



Warmtebehandelingen

Voordat er kan worden gelast, zal er enige voorkennis moeten zijn van het te lassen basismateriaal en hoe dit tot stand is gekomen. In deze rubriek staat de materiaalkundige kant van het vakgebied centraal. Na het ijzer-koolstof diagram en de afkoeldiagrammen in de vorige afleveringen, zijn we nu aangekomen bij de warmtebehandelingen. Een warmtebehandeling wordt uitgevoerd om staal de juiste mechanische eigenschappen mee te geven voor de gekozen toepassing of voor de gewenste bewerking.

In de vorige afleveringen over het ijzer-koolstof diagram en de afkoeldiagrammen is duidelijk geworden dat staal onder invloed van de temperatuur en de afkoelsnelheid diverse microstructuren aan kan nemen. Dit is een belangrijke eigenschap van staal, want het betekent dat het breed inzetbaar is en geschikt is te maken voor uiteenlopende toepassingen. Door hier slim gebruik van te maken, kan de structuur en de daarmee samenhangende eigenschappen van het materiaal door warmtebehandelingen worden veranderd. Onder een warmtebehandeling - ook wel gloeien genoemd - wordt het proces verstaan dat is opgebouwd uit: opwarmen, op temperatuur houden en afkoelen (zie figuur 1). Een warmtebehandeling

wordt veelal uitgevoerd in ovens, sommige warmtebehandelingen kunnen ook plaatselijk met keramische gloeimatten worden uitgevoerd.

Warmtebehandelingen worden vaak toegepast na productieprocessen als walsen, gieten, lassen of vervorming. 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 structuur worden verkregen.

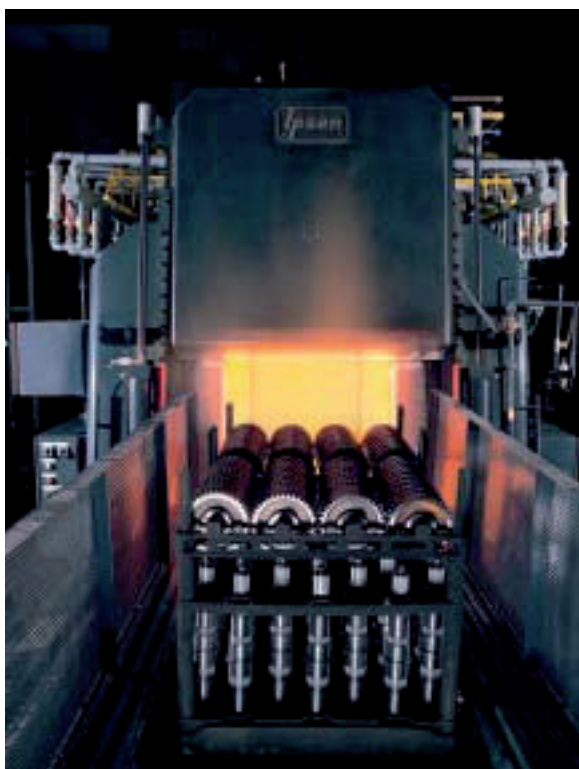
Doel van warmtebehandelingen

Samenvattend is het doel van warmtebehandelingen om staal de juiste mechanische eigenschappen mee te geven voor de gekozen toepassing of om de gewenste bewerkingen uit te kunnen voeren. Globaal kun je zeggen dat warmtebehandelingen voor stalen toegepast worden om:

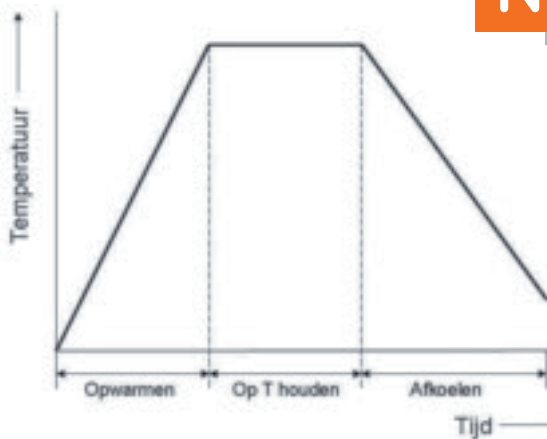
- Ongewenste effecten van een voorgaand productieproces te corrigeren (spanningsarmgloeien, rekristalliserend gloeien, homogengloeien of oplosgloeien)
- Het materiaal sterker te maken (normaalgloeien)
- Het materiaal zachter te maken voor verdere bewerking (zachtgloeien)
- Het materiaal te harden en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

Deze warmtebehandelingen worden in deel 1 en deel 2 van dit artikel uitgebreid behandeld. Hoewel er nog meer warmtebehandelingen voor staal bestaan, zijn dit de belangrijkste en de meest toegepaste.

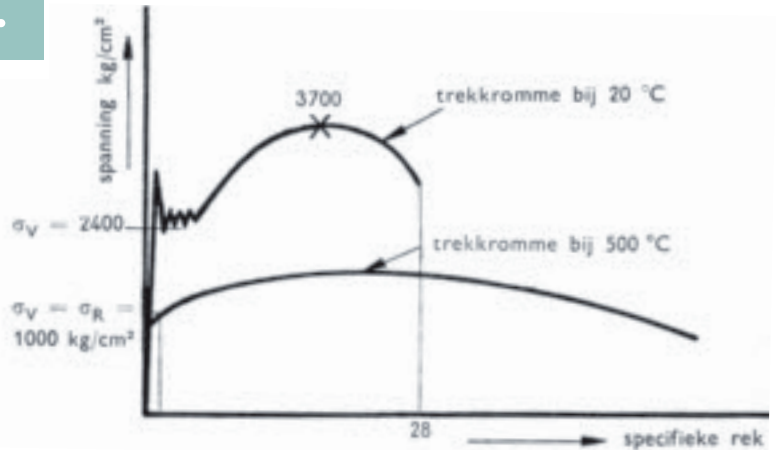
Warmtebehandelingen om ongewenste effecten van een voorgaand productieproces te corrigeren, worden toegepast om de eigenschappen te verbeteren. Hierdoor kan de levensduur van het onderdeel aanzienlijk worden verlengd. Voorbeelden van dit soort warmte-



Onderdelen gaan de oven in voor een warmtebehandeling bij Bodycote, een bedrijf dat al meer dan 25 jaar specialist is op het gebied van warmtebehandelingen (foto: Bodycote)



Figuur 1 – Schematische weergave van een warmtebehandeling (figuur: Geri van Krieken)



Figuur 2 – Invloed van de temperatuur op de treksterkte van staal St. 37 (bron: Warmtebehandelingen van staal I, 1957)

behandelingen zijn spanningsarmgloeien en rekristalliserend gloeien.

Spanningsarmgloeien

Zoals de naam al doet vermoeden, is het doel van deze warmtebehandeling de inwendige spanningen in het materiaal te verminderen. Hierbij verandert de structuur, treksterkte en/of hardheid van het materiaal nauwelijks. Inwendige spanningen ontstaan tijdens het vervaardigen van een werkstuk door bijvoorbeeld het deformerend, 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 lasmateriaal af van smelttemperatuur tot kamertemperatuur. Het lasmateriaal zal willen 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 bij het stollen.

Materiaal dat verspaand moet worden, kan inwendige spanningen bezitten van het voorgaande productieproces. Tijdens het verspanen kan dit leiden tot ongewenste maatafwijkingen. Deze statische trek- en drukspanningen zijn in evenwicht. Als dit evenwicht wordt verstoord, zullen de spanningen zich gaan herverdelen en zal vervorming optreden. De spanningen kunnen oplopen van 10N/mm^2 tot aan de waarde van de rekgrens. Waarden hoger dan de rekgrens zijn niet mogelijk, omdat het materiaal dan gaat vloeien (plastic deformerend). De inwendige spanningen kunnen maat- en vormveranderingen van het werkstuk veroorzaken. Ook kunnen er macroscopische of micro-

scopische scheuren ontstaan die tijdens de gebruiksfase van het onderdeel tot scheuren kunnen uitgroeien.

Het spanningsarmgloeien van staal wordt doorgaans uitgevoerd bij een temperatuur van 500 tot 600 graden Celsius. De gloeitemperatuur is sterk afhankelijk van de warmtevoerdigheid van het materiaal. Bij een hogere temperatuur neemt de sterkte en de vloeigrens van het materiaal af (zie figuur 2). Door het verhogen van de temperatuur zullen de dislocaties zich herrangschikken (polygonisatie) waardoor de roostervorming en het spanningsniveau afneemt. Dit gaat gepaard met een geringe vormverandering van het werkstuk.

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 dikker de wanddikte en complexiteit van het werkstuk, hoe groter het gevaar voor ongelijkmatige opwarming/afkoelen. Een veilige richtlijn voor de opwarm- en afkoel-snelheid wordt beschreven in de volgende formule: opwarmsnelheid = 50°C mm/min gedeeld door de wanddikte.

Het afkoelen aan rustige lucht of gesloten oven dient dubbel zo langzaam te gaan als het opwarmen. Alle spanningen die ontstaan tijdens het afkoelen zullen in het werkstuk blijven. Ook de houdtijd is van invloed op het uiteindelijke spanningsniveau. Als richtwaarden 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 spanningsarmgloeitemperatuursgebied (zie tabel 1).

Rekristalliserend gloeien

Het rekristalliserend gloeien wordt toegepast op sterk gedeformeerd of koudvervormd materiaal om de taaiheid en de vervormbaarheid te herstellen. Vaak zijn dit materialen met een laag koolstofgehalte, omdat stalen met een hoog koolstofgehalte niet of moeilijk koud te vervormen zijn. Door koudvervormen neemt de dislocatiedichtheid en dus de inwendige spanningen 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. De kritische vervormingsgraad waarboven rekristallisatie optreedt, ligt voor staal bij circa tien procent. Onder deze drempelwaarde treedt geen rekristallisatie op, maar slechts afbouw van spanningen (spanningsarmgloeien). 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 het rekristalliserend gloeien treedt korrelgroei op met een grove structuur met slechte mechanische eigenschappen als gevolg (zie tabel 2).

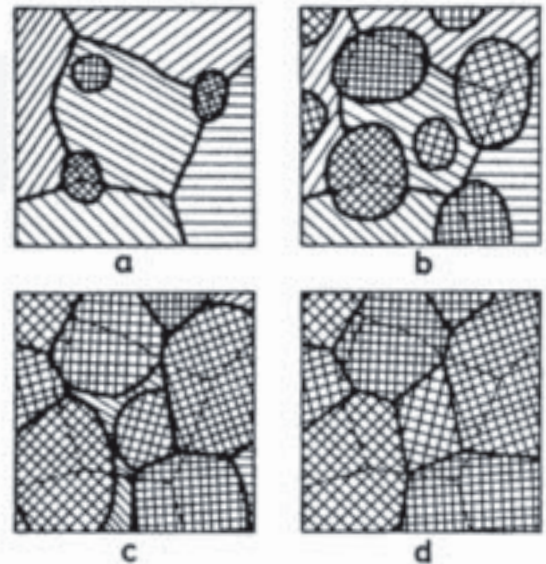
Is de deformatiegraad groter dan zullen er meer kiemplaatsten worden gecreëerd en kan met een lagere

Gloeitijd en -temperatuur	Vloeigrens [N/mm ²]
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
4x 0,5uur op 650°C	- 55

Tabel 1 - Achteruitgang van de vloeigrens als gevolg van spanningsarmgloeien bij S235

Gloei-temp. [°C]	20	400	550	600	650	750	950
Treksterkte N/mm ²	860	850	760	640	420	390	360
Rek [%]	5	9	13	22	28	31	32
Korrelgrootte [µm]	-	-	-	-	4,7	6,2	21,0

Tabel 2 - Invloed van de rekristallisatietemperatuur op de mechanische eigenschappen en korrelgrootte van 90 procent koudgewalst koolstofstaal met 0,09%C (gloeitijd 1 uur)



Figuur 3 – Schematische voorstelling van rekristallisatie, a: beginnende rekristallisatie, d: structuur van de rekristallisatie (bron: Warmbehandeling, Grundlagen und Anwendungen für Eisenwerkstoff, 1991)

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 het dieptrekken.

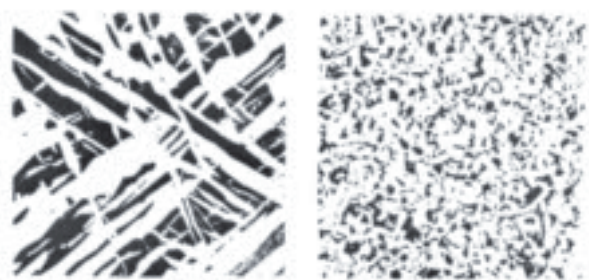
Rekristallisatie en de uiteindelijke korrelgrootte van het staal is dus een combinatie van deformatiegraad en gloeitemperatuur. De rekristallisatietemperatuur is geen materiaalconstante, maar is afhankelijk van de zuiverheid van het ferriet, het perlietpercentage en de vervormingsgraad. Om in staal rekristallisatie te bewerkstelligen, moet er gegloeid worden net onder de A1-lijn in het ijzer-koolstof diagram. De temperatuur moet relatief snel worden verhoogd, anders wordt het materiaal spanningsarmgegloeid en verdwijnen de kiemplaatsten 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; hierin ontstaan dus eerder kiemplaatsten. Voor een volledig structuurherstel zal men moeten normaalgloeien.

Tijdens het rekristalliseren ontstaan op verschillende punten, voornamelijk op de korrelgrenzen, kiemen van nieuwe korrels. Deze kiemen groeien verder uit ten koste van de oude korrels (zie figuur 3). Er zal ongewenste korrelgroei optreden als op te hoge temperatuur wordt gegloeid of als men te lang gloeit.

Homogeengloeien

Gietstructuren van meer dan twee legeringselementen vertonen chemische inhomogeniteiten, segregatie. Hiermee worden plaatselijke concentratieverschillen tussen de verschillende legeringselementen bedoeld.



Figuur 4 – Widmanstättenstructuur voor en na normaal gloeien (bron: Kollegediktaat materiaalkunde II (m 12b), 1970)

Deze inhomogeniteiten kunnen verschillen in hardheid en inwendige spanningen veroorzaken in het gegoten blok of in de plak.

Door te gloeien op temperaturen tussen 1000 en 1300 °C (net onder de solidus-temperatuur) kunnen legeringselementen zoals chroom en molybdeen door het staal diffunderen. Hierdoor ontstaan er minder sterke concentratieverschillen door het hele gietblok. Homogeengloeien wordt voornamelijk toegepast voor microsegregaties. Voor het bereiken van macrosegregaties neemt de gloeitijd sterkt toe. Deze gloeibehandeling kan niet altijd worden uitgevoerd, omdat het gevaar bestaat dat er interkristallijne scheurvorming optreedt. Deze kans bestaat doordat bij de hoge gloei-temperatuur de laagsmeltende fasen/bestanddelen op de korrelgrenzen vloeibaar worden (warmscheuren). Daarom wordt deze gloeibehandeling eigenlijk alleen toegepast door staalfabrikanten en niet door staalgebruikers.

Oplosgloeien

Oplosgloeien is een warmtebehandeling waarbij fasen in oplossing gaan. In staal is het austeniteren een voorbeeld van het oplosgloeien. Ferriet en cementiet worden ‘opgelost’ en gaan over in austeniet. Meestal is het oplosgloeien een stap in een complete warmtebehandelingscyclus, zoals bij het harden van staal.

Materiaal sterker maken

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

Normaalgloeien

Door de verschillende behandelingen (gieten, walsen, lassen en bijvoorbeeld koudvervormen) kunnen ongelijke en grove structuren in het materiaal ontstaan die lage mechanische eigenschappen hebben. Bij het normaalgloeien wordt de structuur als het ware genormaliseerd; in ‘normale’ toestand gebracht.

Hierbij ontstaan fijnere 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 A3 (30 tot 70 °C). Bij bovenperlitisch staal gloeit men 30 tot 70 °C boven A1. 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 teniet gedaan. Doordat bij deze gloeiing twee keer een faseformatie plaatsvindt, namelijk van ferriet plus perliet naar austeniet en omgekeerd, zal er ook twee keer een korrelverfijning optreden. Dit komt omdat er bij de transformatie meerdere groeikiemen per kristal ontstaan. Zo ontstaat een fijnkorrelige perlietstructuur, die karakteristiek of normaal is voor het desbetreffende staal.

Het normaalgloeien wordt overwegend toegepast bij ongelegeerd en laaggelegeerd constructiestaal en bij gietstaal. De koolstofgehalten van deze staalsoorten liggen meestal beneden 0,8 procent. Bovenperlitische staalsoorten (bijvoorbeeld gereedschapstaal met een koolstofgehalte van meer dan 0,8 procent) worden niet vaak normaalgegloeid, omdat de gewenste structuurverbetering beperkt blijft. Bij deze materialen moet op hogere temperaturen boven de Ac_m-lijn worden gegloeid. Hierdoor neemt de kans op korrelgroei toe. Tevens wordt bij afkoelen proeutectoidisch cementiet gevormd op de austenietkorrelgrens. Hierdoor ontstaat een bros cementietnetwerk. Deze materialen worden daarom zachtgegloeid.

Warmte-behandeling	C %	Rekgrens [N/mm ²]	Treksterkte [N/mm ²]	Rek [%]	Kerfslagwaarde J/cm ²
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

Tabel 3 - Gietstaal en de verandering van mechanische eigenschappen als gevolg van normaalgloeien

Widmanstättenstructuur

Gietstaal heeft meestal een grofkorrelige stollingsstructuur, die ontstaat door de afkoelomstandigheden in de gietvorm. Er vormt zich een grove structuur van ferrietplaten met daartussen perliet. Deze structuur wordt widmanstättenstructuur (naaldboomvormig) genoemd (zie figuur 4). Ook in constructiestaal kan deze structuur ontstaan bij hoge afwalstemperaturen of na het lassen. Men spreekt dan van een oververhittingstructuur, met lage kerfslagwaarden en een grofkorrelig glinsterend breukvlak. De widmanstättenstructuur kan door normaalgløeien worden opgeheven, waardoor de mechanische eigenschappen aanzienlijk verbeteren (zie tabel 3). Ook bij gewalst staal wordt door normaalgløeien de rekgrens en de taai-

heid verbeterd. Het verschil is echter klein vanwege de fijnere structuur van het gewalste materiaal. ■

Volgende maand deel 2 van deze aflevering over warmtebehandelingen.

Literatuur

- P.J. Kool, J. v/d Linde, Warmtebehandelingen van staal I, 1957.
- Beckert, Kompendium der Schweisstechnik, Band 3. Eignung metallischer Werkstoffe zum Schweißen, 1997.
- D. Liedtke, R. Jonsson, Warmbehandlung, Grundlagen und Anwendungen für Eisenwerkstoff, 1991.
- P. Jongenburger, B.M. Korevaar, Collegedictaat materiaalkunde II (m 12b), 1970.