

II Metaalkundige aspecten

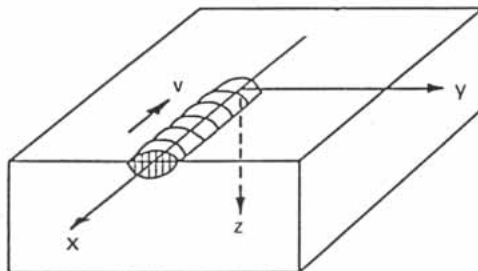
5

Metaalkundige aspecten van het booglassen

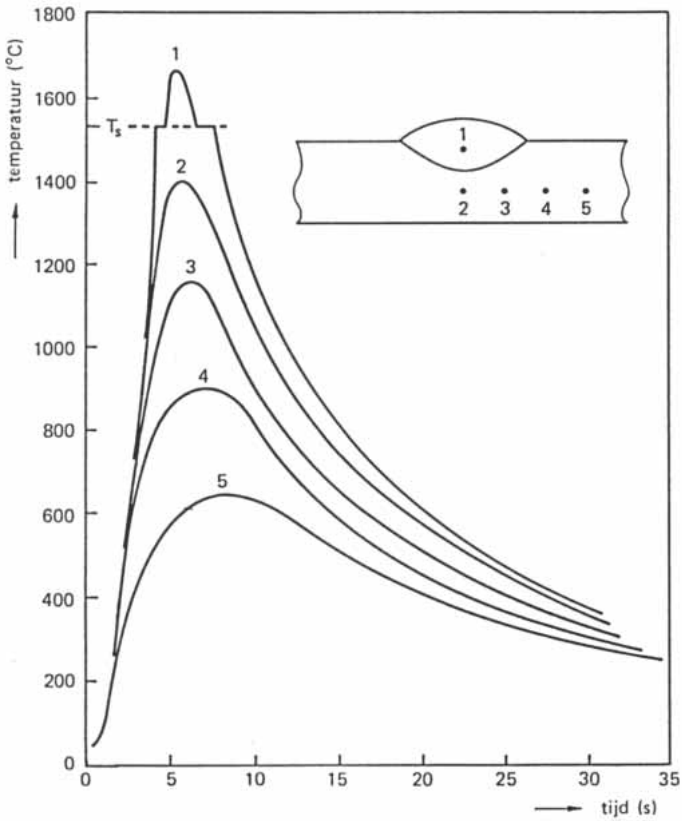
5.1. De temperatuurcyclus

Bij het lassen doorloopt het metaal een temperatuurcyclus, waarbij het zeer snel wordt opgewarmd om daarna weer (wat langzamer) af te koelen. Tijdens deze temperatuurcyclus wordt een deel van het metaal (het lasmetaal) gesmolten, terwijl het ongesmolten metaal een maximale temperatuur bereikt die afhankelijk is van de plaats. De temperatuurcyclus die tijdens het lassen wordt doorlopen is van belang omdat de eigenschappen van het metaal er sterk door worden beïnvloed. Vooral de piektemperatuur (de maximale temperatuur die wordt bereikt) en de afkoelsnelheid spelen een belangrijke rol.

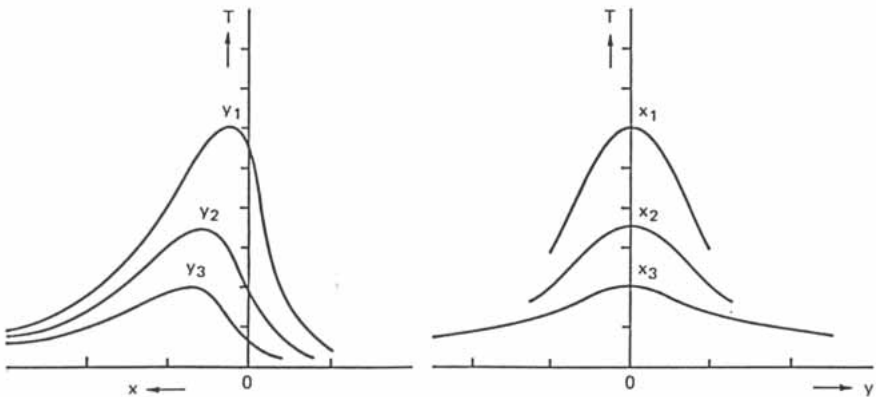
Als uitgangspunt voor een nadere beschouwing van de temperatuurcyclus tijdens het lassen wordt het eenvoudige geval van een stalen plaat genomen, waarop met behulp van het booglasproces een lasrups wordt aangebracht. De situatie is schematisch weergegeven in figuur 5.1. De temperatuur in de plaat is een functie van tijd en plaats en de temperatuurverdeling kan derhalve op verschillende manieren worden weergegeven. Ter illustratie wordt in figuur 5.2 de temperatuur gegeven als functie van tijd voor enkele plaatsen in de plaat, terwijl in figuur 5.3 de temperatuur wordt gegeven als functie van de x- en y-coördinaten op een



Figuur 5.1. Schematische voorstelling van het aanbrengen van een lasrups op een stalen plaat.



Figuur 5.2. De temperatuur als functie van de tijd voor enkele plaatsen in de plaat (T_s is de smelttemperatuur).



Figuur 5.3. De temperatuur als functie van de x - en y -coördinaten op een bepaald tijdstip.

bepaald tijdstip. Voorts zijn in figuur 5.4 isothermen in het oppervlak van de plaat en in een dwarsdoorsnede geschetst.

De temperatuurverdeling in de plaat tijdens het lassen kan worden berekend met behulp van de wet van behoud van energie. Deze luidt voor het onderhavige geval:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) - \rho c v \cdot \nabla T + q \quad (5.1)$$

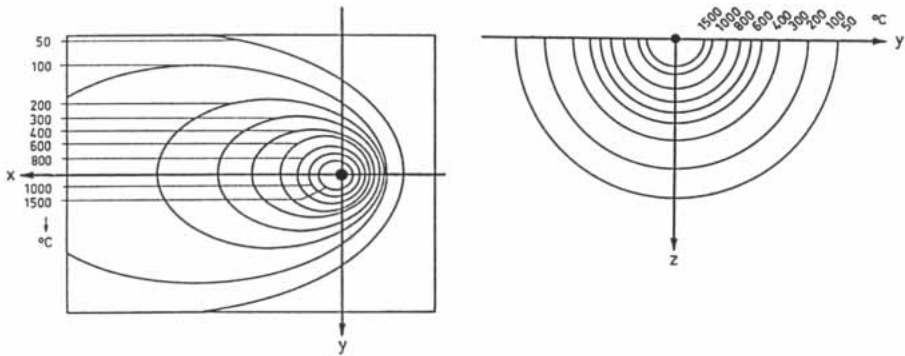
Voor de betekenis van de symbolen in deze en volgende vergelijkingen wordt verwezen naar tabel 5.1.

Tabel 5.1. Betekenis van de gebruikte symbolen.

Symbool	Betekenis
x, y, z	coördinaten van de plaats
$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$	afstand tot boog
$r = \sqrt{y^2 + z^2}$	afstand tot hart van de las
t	tijd
$T(t,r)$	temperatuur als functie van tijd en plaats
T_0	begintemperatuur van de plaat
T_p	piektemperatuur
k	warmtegeleidingscoëfficiënt
c	soortelijke warmte
ρ	dichtheid
$\alpha = k/c\rho$	temperatuurvereffeningscoëfficiënt
q	geproduceerde warmte per volume-eenheid
K_0	Bessel functie van de 2 ^e soort en de 0 ^e orde
V	boogspanning
I	lasstroom
η_p	procesrendement
v	voortloopsnelheid
$W = \eta_p VI/v$	warmte-inbreng
d	plaatdikte

In het geval van een meebewegend coördinatensysteem (de oorsprong beweegt mee met de boog) geldt dat $\partial T/\partial t = 0$ (stationaire toestand) en krijgt vergelijking (5.1) de vorm:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) - \rho c v \frac{\partial T}{\partial x} + q = 0 \quad (5.2)$$



Figuur 5.4. Isothermen in het oppervlak van de plaat en in een dwarsdoorsnede.

Om het oplossen van deze vergelijking mogelijk te maken, worden de volgende vereenvoudigingen ingevoerd:

- de warmtebron is puntvormig en heeft een oneindig hoge temperatuur;
- de fysische eigenschappen van het metaal zijn onafhankelijk van de temperatuur;
- er vindt geen warmte-uitwisseling plaats tussen plaat en omgeving;
- de plaat is vlak en heeft zeer grote afmetingen;
- er vindt geen smelten en stollen plaats.

Met inachtneming van deze vereenvoudigingen kan vergelijking (5.2) nu voor het gebied buiten de warmtebron ($q = 0$) worden geschreven als:

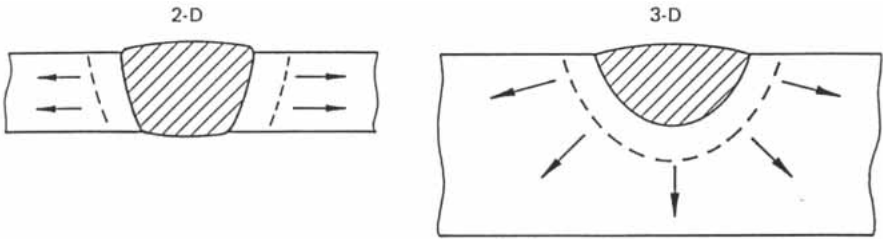
$$\frac{k}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - v \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \tag{5.3}$$

Vergelijking (5.3) kan nu opgelost worden voor het geval van twee-dimensionale warmtestroming (2-D) en voor het geval van drie-dimensionale warmtestroming (3-D). Deze twee gevallen zijn schematisch weergegeven in figuur 5.5. De oplossingen kunnen geschreven worden als:

$$2\text{-D:} \quad T - T_0 = \frac{Wv}{2\pi kd} K_0 \left(\frac{vR}{2\alpha} \right) \exp \left(\frac{vx}{2\alpha} \right) \tag{5.4a}$$

$$3\text{-D:} \quad T - T_0 = \frac{Wv}{2\pi kR} \exp \left(-\frac{v(R-x)}{2\alpha} \right) \tag{5.4b}$$

Uit de twee voorgaande vergelijkingen kan nu de temperatuurcyclus, die een bepaald volume-element van het materiaal ondergaat, berekend worden. Bij benadering geldt:



Figuur 5.5. Schematische voorstelling van twee-dimensionale (2-D) en drie-dimensionale (3-D) warmtestroming.

$$2\text{-D:} \quad T(t, r) - T_0 = \frac{W}{2dk} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi t}} \exp\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (5.5a)$$

$$3\text{-D:} \quad T(t, r) - T_0 = \frac{W}{2\pi kt} \exp\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (5.5b)$$

Een uitdrukking voor de piektemperatuur $T_p(r)$ kan verkregen worden door de vergelijkingen (5.5a) en (5.5b) te differentiëren naar t en het differentiaalquotient gelijk te stellen aan nul. Er volgt dan:

$$2\text{-D:} \quad T_p(r) - T_0 = \sqrt{\frac{1}{2\pi e}} \cdot \frac{\alpha W}{dkr} \quad (5.6a)$$

$$3\text{-D:} \quad T_p(r) - T_0 = \frac{2\alpha W}{\pi ekr^2} \quad (5.6b)$$

Uit de vergelijkingen (5.6a) en (5.6b) blijkt, dat de piektemperatuur met groter wordende afstand tot de las sneller afneemt bij drie-dimensionale warmtestroming (evenredig met $1/r^2$), dan bij twee-dimensionale warmtestroming (evenredig met $1/r$). Als gevolg hiervan zal de warmte-beïnvloede zone in het geval van een dikke plaat smaller zijn dan in het geval van een dunne plaat.

Voorts blijkt dat in beide gevallen de piektemperatuur (en daarmee de breedte van de warmte-beïnvloede zone) evenredig toeneemt met de warmte-inbreng.

Voor het verloop van de afkoelsnelheid $\partial T/\partial t$ bestaan slechts voor het hart van de las ($r = 0$) eenvoudige formules; deze formules zijn echter bij benadering ook geldig voor de warmte-beïnvloede zone:

$$2\text{-D:} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{2\pi k^2 d^2 (T - T_0)^3}{\alpha W^2} \quad (5.7a)$$

$$3\text{-D:} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{2\pi k (T - T_0)^2}{W} \quad (5.7b)$$

Uit de vergelijkingen (5.7a) en (5.7b) blijkt dat de invloed van voorwarmen (T_0) op de afkoelsnelheid aanzienlijk is, vooral in het geval van twee-dimensionale warmtestroming.

Een belangrijke grootte bij de beschrijving van de structuurveranderingen die bij het lassen van ongelegeerde en laaggelegeerde staalsoorten optreden, is de *afkoeltijd* $\Delta t_{8/5}$ tussen 800 °C en 500 °C. Gebleken is dat deze tijd nagenoeg constant is voor die plaatsen van de warmte-beïnvloede zone die verhit geweest zijn boven 900 °C. De waarden van $\Delta t_{8/5}$ zijn te berekenen uit de vergelijkingen (5.7a) en (5.7b) en kunnen worden geschreven als:

$$2\text{-D:} \quad \Delta t_{8/5} = \frac{\alpha W^2}{4\pi k^2 d^2} \left\{ \left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right\} \quad (5.8a)$$

$$3\text{-D:} \quad \Delta t_{8/5} = \frac{W}{2\pi k} \left\{ \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right\} \quad (5.8a)$$

Onderscheid tussen situaties waarin sprake is van twee-dimensionale warmtestroming en situaties waarin sprake is van drie-dimensionale warmtestroming kan worden gemaakt door het invoeren van de zogenaamde kritische plaatdikte d_{kr} . Deze kan worden verkregen door $\Delta t_{8/5}$ voor beide gevallen aan elkaar gelijk te stellen. Dit leidt dan tot:

$$d_{kr} = \sqrt{\frac{\alpha W}{2k} \left\{ \frac{1}{500 - T_0} + \frac{1}{800 - T_0} \right\}} \quad (5.9)$$

Opgemerkt moet worden dat de hierboven gegeven formules in verband met de onderstellingen die zijn gedaan, slechts een benaderend karakter hebben. Voor praktijksituaties zijn ze echter in het algemeen goed bruikbaar.

Wanneer een nauwkeuriger beschrijving van de temperatuurecyclus vereist is kan gebruik gemaakt worden van numerieke berekeningsmethoden (bijvoorbeeld de Eindige Elementen Methode).

5.2. Het lasbad

Tijdens het booglassen wordt onder invloed van de warmte van de boog een smeltbad (lasbad) gevormd. Het lasbad bestaat bij gebruik van een niet-afsmeltende elektrode uit gesmolten moedermateriaal (werkstukmateriaal) en bij gebruik van een afsmeltende elektrode uit een mengsel van gesmolten moedermateriaal en gesmolten elektrodemateriaal.

De opmenging O is gedefinieerd als:

$$O = \frac{\text{gewicht gesmolten moedermateriaal}}{\text{totaal gewicht gesmolten materiaal}} \times 100\% \quad (5.10)$$

De waarde van O is verschillend voor de verschillende varianten van het booglasproces en hangt voorts af van de lasparameters.

In het lasbad vinden verschillende fysische en chemische processen plaats. Vanwege de relatief korte ‘levensduur’ van het lasbad worden evenwichtssituaties echter meestal niet bereikt.

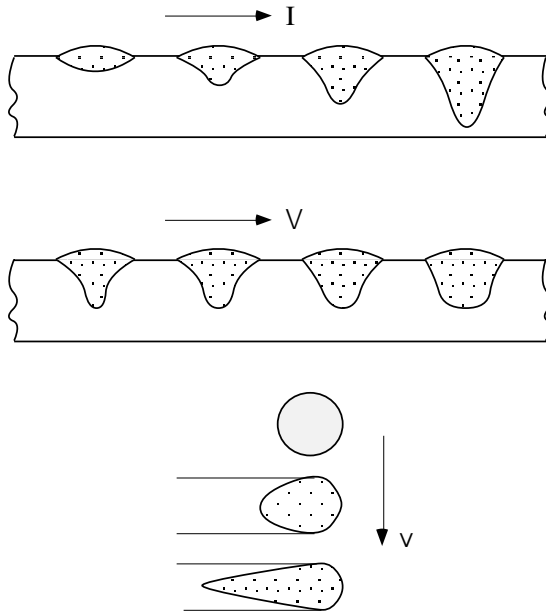
De vorm en de afmetingen van het lasbad bepalen voor een belangrijk deel de structuur die bij het stollen ontstaat (zie paragraaf 5.5) en hangen in sterke mate af van de lasparameters. Vooral de lasstroom, de boogspanning en de voortloopsnelheid spelen in dit opzicht een belangrijke rol. Algemeen geldt voor de invloed van de lasstroom, de boogspanning en de voortloopsnelheid het volgende.

- Bij toenemende lasstroom (intensiteit van de warmtebron) neemt de penetratiediepte toe, terwijl de lengte en breedte van het lasbad nauwelijks veranderen (zie figuur 5.6a).
- Bij toenemende boogspanning (booglengte) nemen de lengte en breedte (oppervlak) van het lasbad toe, terwijl de penetratiediepte nauwelijks verandert (zie figuur 5.6b).
- Bij toenemende voortloopsnelheid wordt het lasbad langgerechter (langer, smaller en ondieper): in bovenaanzicht gaat de vorm van het lasbad geleidelijk over van een cirkel (voortloopsnelheid 0) via een ellips naar een druppelvorm (zie figuur 5.6c).

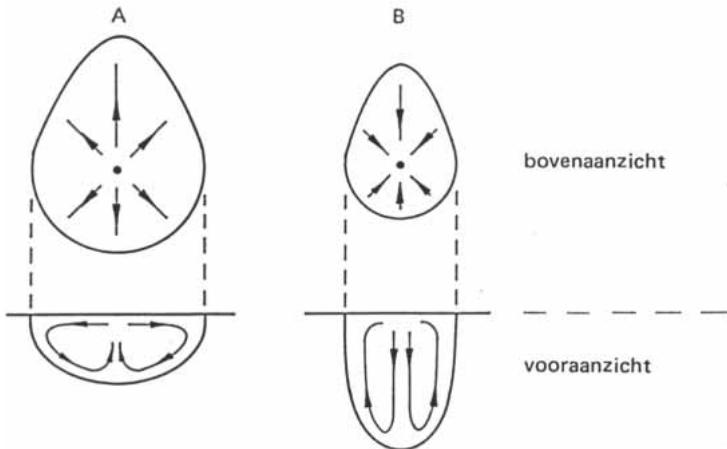
Ook stromingen kunnen de vorm en de afmetingen van het lasbad beïnvloeden. Het blijkt dat er globaal gesproken twee typen stromingen in het lasbad kunnen voorkomen (figuur 5.7):

- een radiaal naar buiten gerichte stroming (type A);
- een naar beneden gerichte stroming (type B).

Het eerste type leidt tot een relatief breed en ondiep lasbad, het tweede type tot een relatief nauw en diep lasbad.



Figuur 5.6. Vormverandering van het lasbad bij a) toenemende lasstroom (dwarsdoorsnede), b) toenemende boogspanning (dwarsdoorsnede) en c) toenemende voortloopsnelheid (bovenaanzicht).



Figuur 5.7. Mogelijke stromingen in het lasbad: type A, radiaal naar buiten gericht; type B, naar beneden gericht.

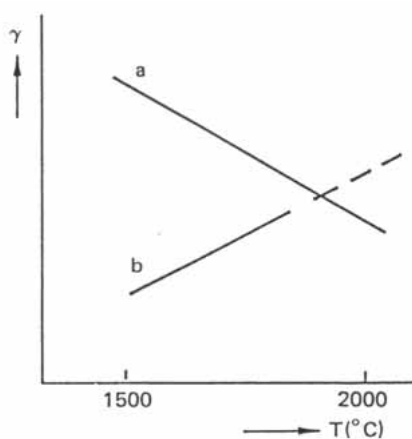
De optredende stromingen worden veroorzaakt door een combinatie van de volgende verschijnselen.

– *Elektromagnetische krachten.*

Elektromagnetische krachten kunnen in het lasbad optreden als gevolg van de divergentie van de elektrische stroom. Hierdoor ontstaan drukverschillen en deze resulteren in stroming (Lorentz stroming) van het type B.

– *Variatie in oppervlaktespanning.*

De oppervlaktetemperatuur van het lasbad zal in het algemeen maximaal zijn in het midden van het lasbad (daar waar de boog aangrijpt) en afnemen met toenemende afstand tot het midden. Voor zuivere metalen geldt als regel dat de oppervlaktespanning afneemt met toenemende temperatuur. Dit is aangegeven door lijn a in figuur 5.8. Als gevolg hiervan zal er in het lasbad een stroming (Marangoni stroming) ontstaan van het type A.



Figuur 5.8. De oppervlaktespanning als functie van de temperatuur voor een ijzerlegering a) zonder en b) met oppervlakte-actieve elementen.

Het blijkt dat in bepaalde gevallen (bijvoorbeeld in het geval van ijzerlegeringen waaraan oppervlakte-actieve elementen zoals zwavel, selenium en zuurstof zijn toegevoegd) de oppervlaktespanning toeneemt (in plaats van afneemt) met toenemende temperatuur (zie lijn b in figuur 5.8). In deze gevallen ontstaat Marangoni stroming van het type B.

– *Variatie in dichtheid.*

Het vloeibare metaal aan de rand van het lasbad heeft in het algemeen de laagste temperatuur en als gevolg daarvan de grootste dichtheid. Hierdoor zal het vloeibare metaal de neiging hebben langs het stolfront naar beneden te zakken, hetgeen leidt tot stroming van het type A.

– *Plasmastroming.*

In de boog stroomt plasma van de elektrode in de richting van het lasbad (zie

paragraaf 1.3). Dit plasma stroomt vervolgens in radiale richting langs het oppervlak van het lasbad en veroorzaakt in het lasbad stroming van het type A.

– *Impuls van druppels.*

Bij het booglassen met afsmeltende elektrode zal materiaaltransport plaatsvinden van de elektrode naar het lasbad in de vorm van druppels. De impuls die de druppels aan het lasbad overdragen zal in het algemeen resulteren in turbulente stroming.

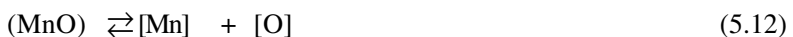
Van de bovengenoemde verschijnselen spelen bij het lassen met niet-afsmeltende elektrode de eerste twee verreweg de belangrijkste rol: bij lage stroomsterkte bepaalt Marangoni stroming het stromingsbeeld, boven een bepaalde stroomsterkte gaat Lorentz stroming overheersen. Aangenomen wordt dat bij het lassen met afsmeltende elektrode de impuls van de druppels het stromingsbeeld bepaalt.

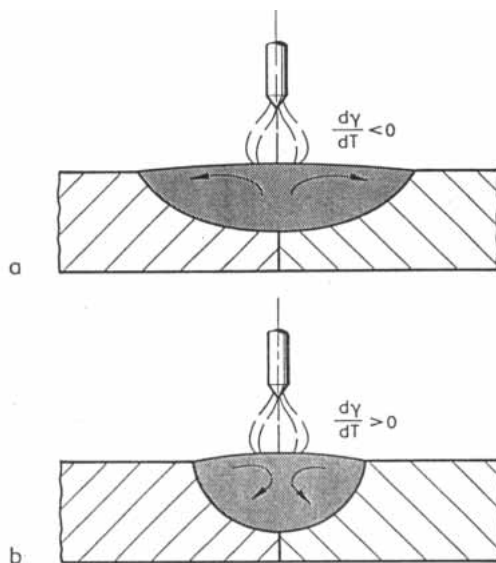
Wanneer Marangoni stroming overheerst moet rekening worden gehouden met omkering(en) van de stromingsrichting, veroorzaakt door variatie in de concentratie van oppervlakte-actieve elementen (zie boven). Als gevolg hiervan zullen ongewenste variaties in penetratiediepte (cast-to-cast variations) kunnen ontstaan, zoals schematisch is weergegeven in figuur 5.9. Deze variaties in penetratiediepte vormen een lastig probleem, vooral bij automatisch lassen waar de lasser niet kan corrigeren.

5.3. Slak-bad reacties

Wanneer bij het lassen slak een rol speelt zullen in het algemeen slak-bad reacties optreden. Dit is het geval bij lassen met beklede elektroden, bij het MIG/MAG-lassen met gevulde draad en bij het onder poeder lassen. De reacties treden op aan het grensvlak tussen vloeibare slak en vloeibaar metaal (druppel en lasbad) en zijn te vergelijken met de reacties die plaatsvinden bij de staalbereiding, zij het dat bij het lassen alles veel sneller en bij hogere temperatuur verloopt.

Ter illustratie worden hieronder de slak-bad reacties gegeven die optreden bij het lassen van ongelegeerd staal in aanwezigheid van slak, bestaande uit FeO, MnO en SiO₂. In de reactievergelijkingen geven de haken om de reagerende stoffen aan of deze stoffen zich in het [bad] in de (slak) of in de {gasvormige toestand} bevinden.

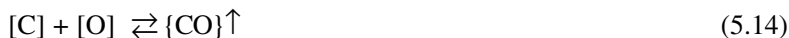




Figuur 5.9. Invloed van de stromingsrichting van het vloeibare lasmetaal op de geometrie van het lasbad a) naar buiten gerichte stroming (lage zwavel/zuurstof concentratie, $\frac{dy}{dT} < 0$); b) naar binnen gerichte stroming (hoge zwavel/zuurstof concentratie, $\frac{dy}{dT} > 0$).



In het vloeibare staal bevindt zich echter ook koolstof dat met de zuurstof reageert volgens



De laatste reactie leidt tot ontkoling, terwijl er tevens CO-poreusheid kan ontstaan. Omdat [O] voor alle vier evenwichten dezelfde waarde moet hebben, volgt dat [Mn], [Si], [C], [O] en {CO} eenduidig bepaald worden door (FeO), (MnO) en (SiO₂).

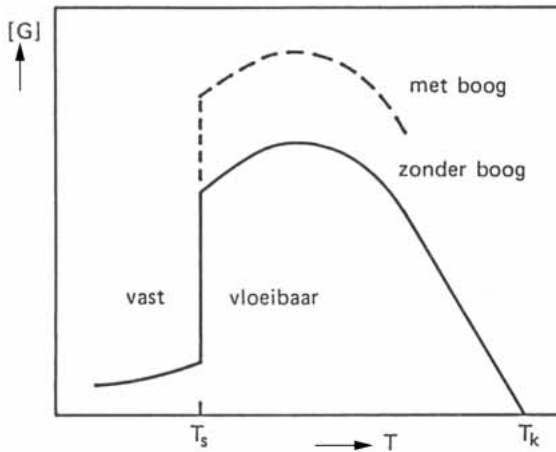
5.4. De opname van di-atomaire gassen

Ondanks strenge voorzorgsmaatregelen (beschermgas, slak) kunnen tijdens het lassen di-atomaire gassen (zoals waterstof, stikstof en zuurstof) uit de omgeving in het lasmetaal worden opgenomen. Deze opname is ongewenst omdat de opgenomen gassen de mechanische eigenschappen van het metaal in het algemeen sterk beïnvloeden, meestal in ongunstige zin.

Wanneer zich boven een metaaloppervlak een di-atomaire gas G_2 bevindt, zal aan dat oppervlak de dissociatiereactie



plaatsvinden. Een gedeelte van de atomen G zal in het metaal worden opgenomen. De concentratie van het atomaire gas dat onder evenwichtsomstandigheden in het metaal aanwezig blijft (de oplosbaarheid $[G]$) wordt bepaald door de temperatuur en door de partiële druk p_{G_2} van het moleculaire gas G_2 in contact met het metaal. In figuur 5.10 is het verloop van $[G]$ bij een bepaalde waarde van p_{G_2} schematisch weergegeven als functie van de temperatuur.



Figuur 5.10. De oplosbaarheid van een di-atomair gas G_2 in een metaal als functie van de temperatuur. T_s = smeltpunt, T_k = kookpunt.

Uit de figuur blijkt dat de oplosbaarheid

- in het vaste metaal toeneemt met de temperatuur;
- bij het smeltpunt sprongsgewijs verloopt;
- in het vloeibare metaal eerst toeneemt met de temperatuur en bij het naderen van het kookpunt weer afneemt.

Dit laatste houdt verband met het feit dat bij het naderen van het kookpunt de dampspanning van het metaal snel toeneemt, waardoor de waarde van p_{G_2} effectief wordt verkleind.

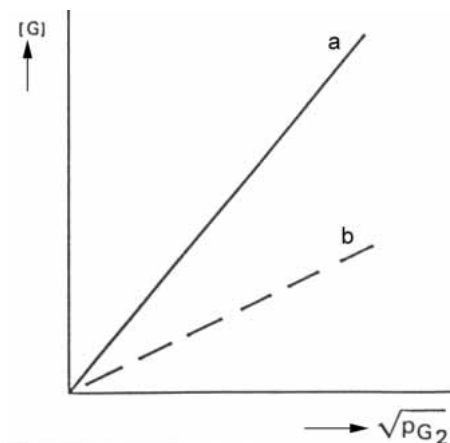
Het verband tussen p_{G_2} en $[G]$ wordt gegeven door de wet van Sieverts. Deze luidt

$$[G] = k\sqrt{p_{G_2}} \quad (5.16)$$

waarin k een evenredigheidsconstante voorstelt, die van de temperatuur afhangt. Bij hoge temperatuur gaat de dampdruk p_M van het metaal een rol spelen en moet vergelijking (5.16) vervangen worden door

$$[G] = k\sqrt{p_{G_2}(1 - p_M)} \quad (5.17)$$

In figuur 5.11 is het verband tussen $[G]$ en p_{G_2} schematisch weergegeven.

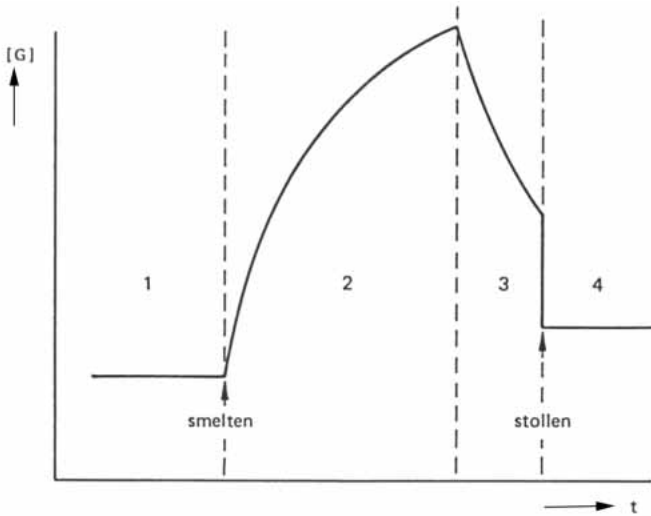


Figuur 5.11. De oplosbaarheid van een di-atomaire gas G_2 in een metaal als functie van de wortel uit de partiële druk p_{G_2} . a) zonder en b) met correctie voor de dampdruk van het metaal.

Uit experimenten blijkt dat onder condities van het booglassen (dat wil zeggen bij aanwezigheid van een boog) aanzienlijk meer gas in het vloeibare metaal kan oplossen dan overeenkomt met de wet van Sieverts (zie stippellijn in figuur 5.10). Dit effect wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de relatief hoge dissociatiegraad van het gas als gevolg van de hoge boogtemperatuur, waardoor de gasopname aan het metaaloppervlak wordt vergemakkelijkt.

Het verloop van de gasconcentratie in het lasmetaal tijdens het lassen is schematisch weergegeven in figuur 5.12. Uit deze figuur blijkt dat de gasopname uitsluitend plaatsvindt tijdens het verhitten van het vloeibare lasmetaal door de boog en dat een deel van het opgenomen gas weer verdwijnt bij afkoeling van het vloeibare lasmetaal (nadat de boog is gepasseerd) en bij het stollen.

Ten gevolge van het feit dat bij het afkoelen en stollen geen evenwicht wordt bereikt, zal niet al het opgenomen gas kunnen ontwijken en zal een deel ervan in het gestolde lasmetaal achterblijven in de vorm van een oververzadigde oplossing. Daarnaast kunnen ook gasbellen worden ingevroren, waardoor poriën in de vaste fase ontstaan.

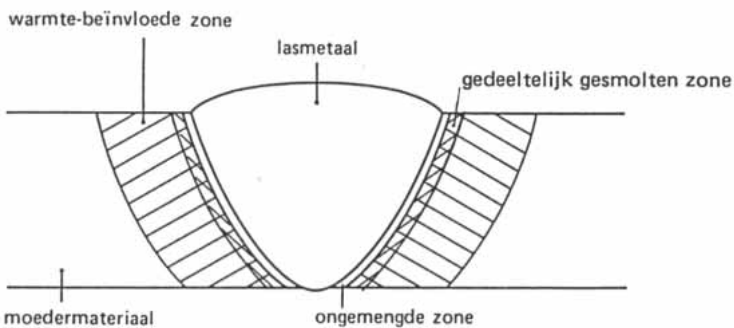


Figuur 5.12. Schematische weergave van het verloop van de gasconcentratie in het lasmetaal tijdens het lassen.

1) Verhitting van het vaste metaal door de boog; 2) verhitting van het vloeibare metaal door de boog; 3) afkoeling van het vloeibare metaal in afwezigheid van de boog 4) verdere afkoeling van het gestolde metaal.

5.5. De structuur van de lasverbinding

Wanneer de doorsnede van een lasverbinding nauwkeurig wordt bekeken blijkt dat er onderscheid gemaakt kan worden tussen verschillende gebieden, elk gekenmerkt door een eigen macro- en microstructuur. Deze gebieden kunnen met behulp van structuurgevoelige etsmiddelen zichtbaar worden gemaakt. In figuur 5.13 worden de verschillende gebieden schematisch weergegeven voor het geval van een enkelvoudige lasverbinding.



Figuur 5.13. Schematische weergave van de structuur van een enkelvoudige lasverbinding.

Lasmetaal

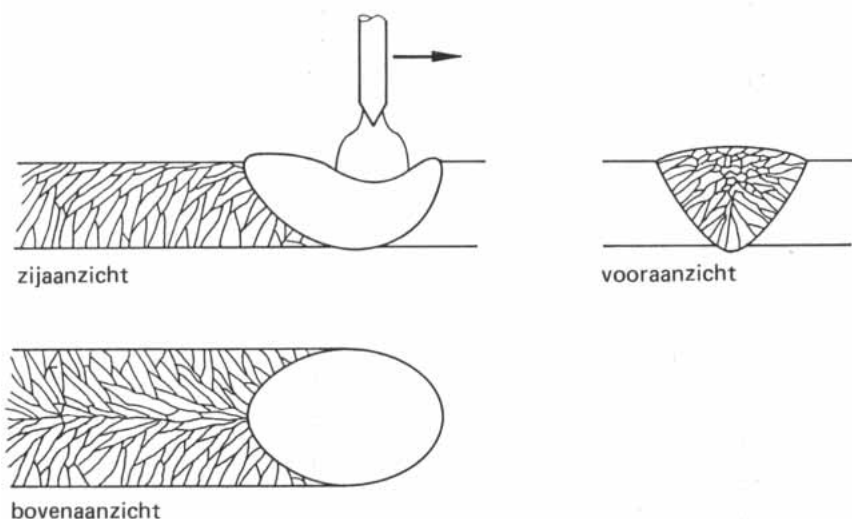
Onder lasmetaal wordt verstaan het metaal dat tijdens het lassen is gesmolten en vervolgens weer is gestold. Lasmetaal heeft dus de samenstelling van het moeder-materiaal in het geval dat bij het lassen geen toevoegmateriaal is gebruikt en heeft een gemengde samenstelling in het geval dat wel toevoegmateriaal is gebruikt (zie vergelijking (5.7)). Bij lasmetaal moet onderscheid worden gemaakt tussen de primaire, secundaire en tertiaire structuur.

De *primaire structuur* is de structuur, die direct na het stollen ontstaat. Bij het stollen spelen in het algemeen kiemvorming en kiemgroei beide een rol. In het geval van lassen is kiemvorming echter van ondergeschikt belang aangezien er altijd sprake is van een ideaal bevochtigde vaste fase.

De primaire structuur is een gietstructuur, bestaande uit stengelvormige kristallen, die wordt gekenmerkt door:

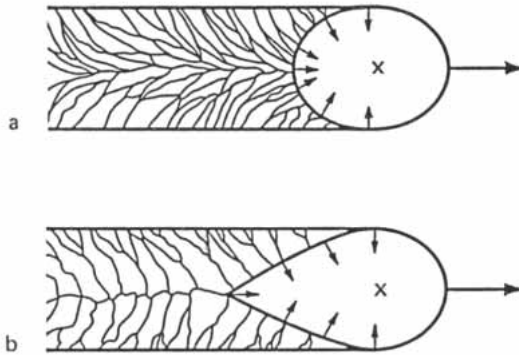
- een groeirichting evenwijdig aan de richting van de maximale temperatuur-gradiënt (maximale warmte-afvoer);
- epitaxiale groei, dat wil zeggen de stengelvormige kristallen hebben dezelfde kristallografische oriëntatie als de kristallen waarop ze zijn geënt;
- een voorkeur voor groei in de $\langle 100 \rangle$ richting, resulterend in textuur (competitieve groei).

In figuur 5.14 wordt de primaire structuur schematisch weergegeven in drie verschillende aanzichten (zijaanzicht, vooraanzicht, bovenaanzicht).



Figuur 5.14. De primaire structuur in drie verschillende aanzichten.

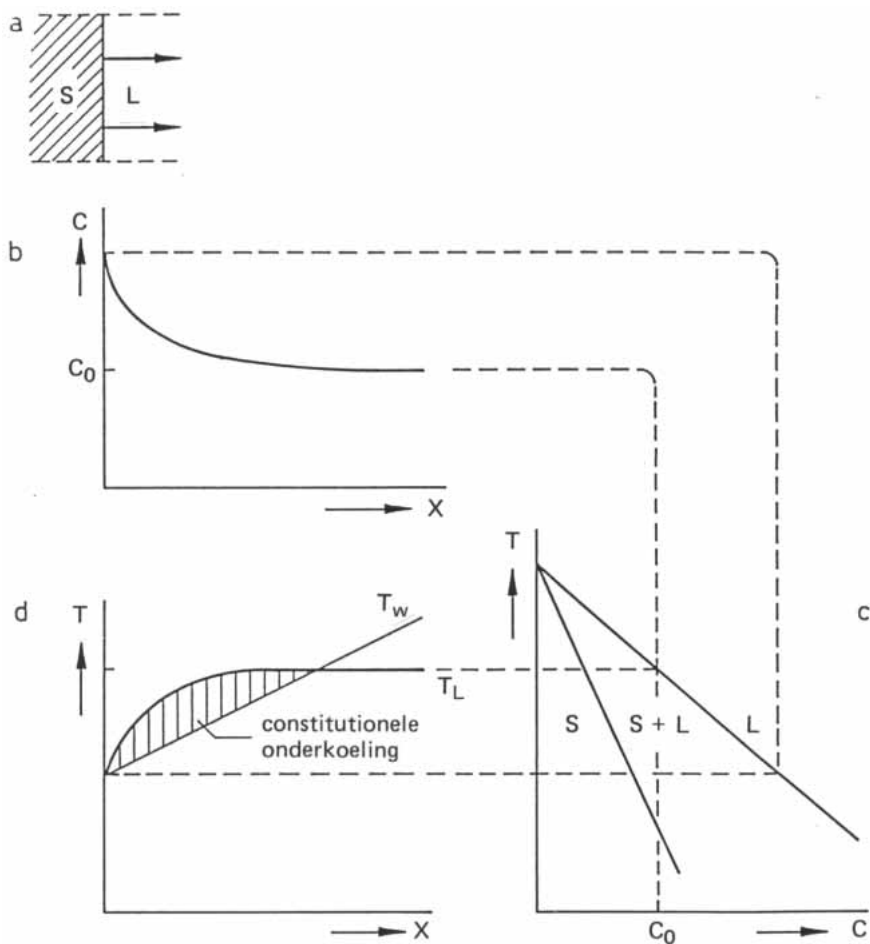
De invloed van de vorm van het lasbad (en dus van de voortloopsnelheid, zie paragraaf 5.2) op de primaire structuur wordt geïllustreerd in figuur 5.15. In deze figuur is de primaire structuur in bovenaanzicht weergegeven voor twee verschillende situaties, namelijk voor een ellipsvormig lasbad (relatief lage voortloopsnelheid) en voor een druppelvormig lasbad (relatief hoge voortloopsnelheid). Duidelijk blijkt, dat in het geval van een ellipsvormig lasbad een fijnere structuur en minder textuur ontstaat dan in het geval van een druppelvormig lasbad.



Figuur 5.15. Boven-aanzicht van de structuur (a) bij een ellipsvormig lasbad en (b) een druppelvormig lasbad.

Bij het lassen van legeringen zal er in het algemeen sprake zijn van een smelttraject/stoltraject in plaats van een smeltpunt/stolpunt. Dit brengt met zich mee dat constitutionele onderkoeling kan optreden, met mogelijke gevolgen voor de primaire stolstructuur. Dit zal aan de hand van figuur 5.16 worden verduidelijkt voor een legering, waarin een bepaald legeringselement met nominale concentratie c_0 is opgelost.

Tijdens het lassen van deze legering zal het stolfront zich met een bepaalde (eenparige) snelheid verplaatsen, zoals in figuur 5.16a is aangegeven. Omdat de oplosbaarheid van het legeringselement in het vloeibare metaal groter is dan in het vaste metaal, zal er vlak vóór het stolfront een verrijking van het legeringselement optreden. Deze verrijking zal worden tegengegaan door diffusie van het legeringselement in het vloeibare metaal (aangenomen is dat vloeistofstroming langs het stolfront te verwaarlozen is). Aldus ontstaat een stationaire toestand, waarbij de hoeveelheid legeringselement die per tijdseenheid bij de stolling door het vaste metaal aan het vloeibare metaal wordt afgegeven, gelijk is aan de hoeveelheid die per tijdseenheid door diffusie wordt afgevoerd. Het verloop van de concentratie van het legeringselement in stationaire toestand is schematisch weergegeven in figuur 5.16b.



Figuur 5.16. Constitutionele onderkoeling.

Het is duidelijk dat de verhoging van de concentratie van het legeringselement in het vloeibare metaal vlak vóór het stolfront gepaard moet gaan met een verlaging van de liquidustemperatuur T_L (vriespuntsverlaging). Het verloop van T_L vóór het stolfront kan worden verkregen door het combineren van de concentratiegradiënt (figuur 5.16b) en het toestandsdiagram (figuur 5.16c). Het resultaat is weergegeven in figuur 5.16d.

Zoals in figuur 5.16d te zien is, treedt constitutionele onderkoeling op wanneer de ware temperatuur T_w lager is dan de liquidustemperatuur T_L .

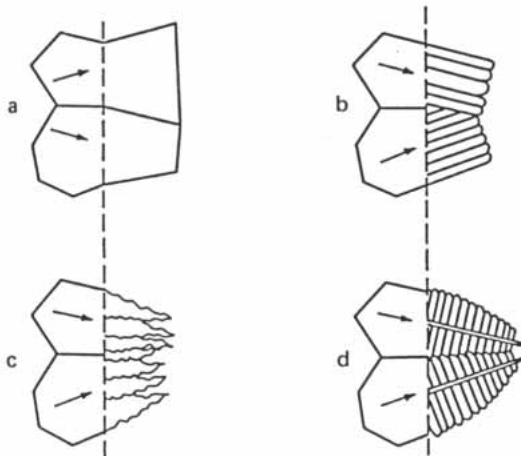
Uit figuur 5.16d blijkt voorts, dat constitutionele onderkoeling wordt bevorderd door:

- verhoging van de concentratiegradiënt in het vloeibare metaal vóór het stolfront,

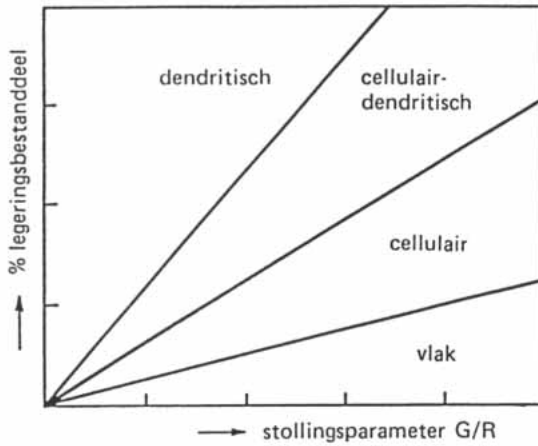
- dat wil zeggen door verhoging van de stolsnelheid;
 – verlaging van de temperatuurgradiënt in het vloeibare metaal.

Als gevolg van constitutionele onderkoeling kunnen binnen de primaire kristallen verschillende substructuren optreden. Een duidelijk onderscheid kan gemaakt worden tussen de vlakke, de cellulaire, de cellulair-dendritische en de dendritische substructuur. Deze substructuren zijn schematisch weergegeven in figuur 5.17. Welke substructuur in een bepaalde situatie ontstaat hangt in het bijzonder af van de chemische samenstelling en van de stolsnelheid. De stolsnelheid wordt meestal uitgedrukt in de vorm van de stollingsparameter G/R , waarin G de temperatuurgradiënt ter plaatse van het stolfront en R de verplaatsingssnelheid van het stolfront voorstelt.

De invloed van de chemische samenstelling en de stollingsparameter op de substructuur is schematisch weergegeven in figuur 5.18. Opgemerkt moet worden dat G en R beide plaatsafhankelijk zijn. In het algemeen is G minimaal in het



Figuur 5.17. De verschillende substructuren van lasmetaal: a) vlak; b) cellulair; c) cellulair-dendritisch; d) dendritisch.

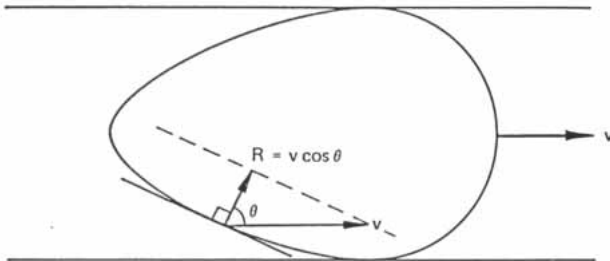


Figuur 5.18. Schematische voorstelling van de invloed van de chemische samenstelling en de stollingsparameter op de substructuur van lasmetaal.

midden van de las terwijl R daar maximaal is. Meer specifiek geldt voor R (zie figuur 5.19):

$$R = v \cos \theta \quad (5.18)$$

waarin v de voortloopsnelheid voorstelt en θ de hoek tussen de voortlooprichting en de stollingsrichting.



Figuur 5.19. De verplaatsingssnelheid R van het stolfront als functie van de plaats op het stolfront.

De *secundaire structuur* treedt op in metalen en legeringen die gekenmerkt worden door een fase-overgang. De secundaire structuur bestaat dus uit transformatieproducten. Door markering van de grenzen van de oorspronkelijke primaire kristallen blijft de primaire structuur vaak wel herkenbaar. Ferritisch lasmetaal is een goed voorbeeld (zie figuur 6.3).

De *tertiaire structuur* treedt op bij een meerlagenlas, waarbij de las uit een aantal

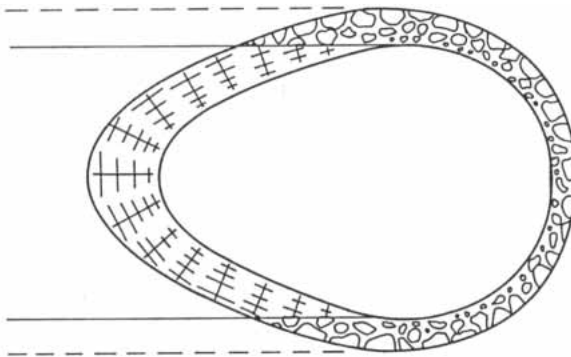
lagen is opgebouwd. Tengevolge van het aanbrengen van elke laag zal de voorgaande een warmtebehandeling ondergaan, hetgeen tot rekristallisatie en korrelgroei leidt. De tertiaire structuur bestaat derhalve uit afgeronde korrels die grover zijn naarmate de temperatuur hoger is geweest.

De ongemengde zone

Deze zone is te beschouwen als de buitenste laag van het lasmetaal grenzend aan het ongesmolten moedermateriaal. De laag heeft een kenmerkende dikte van enkele millimeters. Het metaal is hier wel gesmolten geweest maar heeft zich niet gemengd met de rest van het lasbad. De ongemengde zone heeft dus de structuur van lasmetaal maar de chemische samenstelling van het moedermateriaal. Hoewel altijd aanwezig, is deze zone vooral goed detecteerbaar in die gevallen waarbij toevoegmateriaal en moedermateriaal significant van elkaar verschillen in chemische samenstelling.

De gedeeltelijk gesmolten zone

Zoals hiervoor reeds is opgemerkt, vertonen legeringen die gelast worden in het algemeen een smelttraject. Hierdoor vormt zich aan de rand van het lasbad een zone van gedeeltelijk gesmolten metaal. Dit is schematisch in bovenaanzicht weergegeven in figuur 5.20. De fractie vloeistof in deze zone varieert van 0% bij de stippellijn tot 100% aan de rand van het lasbad.



Figuur 5.20. Schematische weergave van de gedeeltelijk gesmolten zone.

De warmte-beïnvloede zone

De warmte-beïnvloede zone van een las is gedefinieerd als het gedeelte van het moedermateriaal grenzend aan het lasmetaal, dat niet gesmolten maar wel boven een bepaalde temperatuur verwarmd is geweest. Tengevolge van die verwarming zullen

in de warmte-beïnvloede zone in het algemeen structuurveranderingen optreden. Welke structuurveranderingen plaatsvinden hangt af van het beschouwde metaal en de doorlopen temperatuurcyclus. Vooral de piektemperatuur en de afkoelsnelheid spelen een belangrijke rol. Voorbeelden van structuurveranderingen die in de warmte-beïnvloede zone kunnen optreden zijn:

– *Korrelgroei*

Dit verschijnsel treedt op bij alle metalen en legeringen en speelt een belangrijker rol naarmate de temperatuur hoger wordt. Grote korrels worden dus vooral langs de smeltlijn aangetroffen.

– *Vorming van een nieuwe fase*

Bij metalen en legeringen met een fase-overgang in de vaste toestand kunnen als gevolg van (te) snel afkoelen nieuwe fasen worden ingevroren. Het meest bekende voorbeeld is de vorming van martensiet bij het lassen van ongelegeerd en laaggelegeerd staal.

– *Precipitatie*

Tijdens de temperatuurcyclus kunnen er in de warmte-beïnvloede zone precipitatieverschijnselen optreden. Een bekend voorbeeld is veroudering bij het lassen van ongelegeerd staal.

– *Oververoudering (over-ageing)*

In sommige metalen en legeringen zijn precipitaten aanwezig om de sterkte te verhogen (precipitatieharding). Bij het lassen van deze materialen kan oververoudering in de warmte-beïnvloede zone optreden, dat wil zeggen de grootte van de precipitaten neemt toe ten koste van het aantal.

– *Verdwijnen van de deformatiestructuur*

Bij non-ferro metalen wordt de sterkte soms opgevoerd door het metaal koud te vervormen. De geproduceerde deformatiestructuur zal echter boven een bepaalde temperatuur weer verdwijnen.

– *Lasbederf (weld decay)*

Dit verschijnsel kan optreden bij het lassen van bepaalde roestvaste staalsoorten en hangt samen met het ontstaan van chroom-arme zones langs de korrelgrenzen.

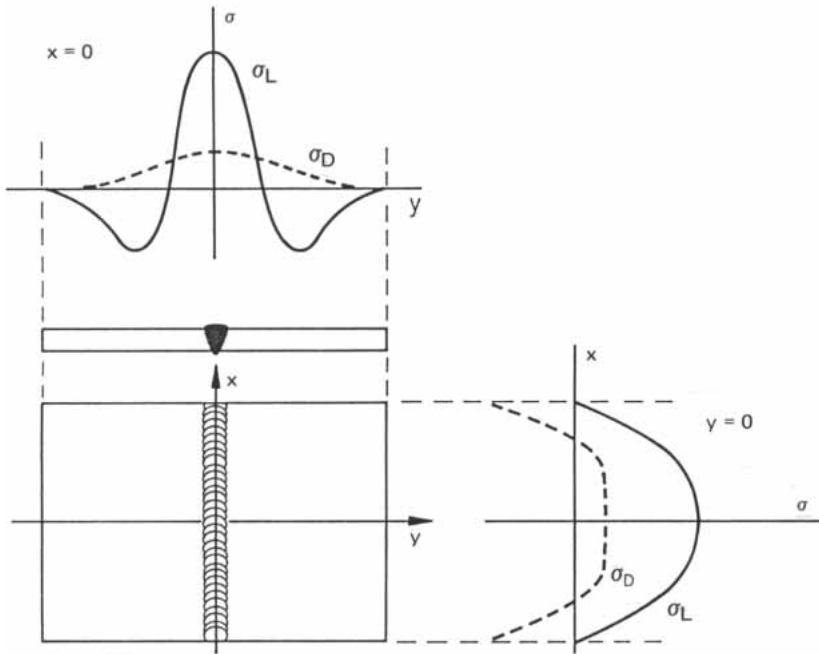
Bovengenoemde voorbeelden zullen in volgende hoofdstukken uitvoeriger aan de orde komen.

5.6. Restspanningen

Bij het lassen kunnen in en rondom de lasverbinding restspanningen ontstaan. De belangrijkste oorzaak van deze restspanningen is krimp van het lasmetaal na het stollen. Deze krimp wordt door het omringende (koudere) metaal verhinderd en

aldus ontstaat een spanningsverdeling, zoals schematisch is weergegeven in figuur 5.21 voor een enkelvoudige las.

Uit de figuur blijkt, dat de longitudinale spanning σ_L (de spanning evenwijdig aan de las) in de las zelf en op korte afstand daarvan een trekspanning is en op grotere afstand een drukspanning (voor evenwicht is vereist dat $\int \sigma_L dy = 0$). In de lengterichting (x -richting) neemt σ_L naar de plaatranden af tot nul.



Figuur 5.21. De spanning evenwijdig aan de las (σ_L) en de spanning loodrecht op de las (σ_D) als functie van de coördinaten x en y .

De dwarsspanning σ_D (de spanning loodrecht op de las) is een trekspanning, die afneemt bij toenemende afstand van de las en nul wordt aan de randen van de plaat. In de lengterichting (x -richting) gaat de dwarsspanning bij nadering van de plaatranden over van een trekspanning naar een drukspanning (voor evenwicht is vereist dat $\int \sigma_D dx = 0$).

Het in figuur 5.21 geschetste spanningsverloop is slechts in eerste benadering juist. Een meer realistisch beeld wordt verkregen wanneer ook rekening wordt gehouden met plastische deformatie, die zowel bij het opwarmen als bij het afkoelen optreedt. Voorts kunnen fase-overgangen en daarmee gepaard gaande volumeveranderingen een rol spelen bij de totstandkoming van restspanningen. Dit is bijvoorbeeld het

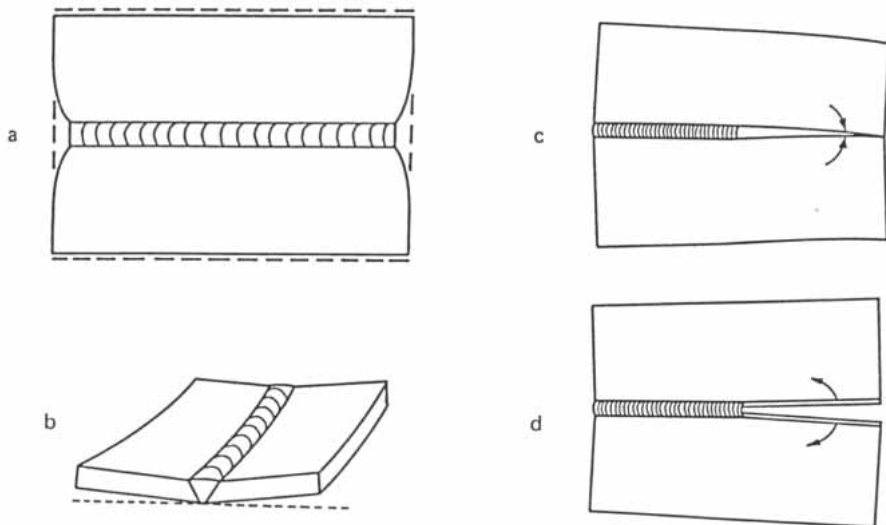
geval bij staal.

Restspanningen zijn in het algemeen zeer ongewenst. Zij kunnen aanleiding geven tot twee effecten:

- achteruitgang van mechanische eigenschappen, bijvoorbeeld door het optreden van spanningscorrosie of vermoeiingsscheuren;
- vormveranderingen.

Beschouw, als voorbeeld van het laatste, twee platen die door middel van een V-las met elkaar worden verbonden. Tengevolge van de aanwezige restspanningen zullen bij vrije oplegging van de platen de volgende vormveranderingen optreden (zie figuur 5.22):

- plaatselijke verkorting in de lengterichting (a);
- naar elkaar toetrekken van de platen in de dwarsrichting (a);
- hol trekken in de lengterichting (b);
- hol trekken in de dwarsrichting (b);
- scharen, dat wil zeggen dichttrekken van de naad (bij kleine warmte-inbreng) en openen van de naad (bij grote warmte-inbreng) (c,d).



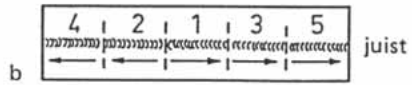
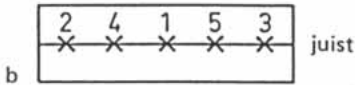
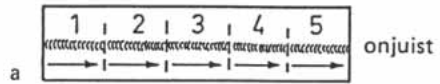
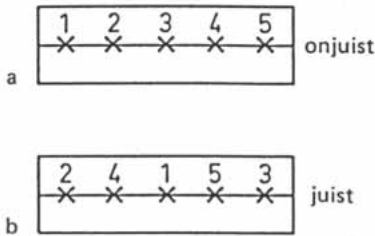
Figuur 5.22. Vormverandering veroorzaakt door restspanningen bij het lassen van twee platen (V-naad, vrije oplegging).

Factoren die de restspanningen (en de als gevolg daarvan optredende vormveranderingen) beïnvloeden, zijn onder andere:

- *De wijze van hechten*

De onjuiste en juiste procedure voor het hechten van twee platen voorafgaande

aan het lassen is schematisch aangegeven in figuur 5.23.



Figuur 5.23. Volgorde van hechten.

Figuur 5.24. Volgorde van lassen.

– De lasvolgorde

De onjuiste en juiste volgorde voor het lassen van twee platen (van grote lengte) is schematisch aangegeven in figuur 5.24.

– De warmte-inbreng

Algemeen geldt dat vergroting van de warmte-inbreng een vergroting van de restspanning teweegbrengt.

– De lasopbouw

Vergroten van het aantal lasrupsen per las doet de restspanning toenemen. Afkoeling van het materiaal na elke rups heeft een grotere restspanning tengevolge, dan wanneer achter elkaar wordt afgelast.

N.B. Hoewel het lassen in meer lagen meestal gunstig is in verband met de structuur van het lasmetaal, is deze werkwijze met het oog op restspanningen dus ongunstig.

– Voorwarmen

Door voorwarmen wordt de temperatuurcyclus, die gepaard gaat met het lassen, enigszins afgevlakt. Dit leidt tot verlaging van het niveau van de restspanning.

Ondanks alle genomen voorzorgsmaatregelen zullen er in het materiaal na het lassen altijd restspanningen aanwezig blijven. Deze kunnen in sommige gevallen een gevaar opleveren voor de constructie.

Het is van belang deze restspanningen te kunnen meten. Voor dit doel kan gebruik worden gemaakt van verschillende methoden, waarvan de belangrijkste zijn:

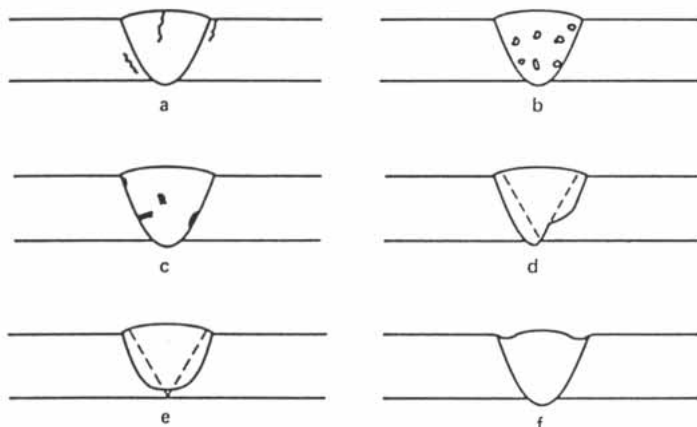
- röntgendiffractie-technieken, waarbij lijnverbreding en lijnverschuiving worden gemeten;
- spanningsrelaxatie-technieken, waarbij de elastische vervormingen worden gemeten na het wegnemen van een klein gedeelte van het materiaal.

Het niveau van de restspanning kan na het lassen worden verlaagd door:

- een warmtebehandeling;
- een mechanische behandeling (hameren, trillen).

5.7. Lasdefecten

Bij het booglassen kunnen in de lasverbinding verschillende lasdefecten ontstaan. De meest voorkomende zijn schematisch in figuur 5.25 afgebeeld.



Figuur 5.25. Lasdefecten: a) scheuren; b) poriën; c) insluitels; d) bindingsfout; e) onvolkomen doorlassing en f) randinkarteling.

– Scheuren

Verreweg de meest gevreesde lasdefecten zijn scheuren. De vier belangrijkste scheurtypen (warmscheuren, koudscheuren, ‘reheat cracks’ en lamellaire scheuren) worden samen met de omstandigheden waaronder ze ontstaan, in het volgende hoofdstuk uitvoerig besproken.

– Poriën

Poriën zijn gasholten, die in het lasmetaal gevormd worden tijdens de stolling. De oorzaak van porievorming houdt direct verband met het verschil in oplosbaarheid van gassen in vloeibaar metaal en in vast metaal. Gassen lossen in het algemeen veel beter op in vloeibaar metaal, dan in vast metaal. Bij snelle stolling, zoals bij het lassen, kan daardoor een oververzadiging van het gas in het vaste metaal ontstaan, hetgeen tot porievorming leidt. De poriën zijn meestal bolvormig, maar kunnen onder bepaalde omstandigheden ook langwerpig zijn (‘worm holes’).

– Insluitsels

Wanneer tijdens het lassen slakvorming een rol speelt (handlassen met beklede elektrode, MIG/MAG-lassen met gevulde draad, onder poeder lassen) kunnen slakinsluitels in het lasmetaal gevormd worden. Slakbestanddelen zullen zich in

verband met hun kleinere dichtheid meestal bovenop het metaal bevinden. Door de stromingen die bij het lassen in het vloeibare lasmetaal optreden, zal echter een gedeelte van de slak in het inwendige van het smeltbad terecht kunnen komen. Deze slak kan dan bij het stollen in de vorm van slakinsluitels worden ingevroren.

Bij het TIG-lassen kan door smelten of afbrokkelen van de elektrode wolfram in het smeltbad terechtkomen. Bij het stollen blijft deze wolfram in de vorm van wolframinsluitels in het lasmetaal achter.

– *Bindingsfouten*

Een bindingsfout ontstaat als gesmolten metaal in contact komt met metaal, dat ongesmolten is en door dat contact ook ongesmolten blijft. Een dergelijke situatie kan zich voordoen in het geval van een enkelvoudige las, maar ook in het geval van een meervoudige las (meerlagenlas).

Het ontstaan van bindingsfouten wordt bevorderd door de aanwezigheid van oxydes of andere oppervlaktelagen.

– *Onvolkomen doorlassing*

Van een onvolkomen doorlassing is sprake als de penetratiediepte (de diepte van het smeltbad) kleiner is dan de diepte van de lasnaad.

– *Randinkarteling*

Een randinkarteling is een oneffenheid of discontinuïteit, die optreedt langs de grens tussen het lasmetaal en de warmte-beïnvloede zone. De randinkarteling kan een vloeiend verloop hebben, maar in bepaalde gevallen ook kerfvormig en scherp zijn.

Van de bovengenoemde lasdefecten kunnen de laatste vijf in principe worden voorkomen door een juiste keuze van lasproces, lasprocedure en lasnaadvoorbewerking. Dit geldt niet of in mindere mate voor scheuren, omdat het ontstaan hiervan voor een belangrijk deel wordt bepaald door de chemische samenstelling van het (te lassen) moedermateriaal en van het toevoegmateriaal.

Lasdefecten hebben in het algemeen een ongunstige invloed op de mechanische eigenschappen van de lasverbinding. Het meest gevaarlijk zijn de vlakke lasdefecten en de ruimtelijke lasdefecten, die gekenmerkt worden door scherpe overgangen. Deze kunnen de breuksterkte en de vermoeiingssterkte drastisch verlagen.

De negatieve invloed van de afgeronde ruimtelijke lasdefecten beperkt zich in de meeste gevallen tot een verlaging van de statische mechanische eigenschappen, die evenredig is met de vermindering van het (effectieve) oppervlak van de doorsnede.

5.8. Lasbaarheid

De beïnvloeding van het materiaal door het lasproces wordt samengevat door het begrip lasbaarheid. Hiermee karakteriseert men de mogelijkheid om in het materiaal met een bepaald lasproces een voor een bepaald doel geschikte lasverbinding te maken. De mate van lasbaarheid hangt dus samen met de mate waarin voorzorgsmaatregelen moeten worden genomen.

Onderscheid wordt gemaakt tussen executieve, metallurgische en constructieve lasbaarheid.

De *executieve lasbaarheid* heeft betrekking op de mogelijkheid een homogene metallische lasverbinding tot stand te brengen, waarin – macroscopisch gesproken – geen fouten of tekortkomingen aanwezig zijn. Onderzoek hiernaar zal gewenst zijn, als een nieuw materiaal moet worden gebruikt of als een nieuwe lasmethode wordt overwogen. Ook bij de keuring van constructiemateriaal of toevoegmateriaal kunnen proeven ten aanzien van de executieve lasbaarheid gewenst zijn.

De *metallurgische lasbaarheid* heeft betrekking op de mate waarin de eigenschappen van de las en de warmte-beïnvloede zone overeenkomen met de eisen die worden gesteld in verband met de toepassing van de constructie (bijvoorbeeld mechanische eigenschappen, corrosievastheid). Bij het lassen van laaggelegeerd staal bijvoorbeeld zal de warmte-beïnvloede zone veelal een geringere taaiheid hebben dan het moedermateriaal. Bij het lassen van roestvast staal moet men bedacht zijn op een mogelijke teruggang van de bestendigheid tegen bepaalde corrosieve milieus in de omgeving van de las. Bij het lassen van sommige aluminiumlegeringen zal een zekere mate van sterkteverlaging in de warmte-beïnvloede zone onvermijdelijk zijn. In al deze gevallen zullen de procesomstandigheden en de materiaalsamenstelling binnen bepaalde grenzen moeten worden gekozen om ervan verzekerd te zijn, dat de eigenschappen van de lasverbinding aan de gestelde eisen voldoen. Het hangt van de bedrijfsomstandigheden van de constructie af welke eisen ten aanzien van eigenschappen als sterkte, taaiheid en corrosievastheid moeten worden gesteld. Naarmate deze eisen hoger zijn, zullen in het algemeen meer beperkingen aan materiaal en lasuitvoering moeten worden opgelegd.

De *constructieve lasbaarheid* heeft betrekking op het vermogen van de constructie de spanningen die door het lassen en door de bedrijfsomstandigheden optreden, te doorstaan. Een onvoldoende constructieve lasbaarheid kan leiden tot het ontstaan van scheuren (bijvoorbeeld warmscheuren of koudscheuren), of tot het uitbreiden van reeds bestaande scheuren.

In algemene termen kan de lasbaarheid worden gekarakteriseerd door de chemische

samenstelling van het te lassen materiaal en het toevoegmateriaal. Dit heeft ertoe geleid dat aan het te lassen materiaal en het toevoegmateriaal met betrekking tot de chemische samenstelling zodanige eisen wordt gesteld, dat binnen zekere grenzen goede lasbaarheid kan worden verwacht.

Helaas is het niet mogelijk, zelfs bij de meest gedetailleerde materiaalspecificaties, het resultaat van het lasproces voldoende nauwkeurig te voorspellen, zodat een zekere mate van spreiding onvermijdelijk is als op deze indirecte manier de lasbaarheid wordt omschreven.

In bepaalde gevallen is het daarom wenselijk of zelfs noodzakelijk lasbaarheidsproeven te doen ook als het materiaal voor het overige aan de eisen voldoet.

Een zeer algemene lasbaarheidsproef die vaak bij belangrijke constructies of constructiedelen wordt toegepast, is de zogenaamde procedure-proef (procedure test). Hierbij voert de fabrikant, onder toezicht van de afnemer, lasproeven uit, waarbij het personeel, de lasapparatuur en de materialen worden betrokken die voor de definitieve constructie zijn bestemd, uiteraard onder toepassing van de voorgenomen lasomstandigheden. Vervolgens wordt onderzocht of aan de gestelde eisen wordt voldaan.

Naast de procedure-proef bestaan vele andere lasbaarheidsproeven. Deze hebben in de meeste gevallen betrekking op één van de specifieke aspecten van de lasbaarheid. Tot de lasbaarheidsproeven worden gerekend: de hardheidsmeting, de trekproef, de buigproef, de kerfslagproef, de CTOD (Crack Tip Opening Displacement) meting, vermoeiingsproeven, corrosieweerstandproeven en een aantal scheurgevoeligheidsproeven, waarvan de varestraint-proef (warmscheuren) en de implant test (koudscheuren) de bekendste zijn. De verschillende lasbaarheidsproeven zullen hier niet worden besproken. Verwezen wordt naar de literatuur.

Opgaven

- 5.1.
 - a) Wat wordt verstaan onder de warmte-inbreng bij het booglassen?
 - b) Op welke wijze hangt de afkoelsnelheid in de warmte-beïnvloede zone af van de warmte-inbreng? Maak onderscheid tussen het twee-dimensionale geval (dunne plaat) en het drie-dimensionale geval (dikke plaat).

- 5.2. Op welke wijze hangt de afkoelsnelheid in de warmte-beïnvloede zone van een las af:
 - a) de lasstroom;
 - b) de voortloopsnelheid;
 - c) de voorwarmtemperatuur?
 Maak onderscheid tussen het twee-dimensionale geval (dunne plaat) en het

drie-dimensionale geval (dikke plaat).

- 5.3. Onder welke omstandigheden (las- en materiaalparameters) is er bij het booglassen sprake van twee-dimensionale warmtestroming en onder welke omstandigheden van drie-dimensionale warmtestroming?
- 5.4. Hoe worden de vorm en de afmetingen van het lasbad beïnvloed door
 - de lasstroom;
 - de boogspanning;
 - de voortloopsnelheid?
- 5.5.
 - a) Welke stromingen kunnen bij het booglassen in het lasbad optreden?
 - b) Wat is de oorzaak van deze stromingen?
 - c) Hoe beïnvloeden deze stromingen de vorm van het lasbad?
- 5.6. Op welke wijze beïnvloeden oppervlakte-actieve elementen, zoals zuurstof en zwavel, de vorm van de las bij het lassen van staal? Geef een verklaring voor deze beïnvloeding.
- 5.7.
 - a) Schets de oplosbaarheid van stikstof in ijzer als functie van de temperatuur.
 - b) Hoe luidt de wet van Sieverts?
 - c) Geldt de wet van Sieverts ook voor het booglassen? Licht Uw antwoord toe.
- 5.8.
 - a) Wat wordt verstaan onder de primaire structuur van lasmetaal?
 - b) Wat zijn de belangrijkste kenmerken van deze structuur?
 - c) Hoe wordt de primaire structuur beïnvloed door de voortloopsnelheid?
- 5.9. Wat wordt verstaan onder de stollingsparameter en op welke wijze beïnvloedt deze parameter de (sub)structuur van het lasmetaal?
- 5.10. Gegeven een rechte enkelvoudige las in een stalen plaat.
 - a) Schets de spanning σ_L evenwijdig aan de las en de spanning σ_D loodrecht op de las als functie van de afstand tot de las.
 - b) Verklaar het geschetste verloop.
 - c) Op welke manieren kan de spanning worden gemeten?
 - d) Op welke manieren kan het spanningsniveau in de plaat worden verlaagd?
- 5.11. Gegeven een puntlas in het middelpunt van een ronde plaat.

- a) Schets de radiële spanning σ_r en de tangentiële spanning σ_t als functie van de afstand r tot het midden van de las (middelpunt van de plaat).
 - b) Verklaar het geschetste verloop.
- 5.12. Twee vlakke platen worden door middel van een V-las met elkaar verbonden. Geef aan de hand van een schets aan welke vormveranderingen er kunnen optreden bij vrije oplegging van de platen.
- 5.13. Noem en schets de belangrijkste lasdefecten die bij het booglassen kunnen optreden en geef aan hoe deze defecten zijn te voorkomen.

Literatuur

- Davies, A.C., *The science and practice of welding*, 8th Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- Easterling, K.E., *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, Butterworths & Co., London, 1983.
- Granjon, H., *Fundamentals of Welding Metallurgy*, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, 1991.
- Kou, S., *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, New York, 1987.
- Lancaster, J.F., *Metallurgy of Welding*, 4th Edition, George Allen & Unwin, London, 1987.
- Metals Handbook*, 9th Edition, Vol. 6: *Welding, brazing and soldering*, American Society for Metals, Cleveland, 1983.
- Welding Handbook*, 8th Edition, Vol. 1: *Welding Technology*, American Welding Society, Miami, 1987.