

Warmtebehandelingen van staal

vm 128

VWM

Warmtebehandelingen van staal

vm 128



Vereniging FME-CWM
vereniging van ondernemers in de
technologisch-industriële sector

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
Telefoon: (079) 353 11 00
Telefax: (079) 353 13 65
E-mail: info@fme.nl
Internet: <http://www.fme.nl>

© Vereniging FME-CWM/december 2009 - versie 02

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 Techniek en Innovatie
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon: 079 - 353 11 00
telefax: 079 - 353 13 65
e-mail: info@fme.nl
internet: <http://www.fme.nl>

Warmtebehandelingen van staal

toelichting:

Deze voorlichtingspublicatie is bedoeld voor allen die te maken hebben of te maken krijgen met de selectie, toepassing en uitvoering van warmtebehandelingen. Daarbij moet gedacht worden aan constructeurs, lastechnici, werkvoorbereiders, enzovoorts.

Deze voorlichtingspublicatie is een update van de bestaande NIL-voorlichtingspublicatie V990906 (september 1999) "Warmtebehandeling van metalen in relatie tot de lastechniek".

De updating was noodzakelijk omdat er enerzijds geen document beschikbaar was met een duidelijk overzicht van de (belangrijkste) warmtebehandelingen en anderzijds omdat de ontwikkelingen in onder andere de nieuwe staalsoorten beperkingen (kunnen) stellen aan de uitvoering van warmtebehandelingen.

De in deze voorlichtingspublicatie genoemde warmtebehandelingen zijn die, welke veel voorkomen in de staalverwerkende industrie en dus ook in de lastechniek. De meest belangrijke warmtebehandelingen worden in beknopte vorm behandeld.

Doel van deze publicatie is voornamelijk basisinformatie te verschaffen over de warmtebehandelingen.

Warmtebehandelingen hebben effecten op de metaalkundige aspecten, zoals de structuur en de daaraan gerelateerde mechanische eigenschappen. Daarom wordt in een aantal hoofdstukken aandacht besteed aan de opbouw (kristalstructuur) van de metalen, alsmede de invloed van het opwarmen naar en (snel) afkoelen vanaf een bepaalde warmtebehandelingstemperatuur.

Daarnaast wordt ook beknopt ingegaan op de uitvoering van warmtebehandelingen. Het is echter geenszins de bedoeling met deze publicatie volledig te zijn.

samengesteld door:

W. Pors IWE (NIL); als co-lezers hebben H. de Jong † IWE (NIL) en H. Bodt IWE (NIL) gefungeerd.
Eindredactie: P. Boers (Vereniging FME-CWM).

technische informatie:

Nederlandse Instituut voor Lastechniek (NIL)

- bezoekadres	Boerhaavelaan 40, Zoetermeer
- correspondentie-adres	Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER
- telefoon	088 - 400 85 60
- telefax	079 - 353 11 78
- e-mail	info@nil.nl
- website	www.nil.nl

informatie over en bestelling van VM-publicaties, TI-bladen en praktijkaanbevelingen:

Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

- bezoekadres	Boerhaavelaan 40, Zoetermeer
- correspondentie-adres	Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER
- telefoon	079 - 353 11 00
- telefax	079 - 353 13 65
- e-mail	info@fme.nl
- website	www.fme.nl

Inhoud

	blz.
Symbolen en verklaringen	5
Overzicht van de warmtebehandelingen	6
1 Inleiding	7
2 Doel van warmtebehandelingen	7
3 Opbouw van de metalen	7
3.1 Inleiding	7
3.2 Wijze van stolling van metalen	7
3.3 Opbouw van de metalen (roostervormen)	8
3.4 Legeringsvormen	8
3.5 Toestandsdiagrammen.	8
3.5.1 Volkomen oplosbaarheid	8
3.5.2 Onvolkomen oplosbaarheid	9
3.5.3 Gedeeltelijke oplosbaarheid	10
3.5.4 Beperking	10
4 De warmte-beïnvloede zone naast de las	10
5 Afkoeling	11
5.1 Inleiding	11
5.2 Warmte-inbreng	11
5.3 Materiaalsoort	11
5.4 Plaatdikte	11
5.5 Voorwarmtemperatuur	11
5.6 Ligging van de lasrups ten opzichte van het werkstuk	11
5.7 Bepaling van de afkoelsnelheid	11
6 Afkoeldiagrammen	12
6.1 Isotherme diagrammen	12
6.2 Afkoel CCT-diagram (Continuous Cooling Transformation diagram)	12
6.3 PTAT-diagram (PiekTemperatuur AfkoelTijd diagram)	13
7 Warmtebehandeling	13
7.1 Voorwarmen	13
7.2 Beheersing van de tussenlagetemperatuur	14
7.3 Waterstofarm gloeien	14
7.4 Spanningsarmgloeien	14
7.5 Oplossend gloeien	15
7.6 Harden	15
7.7 Ontlaten	16
7.8 Veredelen	17
7.9 Normaalgloeien	17
7.10 Precipitatieharden	18
7.11 Homogeengloeien	18
7.12 Rekristalliserend gloeien	18
7.13 Zachtgloeien	19
7.14 Oppervlakteharding	20
8 Uitvoering van warmtebehandelingen	20
8.1 Door aanvullende lasrupsen	20
8.2 Gasbranders	20
8.3 Elektrische verwarmingselementen.	20
8.4 Infrarood stralers	20
8.5 Inductieverwarming	21
8.6 Gloeiovens	21
9 Meten en registratie van de gloeitemperatuur	22
10 Literatuurverwijzing	22
Bijlage 1 Het ijzer-koolstofdiagram	23
Bijlage 2 Diagram ter bepaling van de voorwarmtemperatuur volgens BS 5135	24

Symbolen en verklaringen

Symbolen

α	aanduiding van de ferritische structuur
γ	aanduiding van de austenitische structuur
δ	aanduiding van de primair ferritisch gestolde structuur
σ_v	aanduiding van de vloeispanning
σ_R	aanduiding van de treksterkte
A1-temp	temperatuur waarbij de structuur van staal overgaat van austenitisch/ferritisch in ferritisch/perlitisch
A3-temp	temperatuur waarbij de structuur van staal overgaat van austenitisch/ferritisch in volledig austenitisch
A_{C1}	ook wel A1-temperatuur genoemd
A_{C3}	ook wel A3-temperatuur genoemd
C^{eq}	koolstofequivalent
C_{EV}	koolstofequivalent
Fe_3C	ijzer-koolstofverbinding, cementiet genaamd
HAZ	heat affected zone; door de laswarmte beïnvloede zone naast de las
HDP	hexagonale bolstapeling
HRc	hardheid gemeten volgens de Rockwell-cone methode
KRG	kubisch ruimtelijk gecentreerde structuur, bestaande uit 9 atomen
KVG	kubisch vlakken gecentreerde structuur, bestaande uit 14 atomen
L	liquide (vloeistof)
S	solidus (vaste stof)
t_{8-5}	afkoeltijd tussen 800 en 500 °C
$\Delta t_{8/5}$	afkoeltijd tussen 800 en 500 °C
WBZ	warmte-beïnvloede zone; door de laswarmte beïnvloede zone direct naast de las

Verklaringen

austeniet	kubisch vlakken gecentreerde structuur (KVG)
bainiet	mildere vorm van martensiet met betere mechanische eigenschappen
cementiet	chemische verbinding van ijzer met koolstof, Fe_3C
elementaire cel	basisopbouw uit atomen van een kristal
ferriet	kubisch ruimtelijk gecentreerde structuur (KRG)
legeren	in vloeibare toestand vermengen van meerdere elementen teneinde de eigenschappen te verbeteren
legering	vermenging van elementen
liquidus	vloeibare toestand van een metaal
liquiduslijn	lijn in een toestandsdiagram aangevende die temperatuur waarbij de stolling begint bij afkoeling c.q. volledig smelten een feit is bij opwarming
liquidustemperatuur	temperatuur waarbij stolling begint c.q. volledig smelten een feit is
martensiet	structuurvorm die ontstaat door snelle afkoeling van staal
oriëntatie	richting van de elementaire cellen in een kristal
perliet	lamellair naast elkaar voorkomen van cementiet en ferriet
precipitaat	chemische verbinding die de regelmatige opbouw van het kristalrooster verstoort
solidus	vaste toestand van een metaal
soliduslijn	lijn in een toestandsdiagram aangevende die temperatuur waarbij stolling is voltooid bij afkoeling c.q. vorming van de eerste vloeistof bij opwarming
solidustemperatuur	temperatuur waarbij stolling is voltooid c.q. de eerste vloeistof wordt gevormd

Overzicht van de warmtebehandelingen

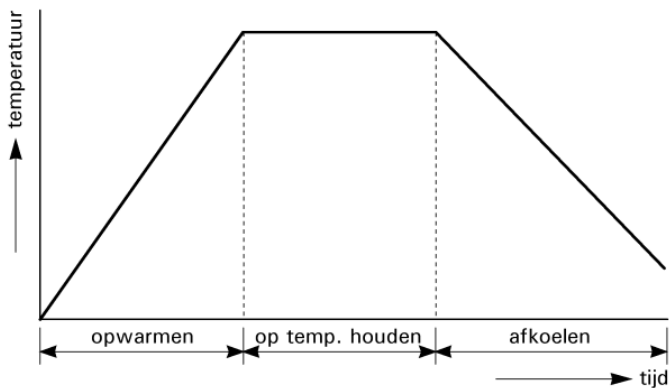
Warmtebehandeling	Doel	Temperatuur-gebied [°C] (ca.)	Opmerking	§
Voorwarmen	- Verlagen afkoelsnelheid - Voorkomen van bindingsfouten	--	Voorwarmtemperatuur hangt af van het te lassen staalsoort, het waterstofgehalte van het lastoevoegmateriaal, het warmtegeleidingsvermogen van het	7.1
Beheersen tussenlagen-temperatuur	Behouden mechanische eigenschappen van zowel las- als basismateriaal	--	Tussenlagentemperatuur hangt af van het toe te passen lastoevoegmateriaal en het te lassen staal	7.2
Waterstofarm gloeien	Verlagen waterstofgehalte om waterstofscheuren te voorkomen	200 - 250		7.3
Spanningsarmgloeien	Verlagen inwendige spanningen	580 - 620	Bij lagere temperatuur (300-400 °C) worden alleen de piekspanningen afgebouwd	7.4
Oplossend gloeien	Oplossen precipitaten in de kristalstructuur	1050 - 1100		7.5
Harden	Verhogen hardheid en sterkte van een constructiedeel	50 °C in austenietgebied	Snelle afkoeling vereist	7.6
Ontlaten	Omzetten martensiet (gevormd door het harden) in bainiet (een mildere en minder brosse vorm)		Temperatuur is afhankelijk van de gewenste mechanische eigenschappen	7.7
Veredelen	Verhogen van sterkte en taaheid na het harden		Veredelen = harden + ontlaten op hoge temperatuur	7.8
Normaalgloeien	Verbeteren van de vervormbaarheid van de structuur na een koude deformatie	50 °C in austenietgebied		7.9
Precipitatieharden	Geven van hardheid aan het materiaal door vorming van roosterverstoringen (precipitaten)		Temperatuur is afhankelijk van de legering en de gewenste hardheid	7.10
Homogeengloeien	Elementen homogeen over de structuur verdelen		Temperatuur is afhankelijk van de legering	7.11
Rekristalliserend gloeien	Korrelverfijning na een bepaalde mate van koudvervormen		Afhankelijk van de legering en de mate van koudvervorming	7.12
Zachtgloeien	Harde structuur weer goed verspaanbaar maken	50 °C in austenietgebied		7.13
Oppervlakteharding	Geven van hardheid alleen aan het oppervlak	50 °C in austenietgebied		7.14

1 Inleiding

In de staalverwerkende industrie en in de lastechniek in het bijzonder komt het veelvuldig voor dat een warmtebehandeling moet worden uitgevoerd. Een warmtebehandeling kan zowel vóór, tijdens als ná de lasbewerking worden uitgevoerd. Onder een warmtebehandeling, ook wel gloeien genoemd, wordt het proces verstaan dat is opgebouwd uit:

- ▶ opwarmen;
- ▶ op temperatuur houden;
- ▶ afkoelen.

Schematisch is dit proces weergegeven in figuur 1.1.



figuur 1.1 Schematische weergave van een warmtebehandeling

Een warmtebehandeling kan (moet) worden uitgevoerd ofwel tijdens één van de fasen van productie, ofwel als het product gereed is. In het eerste geval kan gedacht worden aan montagewerkzaamheden tijdens nieuwbouw, laswerkzaamheden in het veld of bij reparatiewerkzaamheden.

De installatie waarmee de warmtebehandeling moet worden uitgevoerd, moet zowel op het product, als op de omstandigheden waaronder gegloeid moet worden, zijn afgestemd. De warmtebehandeling kan worden uitgevoerd in ovens (meestal als het product gereed is), of kan er, als er lokaal moet worden gegloeid, gebruik worden gemaakt van keramische gloei-elementen, inductieverwarming of een brander.

Warmtebehandelingen worden vaak toegepast na productieprocessen als walsen, gieten, lassen en vervormen. Deze processen hebben een grote en vaak nadelige invloed op de structuur en de bijbehorende mechanische eigenschappen van het materiaal. Met de juiste warmtebehandeling na een productieproces kunnen de gewenste eigenschappen of structuren worden verkregen.

2 Doel van warmtebehandelingen

Kort gezegd is het doel van warmtebehandelingen om het staal de juiste mechanische eigenschappen te geven voor de gekozen toepassing of om de gewenste bewerking te kunnen uitvoeren.

Globaal kan gezegd worden dat warmtebehandelingen voor de verschillende staalsoorten toegepast worden om:

- ▶ ongewenste effecten van een voorgaand productieproces te corrigeren (spanningsarmgloeien, rekristalliserend gloeien, homogengloeien of oplosgloeien);
- ▶ het materiaal sterker te maken (normaalgloeien);
- ▶ het materiaal zachter te maken voor verdere bewerking (zachtgloeien);
- ▶ het materiaal te harden en slijtvaster te maken (harden, ontlaten of veredelen).

Hoewel er nog meer warmtebehandelingen voor staal bestaan, zijn dit de belangrijkste en de meest toegepaste.

Warmtebehandelingen om ongewenste effecten van een voorgaand productieproces te corrigeren, worden toegepast om de eigenschappen te verbeteren. Hierdoor kan de

levensduur van onderdelen aanzienlijk worden verlengd. Voorbeelden van dit soort warmtebehandelingen zijn spanningsarmgloeien en rekristalliserend gloeien en harden.

Ook kunnen warmtebehandelingen worden uitgevoerd vóór of tijdens het lasproces zelf. Te denken valt hierbij aan het voorwarmen voor het lassen en het aanhouden van de tussenlagetemperatuur. Zeker deze laatste wordt meestal niet als "warmtebehandeling" gezien.

3 Opbouw van de metalen

3.1 Inleiding

Voor het kiezen van een warmtebehandeling en het op de juiste wijze uitvoeren ervan is kennis van de metalen een absolute voorwaarde. Zo moet men inzicht hebben in onder meer de volgende aspecten:

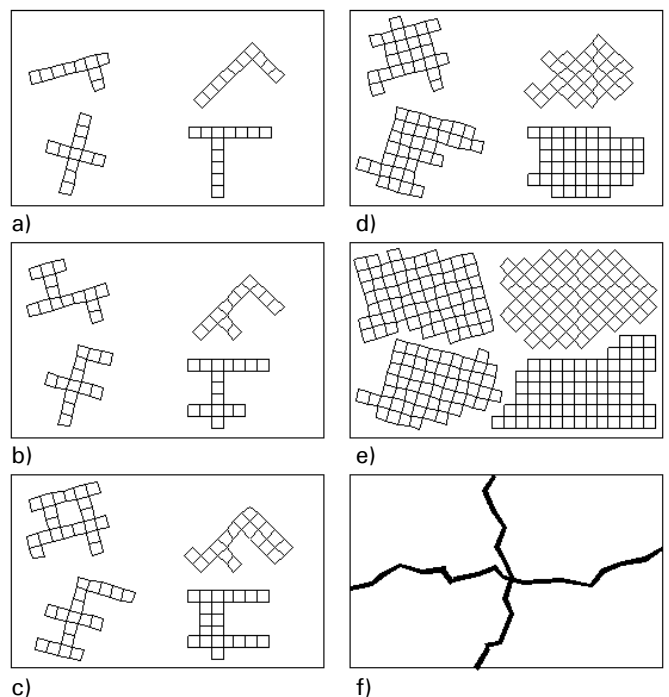
- ▶ wijze van stolling van metalen;
- ▶ opbouw van de metalen (roostervormen);
- ▶ legeringsvormen;
- ▶ toestandsdiagrammen.

Op deze aspecten wordt beknopt ingegaan

3.2 Wijze van stolling van metalen

De atomen waaruit de enkelvoudige metalen zijn opgebouwd, zijn op een regelmatige wijze gerangschikt in een zogenaamde elementaire cel. De basis voor deze elementaire cel is de kubus. Meerdere van deze cellen vormen een kristal.

De stolling van een metaal vanaf de smelttemperatuur gebeurt door vorming van de eerste elementaire cellen. Tijdens het stollingsverloop zullen deze elementaire cellen in de richting van hun vlakken aangroeien. Omdat dit proces op verschillende plaatsen in het smeltbad tegelijkertijd optreedt, zullen dus ook gelijktijdig meer kristallen ontstaan. Deze kristallen, ook vaak "korrels" genoemd, zullen op een gegeven moment tegen elkaar aangegroeid zijn, waardoor scheidingsvlakken ontstaan. De ontstane scheidingsvlakken noemen we de kristalgrenzen (korrelgrenzen). Het verloop van de stolling wordt schematisch weergegeven in figuur 3.1 a tot en met f.



figuur 3.1 Wijze van stolling; van begin stolling (a) tot volledig gestold (f)

Omdat de kristallen in verschillende richtingen groeien, dus een verschillende oriëntatie hebben, is de aansluiting met

een buurkristal niet optimaal. Hierdoor ontstaan onregelmatige kristalgrenzen. Deze wijze van kristalliseren treedt op bij zowel zuivere metalen als ook de legeringen ervan.

3.3 Opbouw van de metalen (roostervormen)

De kristallen zijn opgebouwd uit regelmatig geordende atomen, de zogenaamde elementaire cel.

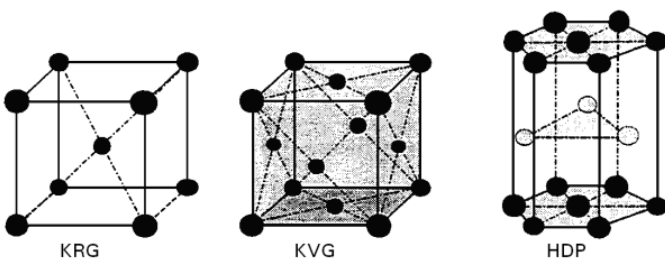
Binnen de metalen komt het volgende drietal elementaire cellen het meeste voor:

- ▶ kubisch ruimtelijk gecentreerd rooster; ook wel de ferritische structuur genoemd;
- ▶ kubisch vlakken gecentreerd rooster; ook wel de austenitische structuur genoemd;
- ▶ een hexagonaal rooster.

Het kubisch ruimtelijk gecentreerd rooster (KRG) bestaat per cel uit 9 atomen, namelijk op iedere hoek van de kubus en in het hart van de kubus een atoom. Deze vorm komt bij kamertemperatuur voor bij onder andere ijzer, chroom, wolfram en molybdeen. Deze vorm wordt ook wel ferriet genoemd.

Het kubisch vlakken gecentreerd rooster (KVG) bestaat uit 14 atomen, namelijk op iedere hoek van de kubus en in het midden van elk vlak van de kubus een atoom. Deze vorm komt bij kamertemperatuur voor bij onder andere aluminium, koper en nikkel en bij hogere temperatuur bij ijzer. Deze vorm wordt ook wel austeniet genoemd.

Het hexagonale rooster (HDP) is een van beide afwijkende vorm. Metalen waar deze vorm in voorkomt zijn zink en magnesium. Bovendien kan deze vorm door een warmtebehandeling uit een van de andere vormen ontstaan. In figuur 3.2 zijn de drie vormen schematisch weergegeven.



figuur 3.2 Voorkomende vormen van elementaire cellen

De kristalstructuren hebben de volgende kenmerkende eigenschappen:

- ▶ het kubisch ruimtelijk gecentreerde rooster (KRG of ferriet):
 - is magnetisch;
 - heeft een hoge sterkte.
- ▶ het kubisch vlakken gecentreerde rooster (KVR of austeniet):
 - is niet magnetisch;
 - heeft een hoge taaiheid;
 - is warscheur gevoelig.

Daarnaast hebben de kristallen zelf de volgende kenmerkende eigenschappen:

- ▶ grove kristallen leiden tot een lage sterkte en lage taaiheid;
- ▶ kleine kristallen leiden tot een hoge sterkte en hoge taaiheid;
- ▶ kristallen willen onder invloed van warmtetoevoer groeien.

3.4 Legeringsvormen

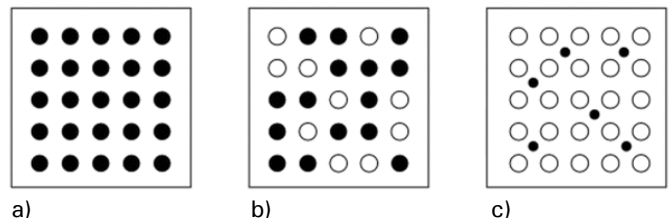
De metalen worden bijna nooit in hun zuivere vorm gebruikt. Dit omdat de eigenschappen in die vorm onvoldoende zijn voor de meeste toepassingen. Daarom worden metalen gelegeerd. Een legering van metalen ontstaat door in vloeibare toestand twee of meer metalen bij elkaar te voegen. Hierdoor worden atomen van de verschillende metalen door elkaar in het rooster opgenomen. Er ontstaat een metaal met andere en vaak betere mechanische of corrosie-eigen-

schappen dan een van de beide materialen afzonderlijk. Ook de structuur van de legering (de opbouw van de kristallen) is anders dan van de afzonderlijke metalen.

Er is een drietal manieren van opname van atomen in een bestaand rooster, namelijk

- ▶ *Substitutioneel*; het vreemde atoom neemt de plaats in van een eigen atoom. Hiertoe moeten de atoomafmetingen ongeveer overeenstemmen. Bekende substitutionele legeringselementen in staal zijn silicium (Si), mangaan (Mn), chroom (Cr), nikkel (Ni) en molybdeen (Mo).
- ▶ *Interstitieel*; het vreemde atoom neemt een plaats in tussen de eigen atomen. Dit kan alleen als het vreemde atoom relatief klein is, zoals koolstof (C), stikstof (N), zuurstof (O) en waterstof (H). Er treedt een sterke verstoring van het rooster op, waardoor slechts een gering aantal atomen kan worden opgenomen; met andere woorden: de oplosbaarheid is gering.
- ▶ *Chemische verbinding*; de atomen vormen een chemische verbinding, zoals bijvoorbeeld Fe_3C , WC, enz. Deze verbindingen zijn vaak hard en bros en daarom veelal ongewenst in de metalen. De vorming van deze verbindingen is echter niet altijd te voorkomen.

In figuur 3.3 is schematisch de mogelijke atoomordening in een homogene stof weergegeven.



figuur 3.3 Atoomordening in een homogene stof:
a) zuiver metaal;
b) substitutioneel mengkristal;
c) interstitieel mengkristal

3.5 Toestandsdiagrammen

Zoals vermeld is, om een warmtebehandeling goed te kunnen uitvoeren, inzicht hebben in de metaaleigenschappen vereist. Belangrijk is onder meer te weten welke uitgangstructuur een metaal heeft. Door een warmtebehandeling kunnen de structuren, door de fabrikant bewust daaraan gegeven, teniet worden gedaan. Hierdoor zullen de oorspronkelijke eigenschappen verloren gaan. Inzicht in welke structuur er ontstaat tijdens stollen en welke structuur er metaal heeft bij een bepaalde temperatuur en na afkoeling, is noodzakelijk. Hiertoe kunnen de zogenaamde toestandsdiagrammen informatie verschaffen.

De zuivere metalen hebben een stolpunt, zijnde één temperatuur waarbij het metaal smelt bij opwarming en stolt bij afkoeling. In legeringen kunnen voorkomen:

- ▶ een stoltraject (een verloop van de temperatuur tijdens het stollen);
- ▶ een stolpunt;
- ▶ combinaties daarvan.

Een en ander is afhankelijk van de mate van oplosbaarheid van de verschillende atomen in elkaars rooster.

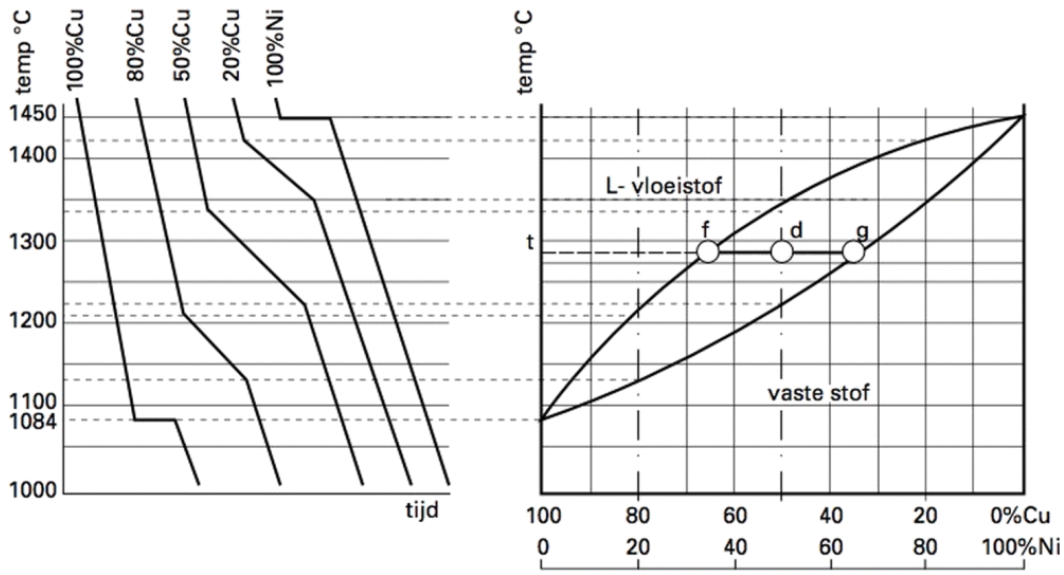
Zo onderkennen we:

- ▶ volkomen oplosbaarheid;
- ▶ onvolkomen oplosbaarheid;
- ▶ gedeeltelijke oplosbaarheid.

Bij deze drie vormen behoren eigen toestandsdiagrammen. Deze drie vormen worden nu beknopt besproken.

3.5.1 Volkomen oplosbaarheid

Figuur 3.4 geeft het toestandsdiagram van het stelsel van legeringen van koper en nikkel weer. Hierin is boven de bovenste gebogen lijn te onderkennen dat alles nog vloeit-

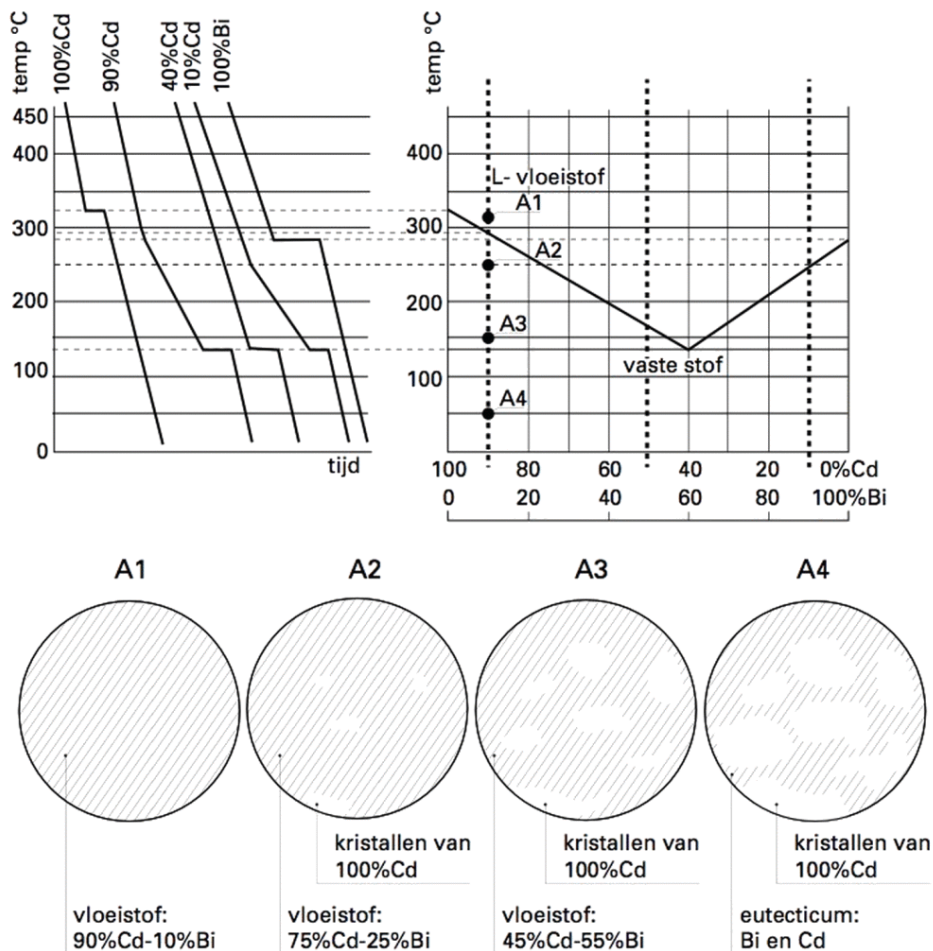


figuur 3.4 Toestandsdiagram van het stelsel koper - nikkel

stof is, aangegeven met de letter L van Liquidus. Onder de onderste gebogen lijn is alles gestold, aangegeven met de letter S van Solidus. Tussen beide lijnen bevindt zich het gebied van deegachtige toestand, namelijk vaste stof in combinatie met vloeibaar metaal. Te zien is dat een legering van 60% koper en 40% nikkel begint te stollen bij ca. 1300 °C en dat alles vast is bij ca. 1180 °C. Hier is dus sprake van een stoltraject. Tijdens de stolling ontstaan zogenaamde mengkristallen.

3.5.2 Onvolkomen oplosbaarheid

Figuur 3.5 geeft het toestandsdiagram van het stelsel bismut - cadmium weer. Dit diagram wijkt volledig af van dat van het stelsel koper - nikkel. Het gebied ingesloten tussen de schuin verlopende lijnen is het gebied waar alles vloeibaar is, terwijl het gebied onder de horizontale lijn (144 °C) het gebied aangeeft waar alles vast is. Verder valt op dat één bepaalde legering bij één temperatuur stolt: namelijk 60% cadmium en 40% bismut stolt middels een stolpunt bij 144 °C.



figuur 3.5 Toestandsdiagram van het stelsel bismut - cadmium

De legering die bij dit stolpunt behoort noemen we een eutectische legering en het stolpunt het eutecticum. In legeringen met minder dan 60% bismut stolt in eerste instantie het cadmium en in legeringen met minder dan 40% cadmium stolt in eerste instantie het bismut. Hierdoor wordt het vloeibare deel armer aan cadmium respectievelijk bismut, waardoor tot slot alles in één keer als eutecticum stolt bij 144 °C. De kristallen die ontstaan, zijn zuivere kristallen cadmium resp. bismut met daaromheen de eutectische samenstelling, zoals weergegeven in figuur 3.5. In het onderste deel van figuur 3.5 zijn de verschillende stadia tijdens de stolling van een legering 90% cadmium en 10% bismut weergegeven.

3.5.3 Gedeeltelijke oplosbaarheid

Er zijn legeringen die een volledige oplosbaarheid combineren met een onvolkomen oplosbaarheid. Een zeer bekende legering is ijzer en koolstof. Het toestandsdiagram van het systeem ijzer en koolstof, beter bekend onder de naam ijzer-koolstofdiagram, is weergegeven in bijlage 1.

Uit het diagram is te lezen dat de legering ijzer met ca. 0,2% C (ongeveer de hoeveelheid die in normale constructiestaalsoorten voorkomt) stolt in de ferritische structuur, overgaat bij ca. 1400 °C in de austenitische structuur en bij ca. 900 °C weer een structuurverandering ondergaat. Bij kamertemperatuur heeft dit staal uiteindelijk een structuur bestaande uit ferriet met daarin opgenomen perliet. Perliet is een structuur van ferriet en cementiet die laagvormig naast elkaar voorkomen. Opgemerkt wordt dat bij 0,77% C de structuur bij kamertemperatuur volledig uit perliet bestaat. Dit staal noemt men een perlitisch staal, terwijl men het eerder genoemde staal met ca. 0,2% C onderperlitisch noemt.

3.5.4 Beperking

Opgemerkt wordt dat de toestandsdiagrammen hun beperkingen hebben. Zij gelden namelijk alleen voor oneindig langzame afkoeling; deze condities zijn alleen in laboratoriumomstandigheden te benaderen. In de praktijk treden totaal andere afkoelcondities op, waardoor andere structuren zullen ontstaan dan volgens de toestandsdiagrammen verwacht mogen worden. Daarom hebben de toestandsdiagrammen voor de lastechniek weinig betekenis. Bovendien bestaan veel legeringen uit meer dan twee afzonderlijke elementen, waardoor de toestandsdiagrammen er anders uit zien.

4 De warmte-beïnvloede zone naast de las

Bij het lassen wordt een zone, grenzend aan de lasrups, door de laswarmte beïnvloed. Deze zone wordt dan ook de warmte-beïnvloede zone, veelal afgekort tot wbz, genoemd. In deze zone treden grotere afkoelsnelheden op dan die welke optreden bij het opstellen van de toestandsdiagrammen. Daarom zijn de toestandsdiagrammen niet direct bruikbaar in de lastechniek.

Wel kan, wat staal betreft, gebruik worden gemaakt van het ijzer-koolstofdiagram om aan te geven welke structuurveranderingen in de warmte-beïnvloede zone optreden. Hiertoe kan figuur 4.1 behulpzaam zijn.

De warmte-beïnvloede zone van een ongelegeerd staal met ca. 0,20% koolstof is in figuur 4.1 schematisch ingedeeld in verschillende zones. De temperaturen en de grootte van de daarbij behorende zones zijn sterk afhankelijk van het lasproces en de warmtehuishouding.

Zone van onvolledige aansmelting

Dit gedeelte ligt direct naast de smeltlijn. Deze zone bereikt de hoogste temperatuur van de warmte-beïnvloede zone. Het materiaal is niet helemaal vloeibaar geweest.

Zone van oververhitting

De hoogste temperaturen liggen tussen de soliduslijn (waaronder alles vast is) en circa 1100 °C. Door de hoge temperatuur treedt korrelgroei op en ontstaat er een grofkorrelige structuur.

Zone van normaliserend gloeien

Te herkennen is een genormaliseerde structuur in de warmte-beïnvloede zone. Het ferriet en perliet zijn fijnkorrelig en gelijkmatig verdeeld. De korrelverfijning is het gevolg van het doorlopen van een fasetransformatie, waarbij kiemvorming en kiemgroei optreedt.

Zone van onvolledige rekristallisatie

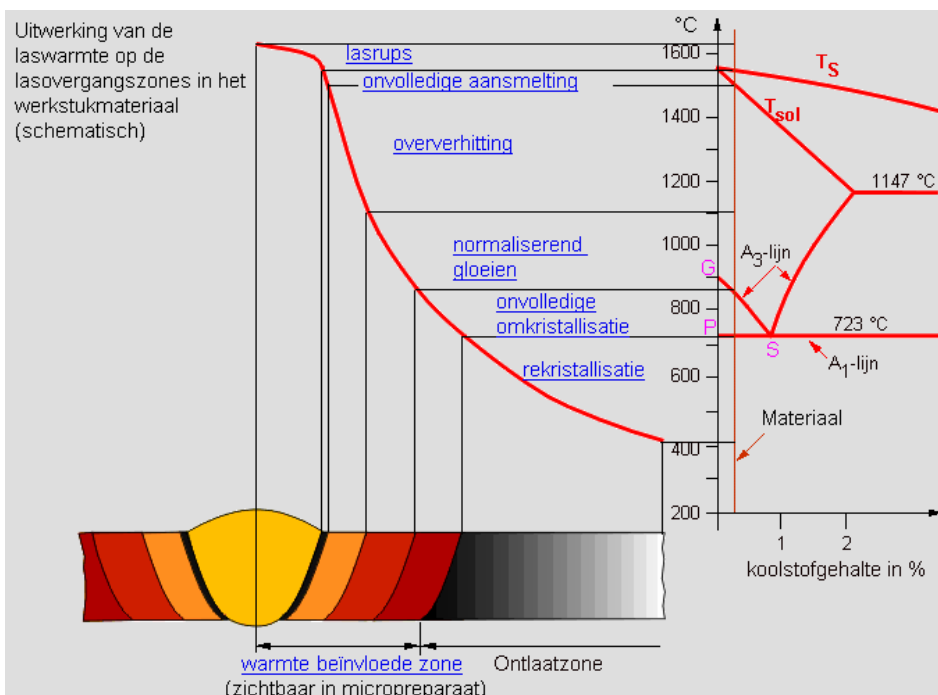
Hier vindt onvolledige rekristallisatie plaats.

Zone van rekristallisatie

Rekristallisatiezone; hierin bereikt de temperatuur waarden tot A1. De cementietlamellen van de perliet vormen zich om tot bolvormige cementiet.

Zone waarin geen structuurverandering plaats vindt

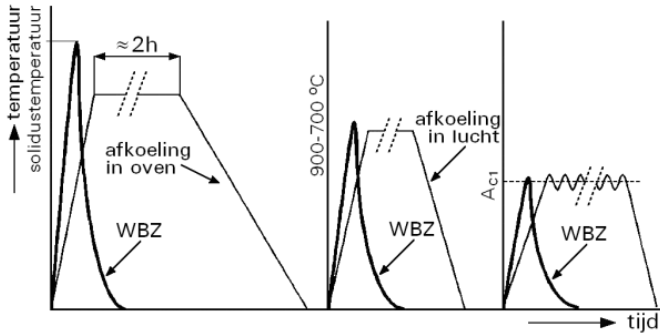
Hier komt de temperatuur niet boven de 400 °C en zullen met de lichtmicroscop geen structuurveranderingen te vinden zijn ten opzichte van de basisstructuur. Dat wil niet zeggen dat er geen veranderingen plaatsvinden.



figuur 4.1 De warmte-beïnvloede zone van een ongelegeerd staal met ca. 0,2%C, schematisch ingedeeld in verschillende zones

Het is mogelijk dat er uitscheidingen zijn, zoals uitharding of veroudering. Ook kunnen aanwezige spanningen gedeeltelijk worden opgeheven (spanningsarmgloeien).

De vergelijking van de structuren in de warmte-beïnvloede zone met de verkregen gloestructuren gaat niet helemaal op. De verblijftijden en de afkoelsnelheid van de warmte-beïnvloede zone zijn vele malen sneller dan bij het gloeien (zie figuur 4.2). Wel geeft het een idee van wat er in de warmte-beïnvloede zone plaatsvindt.



figuur 4.2 De verblijftijden en de afkoelsnelheid van de warmte-beïnvloede zone zijn vele malen sneller dan bij het gloeien

5 Afkoeling

5.1 Inleiding

De wijze van afkoeling alsmede de daarmee te realiseren afkoelsnelheid heeft grote invloed op de uiteindelijke structuur die ontstaat. Kennis van toestandsdiagrammen en afkoeldiagrammen is daarbij noodzakelijk.

Echter, onder 3.5.4 is de beperking ten aanzien van het gebruik van toestandsdiagrammen in de lastechniek aangehaald. Het lassen is eigenlijk ook een warmtebehandeling, waarbij de ingebrachte laswarmte naar het omringende materiaal wordt afgevoerd. Onder ongunstige omstandigheden kan deze warmteafgifte, feitelijk de afkoelsnelheid, zo groot zijn, dat bijvoorbeeld in staal hardingsverschijnselen zullen optreden in de door de laswarmte beïnvloede zone naast de las. Van belang is dus te kennen hoe groot de afkoelsnelheid onder bepaalde omstandigheden is.

De afkoelsnelheid is afhankelijk van een aantal factoren:

- ▶ de hoeveelheid door de lasboog in het materiaal gebrachte warmte, de zogenaamde warmte-inbreng;
- ▶ materiaalsoort;
- ▶ materiaaldikte;
- ▶ voorwarmtemperatuur;
- ▶ de ligging van de rups ten opzichte van het werkstuk.

Deze factoren worden beknopt behandeld.

5.2 Warmte-inbreng

De hoeveelheid laswarmte die in het metaal wordt gebracht is afhankelijk van de lasstroomsterkte, de boogspanning en de voortloopsnelheid. De warmte-inbreng wordt uitgedrukt in kJ/mm laslengte en kan worden berekend aan de hand van de formule, zoals weergegeven in de norm NEN-EN 1011-1:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v} \times 10^{-3} \text{ [kJ/mm]}$$

waarin:

U = Boogspanning [V]

I = Lasstroomsterkte [A]

v = Lassnelheid [mm/sec]

k = Thermisch rendement van het proces.

De waarden voor het thermisch rendement, volgens NEN-EN 1011-1, zijn weergegeven in tabel 5.1.

Onder het thermisch rendement wordt die factor verstaan die weergeeft welk aandeel van de in de lasboog ontwikkelde warmte daadwerkelijk in het smeltbad komt. Facto-

ren onder 1 geven aan dat een deel van de warmte verloren gaat aan uitstraling naar de omgeving.

tabel 5.1 Thermische rendementen voor verschillende lasprocessen

lasproces	procesnummer	rendementsfactor k
Onder poeder lassen	12	1
Bmbe rutiel	111	0,8
MAG-lassen met massieve draad	135	0,8
Bmbe basisch	111	0,8
MAG gevulde draad	136	0,8
MIG-lassen	131	0,8
TIG-lassen	141	0,6
Plasmalassen	15	0,6

In de lastechniek is de norm NEN-EN-1011-2: "Smeltlassen van metallische materialen" van belang. In deze norm zijn tabellen opgenomen, waarin men voor het lassen met beklede elektroden, aan de hand van de elektrodediameter, de lengte van de elektrode en de uittrek lengte ervan, de warmte-inbreng kan bepalen.

Onder de uittrek lengte wordt de lengte van de gelegde lasrups verstaan, uitgaande van de elektrodelengte minus de peuklengte (nuttige lengte).

5.3 Materiaalsoort

Een kenmerk van metalen is, dat zij de warmte goed geleiden en dus ook de laswarmte goed kunnen afvoeren. De warmtegeleiding is niet voor alle metalen gelijk. Bekend is dat koper en aluminium de warmte beter geleiden dan bijvoorbeeld ongelegeerd staal, en dat corrosievast staal de warmte weer minder goed geleidt dan ongelegeerd staal. De afkoelsnelheid wordt dus mede bepaald door het warmtegeleidingsvermogen van het metaal.

5.4 Plaatdikte

Het spreekt voor zich dat de afkoelsnelheid in een dikke plaat groter is dan in een dunne plaat. Zo onderscheiden we in de lastechniek een zogenaamde "tweedimensionale" en een "driedimensionale" warmteafvoer. Bij een driedimensionale warmteafvoer speelt de dikte van het materiaal een grotere rol dan bij de tweedimensionale warmteafvoer. De warmteafvoersnelheid is bij driedimensionaal groter dan bij tweedimensionaal. Bij een gecombineerde te lassen plaatdikte boven de ca. 25 mm moeten we rekening houden met een driedimensionale warmteafvoer. Voorverwarming bij het lassen zal dan waarschijnlijk eerder moeten plaats vinden.

5.5 Voorwarmtemperatuur

Als een plaat op een bepaalde temperatuur is voorverwarmd, is het temperatuurverschil tussen lasnaad en plaat kleiner dan wanneer de plaat de omgevingstemperatuur heeft. De laswarmte zal bij voorgewarmde werkstukken dus minder snel wegvloeien dan bij niet voorgewarmde werkstukken, dus de afkoelsnelheid zal hier dan lager zijn.

5.6 Ligging van de lasrups ten opzichte van het werkstuk

Zo maakt het verschil of de lasrups bijvoorbeeld aan de rand van een plaatveld of midden in een plaatveld ligt voor wat betreft de warmteafvoer. In het eerste geval zal de warmteafvoer minder snel verlopen dan in het tweede geval.

5.7 Bepaling van de afkoelsnelheid

Aan de hand van de bovengenoemde punten hebben de onderzoekers Rykalin en Uwer-Degenkolbe formules ontwikkeld, waarmee men de afkoelsnelheid van het staal in het temperatuursgebied tussen 800 en 500 °C kan bere-

kenen. Zeker bij staal is de tijd voor de afkoeling in dit temperatuursgebied belangrijk voor de vorming van al of niet gewenste structuren. Hierop wordt later teruggekomen. Deze formules zijn weer bewerkt tot een nomogram, waarmee op eenvoudige wijze de afkoeltijd kan worden bepaald. In figuur 5.1 is dit nomogram weergegeven.

Het nomogram bestaat uit drie hoofdlijnen:

- ▶ op de bovenste is de te lassen plaatdikte uitgezet;
- ▶ op de onderste is de warmte-inbreng uitgezet;
- ▶ op de middelste is de afkoeltijd $T_{800-500}$ af te lezen.

Wordt een punt op de warmte-inbrenglijn verbonden met een op die van de plaatdikte, in de figuur 5.1 de 2,0 kJ/mm met de 20 mm plaatdikte, dan kan op het snijpunt met de middelste lijn, de afkoeltijdlijn, de afkoeltijd worden afgelezen. In het voorbeeld is deze 10 seconden.

Uit het nomogram wordt ook de invloed van voorwarmen duidelijk. In het voorbeeld heeft men een voorverwarming van 150 °C uitgezet op de lijn van de afkoelsnelheid (vanuit punt D de maat "a" naar rechts tot punt D'). Met voorwarmen wordt bereikt dat de afkoelsnelheid van 10 seconden afneemt naar ca. 30 seconden.

Al met al is dit nomogram een zeer waardevol hulpmiddel voor de lastechnicus!

In de praktijk is veel ervaring opgedaan met afkoeltijden. Zo kan voor verschillende lassituaties uitgegaan worden van de afkoeltijden als weergegeven in tabel 5.2.

Voor de meest voorkomende staalsoorten zal men streven naar een afkoeltijd tussen 10 en 40 sec; dit gebeurt door sturing via de lasproceskeuze, de voorwarmtemperatuur en de lasparameters.

tabel 5.2 Gemiddelde afkoeltijden voor de verschillende lassituaties

lasproces	afkoeltijd [sec]
handlassen op dikke plaat zonder voorverwarming	ca. 5
handlassen op dikke plaat met voorverwarming op 100-150 °C	ca. 8
onder poeder op dikke plaat zonder voorverwarming	ca. 20
onder poeder op dikke plaat met voorverwarming op 100 °C	ca. 40

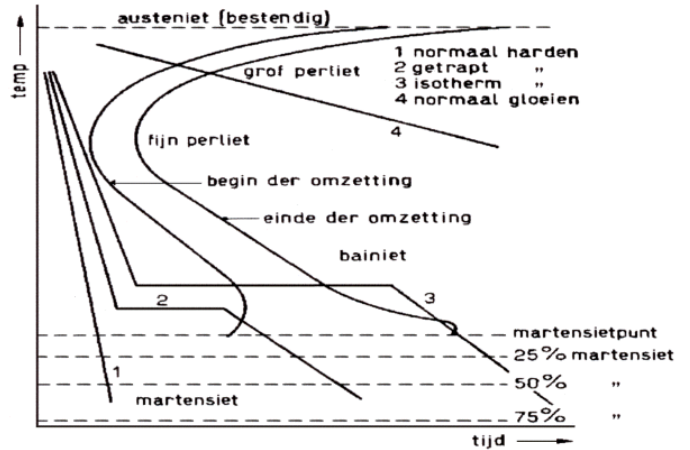
6 Afkoeldiagrammen

Voor de lastechniek hebben de zogenaamde afkoeldiagrammen, de zogenaamde TTT-diagrammen (Temperatuur-Tijd-Transformatie diagrammen) meer betekenis dan het ijzer-koolstofdiagram. De afkoeldiagrammen beschrijven namelijk welke structuren er tijdens een (versnelde) afkoeling in het metaal werkelijk ontstaan. Zo kennen wij isotherme TTT-diagrammen, CCT-diagrammen en PTAT-diagrammen.

6.1 Isotherme diagrammen

Deze diagrammen zijn gebaseerd op een isotherm doorlopen van de temperatuur. Deze methode is slechts van toepassing bij bepaling van de te realiseren hardheid bij het harden van hardbare staalsoorten.

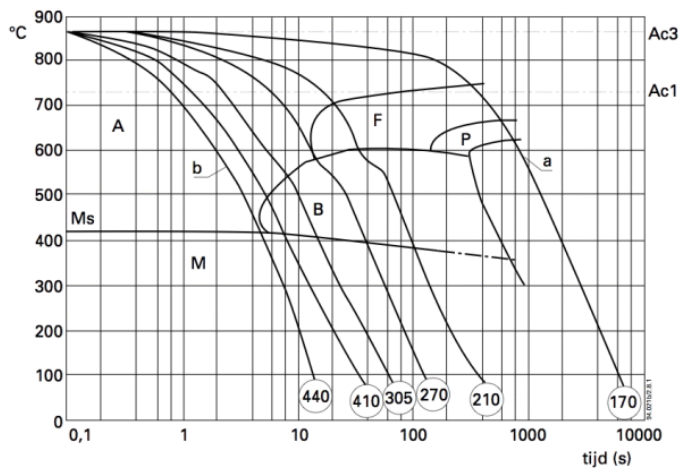
Figuur 6.1 geeft een voorbeeld van een isotherm TTT-diagram.



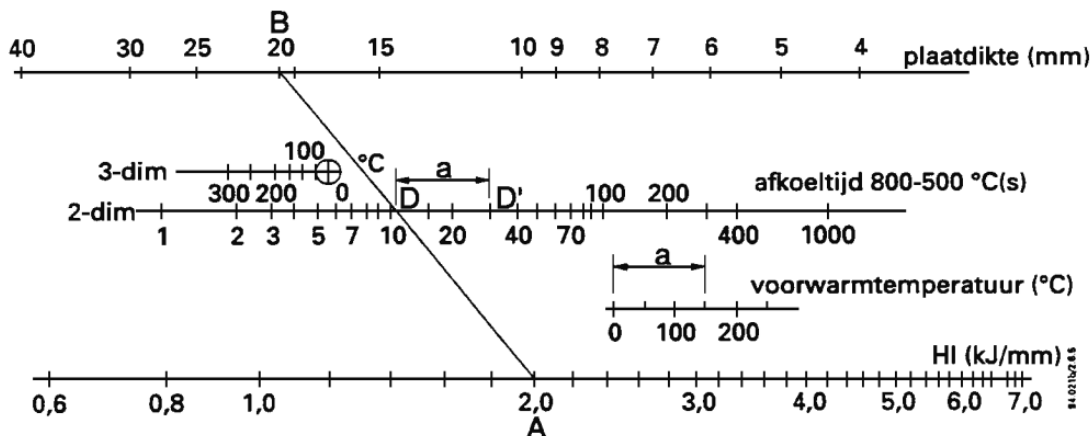
figuur 6.1 Isotherm TTT-diagram

6.2 Afkoel CCT-diagram (Continuous Cooling Transformation diagram)

Het CCT-diagram zoals weergegeven in figuur 6.2, is gebaseerd op het werkelijke verloop van de afkoeling. Dit geeft een redelijk beeld van de te verwachten structuren. Ieder staalsoort heeft zijn eigen diagram.



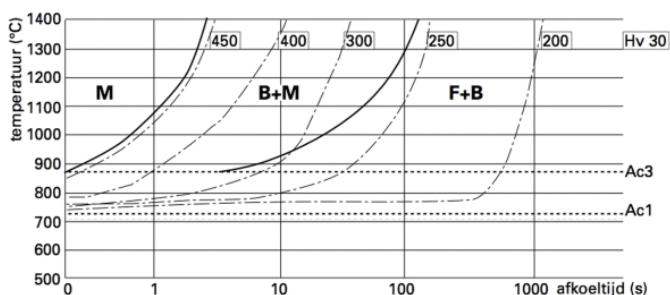
figuur 6.2 Voorbeeld van een CCT-diagram



figuur 5.1 Nomogram voor bepaling van de afkoeltijd tussen 800 en 500 °C

6.3 PTAT-diagram (PiekTemperatuur AfkoelTijd diagram)

Werd in de CCT-diagrammen rekening gehouden met een vaste austeniteertemperatuur, in het PTAT-diagram wordt uitgegaan van een variabele temperatuur. Bij de opzet van dit diagram is uitgegaan van het feit dat de afkoelsnelheid en dus de afkoeltijd bij afkoeling in het temperatuurgebied tussen 800 tot 500 °C gelijk is voor al die punten in het materiaal die tijdens het lassen een temperatuur van meer dan 900 °C hebben bereikt. In figuur 6.3 is een PTAT-diagram van een bepaald type staal weergegeven.



figuur 6.3 Voorbeeld van een PTAT-diagram

Opgemerkt wordt dat ieder staalsoort zijn eigen diagram heeft; deze zijn echter niet voor alle moderne staalsoorten beschikbaar.

Indien de afkoeltijd, bepaald met behulp van het nomogram in figuur 5.1, op de onderste schaal van het PTAT diagram (figuur 6.3) wordt opgezocht en door dat punt een verticale lijn wordt getrokken, doorsnijdt men een aantal structuurgebieden. Wordt vanuit de linker verticale as door een bepaalde piektemperatuur een lijn horizontaal getrokken, dan geeft het snijpunt van beide lijnen de structuur weer die te verwachten is bij die afkoeltijd en die piektemperatuur. Tevens kan de hardheid van die structuur worden afgelezen.

Andersom kan men met behulp van dit diagram bepalen wat de afkoeltijd minimaal moet zijn, opdat men een structuur met de daarbij behorende hardheid verkrijgt die acceptabel is voor de constructie.

7 Warmtebehandeling

Zoals in hoofdstuk 2 al is opgemerkt, wordt een warmtebehandeling om verschillende redenen uitgevoerd. De hoofdredenen zijn enerzijds de eigenschappen van de lasverbinding te beïnvloeden en anderzijds de eigenschappen van het materiaal te beïnvloeden.

De verschillende warmtebehandelingen die ten gevolge van het lassen kunnen worden toegepast zijn:

- 7.1 voorwarmen voor het lassen;
- 7.2 beheersen tussenlagentemperatuur;
- 7.3 waterstofarm gloeien;
- 7.4 spanningsarmgloeien;
- 7.5 oplosgloeien.

Warmtebehandelingen om de materiaaleigenschappen te beïnvloeden zijn:

- 7.6 harden;
- 7.7 ontlaten;
- 7.8 veredelen;
- 7.9 normaalgloeien;
- 7.10 precipitatieharde;
- 7.11 homogeeingloeien;
- 7.12 rekristalliserend gloeien;
- 7.13 zachtgloeien;
- 7.14 oppervlakteharding.

7.1 Voorwarmen

Het doel van het voorwarmen voor het lassen is in het algemeen verlagings van de afkoelsnelheid. Dit voorwarmen kan nodig zijn ter:

- ▶ voorkoming van hardingsverschijnselen;
- ▶ voorkoming van waterstof geïnitieerde scheurvorming (ook wel koudscheuren genoemd).

Ook wordt voorgewarmd ter:

- ▶ voorkoming van bindingsfouten; hoofdzakelijk toegepast bij het lassen van dik aluminium en koper en bij processen met een geringe warmte-inbreng;
- ▶ vermindering van thermische spanningen; hoofdzakelijk toegepast bij dikwandige constructies.

Het voorkomen van bindingsfouten is een duidelijke zaak. Te meer als men bedenkt dat bij zeer snelle afvoer van de ingebrachte laswarmte naar het omliggende materiaal, het vloeibare materiaal te weinig warmte overhoudt om de laskanten nog aan te smelten. Het voorwarmen heeft dus in dit geval te maken met de executieve of operationele lasbaarheid en niet met metallurgische verschijnselen.

Het verminderen van thermische spanningen is het gevolg van het feit dat de door het lassen ingebrachte laswarmte een kleiner temperatuurverschil teweegbrengt wanneer het desbetreffende materiaal is voorverwarmd. Ook dit heeft dus niets te maken met metallurgische verschijnselen.

In de meeste gevallen echter wordt het voorwarmen toegepast om harde zones en daarmee het risico voor het ontstaan van zogenaamde koudscheuren te voorkomen. Het effect is tweeledig: verlagings van de afkoelsnelheid geeft een lagere hardheid in de warmte-beïnvloede zone en meer tijd voor de waterstof om uit het kristalrooster te ontwijken.

Koudscheuren ontstaan onder gelijktijdige aanwezigheid van de volgende vier factoren:

- ▶ temperatuur beneden 200 °C;
- ▶ de aanwezigheid van spanningen;
- ▶ de aanwezigheid van harde structuren in de warmte-beïnvloede zone;
- ▶ de aanwezigheid van waterstof.

Het ontstaan van harde structuren na een snelle afkoeling wordt bij het harden besproken. Als gelast moet worden in dik materiaal en de toegepaste warmte-inbreng is gering, dan kunnen harde zones ontstaan naast de las. Het lassen kan dus worden vergeleken met een hardingsproces. Het begrip warmte-inbreng is al besproken in § 5.2.

Ook de afkoeldiagrammen zijn in hoofdstuk 6 behandeld. Ondanks de afwezigheid van deze diagrammen kan met behulp van het zogenaamde koolstofequivalent, het C_{eq} , veel gezegd worden over het al of niet ontstaan van harde zones tijdens het afkoelen.

Het koolstofequivalent is namelijk een getal dat de invloed van de legeringselementen ten opzichte van het element koolstof aangeeft op de hardbaarheid, dus het ontstaan van hoge hardheden in het metaal. De formule voor het koolstofequivalent is in de norm NEN-EN-1011 deel 2: "Het lassen van metallische materialen. Het lassen van ferritische staalsoorten" gedefinieerd. Deze formule luidt:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{(\%Cr + \%Mo + \%V)}{5} + \frac{(\%Ni + \%Cu)}{15}$$

Als uit deze formule een getal komt $\geq 0,45\%$, dan moet zeer zeker rekening worden gehouden met de noodzaak tot voorverwarming.

Bovendien is de aanwezigheid van waterstof een van de voorwaarden voor het ontstaan van koudscheuren. In deze voorlichtingspublicatie wordt de bron van waterstof beperkt tot de lastoevoegmaterialen; er zijn echter nog meer bronnen van waaruit waterstof kan worden ontwikkeld.

Voor bepaling van de voorwarmtemperatuur werd voorheen voor de "oude" genormaliseerde staalsoorten de British Standard 5135 gebruikt. In deze standaard is een diagram opgenomen aan de hand waarvan de voorwarmtemperatuur

kan worden bepaald. Dit diagram is in bijlage 2 van deze publicatie opgenomen, omdat het nog steeds kan worden gebruikt voor de bepaling van de voorwarmtemperatuur bij reparaties aan oude genormaliseerde staalsoorten, zoals het St 52-3N. Het werken ermee wordt in de bijlage beknopt besproken.

Met de ontwikkeling van de moderne staalsoorten met een lager koolstofgehalte en dus een lager koolstofequivalent en lastoevoegmaterialen met een laag gehalte aan diffundeerbare waterstof, ontstond de vraag naar een nauwkeuriger bepaling van de voorwarmtemperatuur. Onderzoekingen hebben geresulteerd in de norm NEN-EN 1011-2, waarmee de voorwarmtemperatuur voor deze moderne staalsoorten kan worden bepaald.

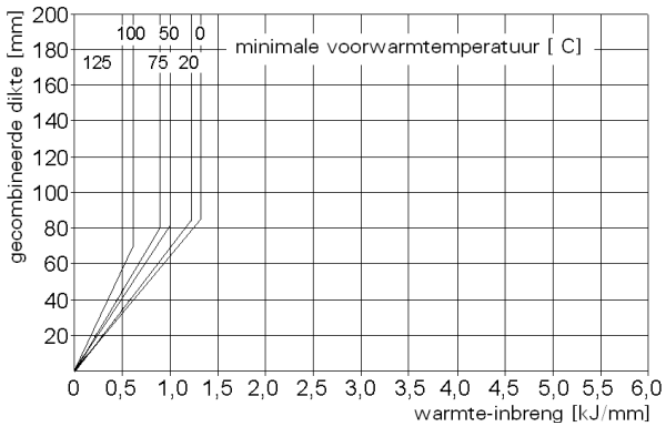
In deze norm NEN-EN 1011-2 gaat men nu uit van een 5-tal verschillende niveaus aan waterstof die in lasmetalen aanwezig kunnen zijn. Deze niveaus zijn in tabel 7.1 weergegeven.

tabel 7.1 Waterstofniveaus volgens NEN-EN 1011-2

hoeveelheid diffundeerbare waterstof in ml/100 gram neergesmolten lasmetaal	waterstofschaal
> 15	A
10 - 15	B
5 - 10	C
3 - 5	D
< 3	E

Voorts gaat men in deze norm uit van een te lassen gecombineerde plaatdikte.

Al met al resulteert dit in een serie grafieken, waarvan in figuur 7.1 een voorbeeld is gegeven, aan de hand waarvan men de minimale voorwarmtemperatuur kan bepalen.



figuur 7.1 Voorbeeld van een diagram uit NEN-EN 1011-2

Op het snijpunt van een verticale lijn door de toe te passen warmte-inbreng met een horizontale door de gecombineerde plaatdikte, is de toe te passen voorwarmtemperatuur af te lezen.

Men moet zich wel realiseren dat elke opgenomen grafiek een eigen geldigheidsgebied heeft. Zo geldt de grafiek in figuur 7.1 alleen voor de voorwaarden zoals aangegeven in tabel 7.2.

Andere combinaties van koolstofequivalent en gehalten aan diffundeerbare waterstof vereisen een andere grafiek.

Ook zijn in de norm NEN-EN 1011-2 aanwijzingen in tabelvorm opgenomen voor het voorwarmen van zowel de kruipvaste alsook de nikkelgelegeerde staalsoorten. Ook hierbij is onderscheid gemaakt naar de hoeveelheid diffundeerbare waterstof in het lasmetaal.

tabel 7.2 Geldigheid diagram in figuur 7.1

waterstofschaal	maximum C _{eq}
A	0,34
B	0,39
C	0,41
D	0,46
E	0,48

7.2 *Beheersing van de tussenlagentemperatuur*

In de lastechniek is beheersing van de tussenlagentemperatuur een belangrijke parameter, hoewel hij niet tot een warmtebehandeling wordt gerekend. De tussenlagentemperatuur, ook vaak "interpass temperature" genoemd, is de maximale temperatuur die het staal op een bepaald punt mag hebben, vóórdat de lasboog dat punt weer passeert. De maximum tussenlagentemperatuur wordt onder andere bepaald door de gevoeligheid van een staal voor het ontstaan van warmscheuren; denk bijvoorbeeld aan bepaalde corrosievaste staalsoorten.

Anderzijds leidt een te hoge tussenlagentemperatuur tot een ontoelaatbare achteruitgang van de mechanische eigenschappen van ofwel het basismateriaal dan wel het lastoevoegmateriaal. Exacte temperaturen kunnen hier niet worden gegeven. Deze kunnen voor het basismateriaal worden verstrekt door de staalleverancier en voor de lastoevoegmaterialen door de fabrikanten van lasmaterialen.

7.3 *Waterstofarm gloeien*

Het doel van deze behandeling is de eventueel aanwezige waterstof uit te drijven (diffunderen), zodat het gevaar voor het optreden van de waterstof geïnduceerde scheuren (koudscheuren) afneemt. Deze behandeling wordt aansluitend aan het lassen doorgevoerd en wel op een temperatuur van ca. 200 tot 250 °C. De tijd dat deze temperatuur wordt aangehouden is ca. 2 uur. Door het toevoeren van warmte zal de diffusiesnelheid van de waterstof toenemen, zodat deze gemakkelijker kan ontwijken uit het materiaal.

7.4 *Spanningsarm gloeien*

Zoals de naam al doet vermoeden, is het doel van deze warmtebehandeling de inwendige spanningen in het materiaal te verminderen. Hierbij verandert de structuur, sterkte en/of hardheid van het materiaal nauwelijks.

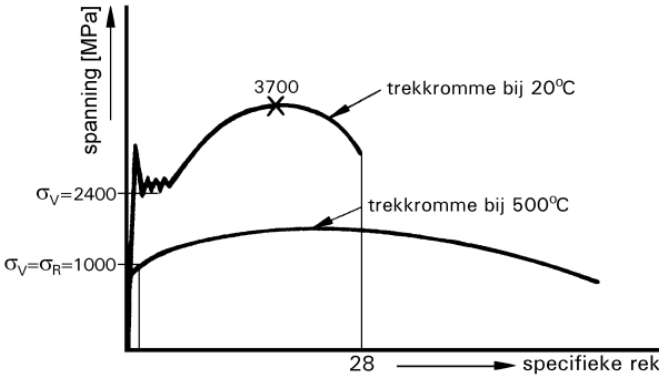
Inwendige spanningen ontstaan tijdens het vervaardigen van een werkstuk door bijvoorbeeld het deformereren, buigen, zetten, lassen of gieten. Bij processen waarbij plastische (of blijvende) deformatie optreedt, neemt de dislocatiedichtheid in het materiaal toe. Het atoomrooster wordt plaatselijk vervormd waardoor spanningen in het rooster ontstaan. Bij het lassen koelt het lasmetaal af van de smelttemperatuur tot kamertemperatuur. Het lasmetaal wil krimpen, maar wordt tegengehouden door het omringende koude plaatmateriaal. Dit resulteert dan ook in trekspanningen in en rondom de las.

Bij gietstukken kunnen inwendige spanningen ontstaan door bijvoorbeeld ongelijkmatige afkoeling en volumecontracties tijdens het stollen.

Materiaal dat moet worden verspaand, kan inwendige spanningen bezitten van het voorgaande productieproces. Tijdens het verspanen kan dit leiden tot ongewenste maatafwijkingen. De statische trek- en drukspanningen in het materiaal zijn namelijk in evenwicht. Als dit evenwicht wordt verstoord, zullen de spanningen zich gaan herverdelen en zal vervorming optreden.

De spanningen kunnen oplopen tot aan de waarde van de rekgrens. Waarden hoger dan de rekgrens zijn niet mogelijk, omdat het materiaal dan gaat vloeien (plastisch deformereren). De inwendige spanningen kunnen maat- en vormveranderingen van het werkstuk veroorzaken. Ook kunnen er macroscopische of microscopische scheuren ontstaan, die tijdens de gebruiksfase van het onderdeel verder kunnen groeien.

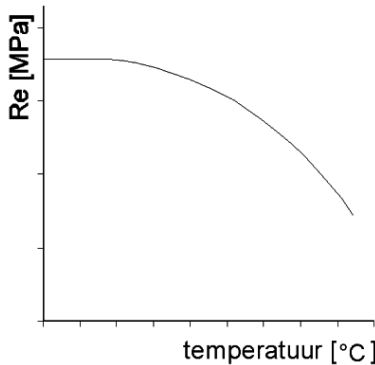
Het spanningsarmgloeien van staal wordt doorgaans uitgevoerd in het temperatuursgebied van ca. 580 tot 620 °C. De gloeitemperatuur is sterk afhankelijk van de warmvastheid van het materiaal. Bij een hogere temperatuur neemt de sterkte en de vloeigrens van het materiaal drastisch af (zie figuur 7.2).



figuur 7.2 Invloed van de temperatuur op de sterkte van staal S235

Wordt het verloop van de rekgrens van een type staal bij verschillende temperaturen bepaald en grafisch uitgezet, dan ontstaat een verloop zoals aangegeven in figuur 7.3.

Door het verhogen van de temperatuur zullen dislocaties zich herrangschikken, waardoor de roostervorming en het spanningsniveau afneemt. Dit gaat gepaard met een geringe volumeverandering van het werkstuk, resulterend in een verlaging van de vloeigrens.



figuur 7.3 Verloop vloeigrens met de temperatuur

Bij het spanningsarmgloeien is het belangrijk dat het opwarmen en afkoelen langzaam gebeurt, zodat er geen nieuwe spanningen ontstaan als gevolg van temperatuurverschillen in het werkstuk. Hoe groter de wanddikte en de complexiteit van het werkstuk, des te groter het gevaar voor ongelijkmatige opwarming/afkoeling.

Het afkoelen aan rustige lucht of in gesloten ovens dient dubbel zo langzaam te gaan als het opwarmen. Alle spanningen die ontstaan tijdens het afkoelen blijven namelijk in het werkstuk.

Ook de houdtijd is van invloed op het uiteindelijke spanningsniveau. Als richtwaarde voor de houdtijd kan 2 min/mm wanddikte worden aangehouden met een minimum van 30 minuten en een maximum van 2 uur. Helaas kunnen de mechanische eigenschappen (rekgrens en treksterkte) van het materiaal achteruit gaan door het langdurig (meer dan 2 uur) gloeien in het spanningsarm gloei-temperatuursgebied (zie tabel 7.3).

tabel 7.3 Achteruitgang van de vloeigrens als gevolg van spanningsarmgloeien van S235

gloeitemperatuur en gloeitijd	vloeigrens [MPa]
1 uur op 600 °C	-20
5 uur op 600 °C	-35
1 uur op 625 °C	-25
0,5 uur op 650 °C	-25
4 x 0,5 uur op 650 °C	-55

Voor het spanningsarmgloeien zijn er twee temperatuursgebieden. Het is mogelijk de piekspanningen af te doen laten nemen door gloeien op een relatief lage temperatuur. Hierbij moet worden gedacht aan ca 300 - 400 °C, het zogenaamde laag-spanningsarmgloeien.

De meest voorkomende behandeling is echter in het gebied van ca 580 - 620 °C. De keuze van de temperatuur is afhankelijk van het type staal. Als gloeiduur/houdtijd wordt 2 minuut per mm wanddikte aangehouden.

Een andere methode om spanningen af te doen laten nemen is het zogenaamde spanningsarm trillen. Bij deze bewerking worden trillingen, ook een bepaalde vorm van energie, in het materiaal gebracht. Hierdoor zullen de spanningen afnemen en blijft de vormvastheid behouden (claimt men). Deze methode wordt weinig toegepast en daardoor is er weinig praktische ervaring.

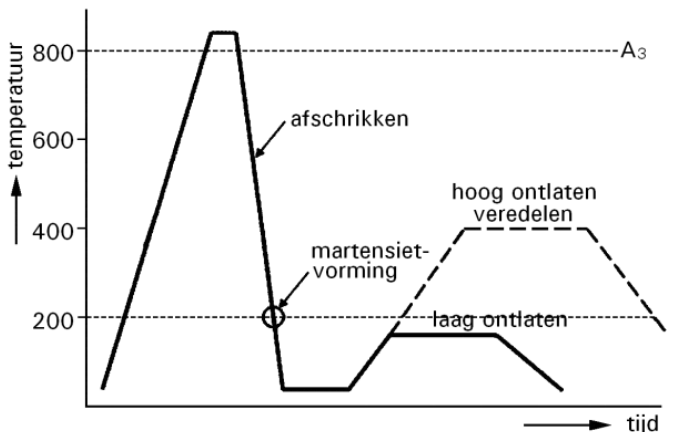
7.5 Oplossend gloeien

Indien warmte aan een materiaal wordt toegevoerd, zoals bij het lassen gebeurt, kunnen ongewenste chemische verbindingen ontstaan, die een negatieve invloed hebben op de verbinding. In deze kan men denken aan het ontstaan van de chroomcarbiden op de kristalgrenzen bij het lassen van sommige typen corrosievast staal met een hoger koolstofgehalte (boven 0,03 %).

Door een warmtebehandeling, het oplossend gloeien, kunnen deze precipitaten en carbiden weer worden opgelost in het kristalrooster. Het gloeien moet op hoge temperatuur plaats vinden, ca. 1100 °C. Na het gloeien moet men er voor zorgen dat de ongewenste precipitaten en carbiden niet weer kunnen ontstaan, zodat men vaak relatief snel moet afkoelen.

7.6 Harden

Het harden van staal wordt uitgevoerd met als doel de sterkte- en slijtage-eigenschappen van het staal te verbeteren. De warmtebehandeling bestaat uit het verhitten van het materiaal tot in het austenietgebied, gevolgd door een zeer snelle afkoeling. Dit wordt ook wel afschrikken genoemd. Een en ander is weergegeven in figuur 7.4.



figuur 7.4 Schematische weergave van het harden van staal

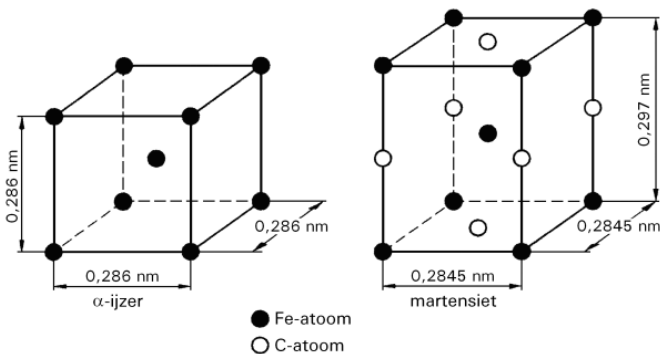
De snelheid waarmee moet worden afgeschrikt kan worden bepaald met behulp van een TTT- of een CCT-afkoeldiagram. Hieruit kan namelijk worden afgelezen welke structuren worden verkregen bij een bepaalde afkoelsnelheid. De hardingsbehandeling wordt vaak gevolgd door een ontlaathandeling. Doel hiervan is om de verkregen harde structuur wat taaier (minder bros) te maken. De combinatie van de behandelingen harden en ontlaten wordt veredelen genoemd.

Moderne staalsoorten kunnen, indien hun chemische samenstelling daarop is afgestemd, hun fijne kristalstructuur met hoge sterkte verkrijgen door een veredelingsbehandeling. Deze staalsoorten zijn bekend onder de naam QT-staalsoorten. QT staat voor: quenched and tempered (gehard en ontlaten).

Ontstaan van hardingsstructuren

Het staal wordt verhit tot in het austenietgebied (boven A_3 in figuur 7.4) en op temperatuur gehouden totdat de gehele structuur austenitisch is geworden. De aanwezige koolstof en een deel van de legeringselementen lossen op in de austenietstructuur. Tijdens de snelle afkoeling vanuit het austenietgebied klappt de kubisch vlakken gecentreerde structuur bij circa 200 °C in één keer om naar de martensietstructuur. Gedurende de transformatie worden de koolstofatomen als het ware ingevangen in het kristalrooster en krijgen ze niet de tijd om zich naar de grotere holten van de kubisch ruimtelijk gecentreerde structuur te verplaatsen. Het rooster van de ijzeratomen wordt een beetje opgerekt en er ontstaat een tetragonale martensietstructuur (figuur 7.5). Hierdoor ontstaan er hoge spanningen in het rooster.

De verkregen structuur wordt martensiet genoemd en is zeer hard en bros. De hardheid wordt vooral bepaald door de hoeveelheid koolstof in het materiaal. Hoe meer koolstof er zich in het staal bevindt, des te meer spanningen in het rooster zullen ontstaan na een hardingsbehandeling en des te harder de martensiet zal worden. Vanaf ongeveer 0,3% koolstof is het mogelijk om staal te harden.



figuur 7.5 Het rooster van de ijzeratomen wordt iets opgerekt, waardoor een tetragonale structuur ontstaat

Bij het harden treedt een volumeverandering op. Martensiet heeft namelijk een groter volume (ca. 1,3 procent) dan ferriet en austeniet. Bij het vervaardigen van een onderdeel moet hiermee rekening worden gehouden. De verkregen volumetoe name na het harden kan een extra slijpbewerking betekenen.

Om de martensietstructuur te verkrijgen moet een snelle afkoeling plaatsvinden. De afkoelsnelheid wordt bepaald door de kritische afkoelsnelheid van het materiaal. Het is van groot belang dat deze kritische afkoelsnelheid wordt gehaald. Hiervoor wordt vaak water of olie gebruikt. Overigens komen hier ook de termen water- en oliehardend staal vandaan.

Als het staal veel legeringselementen bevat, kan het zelfs luchthardend zijn. Dit betekent dat bij afkoelen in lucht de kritische afkoelsnelheid al wordt gehaald. Deze afkoelsnelheid is kleiner naar gelang de hoeveelheid legeringselementen toeneemt. Ook de hardingsdiepte neemt toe met het percentage legeringselementen.

Restausteniet

Zoals beschreven moet austeniet snel worden afgekoeld om martensiet te verkrijgen. De onderkoeling zorgt voor de drijvende kracht van de martensitische transformatie. Het blijkt dat als de koolstof in het staal toeneemt, het staal tot een lagere temperatuur moet worden afgekoeld en het martensietstartpunt (M_s) daalt. Blijkbaar verloopt de transformatie niet zo gemakkelijk. Door de spanningen in het materiaal wordt martensiet gevormd en wordt de verdere transformatie bemoeilijkt. Bij hoge koolstofgehalten in staal zal bij kamertemperatuur niet al het austeniet transformeren. Het overblijvende austeniet wordt restausteniet genoemd, dat niet stabiel is en bij verdere afkoeling zal worden omgezet naar martensiet. Ook zal door deformatie van het staal de transformatie verder gaan.

Door het werkstuk na het harden gelijk te verwarmen op lagere temperatuur krijgt de restausteniet de kans om zich om te zetten in stabiele martensiet. Deze behandeling wordt ontlaten genoemd.

Het legeren van staal leidt ook tot het verkrijgen van een hogere hardheid en een grotere doorhardingsdiepte. Onder de doorhardingsdiepte verstaan we die dikte van de harde laag die wordt verkregen na een snelle afkoeling. Kleine werkstukken zullen tot in de kern een martensitische structuur krijgen, maar bij grotere werkstukdikten is de afkoelsnelheid in de kern lager dan aan de buitenkant.

In veel gevallen zijn werkstukken vereist met alleen een harde buitenlaag, terwijl de kern nog over voldoende taaiheid moet beschikken. Een oppervlakteharding is dan feitelijk voldoende. Maar een staalsoort met hoge taaiheid heeft een relatief laag koolstofgehalte en laat zich dus niet harden. Door aan het oppervlak bijvoorbeeld koolstof toe te voegen, carboneren genoemd, wordt een harde buitenlaag verkregen na het afschrikken.

Ook kan men een warmtebehandeling in een stikstofatmosfeer of stikstof-koolstofatmosfeer geven, waardoor het oppervlak stikstof en koolstof opneemt, waarna het oppervlak eveneens hard wordt na een aanvullende oppervlaktehardingsbehandeling (nitreren en carbonitreren).

7.7 Ontlaten

Door harden krijgt het materiaal de martensitische structuur; een structuur die hard en bros is. Het gevaar van het optreden van scheuren is niet ondenkbeeldig. Om dit gevaar te doen laten afnemen geeft men geharde werkstukken direct na het harden nog een aanvullende warmtebehandeling voordat ze geheel zijn afgekoeld. Deze warmtebehandeling wordt ontlaten (ook wel temperen) genoemd. Hiermee kan de brosheid na het harden zoveel mogelijk worden weggenomen.

Doel van ontlaten is tweeledig:

1. Spanningen door het harden opheffen, restausteniet omzetten in bainiet.
2. Gunstige hardheid en taaiheid verkrijgen voor de beoogde toepassing.

De hoogte van de ontlaattemperatuur wordt bepaald door de samenstelling van het staal en de gewenste eigenschappen na het ontlaten. Bij de meeste stalen ligt de ontlaattemperatuur tussen de 150 en 350 °C. Door het verhogen van de temperatuur kunnen diffusieproblemen optreden. Ontlaten bij een lagere temperatuur vermindert de inwendige spanningen in het werkstuk, maar de restausteniet zal niet worden omgezet. Het ontlaten boven 200 °C zal de taaiheid verbeteren, maar resulteert ook in een daling van de hardheid. Bij deze temperatuur wordt alle restausteniet omgezet in bainiet.

Samenvattend geldt: hoe hoger de ontlaattemperatuur, des te groter de taaiheid en des te lager de hardheid. Het is dus van belang om voor het beoogde doel de juiste ontlaattemperatuur te kiezen. Ontlaten bij temperaturen van ca. 500 °C of hoger wordt hoog ontlaten of veredelen genoemd.

7.8 Veredelen

Veredelen is harden en aansluitend daarop ontlaten op een zo hoge temperatuur, dat daardoor een belangrijke verhoging van de sterkte en taaheid optreedt in vergelijking met onbehandeld staal. Het doel van veredelen is het verkrijgen van een zeer fijne verdeling van carbiden (vooral cementiet) in een fijnkorrelige ferritische kristalstructuur. Deze structuur zorgt voor de hoge sterkte en taaheid.

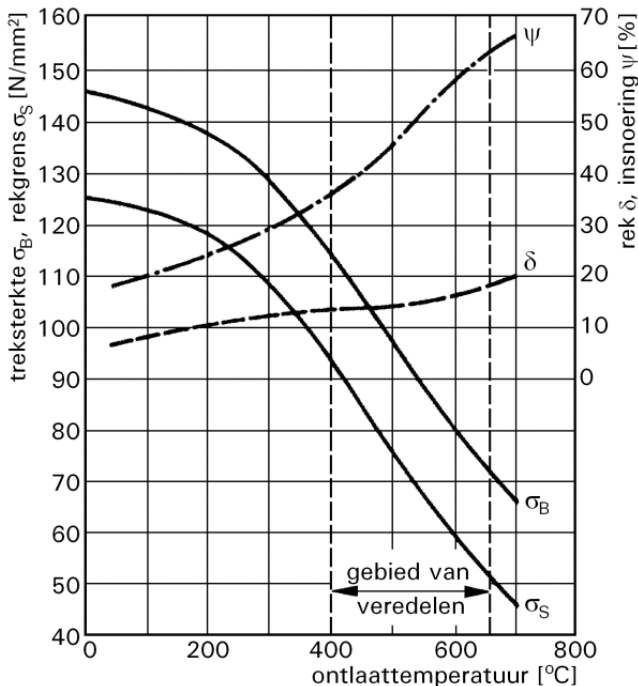
Het veredelen vindt plaats in het temperatuursgebied tussen de 400 en 700 °C, gevolgd door langzame afkoeling in een oven of olie. De voorschriften van de staalfabrikanten moeten nauwkeurig worden opgevolgd om het gewenste resultaat te behalen. Te hoge veredeltemperaturen zullen leiden tot een lagere treksterkte of taaheid dan gewenst. Het veredelproces is een diffusieproces; dezelfde resultaten zijn haalbaar door lang te ontlaten bij lagere temperatuur of korter te ontlaten bij hogere temperatuur.

De resultaten van het veredelen zijn sterk afhankelijk van de mate van doorharding die bij het harden verkregen is. Bij onvolledige doorharding zijn de eigenschappen van de rand en de kern verschillend.

Tijdens de verdelingsbehandeling krijgt de kern de tijd om door middel van diffusie de juiste structuur te verkrijgen, waardoor de mechanische eigenschappen verbeteren. Het voordeel hiervan is, dat het verschil tussen kern en rand na veredelen minder groot is dan direct na het harden.

Het is moeilijk om bij grotere doorsneden een goede doorharding tot in de kern te krijgen. Tijdens het afkoelen heeft dik materiaal meer tijd nodig, waardoor in de kern de gewenste eigenschappen niet worden verkregen. Door legeringselementen toe te voegen wordt de vereiste afkoelsnelheid verlaagd, waardoor er ook in de kern doorharding wordt bereikt. Noodzakelijke legeringselementen zijn naast koolstof ook chroom, mangaan en molybdeen. Bij grotere materiaaldikten zijn steeds meer legeringselementen nodig. Zo moet veredelstaal minimaal 0,3% koolstof bevatten. Bij ideale harding kan men staal met een koolstofgehalte van 0,4% harden tot een hardheid van ca 60 HRC.

Hoe hoger de ontlaattertemperatuur des te lager de treksterkte en des te hoge de taaheid. Er is altijd sprake van een compromis tussen hogere sterkte en taaheid. Hoge verdelings-temperaturen geven een lage sterkte maar hoge taaheid, terwijl lage verdelings-temperaturen een hoge sterkte en een verminderde taaheid geven (zie ook figuur 7.6).



figuur 7.6 Relatie tussen ontlaattertemperatuur en de mechanische eigenschappen

Spanningsarmgloeien van veredeld materiaal

In de ketel- en apparatenbouw worden vaak verdelingsstaalsoorten toegepast. Typische verdelingsstaalsoorten zijn gelegeerd met chroom en molybdeen. Soms is het noodzakelijk om een werkstuk na bijvoorbeeld diverse lasbewerkingen spanningsarm te gloeien. Hierbij moet niet worden vergeten, dat het veredelde staal nooit verwarmd mag worden boven de verdelings-temperatuur. Doet men dit wel, dan zal er ongewenste achteruitgang van de mechanische eigenschappen optreden. Daarom is het belangrijk altijd minimaal 50 °C onder de verdelings- of ontlaattertemperatuur van het staal te blijven. De ontlaatter- of verdelings-temperatuur hoort op het materiaalcertificaat of materiaalattest te worden vermeld door de materiaalfabrikant. Als dit certificaat er niet is, is het veilig om 50 °C onder de minimale verdelings-temperatuur van het betreffende staal te blijven.

De moderne staalsoorten met verhoogde sterkte kunnen hun sterkte verkrijgen door aansluitend aan het walsen het materiaal versneld af te koelen (harden) en te ontlaten. Hierdoor ontstaan de verdelde constructiestaalsoorten. Deze zijn ook bekend onder de Quenched and Tempered (QT) staalsoorten.

7.9 Normaalgloeien

Door het toepassen van de juiste warmtebehandeling kunnen de mechanische eigenschappen van het staal worden verbeterd. De fijnere structuur resulteert in een hogere sterkte en betere taaheid. Normaalgloeien is de warmtebehandeling waarmee dit resultaat kan worden bereikt.

Door de verschillende behandelingen (gieten, walsen, lassen en bijvoorbeeld koudvervormen) kunnen ongelijkmatige en grove structuren in het materiaal ontstaan die tot lagere mechanische eigenschappen leiden. Bij het normaalgloeien wordt de structuur als het ware "genormaliseerd": in normale toestand gebracht. Hierbij ontstaan fijne korrels en betere mechanische eigenschappen. Tevens worden de aanwezige inwendige spanningen tot een minimum gereduceerd. Het werkstuk wordt verwarmd tot temperaturen in het austenietgebied dicht boven A_3 (ca. 30 tot 70 °C in figuur 7.9). Bij bovenperlitisch staal gloeit men ca. 30 tot 70 °C boven A_1 . Voor de verblijftijd wordt minimaal dertig minuten aangehouden plus twee minuten per millimeter wanddikte. Hierna volgt een afkoeling aan rustige lucht.

De afkoelsnelheid ligt iets hoger dan bij spanningsarmgloeien. Zolang men nog in het austenietgebied zit, kan opnieuw korrelgroei optreden met grove korrels tot gevolg. Daardoor wordt het korrelverfijnd effect van het normaalgloeien tenietgedaan.

Doordat bij deze gloeiing twee keer een fasetransformatie plaatsvindt, namelijk van ferriet met perliet naar austeniet en omgekeerd, zal er twee keer een korrelverfijning optreden. Dit komt, omdat er bij de transformatie meerdere groeikiemen per kristal ontstaan. Zo ontstaat een fijnkorrelige perlietstructuur die karakteristiek is voor het betreffende staal.

Het normaalgloeien wordt overwegend toegepast bij ongelegeerd staal, laaggelegeerd staal en bij gietstaal. De koolstofgehalten van deze staalsoorten liggen meestal beneden 0,8 procent. Bovenperlitische staalsoorten (bijvoorbeeld gereedschapsstaal met een koolstofgehalte van meer dan 0,8 procent) worden meestal niet normaalgegleid, omdat de gewenste structuurverbetering beperkt blijft. Bij deze materialen moet op hogere temperaturen boven de A_{cm} -lijn (figuur 7.9) worden gegloeid. Hierdoor neemt de kans op korrelgroei toe. Tevens wordt bij afkoelen op de korrelgrenzen pro-euctoidisch cementiet gevormd. Deze staalsoorten worden daarom zachtgegleid.

In tabel 7.4 wordt de invloed van het normaalgloeien op de mechanische eigenschappen van een aantal gietstaalsoorten weergegeven.

tabel 7.4 Gietstaalsoorten en de verandering van mechanische eigenschappen als gevolg van normaal gloeien

warmte-behandeling	koolstof-gehalte	rek-grens	trek-sterkte	rek	kerfslag-waarde
	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[J]
ongegloeid	0,11	180	410	26	40
gegloeid op 900 °C		260	420	30	170
ongegloeid	0,26	230	430	13	30
gegloeid op 900 °C		290	480	24	90
ongegloeid	0,53	250	620	7	13
gegloeid op 900 °C		350	700	16	35
ongegloeid	0,85	300	620	1	14
gegloeid op 900 °C		320	720	9	20

Opmerking:

Als een gelaste constructie moet worden normaal gegloeid, moet bij de keuze van het toe te passen lastoevoegmateriaal daarmee rekening worden gehouden. De standaard toevoegmaterialen zijn namelijk niet ontwikkeld voor deze gloeibehandeling; de sterkte en de taaheid nemen aanzienlijk af. Er zijn toevoegmaterialen ontwikkeld speciaal geschikt voor het normaliserend gloeien na het lassen.

7.10 Precipitatieharden

Deze warmtebehandeling wordt eerder uitgevoerd aan aluminiumlegeringen dan aan staalsoorten. Het legeringselement wordt bij hoge temperatuur opgelost in het aluminium mengkristal. Na afschrikken wordt nagewarmd op ca. 200 °C. Hierdoor worden fijne deeltjes uitgescheiden, precipitaten genaamd, waardoor het als een soort wapening aan het aluminium een grote sterkte toename geeft. Koper is een voorbeeld van een precipiterend element. De AlCu-legeringen vinden door de combinatie van gewicht en sterkte veel toepassing in de vliegtuigbouw. Deze warmtebehandeling wordt ook wel (kunstmatige) veroudering genoemd.

7.11 Homogeengloeien

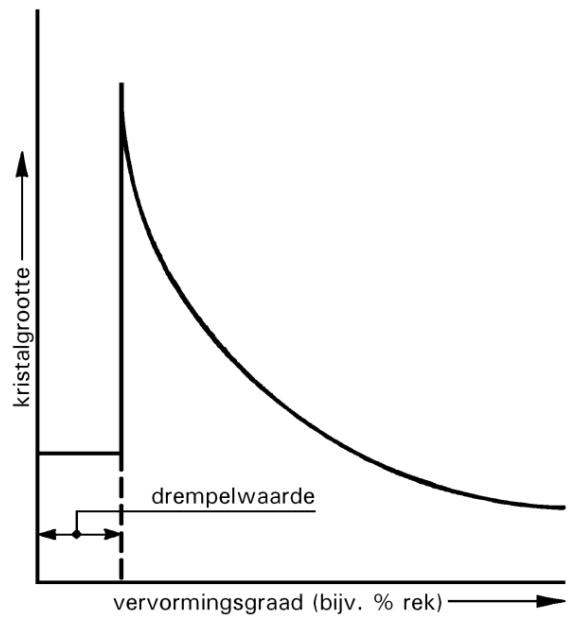
Gietstructuren van meer dan twee legeringselementen vertonen chemische inhomogeniteiten, segregatie. Hiermee worden plaatselijke concentratieverschillen tussen de verschillende legeringselementen bedoeld. Deze inhomogeniteiten kunnen verschillen in hardheid en inwendige spanningen veroorzaken in het gegoten blok of plak. Door te gloeien op temperaturen tussen ca. 1000 en 1300 °C (net onder de solidustemperatuur) kunnen legeringselementen zoals chroom en molybdeen door het staal diffunderen. Hierdoor ontstaan er minder sterke concentratieverschillen door het gehele gietblok.

Homogeengloeien wordt voornamelijk toegepast voor micro-segregatie. Voor het bereiken van macrosegregatie neemt de gloeitijd toe. Deze gloeibehandeling kan niet altijd worden uitgevoerd, omdat het gevaar bestaat dat er interkristallijne scheurvorming optreedt. Deze kans bestaat, doordat bij de hoge gloeitemperatuur de laagsmeltende fasen/bestanddelen op de korrelgrenzen vloeibaar worden (warmscheuren). Daarom wordt deze gloeibehandeling eigenlijk alleen toegepast door staalfabrikanten en niet door staalverwerkers.

7.12 Rekristalliserend gloeien

Het rekristalliserend gloeien wordt toegepast op sterk gedeformeerd of koudvervormd staal om de taaheid en de vervormbaarheid te herstellen. Vaak zijn dit staalsoorten met een laag koolstofgehalte, omdat staalsoorten met een hoog koolstofgehalte niet of moeilijk koud te vervormen zijn. Door koudvervormen neemt de dislocatiedichtheid en dus de inwendige spanning in het materiaal toe. Deze inwendige spanningen en de daaraan verbonden energie zorgen ervoor dat als de temperatuur wordt verhoogd, nieuwe korrels worden gevormd met een nieuw kristalrooster, waarin de dislocatiedichtheid laag is.

Om rekristallisatie te laten optreden is een minimale deformatiegraad nodig (zie figuur 7.7).



figuur 7.7 Relatie vervormingsgraad en kristal grootte

De kritische vervormingsgraad waarboven rekristallisatie optreedt ligt voor staal bij ca. 10%. Onder deze drempelwaarde treedt geen rekristallisatie op, maar slechts afbouw van de spanningen (spanningsarm-gloeien). Net boven de kritische deformatiegraad zijn er slechts weinig kiemen aanwezig en is een hoge temperatuur nodig om rekristallisatie te verkrijgen. Dit beperkte aantal kiemen zal dan - ook vanwege de hoge temperatuur - kunnen uitgroeien tot grote korrels. Dit is het geval bij bewerkingen als knippen, ponsen, buigen en richten. Door rekristalliserend gloeien treedt korrelgroei op met een grove structuur met slechte mechanische eigenschappen als gevolg (zie tabel 7.5).

tabel 7.5 Invloed rekristallisatietemperatuur op de mechanische eigenschappen en korrelgrootte van 90% koudgewalst koolstofstaal met 0,09% C (gloeitijd 1 uur)

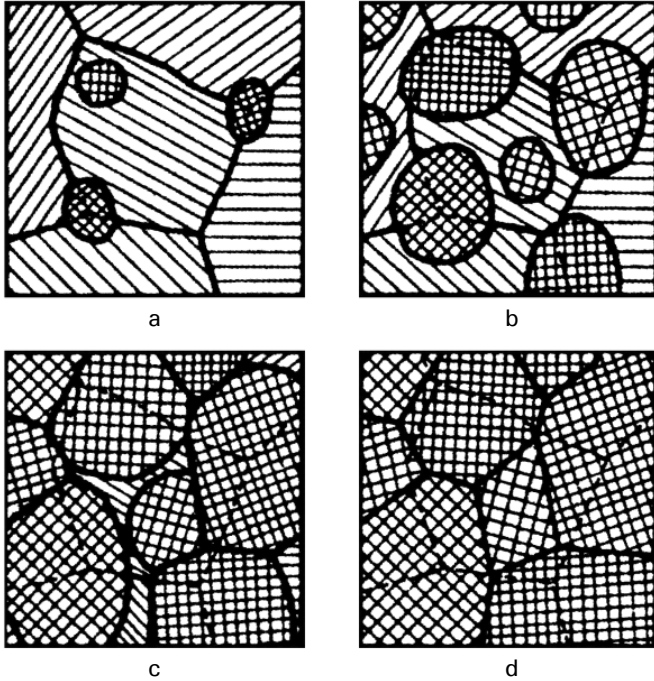
Gloeitemp. °C	20	400	550	600	650	750	950
Treksterkte (MPa)	860	850	760	640	420	390	360
Rek (%)	5	9	13	22	28	31	32
Korrelgrootte (µm)	-	-	-	-	4,7	6,2	21,0

Is de deformatiegraad groter, dan zullen er meer kiemplaatzen worden gevormd en kan met een lagere gloeitemperatuur worden volstaan om te rekristalliseren. Ook blijft de korrelgroei beperkt. Als een fijne rekristallisatiestructuur is gewenst, moet de koudvervorming minstens dertig procent bedragen. Dit is haalbaar bij dieptrekken.

Rekristallisatie en de uiteindelijke korrelgrootte van het staal is dus het resultaat van een combinatie van deformatiegraad en gloeitemperatuur. De rekristallisatietemperatuur is geen materiaalconstante, maar afhankelijk van de zuiverheid van de ferriet, het perlietpercentage en de vervormingsgraad. Om in staal rekristallisatie te bewerkstelligen, moet er worden gegloeid net onder de A₁-lijn (figuur 7.9) in het ijzer-koolstofdiagram. De temperatuur moet relatief snel worden verhoogd, anders wordt het materiaal spanningsarm gegloeid en verdwijnen de kiemplaatzen voor rekristallisatie. Het ferriet rekristalliseert tussen de 550 en 650 °C, de bestaande perlietvelden zullen niet veranderen. Perliet rekristalliseert pas bij veel hogere temperaturen.

In een ferritisch-perlitisch staal zal eerst het ferriet deformeren; hierdoor ontstaan dus eerder kiemplaatzen. Voor een volledig structuurherstel moet worden normaalgegloeid.

Tijdens het rekristalliseren ontstaan op verschillende punten, voornamelijk op de korrelgrenzen, kiemen van nieuwe korrels. Deze kiemen groeien verder uit ten koste van oude korrels (zie figuur 7.8). Er zal ongewenste korrelgroei optreden als op te hoge temperatuur wordt gegloeid of als er te lang wordt gegloeid.



figuur 7.8 Schematische voorstelling van rekristallisatie.
 a: beginnende rekristallisatie
 b en c: verschillende stadia tijdens rekristallisatie
 c: structuur van de rekristallisatie

7.13 Zachtgloeien

Zachtgloeien en veredelen zijn gloeibehandelingen waarbij het staal zachter wordt.

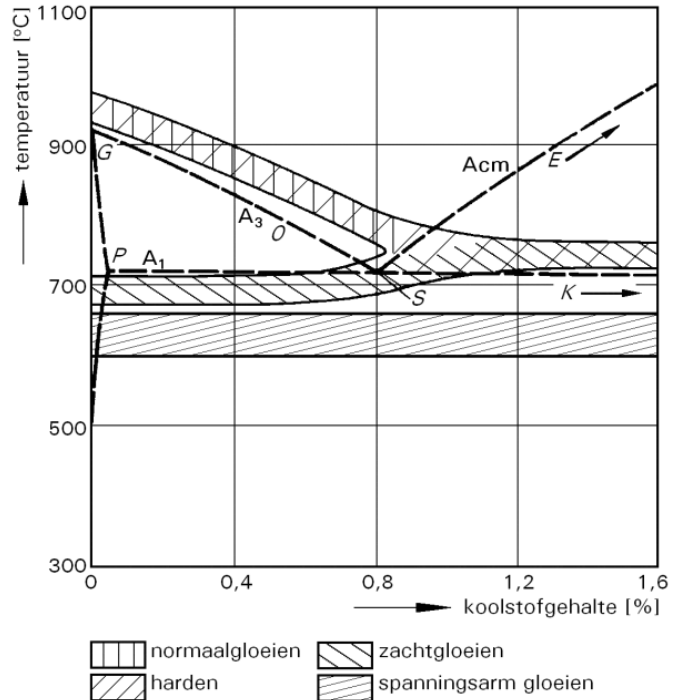
Het doel van zachtgloeien is het staal een zodanige structuur te geven, dat het beter verspanbaar en vervormbaar is. Ook verkleint het de kans op scheuren bij eventuele hardingsbehandelingen. Door de gloeiing neemt de treksterkte en hardheid zo'n 10 tot 25% af; daarentegen neemt de taaiheid iets toe.

Er wordt een structuur verkregen met globulaire (bolvormige) carbiden in een ferritisch kristalrooster. Door de globulaire carbiden breekt de structuur wordt omgezet in austeniet. Deze uitvoering van de gloeibehandeling wordt voornamelijk toegepast bij staalsoorten met een hoog koolstofgehalte, bijvoorbeeld gelegeerde veredelingsstalen. De gloeiduur is ca. 5 tot 24 uur (afhankelijk van de staalsoort) en wordt gevolgd door langzaam afkoelen in de oven.

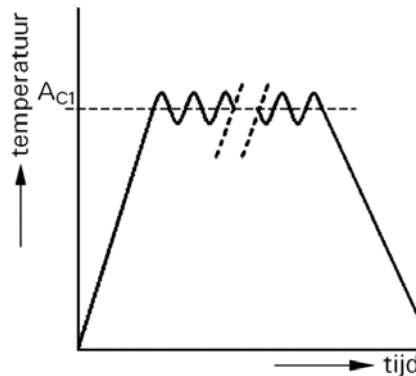
Het staal wordt verhit tot net onder het austenietgebied (zie figuur 7.9), gevolgd door zeer langzaam afkoelen.

Een andere manier is om de temperatuur te laten schommelen rond de 720 °C (A_{C1} in figuur 7.10), waarbij slechts een klein deel van de structuur wordt omgezet in austeniet. Deze uitvoering van de gloeibehandeling wordt voornamelijk toegepast bij staalsoorten met een hoog koolstofgehalte, bijvoorbeeld gelegeerde veredelingsstalen. De gloeiduur is ca. 5 tot 24 uur (afhankelijk van de staalsoort) en wordt gevolgd door langzaam afkoelen in de oven.

Het zachtgloeien is een diffusieproces en berust op de neiging van de carbiden om de oppervlakte-energie te verlagen door een bolvorm aan te nemen. Ze gaan over van de lamellaire carbiden in bolvormige. Bij ongelegeerd staal hoeft alleen de koolstof te diffunderen. In gelegeerd staal moeten naast de koolstof ook de substitueel opgeloste elementen worden verplaatst. Hierdoor is het zachtgloeien



figuur 7.9 Gebieden voor de verschillende gloeibehandelingen, weergegeven in het relevante deel van het ijzer-koolstofdiagram



figuur 7.10 Schematische voorstelling van het zachtgloeien, pendelen rond A_{C1}

vooral in gelegeerde staalsoorten een langdurig proces. De hoogste diffusiesnelheid van de elementen in het ferriet wordt bereikt vlak onder de overgangstemperatuur. Daarom wordt het staal bij zachtgloeien verwarmd tot vlak onder de A_1 -temperatuur (ca. 680 tot 710 °C in figuur 7.9). Bij ongelegeerd staal zorgt deze methode gewoonlijk in vijf tot tien uur voor het gewenste doel. Bij gelegeerde staalsoorten zijn soms gloeitijden van 24 uur of langer nodig. Ook daarna is de bereikte hardheid nog meestal niet optimaal.

Zachtgloeien wordt voornamelijk toegepast bij staalsoorten met een koolstofgehalte van 0,9 procent of meer, voornamelijk gereedschapsstaal.

Voor staalsoorten met minder dan 0,9 procent koolstof (gelegeerde veredelingsstaalsoorten) wordt het zachtgloeien wel eens gebruikt om het staal beter verspanbaar te maken. Voor staalsoorten met minder dan 0,5 procent koolstof is de zachtgegloeide toestand voor verspanende bewerking ongunstig, omdat het materiaal zo zacht wordt dat het materiaaloppervlak onder de beitel zal vervormen (smeren) in plaats van snijden. Bij deze materialen geeft normaalgloeien de beste verspanbaarheid.

In het algemeen kan worden gesteld: staalsoorten met minder dan 0,5 procent koolstof worden normaalgegloeid, terwijl staalsoorten met koolstofgehalten boven 0,5 procent worden zachtgegloeid.

7.14 *Oppervlakteharding*

Soms is het gewenst dat het oppervlak van een werkstuk een bepaalde hardheid en slijtvastheid moet hebben, terwijl de kern ervan een hoge taaigheid moet bezitten. Denk bijvoorbeeld aan de flanken van tandwielen. Het harden van het oppervlak is dan gewenst.

Echter, de begrippen hoge hardheid en hoge taaigheid staan lijnrecht tegenover elkaar. Een hoge hardheid wordt in principe verkregen door een hoger koolstofgehalte, terwijl met een lager koolstofgehalte eerder een hoge taaigheid wordt verkregen.

Door nu met bepaalde diffusieprocessen het koolstofgehalte in het oppervlak van het werkstuk te verhogen, kan men het werkstuk via snel afkoelen vanuit het austenietgebied alleen aan het oppervlak harden. Ook kan diffusie van stikstof (en eventueel koolstof) in het oppervlak worden bevorderd (zie ook § 7.6). Deze warmtebehandeling wordt oppervlakteharding genoemd.

8 *Uitvoering van warmtebehandelingen*

Warmtebehandelingen kunnen op de volgende manieren worden uitgevoerd:

- 8.1 in (tijdelijke) ovens.
- 8.3 met elektrische verwarmingselementen;
- 8.4 door infrarood stralers;
- 8.5 door inductieverwarming;
- 8.2 door gebruik van gasbranders;
- 8.1 door aanvullende lasrupsen;

8.1 *Gloeiovens*

Het gloeien op hoge temperatuur zal meestal plaatsvinden in ovens. Hiervoor kunnen zowel vaste ovens, alsook tijdelijke/mobiele ovens worden gebruikt.

Vaste ovens zijn ovens die op één vaste plaats, meestal bij het bedrijf dat de gloeiing uitvoert, staan opgesteld. Deze ovens zijn er ook in velerlei afmetingen. De grootte van de oven wordt bepaald door de grootte van het te gloeien werkstuk. Figuur 8.1 geeft een voorbeeld van een vaste oven. Bij gloeiwerkzaamheden met deze ovens worden de te gloeien werkstukken naar de ovens gebracht.



figuur 8.1 Vaste gloeiovens

Het kan ook zo zijn dat de te gloeien werkstukken te groot of te complex zijn om te vervoeren naar een vaste oven.

Dan kunnen zogenaamde mobiele of tijdelijke ovens om het werkstuk worden gebouwd. Figuur 8.2 geeft een voorbeeld van een dergelijke oven.

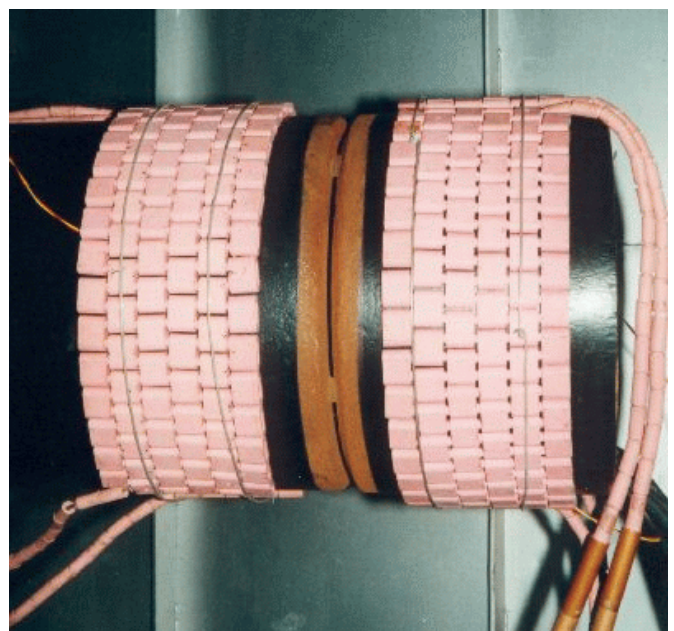


figuur 8.2 Tijdelijke gloeiovens

In het algemeen moet worden opgemerkt dat gloeiwerkzaamheden aan werkstukken, met uitzondering van het voorverwarmen, specialistisch werk is. Het is dan ook raadzaam hiervoor gespecialiseerde bedrijven in te schakelen.

8.3 *Elektrische verwarmingselementen*

Deze elementen zijn in veel verschillende uitvoeringen en afmetingen beschikbaar. De stroom, veelal geleverd door speciale laagspanningstransformatoren, ondervindt weerstand in de elementen. Deze worden heet en geven hun warmte af aan het werkstuk. Door regeling van de stroomsterkte door deze elementen kan men de ontwikkelde warmte regelen en daarmee de temperatuur sturen. Via thermokoppels op het werkstuk, verbonden met de stroombron, kan een optimale regeling plaatsvinden. Deze methode van verwarmen vindt plaats bij het voorverwarmen van lasnaden alsook het lokaal uitgloeien van lassen. Figuur 8.3 geeft een voorbeeld van deze wijze van uitgloeien van een lasnaad weer.



figuur 8.3 Uitgloeien van een lasnaad met elektrische weerstandselementen

8.4 *Infrarood stralers*

De door een regelbare stroom ontwikkelde infrarood stralen verhitten het werkstuk. Deze methode wordt toegepast voor het voorverwarmen van onder andere lasnaden. Figuur 8.4 geeft hiervan een voorbeeld.

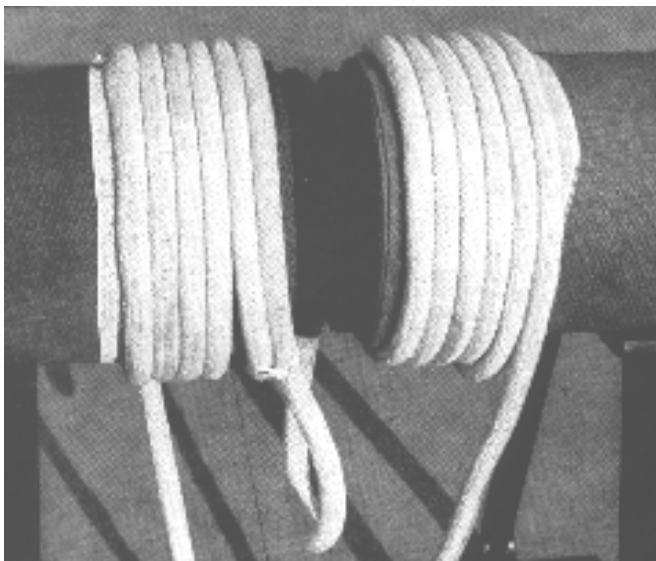


figuur 8.4 Voorwarmen van een lasplaats via infrarood straling

8.5 Inductieverwarming

Door een geïnduceerde stroom zal het werkstuk, ingebracht in de inductiespoel, warm worden. Voor relatief kleine werkstukken, meestal pijpverbindingen, wordt deze methode van uitgløeien veelvuldig toegepast.

Figuur 8.5 geeft hiervan een voorbeeld. Hierbij zijn de kabels waardoor de regelbare elektrische stroom gaat ter weerszijde van de lasnaad om de pijp gewikkeld.



figuur 8.5 Gloeien via de inductiemethode

8.2 Gasbranders

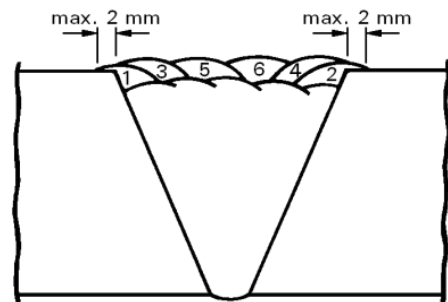
Gas-zuurstofbranders voor het uitvoeren van warmtebehandelingen zijn er in vele maten en vele soorten. Gasbranders worden hoofdzakelijk gebruikt bij het voorwarmen van te lassen werkstukken. Veel gebruikte gas-zuurstofcombinaties zijn acetyleen-zuurstof en propaan-zuurstof.

In vele gevallen is echter het gebruik van gasbranders af te raden. Enerzijds omdat er vanuit de gasvlam vocht kan neerslaan op het werkstuk, waardoor de kans op het ontstaan van koudscheuren toeneemt. Anderzijds zijn de branders veelal slecht afgesteld, waardoor een roetende vlam ontstaat. Hierdoor slaat roet neer op het werkstuk. Roet is niets anders dan onverbrande koolstof. Deze komt in de lasnaad terecht, met als gevolg opkoling en meer kans op het ontstaan van scheuren.

8.1 Door aanvullende lasrupsen

Deze methode is ook bekend onder de naam "temper bead methode". In feite is het een warmtebehandeling uitgevoerd door een extra lasrups, met als doel de warmte-beïnvloede zone te ontlaten.

De normale wijze van vullen van lasnaden is rupsen lassen in lengterichting van de lasnaad, beurtelings beginnende vanaf beide naadflanken (zie figuur 8.6).

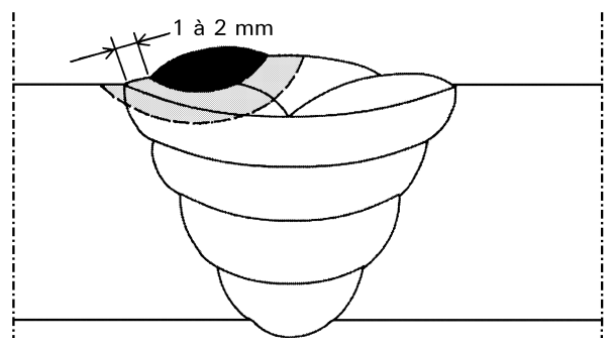


figuur 8.6 Normale wijze van vulling van een lasnaad

Het lassen van de sluitlaag verschilt in zoverre van de daaronder liggende lagen, dat het lasmetaal van de sluitlaag niet opnieuw een warmtebehandeling ondergaat als gevolg van het lassen van de volgende lagen.

De sluitlaag wordt daarom zodanig gelast, dat eerst twee lasrupsen worden gelegd tegen beide plaatkanten. Vervolgens wordt de sluitlaag tussen deze lasrupsen gelast. De meest kritische punten met betrekking tot martensietvorming, namelijk de overgang van lasmateriaal naar plaatmateriaal, krijgen op deze wijze toch nog een warmtebehandeling als gevolg van het lassen van de volgende rupsen. Om een effectief uitgløeien van eventueel gevormd martensiet in de overgangzone te bewerkstelligen, dient de overlapping van de eerst gelegde lasrupsen voldoende groot te zijn (zie figuur 8.6). Deze methode van lassen met het uitgløei-effect van de warmte-beïnvloede zone noemt men de "temper bead methode".

Er zijn echter situaties, waarbij deze wijze van vullen van de naad niet kan plaatsvinden. Denk bijvoorbeeld aan het vullen van een naad "uit de zij" (positie PC). De sluitende lasrups wordt aan de bovenzijde gelegd en uitgløeien van de warmte beïnvloede zone door het leggen van deze rups vindt niet meer plaats. Door het leggen van een "tempersnoer" op de laatst gelegde lasrups zal deze de warmte-beïnvloede zone uitgløeien, zodat harde zones worden weggenomen (zie figuur 8.7).



figuur 8.7 Uitvoering van de "temper bead"

Bij deze techniek last men na het vullen van een lasnaad met opzet nog een snoer op de laatst gelegde lasrups. Door de laswarmte van deze extra rups wordt het onderliggende materiaal uitgegloeid. De positionering van deze rups is zeer kritisch. Een afstand van $1,5 \pm 0,5$ mm ten opzichte van de smeltlijn van het onderliggende snoer is juist.

9 *Metten en registratie van de gloei-temperatuur*

Er zijn veel methoden voor het meten van de temperatuur. Te denken valt aan:

- ▶ thermokoppels;
- ▶ thermokrijtjes (tempelsticks);
- ▶ contactmeting;
- ▶ infraroodmeting.

Via thermokoppels, direct bevestigd aan het te gloeien werkstuk, kan zeer nauwkeurig de temperatuur worden gemeten. Bovendien kan met deze methode via een terugkoppeling naar de stroombron die de stroom aan de gloei-elementen levert, de temperatuur zeer nauwkeurig worden geregeld.

Het meten met thermokrijtjes is een benaderingsmethode. Bij het ene type krijtje verandert de kleur van de aangebrachte streep bij een bepaalde temperatuur, terwijl bij het andere type krijtje het krijt bij een bepaalde temperatuur verweekt, zodat er gemakkelijk een streep op het werkstuk kan worden gezet. Registratie en dus sturing hiermee van de temperatuur is niet mogelijk.

Bij contactmeting kunnen handmeters worden gebruikt. Met deze methode, mits juist uitgevoerd, is een nauwkeuriger temperatuurmeting mogelijk dan met krijtjes.

Bij infraroodmeting kan contactloos en veelal op afstand worden gemeten.

Wat betreft de kwaliteitsaspecten bij het uitvoeren van gloeiactiviteiten moet verwezen worden naar een ISO-norm: ISO 17663 "Welding - Guidelines for quality requirements for heat treatment in connection with welding and allied processes".

In dit document wordt uitvoerig ingegaan op het uitvoeren van de warmtebehandelingen.

Zo is een tabel opgenomen, waarin is aangegeven welke temperatuurverschillen er mogen zijn tussen verschillende meetpunten op één werkstuk. De verschillen zijn op hun beurt weer gerelateerd aan de gloei-temperatuur.

Bovendien is aangegeven hoeveel meetpunten er op een werkstuk moeten worden aangebracht. Het aantal punten is afhankelijk van de inhoud van de gloeioven of de grootte van het te gloeien product.

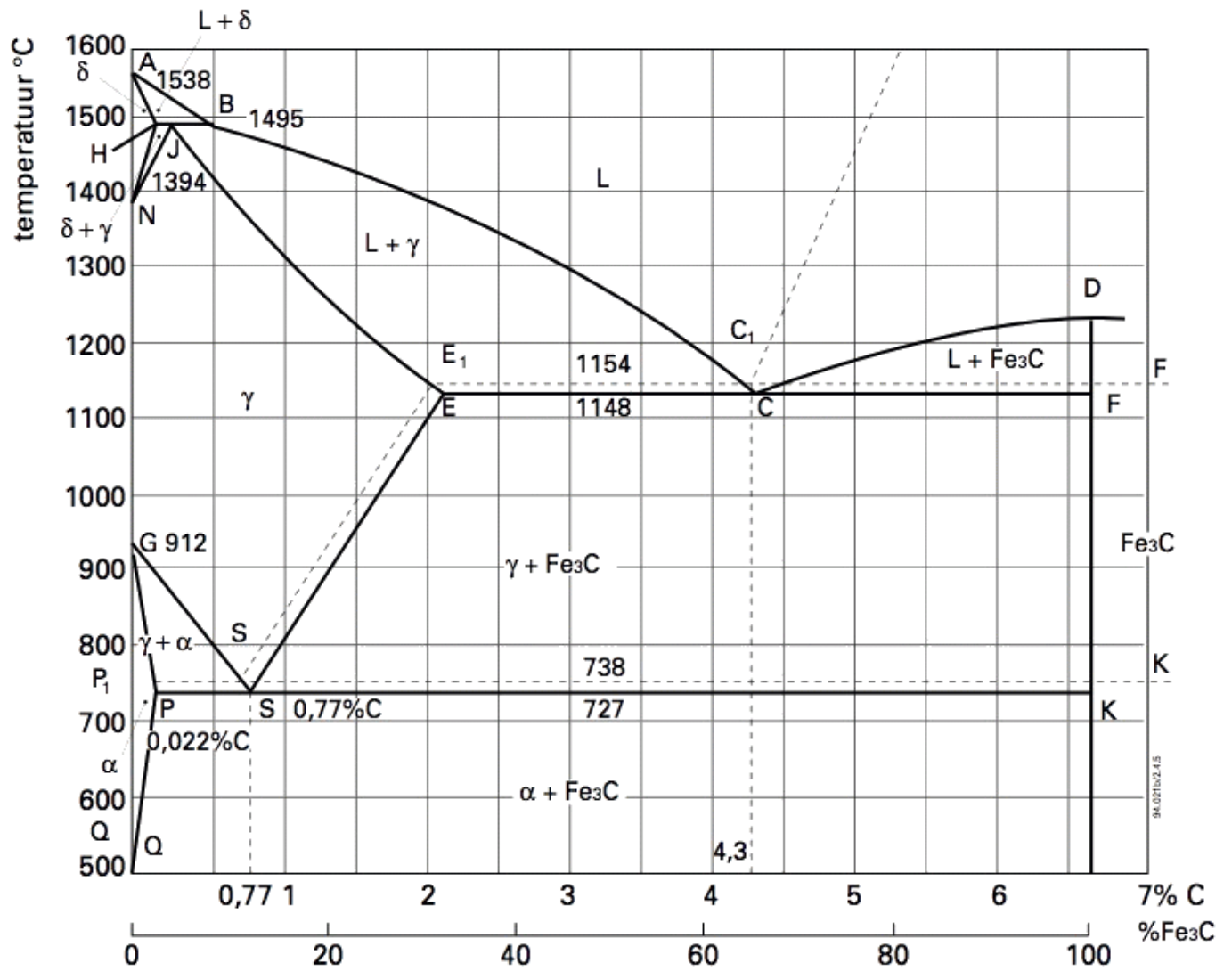
Ook zijn eisen opgenomen ten aanzien van de registratie van de gloei-temperatuur.

10 *Literatuurverwijzing*

- [1] Materialenkennis voor de laspraktijk nr 6: IJzer-koolstof-diagram; Lastechniek nr 2 d.d. februari 2007; auteur: G. van den Handel.
- [2] Materialenkennis voor de laspraktijk nr 8: Warmtebehandelingen; Lastechniek nr 4 d.d. april 2007; auteur: G. van Krieken.
- [3] Materialenkennis voor de laspraktijk nr 9: Warmtebehandelingen deel 2; Lastechniek nr 5 d.d. mei 2007; auteur: G. van Krieken.
- [4] Materialenkennis voor de laspraktijk nr 17: Voorwarmen voor het lassen; Lastechniek nr 2 d.d. februari 2008; auteur: M. Hermans.
- [5] NIL-lesmateriaal voor de opleiding IWE en IWT.
- [6] CEN rapport CR ISO 17663, dd maart 2001: Guidelines for quality requirements for heat treatment in connection with welding and allied processes
- [7] ISO 17663: Guidelines for quality requirements for heat treatment in connection with welding and allied processes

Bijlage 1

Het ijzer-koolstofdiagram



figuur B.1 Het ijzer-koolstofdiagram

Bijlage 2

Diagram ter bepaling van de voorwarmtemperatuur volgens BS 5135

Het diagram bestaat uit drie delen:

- ▶ de schalen A tot en met D, voorstellend de koolstofequivalenten met verschillende gehalten aan diffundeerbare waterstofgehalten van de lastoevoegmaterialen;
- ▶ de rechter grafiek, waar langs de horizontale as de warmte-inbreng is aangegeven en waarin opgenomen een waaier aan lijnen voorstellende de gecombineerde te lassen plaatdikte;
- ▶ de rechter grafiek, waarin opgenomen lijnen voorstellende de aan te houden minimale voorwarmtemperatuur in °C.

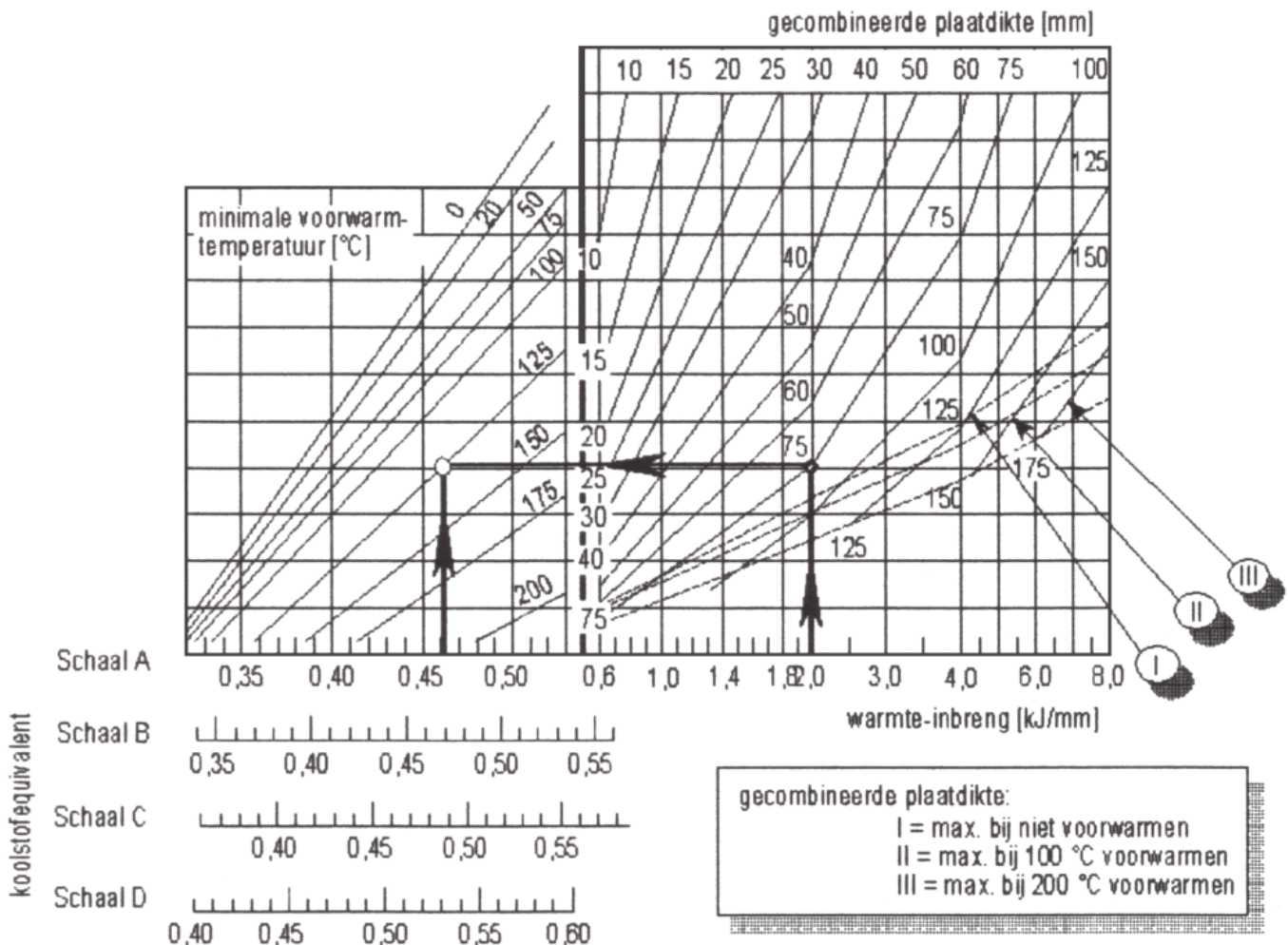
De schalen A tot en met D vergen uitleg. Beklede rutielelektroden geven, vanwege de samenstelling van de bekleding meer diffundeerbare waterstof af dan basische elektroden. Deze op hun beurt geven weer meer waterstof af dan de massieve draden voor het MAG-lassen.

Zo gelden de volgende waarden voor de schalen A tot en met D voor de lastoevoegmaterialen:

- ▶ **schaal A:** diffundeerbare hoeveelheid waterstof meer dan 15 ml per 100 gram lasmetaal;
- ▶ **schaal B:** diffundeerbare hoeveelheid waterstof tussen 10 en 15 ml per 100 gram lasmetaal;
- ▶ **schaal C:** diffundeerbare hoeveelheid waterstof tussen 5 en 10 ml per 100 gram lasmetaal;
- ▶ **schaal D:** diffundeerbare hoeveelheid waterstof minder dan 5 ml per 100 gram lasmetaal.

De werkwijze is als volgt:

- ▶ bereken het koolstofequivalent van het te lassen staal;
- ▶ bepaal het lasproces en het type lastoevoegmateriaal (lees: het gehalte aan diffundeerbare waterstof), waarmee de lasverbinding wordt gemaakt;
- ▶ bepaal het punt op een van de betreffende schalen A tot en met D;
- ▶ trek een verticale lijn door dit punt;
- ▶ bereken de warmte-inbreng;
- ▶ bereken de gecombineerde te lassen plaatdikte;
- ▶ trek een verticale lijn door het punt van de warmte-inbreng;
- ▶ trek een horizontale lijn naar links door het snijpunt van de verticale lijn van de warmte-inbreng en de gecombineerde plaatdikte;
- ▶ het snijpunt van deze lijn met de verticaal getrokken lijn door het betreffende koolstofequivalent is de toe te passen voorwarmtemperatuur.



figuur B.2 Diagram volgens de oude BS 5135 ter bepaling van de voorwarmtemperatuur



Vereniging FME-CWM
vereniging van ondernemers in de
technologisch-industriële sector

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer

T (079) 353 11 00

F (079) 353 13 65

E alg@fme.nl

I www.fme.nl