het piekvermogen te hoog is.

10.2 Lasdefecten bij onvoldoende laspenetratie

Onvoldoende (of gebrek aan) laspenetratie kan over de gehele lengte van de las of incidenteel optreden (zie figuur 10.4).



figuur 10.3 Ondersnijding in aluminium (1 mm)



figuur 10.4 Langsdoorsnede van een las waarin incidenteel onvoldoende penetratie van de las voorkomt

10.2.1 *Onvoldoende laspenetratie over de gehele lengte van de las*

Algemene controlepunten

- ▶ Is het laservermogen (of pulsvermogen bij puntlassen) voldoende hoog, bij de gegeven lassnelheid, om voldoende laspenetratie te verkrijgen?
- ▶ Is de focuspositie (zie § 4.2) juist/optimaal?
- ▶ Is de optiek en/of het beschermglaasje onbeschadigd (geen krassen en/of putjes) en vrij van vuil (spatten, roet)? Verbeter de gasbescherming van de optiek als het probleem zich blijft herhalen, in het bijzonder bij gebruik van lenzen met korte brandpuntsafstand.
- ▶ Is er rekening gehouden met vermogensverlies t.g.v. het bundeltransport middels spiegels en/of glasfiber (zie § 2.3)? Zo niet, meet het laservermogen dat de focusseeroptiek verlaat en vergelijk dat met het ingestelde laservermogen. Compenseer het verschil door het laservermogen hoger in te stellen.

Controlepunten in het geval van bundeltransport m.b.v. spiegels en het gebruik van lenzen

- ▶ Komen de bundelafmetingen en energieverdeling van de laserbundel, vlak voordat deze het focusseeroptiek ingaat, overeen met de verwachte afmetingen en verdeling? Demonteer daartoe de focusseeroptiek en maak een *mode burn*?
- ▶ Zijn alle spiegels in het bundelpad (figuur 2.6) schoon? Controleer ook (het debiet van) de gasbescherming (incl. filters) van deze spiegels (indien aanwezig).
- ▶ Heeft de laserbundel 'vrij baan' van laserbron tot aan de focusseeroptiek? D.w.z. raakt de laserbundel nergens de bundelafscherming? Dit kan worden herkend aan een onvoldedige *mode burn* of een *mode burn* met interferentiepatronen.
- ▶ Is de richtlaser (*pilot laser*) uitgelijnd met de laserbundel? Zijn beide bundels gecentreerd t.o.v. van de spiegels van het bundeltransportsysteem en de focusseeroptiek? Controle kan plaatsvinden d.m.v. *mode burn* van de ongefocuseerde bundel, met een in het bundelpad geplaatst richtkruis (bijvoorbeeld van koperdraad) waarop de richtlaser is uitgelijnd.
- ▶ Indien de laspenetratie langzaam is afgenomen (gedurende een aantal dagen of weken) kan er thermische focussering opgetreden zijn van de lens. Dit kan voorkomen wanneer de standtijd van de lens (bijna) is overschreden en uit zich in een schijnbare

verkorting van de brandpuntsafstand. Demonteer ter controle de focusseeroptiek, maak een *mode burn* en vergelijk deze met de verwachte (afmetingen van de) *mode burn*.

Controlepunten in het geval van bundeltransport m.b.v. glasfibers

- ▶ Wordt het laservermogen goed ingekoppeld in de glasfiber (zie figuur 2.7)? Vergelijk daartoe het ingestelde laservermogen met het (gemeten) vermogen dat de fiber verlaat. Dit laatste mag niet lager zijn dan circa 90% van het ingestelde laservermogen.
- ▶ Controleer of de convergerende laserbundel die de optiek verlaat (figuur 2.8) wordt belemmerd door obstakels (lasmal, klemmen, gasnozzle) of delen van het product zelf (een flens of een wand)? Dit kan worden nagegaan door een stuk tape op het 'verdachte' obstakel te plakken en te inspecteren op brand(plekken) na het maken van een las.

10.2.2 *Incidenteel gebrek of onvoldoende laspenetratie*

Algemene controlepunten

- ▶ Voldoet de lasnaad over de gehele lengte van de las aan de toleranties (zie figuren 4.4 en 4.5, en tabel 4.2)? Controleer daartoe de lasmal op (plaatselijke) slijtage, onvoldoende klemkracht of vervuiling. Controleer ook of de kanten van de lasnaad over de gehele lengte aan de toleranties voldoen.
- ▶ Neemt de spleetbreedte toe tot meer dan de tolerantie Δs over de lengte van de las? Thermisch vervormen van de las (en dus het openstaan van de lasnaad) kan worden voorkomen door de producten te voorzien van (laser)hechtlassen (puntlassen) alvorens een continue las wordt gelegd. Een andere oplossing is het gebruik van een gekoelde lasmal.

Controlepunten t.a.v. het bundeltransport

- ▶ Is de gasbescherming (indien aanwezig) in het bundeltransportsysteem schoon en droog? Controleer ook de filters;
- ▶ Indien de laspenetratie de eerste millimeters voldoende is en daarna onvoldoende, kan er thermische focussering opgetreden zijn (zie § 10.2.1).
- ▶ Is de koeling van het bundeltransportsysteem en de focusseeroptiek afdoende? De behuizing van de optiek en het koelwater mogen niet meer dan handwarm zijn.

11 *Literatuur en normen*

Deel 6 van de Europese standaard NEN-EN 1011 [7] 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 [8] zijn vergelijkbare procedures vastgelegd. De definitie van de kwaliteit van laserlassen (in aluminium en staal) is vastgelegd in de NEN-EN-ISO 13919 norm [3]. 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 [9]. In de voorlichtingpublicatie VM 121 "Hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen" [1] wordt nader op de mogelijkheden en beperkingen van lasers ingegaan, inclusief tabellen en figuren met procesinstellingen.

12 Referenties en bronvermelding

Referenties

- [1] Römer, G.R.B.E.; Hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen, VM121, Vereniging FME-CWM, Zoetermeer, 2002, aangepast in 2009.
- [2] Tech-Info-blad TI.99.08; IOP Metalen nr. 6.6: Laserlassen van beklede plaat. Vereniging FME-CWM, Zoetermeer, 1999.
- [3] NEN-EN-ISO13919: Lassen - Elektronenbundellassen en laserlasverbindingen - Richtlijn voor het vaststellen van kwaliteitsniveaus voor onvolkomenheden - Deel 1: Staal, Deel 2: Aluminium
- [4] NEN-EN 10825: Veiligheid van laserproducten - Apparatuurclassificatie, eisen en gebruikershandleiding.
- [5] NEN-EN 12626: Veiligheid van machines - Machines die gebruikmaken van lasers - Veiligheidseisen.
- [6] NEN-EN 12254: Afschermingen voor werkplekken met lasers - Veiligheidseisen en beproeving.
- [7] NEN-EN 1011-6 (ontw.): Welding. Recommendation for welding of metallic materials. Part 6: Laser beam processing.
- [8] NEN-EN-ISO 15609-4: Specification and approval of welding procedures for metallic materials - Welding procedure specification - Part 4: Laser beam welding.
- [9] NEN-EN-ISO 15616 (ontw.): Acceptance tests for CO₂-laser beam machines for welding and cutting.

Bronvermelding

- Rofin-Baasel Benelux: figuren 2.4, 4.1, 10.2 en 10.3
- Fraunhofer-Institut: figuur 3.3
- Hoek Loos: figuur 4.7
- Inalfa: figuren 7.1, 7.2 en 7.3
- TNO Industrie: figuren 7.4, 7.5 en 7.6
- CMF Group: figuur 7.7

Alle overige gegevens en figuren in deze praktijkaanbeveling zijn aangeleverd (of aangepast) door de Leerstoel Toegepaste Lasertechnologie van de Universiteit Twente te Enschede.

Auteur(s)

De eerste uitgave van deze praktijkaanbeveling is tot stand gekomen, middels een samenwerkingsverband van de Bond voor Materialenkennis, de Metaalunie, de vereniging FME-CWM en PMP, in het kader van een pionierproject getiteld "De toegevoegde waarde van hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen en kunststoffen voor de Nederlandse industrie".

De auteur, G.R.B.E. Römer (Universiteit Twente) werd ondersteund door een werkgroep bestaande uit: P. de Boer (TNO Industrie), P. Boers (FME), J. Dijk (Trumpf Laser Nederland), J. van Eijden (namens Syntens), W.G. Essers, P. ter Horst (Demar Laser), D.R.J. Lafèbre (Hoek Loos), J. Meijer (Universiteit Twente), J. OldeBenneker (NIMR), R. Pieters (NIMR) en P. Scheyvaerts (Rofin-Baasel Benelux).

In 2008/2009 is deze publicatie door P.F. Senster (TNO Industrie en Techniek) herzien en licht aangepast aan de huidige stand van de techniek.

Eindredactie P. Boers (Vereniging FME-CWM)

Technische informatie

Voor technisch inhoudelijke informatie over de in deze voorlichtingspublicatie behandelde onderwerpen kunt u zich richten tot de

Leerstoel Toegepaste Lasertechnologie van de Universiteit Twente:

Bezoekadres: Drienerlolaan 5,
7522 NB ENSCHEDE
Correspondentie-adres: Faculteit Construerende
Technische Wetenschappen,
Postbus 217,
7500 AE ENSCHEDE
Telefoon: (053) 489 2502
Fax: (053) 489 3631
Internet: <http://www.wa.ctw.utwente.nl>

Informatie over, en bestelling van VM-publicaties

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: <http://www.fme.nl>

© Vereniging FME-CWM/augustus 2009 - 2^e druk

Niets uit deze uitgave mag worden vervoelvoudigd 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
telefax 079 - 353 13 65
e-mail: info@fme.nl
internet: www.fme.nl