



IJzer-koolstof diagram

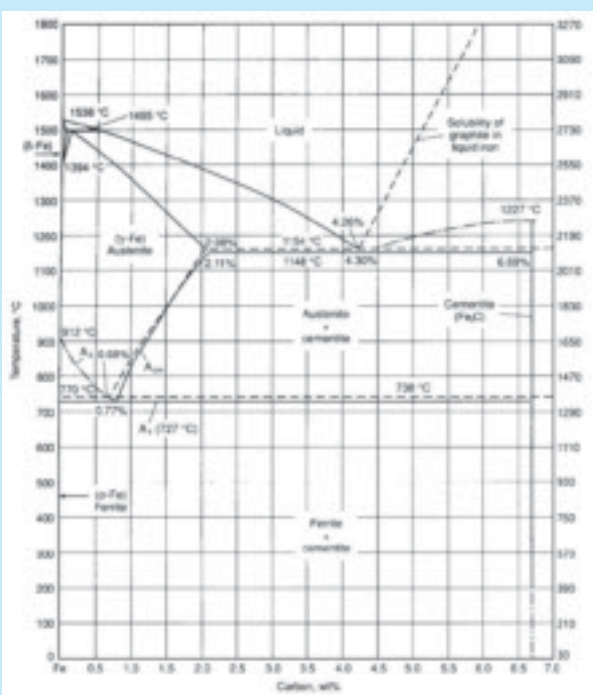
Voordat er kan worden gelast, zal er enige voorkennis moeten zijn van het te lassen basis-materiaal en hoe dit tot stand is gekomen. In deze rubriek staat de materiaalkundige kant van het vakgebied centraal. In voorgaande afleveringen is de productieroute van erts via ruwijzer naar staal geschetst. Ook is de opbouw van metalen en specifiek het element ijzer besproken. Deze maand gaan we verder in op de invloed van koolstof als legeringselement in ijzer (staal).

In ons vakgebied hebben we het altijd over het ijzer-koolstof diagram (Fe-C), maar in werkelijkheid is dit een onjuiste benaming. Als we bij de basis beginnen van zuiver ijzer en de invloed van koolstof op de structuursamenstelling, dan starten we bij het Fe-C diagram. Dit diagram beschrijft de verschijningsvormen van de microstructuur in een stabiel systeem. In het diagram kunnen we zien dat koolstof maar voor een zeer klein deel in ijzer kan oplossen en dat in de microstructuur al snel een vrije koolstof (grafiet) fase aanwezig is. Natuurlijk kennen we allemaal de eigenschappen van koolstof in zijn zuivere vorm zoals niet sterk en bros, waardoor het voor de industrie al snel een moeilijk toe te passen materiaal zou zijn. Gelukkig is er ook een ander toestandsdiagram, het

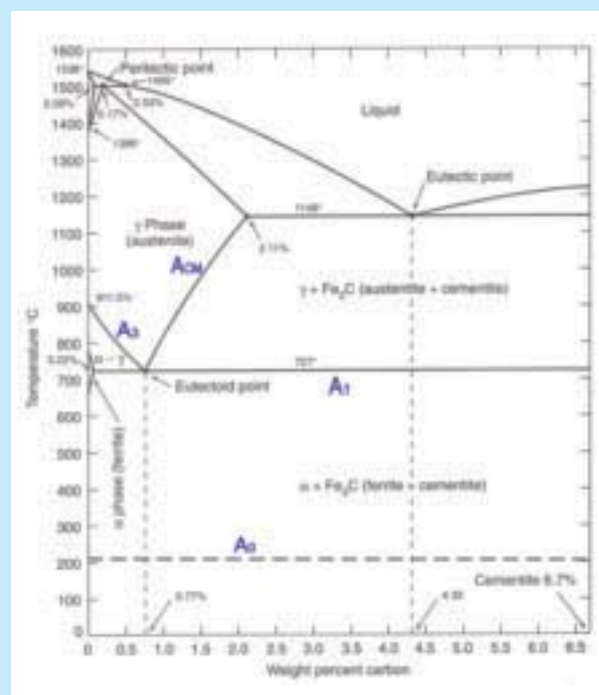
metastabiele Fe-Fe₃C systeem. Dit is het ijzer-cementiet diagram, welke de niet stabiele toestand beschrijft van ijzer en de ijzercarbide verbinding Fe₃C (cementiet). Aan dit diagram hebben we in de staalindustrie veel te danken. Het geeft door zijn overzichtelijke beschrijving van de structuurdelen een goed beeld van de te verwachten samenstelling van een staal, gietstaal of gietijzer en biedt ondersteuning voor het toepassen van onder andere warmtebehandelingen. In ons vakgebied hebben we het dus in het vervolg over het ijzer-cementiet diagram.

Fe-Fe₃C diagram

In het Fe-Fe₃C diagram kunnen we een aantal zaken onderscheiden. De linkerkant van het diagram stelt



Figuur 1 - Het Fe-C diagram in gestippelde lijnen



Figuur 2 - Het Fe-Fe₃C diagram

	Temperatuur in °C	Transformatie
A ₀	210	De overgangstemperatuur van de magnetische eigenschappen van cementiet
A ₁	727	De eutectoidische overgangstemperatuur (eutectoiden) tussen austeniet en ferriet transformatie
A ₂	768	De overgangstemperatuur van de magnetische eigenschappen van ferriet
A ₃	727-911	De overgangslijn tussen austeniet en ferriet transformatie
A _{cm}	727-1147	De overgangslijn tussen austeniet en cementiet transformatie, bij een teruglopende oplosbaarheid van de koolstof in austeniet tijdens afkoeling

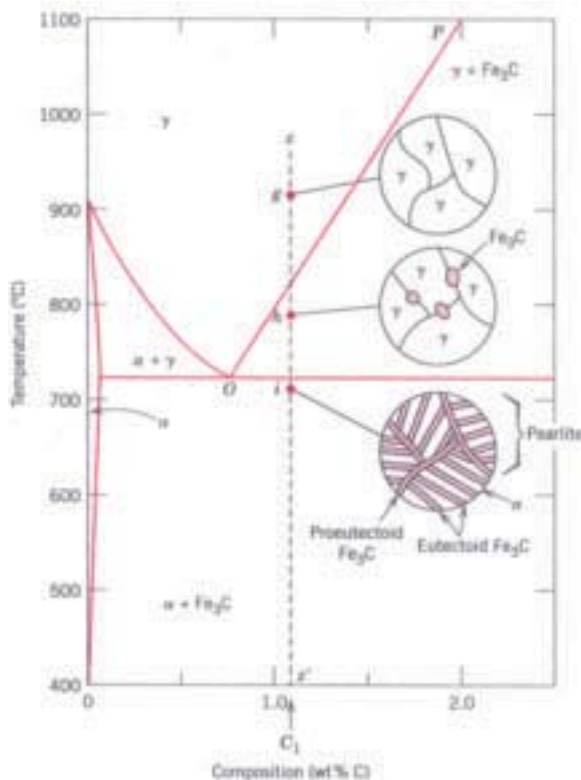
Tabel 1 - Belangrijke temperaturen in het Fe-Fe₃C diagram

zuiver ijzer voor en de rechterkant van het diagram de ijzer-koolstof verbinding Fe₃C met 6.67 %C. Dus hoe meer koolstof we in ijzer stoppen, hoe verder we naar rechts opschuiven in het diagram.

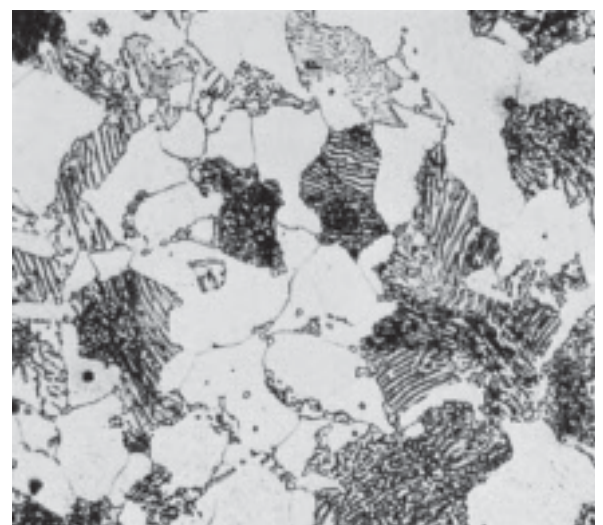
Het diagram laat ook zien hoe het materiaal vanuit een vloeibare conditie stolt en gaat veranderen (transformeren) in vaste toestand. Als voorbeeld nemen we twee transformaties uit het diagram over de lijn A en B. De lijn A geeft een onder (hypo) eutectoidisch staal weer, welke vanuit de vloeibare fase een stollingstraject doorloopt met vorming van delta (δ) ferriet en austeniet (γ). De delta-ferriet kan alleen bestaan op hoge temperaturen en wordt bij verdere afkoeling weer omgezet naar austeniet in het temperatuurstraject van 1492 tot 1400 °C. Dit gebied noemen we het peritecticum, waar een driefasenevenwicht bestaat

tussen vloeistof (L), delta-ferriet en austeniet: $\delta + L \leftrightarrow \gamma$.

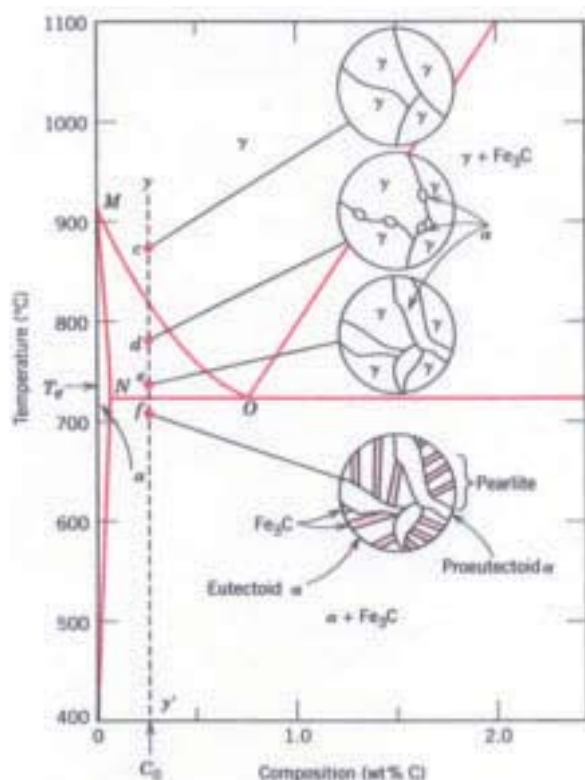
Bij afkoeling van het austeniet wordt de A₃ transformatielijn gekruist, waar de vorming van alpha (α) ferriet start. Bij verdere afkoeling wordt de A₁ temperatuur bereikt. Hier is het driefasenevenwicht in vaste materiaaltoestand, een eutectoiden. Bij dit eutectoiden vindt bij afkoeling perlietvorming plaats volgens het evenwicht: $\gamma \leftrightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$. Deze overgang is schematisch weergegeven in figuur 3, terwijl een microstructuurfoto van het staal is weergegeven in figuur 4. De lijn B geeft een boven (hyper) eutectoidisch staal weer, welke vanuit de vloeibare fase een stollingstraject doorloopt met vorming van austeniet (γ). Bij afkoeling van het austeniet wordt de A_{cm}-transformatielijn gekruist, waar de vorming van (pro-eutectoidisch) cementiet start door het teruglopen van de oplosbaarheid van koolstof in de austenietfase. Bij verdere afkoeling wordt de A₁ temperatuur bereikt. Hier is het driefasenevenwicht in vaste materiaaltoestand, een eutectoiden, waar bij afkoeling perlietvorming plaatsvindt volgens het evenwicht: $\gamma \leftrightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$. Deze overgang is schematisch weergegeven in figuur 5. Figuur 6 toont een microstructuurfoto van het staal.



Figuur 3 - Schematische voorstelling van de fasetransformatie vanuit het austenietgebied naar ferriet-perliet

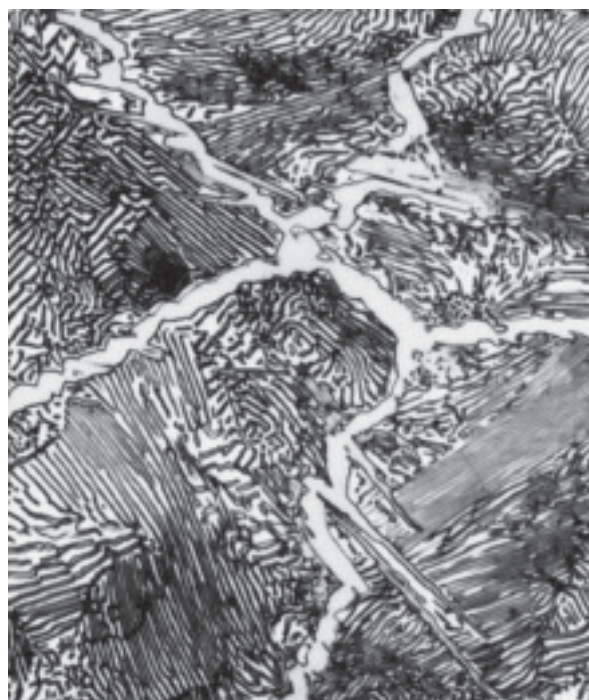


Figuur 4 - Foto van een onder-eutectoidisch staal met 0,34%C, met een ferriet-perliet structuur



Figuur 5 - Schematische voorstelling van de fasetransformatie vanuit het austenietgebied naar cementiet en perliet

Als er meer dan 2% koolstof aan ijzer wordt toegevoegd, spreken we niet meer van een normaal staal, maar van gietijzer. In het rechtse deel van het Fe-Fe₃C diagram krijgen we te maken met een speciaal driefa-



Figuur 6 - Foto van een boven-eutectoidisch staal met 1,1%C, met een cementiet-perliet structuur

senevenwicht, het eutecticum ledeburiet. Het eutecticum is een evenwicht tussen een vloeibare fase en twee vaste fasen, in ons geval bij 1148°C en 4.3%C volgens: $L \leftrightarrow \gamma + Fe_3C$. Bij verdere afkoeling wordt het austeniet bij de A₁ transformatielijn omgezet in perliet volgens het evenwicht: $\gamma \leftrightarrow \alpha + Fe_3C$.

De verschillende microstructuren van onder (hypo) eutectisch, eutectisch en boven (hyper) eutectisch gietijzer zijn schematisch weergegeven in figuur 7. Het gietijzer dat ontstaat bij een stolling met ledeburiet wordt ook wel wit gietijzer genoemd.

Grijs gietijzer komt voort uit stolling via het stabiele Fe-C systeem. Het wordt grijs genoemd door de aanwezigheid van een vrije koolstoffase (grafiet). Figuur 8 toont schematisch de belangrijkste verschijningsvormen van grijs gietijzer.

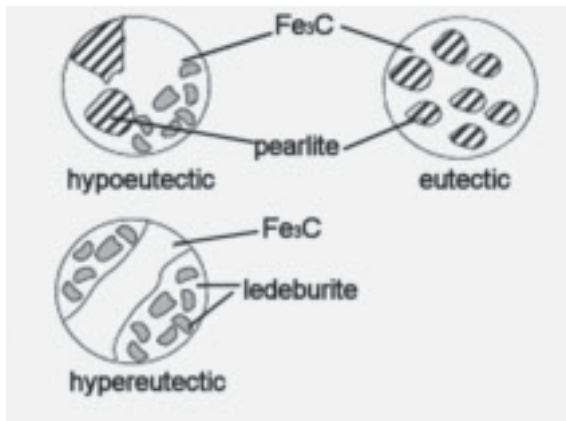
Er zijn veel parameters die invloed hebben op welk type stolling er optreedt, maar de belangrijkste zijn de afkoelsnelheid en kleine hoeveelheden legeringselementen (toevoegingen) in het ijzer. De belangrijkste elementen zijn silicium (Si) en fosfor (P). De invloed van silicium op de stolling is te zien in figuur 9. Ook hier kennen we een koolstofequivalentformule, welke de plaats van de legering ten opzichte van het eutecticum beschrijft: $C_{\text{equivalent}} = \%C + (\%Si + \%P)/3$

Structuurbestanddelen en eigenschappen

De eigenschappen van een materiaal volgens het Fe-C of Fe-Fe₃C diagram worden bepaald door de opeenstapeling van de eigenschappen van de verschillende structuurdelen. De uiteindelijke materiaaleigenschappen zijn afhankelijk van de afzonderlijke kristalstructuren en van hun mengverhouding. Een overzicht van de kristalstructuren van ijzerlegeringen:

- Ferriet, bijna zuiver ijzer, kubisch ruimtelijk gecentreerd (KRG), niet erg sterk, goed vervormbaar, taai en ferromagnetisch.
- Austeniet, ijzer met koolstof in oplossing, kubisch vlakken gecentreerd (KVG), niet ferromagnetisch, zeer taai, zeer goed vervormbaar. Alleen bij gelegerde staalsoorten kan austeniet bij kamertemperatuur bestaan. Bij ongelegerde staalsoorten kan in normale omstandigheden bij kamertemperatuur geen austeniet bestaan.
- Grafiet, zuiver gekristalliseerde koolstof, hexagonale kristallen, zacht, niet sterk, weinig vervormbaar (bros).
- Cementiet, gekristalliseerde ijzercarbide, zeer hard, bros, niet vervormbaar, grote sterkte.

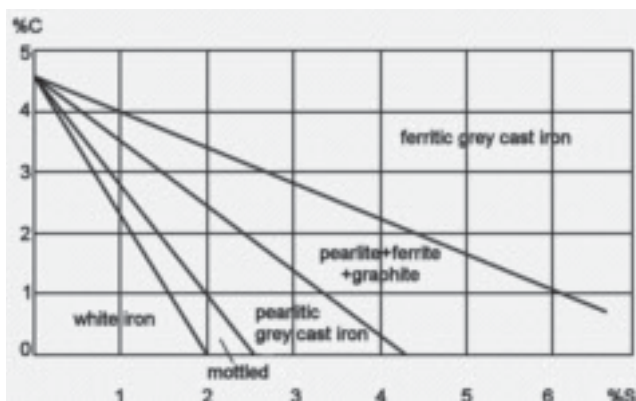
Met het toenemen van het koolstofpercentage in ijzer neemt ook de hoeveelheid cementiet toe en veranderen daarnaast de mechanische eigenschappen van ijzer (staal). In figuur 10 zijn de belangrijkste veranderingen in mechanische eigenschappen weergegeven



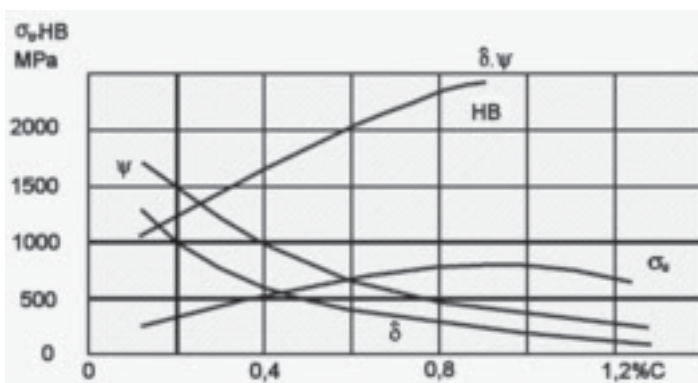
Figuur 7 - Schematische voorstelling van onder (hypo) eutectisch, eutectisch en boven (hyper) eutectisch gietijzer



Figuur 8 - Schematische weergave van de belangrijkste verschijningsvormen van grijs gietijzer



Figuur 9 - Invloed van silicium op de stolling van gietijzer. Mottled is gemêleerd gietijzer, een mengvorm van grijs en wit gietijzer



Figuur 10 - Belangrijkste veranderingen in mechanische eigenschappen onder invloed van het koolstofgehalte in staal

onder invloed van het koolstofgehalte in staal. Bij verhoging van het koolstofgehalte:

- Neemt de hardheid van het staal toe, weergegeven in HB (hardheid Brinell).
- Neemt de treksterkte toe, weergegeven in σ_u in MPa.
- Neemt de insnoering af, weergegeven in ψ in %.
- Neemt de rek bij breuk af, weergegeven in δ in %.

De warmvervormbaarheid van staal neemt af bij verhoging van het koolstofgehalte. De grens van de smeedbaarheid ligt bij circa 2%C. Bij een hoger koolstofgehalte is warmvervormen niet meer mogelijk. De koudvervormbaarheid is het beste bij ongelegeerd ijzer. Door het harde en brosse cementiet wordt de koudvervormbaarheid minder. De grens ligt bij ongeveer 0,8%C. Hoe hoger het koolstofgehalte, hoe groter de kracht moet zijn die voor het koudvervormen nodig is.

Lasbaarheid hangt nauw samen met de rek en de insnoering. Als het staal goed vervormbaar is, worden de spanningen die bij het lassen door het ongelijkmatig afkoelen ontstaan ten gevolge van het vervormen door deze inwendige spanningen verminderd. Gevaar voor scheuren bestaat als hardere staalsoorten met een geringe rek deze spanningen niet kunnen verlagen door te vervormen. Staalsoorten met een laag koolstofgehalte (minder dan 0,25%C) zijn het best lasbaar. ■

Referenties

1. G. den Ouden, B.M. Korevaar, Metaalkunde, deel 1, DUM, ISBN 90-6562-117-2, 1991.
2. B.M. Korevaar, G. den Ouden, Metaalkunde, deel 2, DUM, ISBN 90-407-1282-4, 1998.
3. Engineering materials (artikel), Kaunas University of technology, Jonas Mockaitis en Regita Bendikiene.
4. Materialenkennis en materiaalbeproeving, Wolfgang Weissbach, ISBN 90-6376-009-4, 1981.
5. Materials Science and Engineering - An Introduction, W.D. Callister, 5de editie, John Wiley & Sons Inc., ISBN 04-7132-013-7.