

Korrelgroei

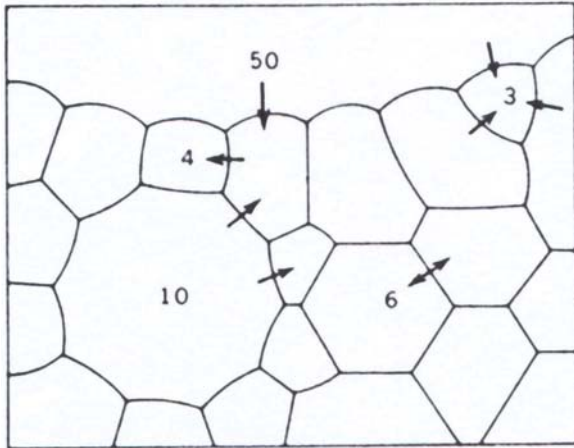
De korrelgrootte in een metaal bepaalt in sterke mate de mechanische eigenschappen, zoals sterkte en taaierheid. Bij de productie van metalen voor constructieve doeleinden wordt gestreefd naar een optimale fijnkorrelige microstructuur. Tijdens het lassen zal de structuur en de korrelgrootte onder invloed van de temperatuurcyclus veranderen.

Foto boven:
Eindwalsstands bij Warm-
bandwalsen 2 van Corus
Strip Products IJmuiden

De verandering van de structuur en korrelgrootte is natuurlijk het duidelijkst in het lasmetaal, waar tijdens de stolling vanuit de vloeibare fase korrels worden gevormd. Stolling is een kiemvorming- en kiemgroeiproces, maar in feite is de kiemvorming tijdens het lassen van ondergeschikt belang. Aan de smeltlijn is al een vaste fase aanwezig die ideaal wordt bevochtigd. De grootte van de korrels in de warmtebeïnvloede zone speelt daardoor een belangrijke rol in de structuurontwikkeling van het lasbad. De stolstructuur is afhankelijk van de chemische

samenstelling van het metaal, de temperatuurgradient en de richting van de maximale temperatuurgradient in de vloeistof en de afkoelsnelheid. Als tijdens de afkoeling in het gestolde materiaal faseformaties optreden, heeft dit ook effect op de korrelgrootte. Kiemen van de nieuw te vormen fase worden dan gevormd en vervolgens zal kiemgroei optreden [1].

In dit artikel gaan we in op de microstructuur in de warmtebeïnvloede zone. Als eerste komen de algemene theoretische achtergronden van korrelgroei



Figuur 1 - Korrelgroei: grote korrels groeien ten koste van kleinere korrels. De getallen in de figuur zijn een maat voor de grootte van de korrel, de pijlen geven aan in welke richting korrelgroei plaatsvindt

aan bod. Vervolgens zal dit fenomeen in het geval van lassen van metalen worden beschreven.

Theoretische achtergronden

Metalen voor constructieve toepassing zijn polikristallijn. Metaal is dus opgebouwd uit een groot aantal korrels, gescheiden door korrelgrenzen. De korrels zijn anders georiënteerd en waar ze elkaar raken, passen de roosters niet perfect. Er is een bepaalde 'misfit'. Korrelgrenzen kunnen worden aangetoond door het materiaal te etsen. Atomen aan korrelgrenzen gaan sneller in oplossing en onder invallend licht van een microscoop geeft dit een schaduwwerking. Door het oplossen van de atomen wordt de breedte van de dunne korrelgrens wel sterk overtrokken.

Eigenschappen van metalen hangen af van de microstructuur, zo ook de mechanische eigenschappen. De empirische Hall-Petch relatie (vergelijking 1) geeft bijvoorbeeld de rekgrens ($\sigma_{0,2}$) als functie van de gemiddelde korrelgrootte (\bar{d}). Hierin geeft σ_i de weerstand van het rooster tegen dislocatiebeweging en is k een maat voor de relatieve verstevigingbijdrage van de korrelgrenzen [2]. Een kleinere korrel maakt het materiaal sterker en taaiër. Korrelgrenzen zijn dus blijkbaar een obstakel voor de verplaatsing van dislocaties.

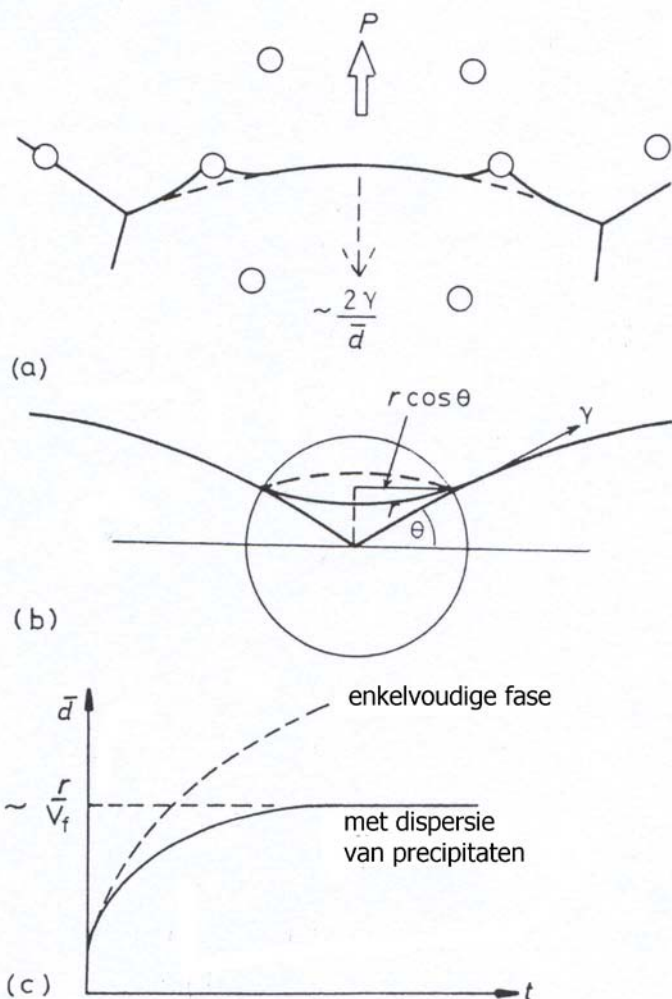
$$\sigma_{0,2} = \sigma_i + \frac{k}{\sqrt{\bar{d}}} \quad (1)$$

Korrelgrenzen zijn echter niet gefixeerd, maar kunnen bewegen. De reden hiervoor is dat systemen altijd streven naar een zo laag mogelijke vrije energie [3-5]. De drijvende kracht ΔG voor korrelgrensbeweging bestaat uit een bijdrage van de bulk en een

bijdrage van het grensvlak en kan als volgt worden uitgedrukt:

$$\Delta G = \Delta G_{bulk} + \Delta G_{gv} \quad (2)$$

Op atomaire schaal is dit te visualiseren door 'het springen' van een atoom uit de korrel, door de korrelgrens, naar een andere korrel. Aan één zijde van de grens verdwijnen dus roosterplaatsen terwijl die er aan de andere kant bijkomen. Hierdoor verplaatst de korrelgrens zich. De drijvende kracht voor deze verplaatsing is het verschil in de vrije energie van de korrels, ΔG_{bulk} . Bij dit proces moet meestal een energiedrempel overwonnen worden, de activeringsenergie. Deze energie zal bij hogere temperatuur gemakkelijker overwonnen worden. Rekristallisatie is een



Figuur 2 - Schematische voorstelling van het pinnen van korrelgrenzen door precipitaten (a), de invloed van een precipitaat op de totale oppervlakte-energie (b), het verschil in gemiddelde korrelgrootte voor een enkelvoudige fase en een metaal met een dispersie van precipitaten als functie van tijd (c) [6]

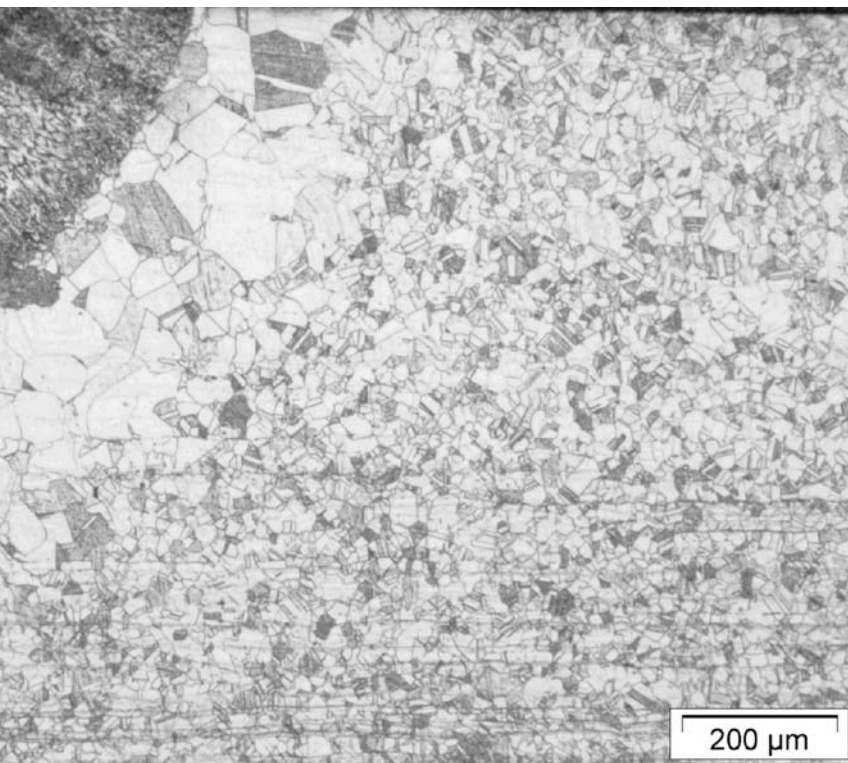
voorbeeld van de verplaatsing van korrelgrenzen. In plastisch gedeformeerd metaal kunnen op plaatsen waar de spanningsenergie het hoogst is (hoge dislocatiedichtheid) kiemen ontstaan met een nieuw kristalrooster en een veel kleinere dislocatiedichtheid. Na rekristallisatie is de vrije energie lager. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij het warmwalsen (zie foto).

Ook grensvlakken representeren een bepaalde energie. De grensvlakenergie kan worden verlaagd door de hoeveelheid grensvlak te verkleinen, ΔG_{gv} (zie figuur 1). De gemiddelde kromtestraal kan evenredig worden beschouwd met de gemiddelde korrelgrootte. Daaruit kan de volgende drijvende kracht voor korrelgroei worden afgeleid:

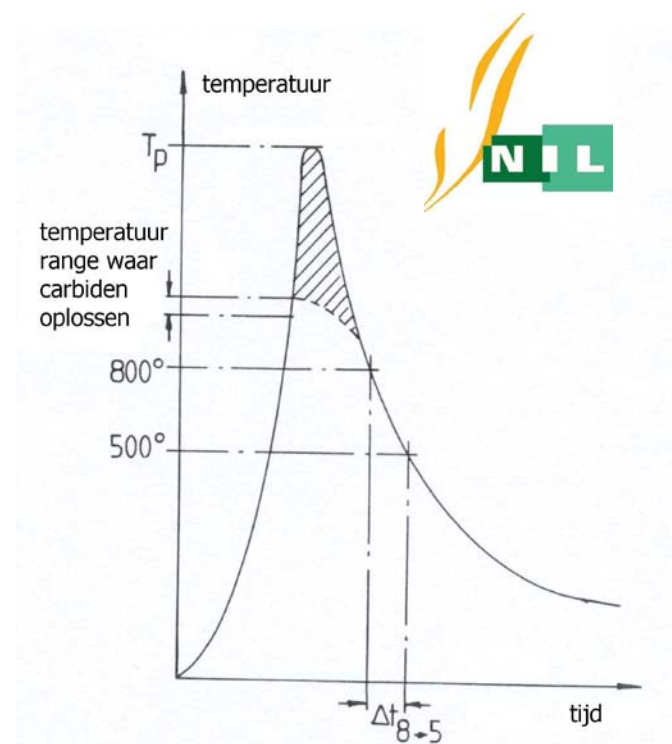
$$\Delta G_{gv} \approx \frac{2\gamma_{gv}}{d} \quad (3)$$

met γ_{gv} de grensvlakspanning. Een grotere korrel d , geeft een lagere vrije energie ΔG .

De snelheid waarmee het grensvlak zich verplaatst, kan worden belemmerd door obstakels, zoals substitutioneel opgeloste atomen, precipitaten en insluitels [6]. Figuur 2 illustreert dit. De drijvende kracht voor de verplaatsing van de korrelgrens wordt tegenwerkt door de toename van het grensvlak door de interactie met het deeltje. De tegenwerkende kracht



Figuur 3 - Dwarsdoorsnede van een las in austenitisch roestvast staal 316. De linker bovenhoek toont het lasmetaal, daarnaast is een zone met korrelgroei te zien [3]



Figuur 4 - Carbiden gaan in oplossing als een bepaalde temperatuur wordt overschreden [6]

(P) hangt af van de volumefractie (V_f) van de deeltjes met straal r en kan geschreven worden als:

$$P \approx \frac{3V_f\gamma_{gv}}{2r} \quad (4)$$

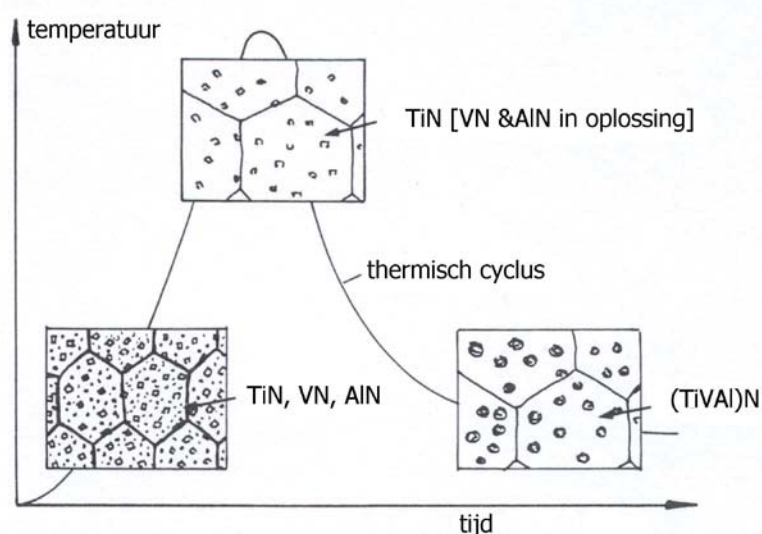
Door vergelijking 4 gelijk te stellen aan vergelijking 3, krijgt men de evenwichtstoestand waarbij deeltjes verdere korrelgroei voorkomen. De maximale korrelgrootte voor een dergelijke dispersie van deeltjes wordt dan gegeven door:

$$\bar{d}_{max} = \frac{4r}{3V_f}$$

Korrelgroei tijdens laswerk

De thermische cyclus tijdens het lassen zal net als bij andere warmtebehandelingen de korrelstructuur veranderen. In de warmtebeïnvloede zone stijgt de temperatuur tot de solidus temperatuur. De bereikte piektemperatuur neemt af met de afstand tot de smeltlijn.

De mobiliteit van korrelgrenzen is dus ook afhankelijk van de positie tot de smeltlijn. Vooral dicht bij de smeltlijn zal korrelgroei optreden. Korrelgroei is duidelijk waarneembaar bij staalsoorten waarbij tijdens afkoeling geen fasetransformaties in de vaste



Figuur 5 - Het effect van oplossen, vergroving en reprecipitate als functie van tijd en temperatuur [6]

stof plaatsvinden, zoals volledig austenitisch of ferritisch roestvast staal. Figuur 3 geeft hiervan een voorbeeld; een zone met extreme korrelgroei.

In koolstofstaal komt cementiet voor: een precipitaat van ijzercarbide. Zoals hiervoor beschreven kunnen precipitaten korrelgroei beperken. Ze moeten echter wel stabiel zijn bij de hoge temperaturen in de warmtebeïnvloede zone. In de zone direct naast het lasbad is de temperatuur zo hoog dat het ijzercarbide in oplossing gaat (er wordt austeniet gevormd waarin het koolstof keurig is opgelost), zie figuur 4. Als precipitaten oplossen, kan korrelgroei optreden. Het effect van korrelgroei wordt deels teniet gedaan in staalsoorten waarbij in de vaste toestand fase-transformaties voorkomen. Dit komt door de vorming van kiemen van de nieuwe fase en is het geval bij ongelegeerd staal. Naast het lasmetaal zal de korrelgrootte toch toenemen. De korrelgroei heeft de overhand ten opzichte van de korrelverfijnende werking van de fase-transformatie. In de zone waar de temperatuur net het austenietgebied heeft bereikt, zal korrelverfijning optreden.

In een eerdere aflevering van 'Materialenkennis voor de laspraktijk' is ingegaan op de stabiliteit van precipitaten [7]. Naast het daadwerkelijk in oplossing gaan, zullen precipitaten door de verhoogde temperatuur ook in aantal kunnen afnemen en kunnen groeien (oververoudering). Het effect als verstevingmechanisme wordt hierdoor kleiner. In figuur 5 is een schematische temperatuur-tijd curve weergegeven, met daarin het effect op precipitaten en korrels. Van de drie aanwezige precipitaten (TiN, VN en AlN) gaan de laatste twee in oplossing, terwijl het

TiN grover wordt. De korrel neemt toe in grootte doordat de korrelgroei-remmende werking van de precipitaten afneemt. Tijdens de afkoelfase kan weer uitscheiding van precipitaten optreden.

Concluderend

De drijvende kracht voor verandering van de microstructuur van metalen is verlaging van de vrije energie. Om deze verandering in gang te zetten, is vaak een activeringsenergie nodig. Tijdens het lassen is dat de warmte-inbreng. Hierdoor treedt mogelijk korrelgroei op. De korrelgrensbeweging kan worden beperkt door obstakels, zoals stabiele precipitaten. ■

Referenties

1. G. den Ouden, Lastechnologie, ISBN 90-407-1285-9, Delftse Universitaire Pers, 2000.
2. Ø. Grong, Metallurgical modeling of welding, ISBN 0-901716-37-5, The Institute of Materials, 1994.
3. R.G. Thiessen en I.M. Richardson, A physical based model for microstructure development in a macroscopic heat-affected zone: Grain growth and recrystallisation, Metallurgical and Materials Transactions B, 37B, 2006, 655-663.
4. R.E. Reed-Hill, Physical metallurgy principles, ISBN 0-442-06864-6, D. van Nostrand Company, 1973.
5. G. den Ouden en B.M. Korevaar, Metaalkunde deel I, ISBN 90-407-1281-6, Delftse Universitaire Pers, 1996.
6. K. Easterling, Introduction to the physical metallurgy of welding, ISBN 0-408-01351-6, Butterworths & CO Ltd. 1983.
7. M. Hermans, Carbiden in staal, Lastechniek, maart 2008.

Dr. ir. Marcel Hermans is docent aan de TU Delft, afdeling Technische Materiaalwetenschappen, sectie Joining and Mechanical Behaviour.