



## TTT- en CCT-diagram

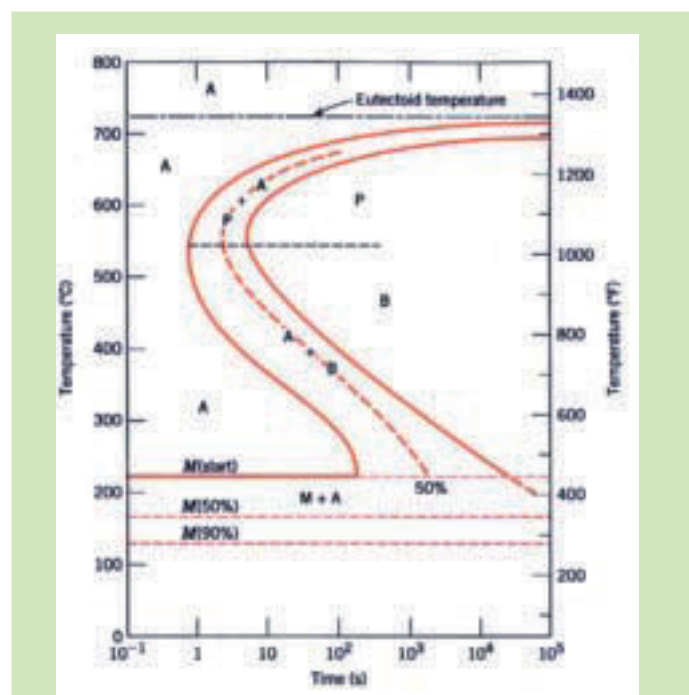
Voordat er kan worden gelast, zal er enige voorkennis moeten zijn van het te lassen basismateriaal en hoe dit tot stand is gekomen. In deze rubriek staat de materiaalkundige kant van het vakgebied centraal. In de voorgaande aflevering is het ijzer-koolstof evenwichtsfasediagram beschreven. Dit diagram kan niet klakkeloos gebruikt worden voor het bepalen van de ontwikkeling van de microstructuur in staal. Twee typen diagrammen zijn ontwikkeld om de ontwikkeling van de microstructuur in staal, waarbij de factor tijd betrokken is, te beschrijven: het TTT- en CCT-diagram.

Uit het ijzer-koolstof diagram is af te lezen welke fasen in staal aanwezig zijn als functie van de temperatuur en chemische samenstelling (koolstofgehalte). Ook is te zien wanneer faseovergangen optreden, zoals de overgang van vloeibaar naar vast, maar ook van austeniet naar ferriet en cementiet. De faseovergang zal optreden, omdat het energetisch voordeliger is. Dat wil zeggen dat een systeem altijd streeft naar het laagste energieniveau. Het evenwichtsdiaagram is bruikbaar als het systeem (Fe-C) in thermodynamisch evenwicht is. De faseovergangen hebben de tijd om plaats te vinden en daarom is de factor 'tijd' niet terug te vinden in het evenwichtsdiaagram. In het leven van alle dag speelt 'tijd' natuurlijk wel een belangrijke rol. Zo ook voor de ontwikkeling van de microstructuur in staal. Het ijzer-koolstof diagram kan dan ook niet klakkeloos gebruikt worden, maar zal aangepast moeten worden. Het TTT- en CCT-diagram zijn ontwikkeld om de ontwikkeling van de microstructuur in staal, waarbij de factor tijd betrokken is, te beschrijven. TTT staat voor het isotherme Transformatie-Tijd-Temperatuur-diagram en CCT is het Transformatie-diagram bij continue afkoeling (Continuous Cooling Transformation).

### Het TTT-diagram

De drijvende kracht voor een faseovergang is de verlaging van de vrije energie. Een manier om faseovergangen bij staal bij afkoeling te bestuderen is om het materiaal vanuit het austenietgebied snel tot een bepaalde temperatuur af te koelen en vervolgens de temperatuur constant te houden (isotherm transformeren). De faseovergang kan door middel van bijvoorbeeld de uitzetting worden gevolgd. Is de temperatuur relatief hoog (kleine onderkoeling), dan is de drijvende kracht klein en zal het lang duren voordat

de transformatie zich voltrokken heeft. Is de temperatuur lager (grotere onderkoeling) dan is de drijvende kracht groter en zal de transformatie sneller verlopen. Naast de drijvende kracht voor de transformatie speelt ook de verplaatsing (diffusie) van koolstof door het staal een grote rol. Op hoge temperatuur is de diffusiesnelheid (afstand die een koolstofatoom door het staal aflegt binnen een bepaalde tijd) hoog, terwijl bij verlaging van de temperatuur de diffusiesnelheid afneemt. Bij de transformatie van austeniet naar ferriet en cementiet moet een herverdeling van de koolstof plaatsvinden. Het ferriet kan maximaal 0,022 gewichtsprocent C bevatten, terwijl in cementiet 6,7



Figuur 1 - Isotherm transformatiediagram (TTT) voor een eutectoidische ijzer-koolstof legering (A: austeniet, B: bainiet, M: martensiet en P: perliet) (bron: Materials Science and Engineering)

gewichtsprocent C aanwezig is. De herverdeling van koolstof gebeurt door diffusie.

Als we uitgaan van een perlitisch staal (0,77 gewichtsprocent C) zal volgens het Fe-C diagram de transformatie naar perliet bij 727 °C beginnen (zie het fasediagram in de vorige uitgave van Lastechniek). Perliet is de gelaagde ferriet-cementietstructuur. De koolstof zal vanuit het austeniet naar het cementiet diffunderen. Bij een transformatie op hoge temperatuur zal de koolstof een grote afstand kunnen afleggen en wordt grove perliet gevormd. Bij lagere temperaturen (550 °C) is de diffusiesnelheid kleiner en de drijvende kracht om te transformeren groter. Dus de tijd dat koolstof zich kan verplaatsen, is kleiner. Dit resulteert in een fijner perliet. Bij transformaties op nog lagere temperatuur (tussen 550 en 200 °C) zal bainiet ontstaan, een naald-/schijfvormige structuur met hoge sterkte. Als het staal snel tot beneden de 200 °C wordt afgekoeld, zal martensiet worden gevormd. De koolstof krijgt bij martensietvorming geen tijd meer om zich te verplaatsen en zal daardoor spanningen veroorzaken in het staal.

Door de experimenten bij verschillende temperaturen te herhalen, kan een TTT-diagram worden samengesteld zoals is weergegeven in figuur 1. Zowel het bainiet als het martensiet zijn structuurbestanddelen die niet in het Fe-C evenwichtsdiagram voorkomen.

In het TTT-diagram in figuur 1 zijn C-vormige curves weergegeven. De meest linkse curve geeft aan wanneer de transformatie begint, de rechtse curve geeft het tijdstip waarop de transformatie is voltooid. Als

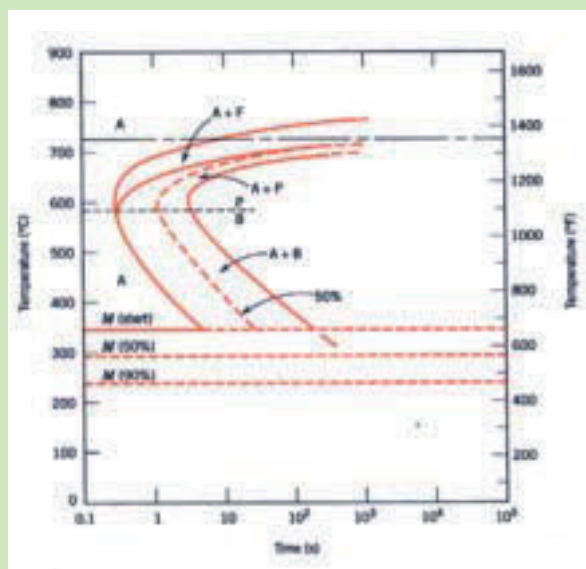
de lijn M (start) wordt gepasseerd, zal martensietvorming optreden. Overigens wordt de x-as weergegeven in logaritmische schaal, omdat zeker bij lage transformatietemperaturen het lang kan duren voordat de transformatie volledig is voltooid.

Bij onder- en bovenperlitisch staal zijn de diagrammen iets gecompliceerder, omdat proeutectoidische uitscheidingen kunnen plaatsvinden. Voor een onderperlitisch staal is er een extra curve voor de vorming van proeutectoidische ferriet (zie figuur 2), bij een bovenperlitisch staal is een lijn voor de proeutectoidische cementietvorming te zien. In het TTT-diagram voor het staal met een koolstofgehalte van 0,45 gewichtsprocent ligt de starttemperatuur voor martensietvorming aanzienlijk hoger.

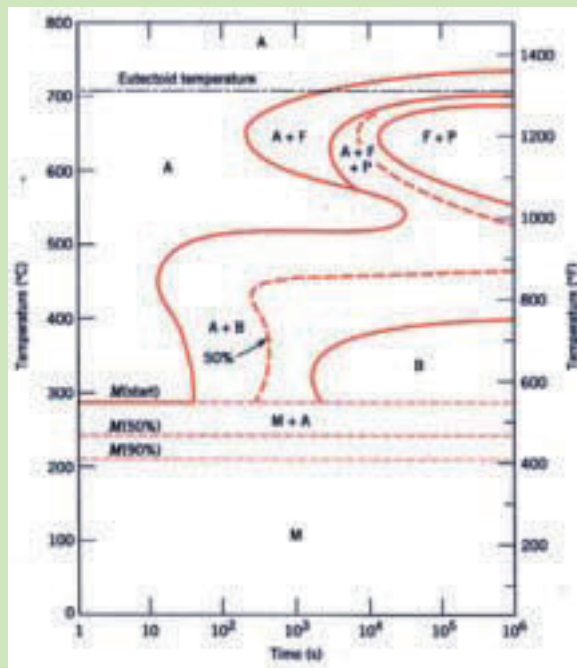
Bij gelegerde staalsoorten zullen de curves naar rechts verschuiven, zoals te zien is in figuur 3. De vormingsnelheid van ferriet en perliet is laag en het is dus relatief eenvoudig om hardingsstructuren (bainiet en martensiet) te vormen. De hardbaarheid van gelegerde staalsoorten is daarom groter.

### Het CCT-diagram

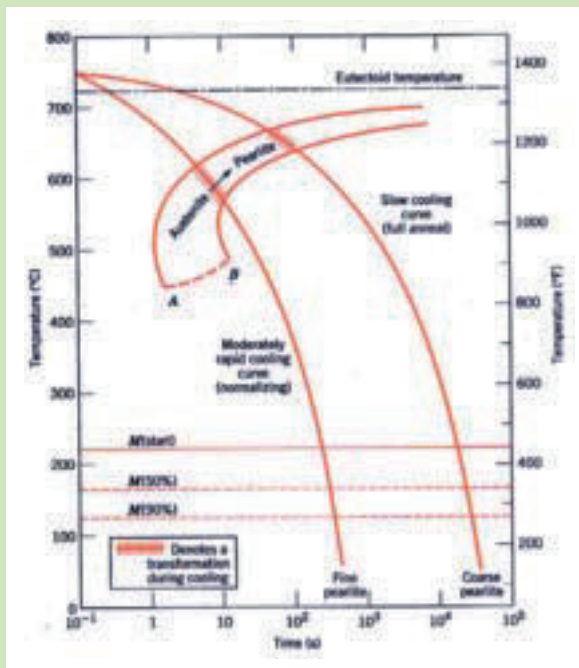
Het bestuderen van transformaties bij constant blijvende temperatuur geeft de mogelijkheid de vorming van een specifieke microstructuur te volgen. In de praktijk van tal van warmtebehandelingen zal het werkstuk echter worden afgekoeld met een bepaalde afkoelsnelheid. De transformatiediagrammen voor continue afkoeling lijken veel op TTT-diagrammen. Het belangrijkste verschil is de verschuiving van alle omzettingen naar lagere temperaturen en langere tij-



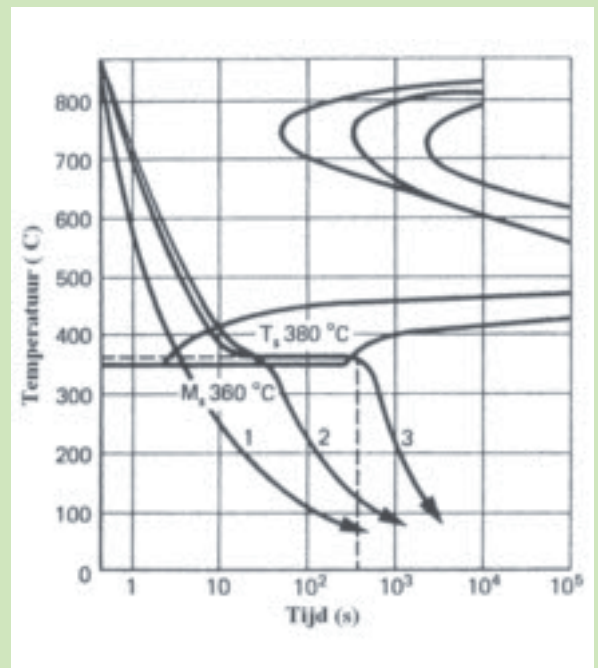
Figuur 2 - TTT-diagram voor staal met 0,45%C (A: austeniet, B: bainiet, M: martensiet, F: pro-eutectoidisch ferriet en P: perliet)  
(bron: Materials Science and Engineering)



Figuur 3 - TTT-diagram voor een gelegerd staal AISI4340 (A: austeniet, B: bainiet, M: martensiet, F: pro-eutectoidisch ferriet en P: perliet)  
(bron: Materials Science and Engineering)



Figuur 4 - CCT-diagram voor een eutectoidische ijzer-koolstof legering waarin twee afkoelcurven zijn gegeven: één voor lage afkoelsnelheid en één voor middelmatige afkoelsnelheid (bron: Materials Science and Engineering)



Figuur 5 - Diverse afkoelsnelheden bij het lassen van staal met 0,25% C en 5% Cr (bron: Kompendium der Schweisstechnik Band 3)

den. In tegenstelling tot de isotherme transformaties wordt bij continu afkoelen een reeks van omzettingen gevormd. In het diagram worden lijnen van een bepaalde afkoelsnelheid weergegeven. De transformatie start met de vorming van ferriet als de eerste C-vormige curve wordt gepasseerd. Bij lagere temperatuur zal vervolgens perliet, bainiet en eventueel martensiet worden gevormd.

Opgemerkt moet worden dat zowel de TTT- als de CCT-diagrammen geldig zijn voor een bepaalde samenstelling van het staal en voor een bepaalde austeniteertemperatuur en austenietkorrelgrootte. Lasprocessen zijn altijd onderhevig aan opwarming en afkoeling (afkoelsnelheden in de orde van 40 K/s bij booglassen en meer dan 100 K/s bij laserlassen) en de CCT-diagrammen lenen zich daarom het beste om de aanwezige fasen na het lassen te bepalen. Hierbij dient wel rekening te worden gehouden met de beperkingen van deze diagrammen zoals hierboven besproken, zoals de vaste austeniteertemperatuur en samenstelling waarvoor de diagrammen geldig zijn.

#### Relatie met de lastechniek

Wat kunnen we nu als lassers met deze grafieken? Uit het CCT-diagram kan worden afgeleid bij welke temperaturen en afkoelingen welke structuur er zal ontstaan. Vooral bij het lassen van laaggelegeerde staal-soorten die gevoelig zijn voor harden (legeringen met koolstofgehaltes van meer dan 0,25% C met toevoegingen als Cr, Ni, Mo, Mn etc., bijvoorbeeld 42CrMo4) kan men hier waardevolle informatie uit halen. Zie figuur 5 waarin drie afkoelcurven zijn getekend. Curve 1 is een

voorbeeld van lassen zonder voorwarmen. De structuur in de lasovergang wordt martensitisch en hardings-scheuren vormen een zeer groot risico. De tweede curve laat zien wat er gebeurt met de structuur met lage voorwarming. Door het voorwarmen wordt de afkoelsnelheid aanzienlijk verlaagd. Hierdoor zullen andere structuren (lees: minder harde) ontstaan en veel minder martensiet, waarmee de kans op scheuren aanzienlijk terugloopt. Bij de derde curve is gekozen voor lassen met hoog voorwarmen. De voorwarmtemperatuur is zo gekozen dat de temperatuur tijdens het lassen boven de martensietstart-temperatuur blijft. Daardoor wordt er nauwelijks martensiet gevormd. De gevormde structuur zal dan ook geen scheurvorming vertonen als gevolg van harde structuren. Deze laatste methode wordt ook wel het isotherm lassen genoemd.

Het is dus ook voor de lasser goed om te weten dat deze diagrammen gebruikt kunnen worden om voorwarmtemperaturen vast te stellen en daarmee de kwaliteit van de las te waarborgen. ■

#### Referenties

1. Materials Science and Engineering - An Introduction, W.D. Callister, 5de editie, John Wiley & Sons Inc., ISBN 0-471-32013-7.
2. Kompendium der Schweisstechnik Band 3, Beckert, Eignung metallischer Werkstoffe zum Schweißen, 1997. ISBN 3-87155-160-0.

Dr. ir. Raph Pieters is werkzaam bij de Faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek van de TU Delft, waar hij onderzoek doet naar Friction Stir Welding.