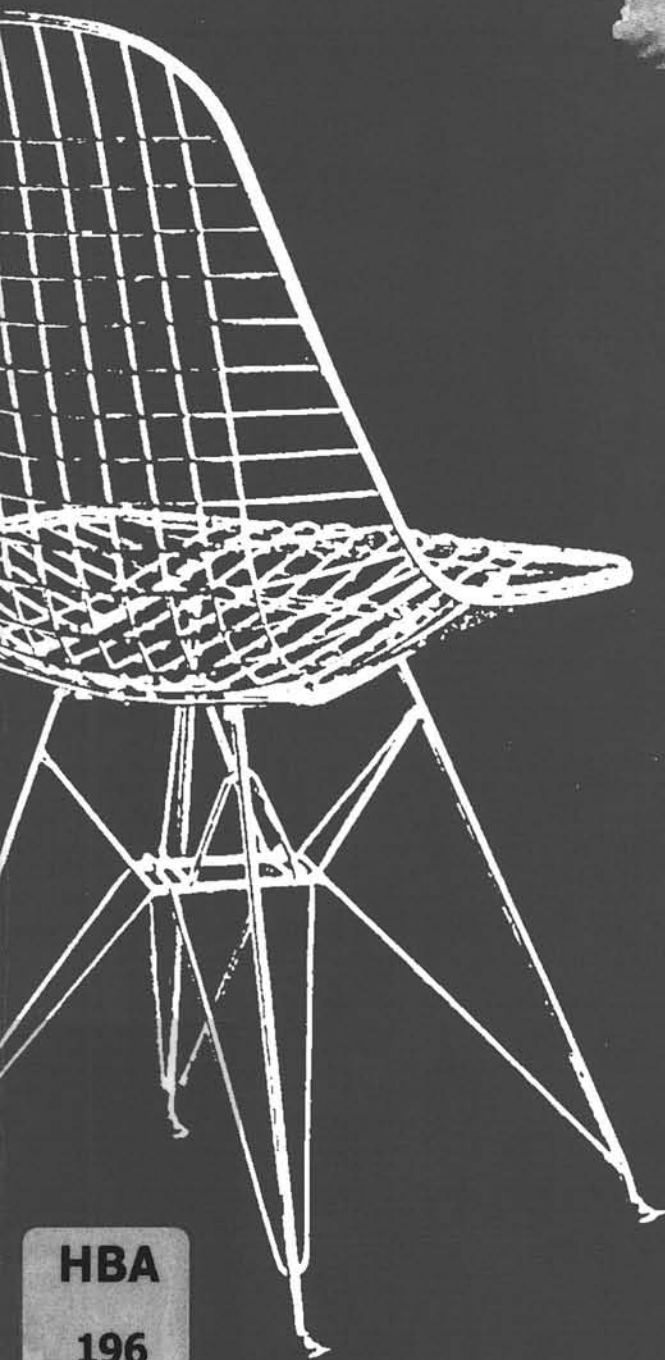


Materiaalkunde voor Ontwerpers



P. van Mourik
J. van Dam

HBA

196

Delftse Universitaire Pers

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|-------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 7 Li | 9 Be | 1 H | | 4 He | | | | | | | | 11 B | 12 C | 14 N | 16 O | 19 F | 20 Ne |
| 3 | 4 | 1 | | 2 | | | | | | | | 31 Al | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 23 Na | 24 Mg | IIIA | IVA | VA | VIA | VIIA | VIII | | | IB | IIB | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 39 K | 40 Ca | 45 Sc | 48 Ti | 51 V | 52 Cr | 55 Mn | 56 Fe | 59 Co | 58,7 Ni | 63,6 Cu | 65,4 Zn | 70 Ga | 72,6 Ge | 75 As | 79 Se | 80 Br | 84 Kr |
| 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 85,5 Rb | 87,6 Sr | 89 Y | 91 Zr | 93 Nb | 96 Mo | 99 Tc | 101 Ru | 103 Rh | 106,4 Pd | 108 Ag | 112,4 Cd | 115 In | 118,7 Sn | 122 Sb | 127,6 Te | 127 I | 131,3 Xe |
| 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 |
| 133 Cs | 137,4 Ba | 139-175 ZA | 178,5 Hf | 181 Ta | 184 W | 186 Re | 190 Os | 192 Ir | 195 Pt | 197 Au | 200,6 Hg | 204,4 Tl | 207 Pb | 209 Bi | 210 Po | 210 At | 222 Rn |
| 55 | 56 | 57-71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 |
| 223 Fr | 226 Ra | | | | | | | IIIB | | IVB | VB | VIB | VIIIB | | | | |
| 87 | 88 | 227 Ac | 232 Th | 231 Pa | 238 U | 237 Np | 242 Ac | 243 Am | 247 Cm | 249 Bk | 251 Cf | 254 Es | 253 Fm | 256 Md | 254 No | 257 Lw | |
| IA | IIA | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | |



kvg



krg



hex.d.p.



diamant



overige

FRBA 100

2260140 M.P.

Ob Collegelect.

ex 2272344

L2 . 2 mT/WT

**Materiaalkunde
voor
Ontwerpers**

Bibliotheek TU Delft



C 2272344

0786
534
5

Wetenschappelijke
100
1910

Materiaalkunde voor Ontwerpers

dr.ir. P. van Mourik
dr.ir. J. van Dam



CIP-gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag

Mourik, P. van

Materiaalkunde voor ontwerpers / P. van Mourik, J. van Dam.

Delft: Delftse Universitaire Pers. – III.

Met lit. opg., reg.

Uitg. in opdracht van: Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen te Delft

ISBN 90-407-1320-0

Trefw.: materiaalkunde

© **VSSD**

Eerste druk 1996

Uitgegeven door:

Delftse Universitaire Pers

Stevinweg 1, 2628 CN Delft

tel. 015 - 2783254, telefax 015 - 2781661.

In opdracht van:

Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen te Delft

Poortlandplein 6, 2628 BM Delft

tel. 015 - 2782124, telefax 015 - 2787585, e-mail: VSSD@tudelft.nl

internet: pubwww.tudelft.nl/vssd

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

ISBN 90-407-1320-0

Voorwoord

Vaak wordt het vak Materialkunde in verschillende deelvakken gedoceerd: Staal & Gietijzer Non-Ferro Metalen en Kunststoffen. Uiteraard komt deze uitsplitsing de studie van het vak Materiaalkunde niet ten goede omdat dan sterk nadruk wordt gegeven aan de verschillen tussen de genoemde deelonderwerpen. Gemeenschappelijk hebben deze deelonderwerpen dat structuur, vervaardigheden en materiaaleigenschappen steeds met elkaar verbonden zijn.

Dit boek beoogt de integratie van de genoemde onderdelen tot Materiaalkunde en de zelfstudie zodanig dat de contactvlakken met andere onderdelen van het Industrieel Ontwerpen, zoals het ontwerpen zelf en de vervaardiging van producten, duidelijk voor het voetlicht treden. Materiaalkunde is een geïntegreerd onderdeel van het ontwerpen en vervaardigen van producten. Immers, een virtueel produkt bestaat niet en materiaalkunde maakt een produkt concreet.

Bij het schrijven van dit boek is veel samenwerking geweest met leden van de Faculteit van het Industrieel Ontwerpen van de Technische Universiteit Delft. Met name kunnen hier genoemd worden prof.ir. J. Spoomaker en ir. J.F. Prins die een stimulerende rol gespeeld hebben bij de selectie van de te behandelen onderwerpen. Prof.ir. P. de Ruwe was zo vriendelijk Hoofdstuk 5 "Structuur en Verwerking van Materialen" kritisch te lezen.

Uit de Faculteit der Scheikundige Technologie en der Materiaalkunde wordt genoemd prof.em.dr.ir. B.M. Korevaar die ons zijn kritische opmerkingen over de Hoofdstukken 1 tot en met 4 niet spaarde. Verder noemen wij prof.em.dr.ir. A. van der Vegt. Zijn boek "Polymeren, van keten tot kunststof" (Ref. 6) fungeerde als bron voor de "kunststoffen"-paragrafen in dit boek en wij hebben zijn kritische opmerkingen over deze paragrafen in dankbaarheid verwerkt. Dr.ir. H. Nieswaag las de gedeelten gewijd aan gietijzer kritisch. H.J.A. Breur, M. van Driel en A. Speijer droegen als student Materiaalkunde eveneens waardevol bij aan tekst en figuren. De Sectie Thermische Verwerkingstechnologie (prof.dr.ir. S. van der Zwaag) en de Vakgroep Technologie van de Macromoleculaire Stoffen (prof.dr.ir. A. Posthuma de Boer) van deze faculteit gaven ons (respectievelijk PvM en JvD) de vrijheid tot het schrijven van dit boek. Tot slot danken wij het OnderwijsStimuleringsFonds van de Technische Universiteit Delft die via de financiering van het project "Materiaalkunde in blokvorm" dit boek mede mogelijk heeft gemaakt.

Wij houden ons aanbevolen voor opbouwende kritiek. Hierbij denken wij vooral aan de gebruikers van dit boek: studenten Industrieel Ontwerpen.

Delft, juni 1996

Delft, Laboratorium voor Materiaalkunde TU Delft

P. van Mourik & J. van Dam

Aanwijzingen voor zelfstudie

In het studiejaar '94/'95 werd dit stof in dit boek voor het eerst in deze vorm gebruikt voor het tweedejaarsvak Materiaalkunde II van de studierichting Industrieel Ontwerpen aan de Technische Universiteit Delft. Uit verzameld cijfermateriaal werd afgeleid, dat de in dit boek gepresenteerde stof zelfstudie stimuleert. Dit boek is dan ook speciaal ontworpen voor zelfstudie: het moet niet gelezen worden, maar bestudeerd. Het boek biedt de student (m/v) de volgende hulpmiddelen bij zelfstudie:

1. De gedetailleerde inhoudsopgave laat in één oogopslag het verband tussen de verschillende onderdelen van de stof.
2. Elk hoofdstuk begint met leerdoelen voor dat hoofdstuk, zodat de student (m/v) direct ziet waar in dat hoofdstuk de belangrijke accenten liggen.
3. De tekst is zo compact mogelijk geschreven, vaak in samenhang met de figuren: voor een goed begrip vormen tekst en figuren een geheel.
4. Terugzoeken is mogelijk via de gedetailleerde inhoudsopgave en via de trefwoordenlijst.
5. De studievragen in de tekst prikkelen tot nadenken. Voor de noodzakelijke terugkoppeling zorgen de 'Antwoorden op Studievragen'.
6. Aan het einde van het boek is een verzameling studie-opdrachten gegeven. Na bestudering van dit boek wordt van de studenten (m/v) verwacht dat hij/zij zelf een antwoord op een dergelijke studie-opdracht formuleert en ook evalueert.

Materiaalkunde en Industrieel Ontwerpen zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden. Een grondige kennis van materialen is een absolute vereiste voor een verantwoord produkt. De grote lijn van dit boek is dan ook:

1. kennis van en inzicht in de structuur van materialen (Hoofdstuk 2, 3)
2. basiskennis van veel toegepaste materialen (Hoofdstuk 4)
3. kennis van en inzicht in het verband tussen structuur, verwerking en resulterende eigenschappen (Hoofdstuk 5)

Hoofdstuk 1 schetst de plaats van Materiaalkunde binnen Industrieel Ontwerpen. Hoofdstuk 6 geeft via vier vraaggESPrekken stem aan de praktijk. Dit hoofdstuk illustreert dat de verbinding tussen ontwerpen en daadwerkelijk produceren niet altijd gemakkelijk is. Het is voor een student Industrieel Ontwerpen van belang hiervan kennis te hebben.

Door de index, de appendices, de vele tabellen en de referenties is dit boek niet alleen bruikbaar als studieboek, maar ook als naslagwerk. Kennis van materialen is een wezenlijk onderdeel van de geestelijke bagage van een Industrieel Ontwerper. In

tegenstelling tot een wijd verbreid misverstand zijn *eigen kennis en inzichten* ook in het tijdperk van de informatietechnologie van doorslaggevend belang. Voor het beoordelen van informatie is een referentiekader noodzakelijk gebaseerd op eigen kennis en inzichten. Kennis en inzicht verwerft men door zelfstudie. Voor de verwerking van dit boek is zelfstudie het noodzakelijke enzym.

Delft, juni 1996

P. van Mourik & J. van Dam

Inhoud

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| VOORWOORD | 5 |
| AANWIJZINGEN VOOR ZELFSTUDIE | 6 |
| 1. INLEIDING | 11 |
| 2. STRUCTUREN VAN MATERIALEN | 15 |
| 2.1. Inleiding | 15 |
| 2.2. Atoombouw en atoombinding | 17 |
| 2.3. Metaalkristallen | 22 |
| 2.3.1. Roosters | 22 |
| 2.3.2. Kristalfouten | 28 |
| 2.3.3. De versterking van metalen en metaallegeringen | 34 |
| 2.4. Kunststoffen | 38 |
| 2.4.1. De opbouw van polymeren | 38 |
| 2.4.2. Ketenstructuur | 41 |
| 2.4.3. Glastoestand en glas-rubberovergang | 44 |
| 2.4.4. Semi-kristallijne polymeren | 47 |
| 3. LEGERINGEN, OPLOSSINGEN, MENGSELS, BIJMENGSELS EN COMPOSITIEN | 53 |
| 3.1. Inleiding | 53 |
| 3.2. Opbouw van metaallegeringen | 55 |
| 3.3. Toestandsdiagrammen voor binaire metaallegeringen | 57 |
| 3.3.1. Onoplosbaarheid in de vaste toestand; eutecticum, peritecticum en intermetallische verbinding | 58 |
| 3.3.2. Volledige oplosbaarheid in vaste toestand; mengkristallen | 61 |
| 3.3.3. Beperkte oplosbaarheid in vaste toestand | 62 |
| 3.3.4. Overgangspunten; gecompliceerde diagrammen | 64 |
| 3.4. Samengestelde kunststoffen | 67 |
| 3.4.1. Polymeer-polymeer mengsels | 67 |
| 3.4.2. Mengsels van polymeren met niet-polymeren; composieten | 68 |
| 4. ENKELE BELANGRIJKE MATERIALEN | 73 |
| 4.1. Een overzicht | 73 |
| 4.2. IJzer, staal, gietijzer en gelegeerd staal | 78 |
| 4.2.1. De kracht van ijzer, staal en gietijzer | 78 |

| | | |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.2. | IJzer | 79 |
| 4.2.3. | Staal | 81 |
| 4.2.4. | Gietijzer | 99 |
| 4.2.5. | Gelegeerd staal | 105 |
| 4.3. | Non-Ferro Metalen | 112 |
| 4.3.1. | De sier, de duurzaamheid en de lichtheid van het bestaan | 112 |
| 4.3.2. | Aluminium en zijn legeringen | 113 |
| 4.3.3. | Koper en zijn legeringen | 148 |
| 4.3.4. | Magnesium en zijn legeringen | 160 |
| 4.4. | Kunststoffen | 168 |
| 4.4.1. | Belangrijke thermoplasten | 168 |
| 4.4.2. | Belangrijke thermoharders | 173 |
| 4.4.3. | Belangrijke elastomeren | 173 |
| 4.5. | Eigenschappen van kunststoffen | 175 |
| 4.5.1. | Algemeen gedragspatroon | 175 |
| 4.5.2. | Mechanische eigenschappen | 182 |
| 4.5.3. | Oppervlakte-eigenschappen | 202 |
| 4.5.4. | Thermische eigenschappen | 204 |
| 4.5.5. | Elektrische eigenschappen | 210 |
| 4.5.6. | Optische eigenschappen | 212 |
| 4.5.7. | Milieu-invloeden | 213 |
| 4.5.8. | Diffusie en permeabiliteit | 215 |
| 5. | STRUCTUUR EN VERWERKING VAN MATERIALEN | 217 |
| 5.1. | Inleiding | 217 |
| 5.2. | Structuur en de verwerking via de vloeibare toestand | 230 |
| 5.2.1. | Metaallegeringen | 230 |
| 5.2.2. | De structuur van gietijzer, gegoten aluminiumlegeringen, gegoten koperlegeringen en gegoten magnesiumlegeringen | 237 |
| 5.2.3. | Kunststoffen | 246 |
| 5.3. | Structuur en de verwerking via de vaste toestand | 252 |
| 5.3.1. | Plastische vervorming van metalen en metaallegeringen | 252 |
| 5.3.2. | Plastische vervorming en verspaning van kunststoffen | 270 |
| 5.4. | Structuur en verbindingen | 272 |
| 5.4.1. | Lassen, solderen en lijmen van metaallegeringen | 272 |
| 5.4.2. | Lassen van kunststoffen | 278 |
| 5.4.3. | Lijmen van kunststoffen | 280 |

| | |
|----------------------------------------------|-----|
| 6. ONTWERPEN EN PRODUCEREN | 282 |
| 6.1. Inleiding | 282 |
| 6.2. Van stuiver tot vijf gulden | 282 |
| 6.2.1. De ontwerper: Bruno Ninaber van Eyben | 283 |
| 6.2.2. De producent: 's Rijks Munt | 286 |
| 6.3. Sigaren passen in doosjes | 289 |
| 6.4. Geavanceerde eenvoud | 292 |
| APPENDIX NOMENCLATUUR | 297 |
| APPENDIX MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN | 300 |
| APPENDIX PRIJSVERHOUDINGEN | 310 |
| ANTWOORDEN OP STUDIEVRAGEN | 313 |
| STUDIEOPDRACHTEN | 319 |
| OUDE TOEKOMST | 325 |
| REFERENTIES | 327 |
| TREFWOORDEN | 327 |

1 Inleiding

Na bestudering van dit hoofdstuk kan de student:

1. *het onderscheid maken tussen functie-eisen en fabricage-eisen*
2. *het verband aangeven tussen materiaalkunde en industrieel ontwerpen*

Stoffen worden materialen genoemd, als ze worden toegepast in concrete producten. Deze definitie geeft al aan, dat de materiaalkeuze een geïntegreerd onderdeel dient te zijn van het gehele ontwerpproces. Dit gezichtspunt zal op verschillende plaatsen in dit boek, zij het niet op altijd dezelfde wijze, aan de orde komen. Gelukkig begint dit boek niet in een materiaalkundig vacuüm. Iedereen heeft op zijn minst een alledaagse materialenkennis. De voor de praktijk van het Industrieel Ontwerpen belangrijke materialen worden onderscheiden in:

1. Metalen
2. Macromoleculaire materialen
3. Keramische materialen

De toepassing van de op ijzer gebaseerde metalen is dusdanig dominant (de gezamenlijke jaarproductie van ijzer en staal is circa vijftig keer zo groot als die van het metaal met de op één na grootste productie, te weten aluminium en zijn legeringen), dat de metalen worden verdeeld in ferro en non-ferro metalen. Deze dominante positie heeft ijzer vooral te danken aan de door de gemakkelijke winbaarheid relatief zeer lage prijs en aan de enorme variatie aan eigenschappen die ijzer- en staallegeringen kunnen vertonen.

De macromoleculaire stoffen worden verdeeld in de natuurlijk voorkomende macromoleculaire stoffen, zoals hout, leer en katoen en de synthetische polymeren. De meeste macromoleculaire stoffen die van belang zijn voor de industrieel ontwerper zijn echter synthetische polymeren. Voor de vormgeving is vooral van belang het onderscheid tussen thermoharders en thermoplasten (zie §2.4).

De keramische materialen vormen in deze indeling een restcategorie. Voor de industrieel ontwerper zijn vooral die materialen van belang, waarin siliciumoxyde een rol speelt. Het kan dus om glas gaan (de Leerdamse glasfabrieken onderkennen al vroeg het belang van industrieel ontwerpen – het door Copier ontworpen tulpglas is hier een goed voorbeeld van), maar ook om gebakken klei of porselein. In dit boek zullen we ons beperken tot metalen en macromoleculaire materialen.

Een industrieel ontwerper zal in de regel gevraagd worden een compleet produkt te ontwerpen. Veelal zal een dergelijk produkt bestaan uit een veelheid van onderdelen

van een veelheid van materialen, die gezamenlijk moeten voldoen aan de functie-eisen voor het complete produkt. Materiaalkeuze in relatie tot het totale ontwerp zal dus ingewikkeld zijn. Om deze materiaalkeuze verantwoord te doen, en dus om een in alle opzichten verantwoord ontwerp te scheppen, zijn materiaalkundige kennis en materiaalkundig inzicht absoluut vereist. Vanuit praktisch oogpunt zijn daarnaast nog nodig: globaal inzicht in de kosten, verkrijgbaarheid en verwerkbaarheid van materialen en globaal inzicht in de milieukundige consequenties. Op grond van het voorgaande kan men de volgende leerdoelen voor materiaalkunde voor ontwerpers formuleren (zie Ref. 1):

- Kennis van materialen, met nadruk op metalen en kunststoffen. De fysische en chemische eigenschappen, voor zover van belang voor de functionele kenmerken, voor de vervaardiging of voor de milieubelasting van in serie of in massa geproduceerde produkten.
- Kennis over de vorm waarin materialen verkrijgbaar zijn.
- Vaardigheid in het beoordelen van gegevens uit materiaalhandboeken.
- Inzicht in de betekenis van materialen voor het ontwerpen van in serie of in massa vervaardigde produkten.
- Kennis en inzicht in de toepassingen van metalen of kunststoffen in relatie tot functie, fabricagemethode en fabricagekosten.
- Kennis en inzicht in het proces van materiaalkeuze.
- Inzicht in de trends van ontwikkelingen in de materiaalkunde.

Het gemeenschappelijke van deze leerdoelen is het verkrijgen van inzicht in de relatie tussen materiaalkeuze, produktontwerp en produktfabricage. Daarom worden in dit boek behandeld de structuur van materialen, fasenleer: legeringen en mengsels, vormgeving en verwerking van materialen en eigenschappen van materialen. Verder worden enkele belangrijke materialen nader beschouwd: eigenschappen, vormgeving en bewerkingen. De grondslagen voor een verantwoorde materiaalkeuze worden gelegd.

In veel produkten is een veelheid van materialen aanwezig. Tijdens het ontwerp-proces zal regelmatig de vraag gesteld worden welk materiaal voor een bepaalde toepassing het geschiktst is. De complexiteit van deze vraag zal aan de hand van het volgende voorbeeld toegelicht worden.

Een koffiezetapparaat is ingewikkelder dan het lijkt. Het bestaat uit verschillende onderdelen met elk specifieke functies. Denk bijvoorbeeld aan de warmhoudplaat, het verwarmingselement, de warmtewisselaar, de waterpomp en de behuizing. Voor elk onderdeel moeten de functie- en fabricage-eisen beschouwd worden, waarna een geschikt materiaal gekozen kan worden. In elk stadium van het ontwerpproces moet gevraagd worden: voldoet het gekozen materiaal aan de gestelde functie- en fabricage-eisen? In Tabel 1.1 zijn voor de behuizing enkele eisen gegeven.

Tabel 1.1. *Functie- en fabricage-eisen voor de behuizing van een koffiezetapparaat.*

| <i>functie-eisen</i> | <i>fabricage-eisen</i> |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| voorraadvat voor koud water | fabricage uit een stuk mogelijk, geen nabewerking |
| transport van heet water (± 80 °C) | lage stukprijs/ massafabricage |
| bescherming van de hete pot waarin de koffie zit | |
| vaste passende kleur | |
| lage massa | |

De ontwerper maakt dus eerst een opsomming van de functie- en fabricage-eisen. Hieruit volgen de gestelde eisen aan de materiaaleigenschappen (zie Tabel 1.2). Na bestudering van de relevante hoofdstukken zal blijken dat kunststoffen in dit geval het beste aan de gestelde eisen voldoen. Veel kunststoffen kunnen uitstekend verwerkt worden via spuitgieten (zie Hoofdstuk 5), waarbij een ingewikkeld voorwerp vormgegeven kan worden zonder nabewerking. Bovendien kan aan kunststoffen elke gewenste kleur gegeven worden, zodat een oppervlaktelaag als kleurgever niet nodig is.

Tabel 1.2. *Eisen aan de materiaaleigenschappen.*

| <i>functie-eisen</i> | <i>fabricage-eisen</i> |
|-------------------------------------------|------------------------|
| bestand tegen warm en koud water | spuitgietbaar |
| krasvast en slagvast | lage materiaalprijs |
| kleurvast zonder extra oppervlaktelaag | |
| geen aanhechting van koffiedrank | |
| bestand tegen gangbare vaatwasmiddelen | |

De groep van kunststoffen is echter zeer gevarieerd. Een belangrijke onderverdeling is die tussen rubbers, thermoharders en thermoplasten, zie §2.4. Omdat een rubberen koffiezetapparaat niet praktisch lijkt, blijven thermoharders en thermoplasten over. Zoals blijkt uit Hoofdstuk 5 zijn alleen de thermoplasten gemakkelijk vorm te geven via spuitgieten, waardoor nabewerkingen tot een minimum beperkt blijven. De materiaalkeuze komt er nu verder op neer een thermoplast te vinden, die zo goed mogelijk voldoet aan de genoemde eisen aan materiaaleigenschappen. De keuze zal zo veel mogelijk worden gedaan op basis van een kwantitatieve vergelijking tussen de gevraagde materiaaleigenschappen en de beschikbare thermoplasten. Hierbij zijn de prijs, dat is de prijs van het materiaal verwerkt tot een kant-en-klare behuizing in de geplande aantallen, en de beschikbaarheid vaak doorslaggevend voor de uiteindelijke keuze.

Vraag 1.1 *Maak een beredeneerde schatting van het aantal per jaar in Nederland verkochte koffiezetapparaten.*

2 Structuren van materialen

Na bestudering van dit hoofdstuk kan de student:

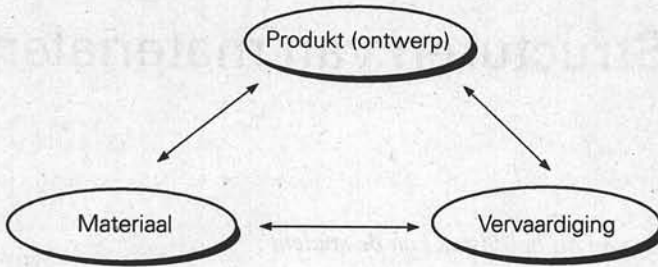
1. *formuleren wat het verband is tussen produkt, vervaardiging en materiaal*
2. *aangeven welke bindingen voor metalen en kunststoffen van belang zijn*
3. *definiëren wat een kristal is en welke kristalsoorten er zijn*
4. *aangeven hoe metaallegeringen verstevigd kunnen worden*
5. *aangeven hoe polymeren opgebouwd zijn*
6. *aangeven welke fase-overgangen er in polymeren zijn en hoe deze gemeten kunnen worden*

2.1. Inleiding

Materialen kunnen worden bekeken vanuit een fenomenologisch gezichtspunt: welke soorten materialen zijn er, wat is globaal hun herkomst en welke soort eigenschappen zijn belangrijk voor hun toepassing in concrete produkten (Ref. 2). Daarbij gaat het vooral om mechanische eigenschappen (hoe sterk is een materiaal) en fysische eigenschappen (bijvoorbeeld: wat is de dichtheid van een materiaal). Daarnaast kunnen oppervlakte-eigenschappen en corrosie-eigenschappen ter sprake komen. Staal is in veel gevallen sterker dan legeringen van aluminium, staal corrodeert meestal en aluminium niet, en kunststoffen hebben meestal een lagere dichtheid dan metalen.

In dit hoofdstuk zal nader ingegaan worden op de structuur van materialen. Kennis van en inzicht in de structuur van materialen kan veel verhelderen over het verband tussen de materiaaleigenschappen en de route waarlangs produkten gefabriceerd worden. Immers, een materiaal is een stof verwerkt tot een concreet produkt of een halffabrikaat. De materiaaleigenschappen kunnen niet los gezien worden van het produkt en de procesroute waarlangs men dit produkt heeft vervaardigd. Produkt (-ontwerp), Materiaal en Vervaardiging vormen een onlosmakelijk geheel in de driehoek **P M V** (zie Figuur 2.1).

Verhelderend is hierbij het inzicht, dat materiaalkunde als technisch vak een 'historische wetenschap' is. Hiermee wordt bedoeld, dat wat tijdens het doorlopen van de vervaardigingsroute met het materiaal gebeurde, grote invloed heeft op de materiaaleigenschappen in het uiteindelijke produkt. Enige voorbeelden illustreren dit:



Figuur 2.1. Driehoek produkt, materiaal en vervaardiging.

1. Veel aluminiumlegeringen lenen zich voor deformatie bij kamertemperatuur. Omdat deze deformatie plaats vindt beneden de hersteltemperatuur (zie §2.3.3), wordt deze deformatie kouddeformatie genoemd. De kouddeformatie verhoogt de hardheid. De hardheid van het via kouddeformatie verkregen produkt hangt dus af van de gevolgde produktieroute. De mate waarin aluminiumlegeringen koud gedeformeerd kunnen worden, hangt weer af van de structuur van de aluminiumlegeringen, zoals bepaald door het kristalrooster van de aluminiumrijke fase, korrelgrootte en de aan- of afwezigheid van precipitaten (zie §4.3.2).
2. Een gewone huishoudschaar is vervaardigd uit een ijzer-koolstof legering. Staal is per definitie een ijzer-koolstof legering met een koolstofgehalte van minder dan twee gewichtsprocent (zie § 4.2). De legering voor de huishoudschaar bevat zoveel koolstof dat deze legering te hard is om koud te vervormen en de schaar wordt daarom warm gesmeed. Daarna wordt het staal gehard. De materiaal-kundige structuur van het uitgangsmateriaal bepaalt hier dus niet alleen de materiaaleigenschappen in het uiteindelijke produkt, maar ook het fabricage-proces.
3. Kunststoffen huishoudmaatbekers worden vervaardigd uit polystyreen (zie §4.4). Kunststoffen zijn macromoleculaire stoffen; ze zijn opgebouwd uit zeer lange ketenmoleculen. De kunststof is transparant als de ketens volkomen ongeordend zijn. Piepschuim is een veel gebruikt verpakkingsmateriaal. Piepschuim is vervaardigd uit polystyreenkorrels, die via een speciaal procédé worden opgeblazen. Piepschuim bestaat voor 90 vol% (volumepercent) uit lucht en voor 10 vol% uit polystyreen en het is ondoorzichtig. Ook hier is de structuur van het materiaal bepalend voor de materiaaleigenschappen in het uiteindelijke produkt.

De bovenstaande voorbeelden tonen duidelijk aan dat de structuur van materialen belangrijk is voor de materiaaleigenschappen in het uiteindelijke produkt. Hoe een produkt er uitziet (oppervlakte-afwerking, onderlinge verhouding van de dimensies van een produkt) wordt mede bepaald door de materiaaleigenschappen en dus door de materiaalstructuur. Er bestaat wisselwerking tussen de structuur, de verwerkings-

technologie en de materiaalkeuze. Het is evident, dat de materiaalkeuze en verwerkingstechnologie gevolgen hebben voor de vormgeving van het produkt, alsmede voor de mate waarin het produkt voldoet aan de gestelde functie-eisen.

In het tweede en derde voorbeeld komt naar voren, dat er een sterk verband kan bestaan tussen de samenstelling en de structuur van materialen. Materialen zijn in de praktijk bijna altijd mengsels van verschillende stoffen, of het zijn legeringen.

De in de praktijk voorkomende materialen bevinden zich bijna altijd in slechts één aggregatietoestand: vast. Een vloeibaar produkt kenmerkt zich meestal niet door een grote vormvastheid. Het is van belang na te gaan welke structuren vaste materialen kunnen hebben. Daarom begint dit hoofdstuk met een paragraaf over de structuren van vaste materialen. Vervolgens wordt enig inzicht gegeven in het verband tussen chemische samenstelling en structuur op basis van enige toegepaste thermodynamica. Hierbij zal tevens blijken dat de structuren van de temperatuur afhankelijk kunnen zijn. Bij het metaal ijzer is de structuur boven 912 °C anders dan bij kamertemperatuur. Hierop berusten warmtebehandelingen die de structuur van een materiaal beïnvloeden en dus zijn eigenschappen doen veranderen.

2.2. Atoombouw en atoombinding

Alle stoffen bestaan uit atomen. In de natuur komen ongeveer 90 verschillende soorten atomen voor. De atomen zijn bij benadering bolvormig met een diameter variërend tussen 0,2 en 0,4 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). De atomen bestaan uit een elektrisch positieve kern met daar omheen elektrisch negatieve deeltjes: elektronen. De atoomkern bestaat uit protonen en neutronen. De neutronen zijn elektrisch neutraal en de protonen zijn elektrisch positief. Het atoom is elektrisch neutraal; dus het aantal protonen is gelijk aan het aantal elektronen.

Elke atoomsoort of element heeft een atoomnummer. Dit nummer is gelijk aan het aantal protonen. De atoommassa is gelijk aan het aantal protonen plus het aantal neutronen, want de massa van de elektronen is verwaarloosbaar klein ten opzichte van die van de neutronen en protonen. Atomen met een gelijke kernlading en verschillend aantal neutronen worden isotopen van de betreffende atoomsoort genoemd. Isotopen hebben identieke chemische, maar verschillende fysische eigenschappen.

Rondom de atoomkern zwermen de elektronen in een aantal schillen. Deze schillen zijn ruimtelijk niet scherp begrensd. Deze schillen zijn genummerd; het schilnummer is n : $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots$ Naarmate het schilnummer hoger is, zwermen de elektronen op een grotere afstand van de atoomkern. De opbouw van de elektronenschillen, vooral van de buitenste schil, bepaalt in hoge mate de eigenschappen van de verschillende atoomsoorten, bijvoorbeeld de bindingsmogelijkheden die verantwoordelijk zijn voor de sterkte-eigenschappen van de materialen.

In de opbouw van de elektronenschillen van de verschillende atoomsoorten zijn

bepaalde regelmatigheden. Op basis hiervan kunnen de elementen worden ingedeeld in het *Periodiek Systeem* (zie binnenkant omslag). Gerekend vanaf de atoomkern kan de eerste elektronenschil maximaal twee, de tweede maximaal acht, de derde maximaal 18, de vierde maximaal 32, ergo $2n^2$ met n = nummer van de schil, elektronen bevatten. *De buitenste schil bevat nooit meer dan acht elektronen.* De elektronen van de buitenste schil heten *valentie-elektronen*. Het aantal valentie-elektronen bepaalt voornamelijk de chemische eigenschappen van het betreffende element (zie ook Ref. 3). De buitenste schil hoeft niet volledig gevuld te zijn. De atoomsoorten met volledig gevulde buitenste elektronenschillen (zie Tabel 2.1) zijn chemisch inactief, zij vormen de edelgassen. Het blijkt, dat alle atoomsoorten in hun verbindingen streven naar deze edelgasconfiguratie. Dit kan door afstaan van valentie-elektronen of door het opnemen van valentie-elektronen. *Een atoomsoort gedraagt zich als een metaal als het elektronen afstaat; een metalloïde neemt juist valentie-elektronen op.*

Tabel 2.1. Edelgasconfiguratie.

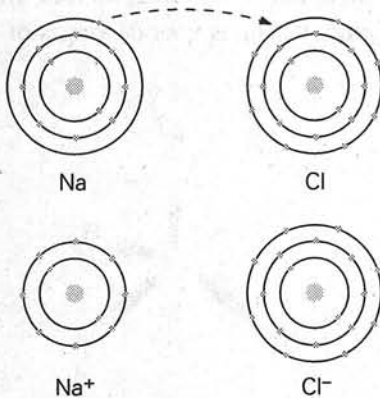
| aantal schillen | aantal elektronen | edelgas |
|-----------------|--------------------------|---------|
| $n = 1$ | 2 | Helium |
| $n = 2$ | 2 + 8 | Neon |
| $n = 3$ | 2 + 8 + 8 | Argon |
| $n = 4$ | 2 + 8 + 18 + 8 | Krypton |
| $n = 5$ | 2 + 8 + 18 + 18 + 8 | Xenon |
| $n = 6$ | 2 + 8 + 18 + 32 + 18 + 8 | Radon |

Elementen met een gelijk aantal elektronen in de buitenste schil, maar met verschillende binnenschillen, gedragen zich scheikundig analoog. Voorbeelden zijn de alkalimetalen: Li, Na, K, Rb, Cs, en de halogenen: F, Cl, Br, J, met respectievelijk één en zeven elektronen in de buitenschil. In het Periodiek Systeem zijn de atoomsoorten gerangschikt volgens oplopend atoomnummer in rijen met een gelijk aantal elektronenschillen, waarbij de atoomsoorten met eenzelfde aantal valentie-elektronen in kolommen onder elkaar staan. De metalen, die gemakkelijk elektronen afstaan, staan in de linkerkant van het Periodiek Systeem, terwijl de metalloïden, die elektronen opnemen, in de rechterkant van het Periodiek Systeem zijn te vinden. Van links naar rechts gaat het metaalkarakter geleidelijk over in het metalloïde karakter. Door het streven naar de edelgasconfiguratie kunnen atomen zich aan elkaar binden. Dit betekent, dat de binding afhankelijk is van het aantal valentie-elektronen. Het overlappen van de elektronenschillen van atomen van verschillende of van de zelfde soort kan leiden tot de edelgasconfiguratie voor die gezamenlijke atomen en dus tot binding tussen die atomen. De verbinding van een aantal atomen heet een molecuul. Er zijn drie typen bindingen die door overlap van de elektronenschillen ontstaan. De grenzen tussen deze typen zijn niet scherp. Men onderscheidt: ionbinding of

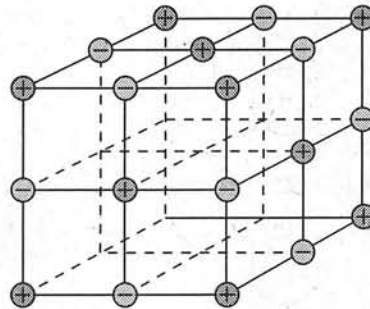
heteropolaire binding, covalente of homopolaire binding en metaalbinding (Ref. 4). Deze berusten op de structuur van de buitenste elektronenschillen en worden primaire bindingen genoemd. Daarnaast zijn er bindingen die tot stand komen zonder verandering in de elektronenstructuur. Zij heten secundaire bindingen of Van-der-Waals-bindingen.

Ionbinding of heteropolaire binding

De ionbinding is het gevolg van de onderlinge aantrekkingskracht van positief en negatief geladen ionen. Atomen van metalen, zoals natrium of calcium geven gemakkelijk hun valentie-elektronen af en worden dan positief geladen ionen. Metalloïdatomen, zoals zuurstof of chloor, nemen graag een elektron op en worden dan negatief geladen ionen. Door de elektrostatische aantrekkingskracht ontstaat een binding tussen verschillend geladen ionen (zie Figuur 2.2). Dit wordt de ionbinding of de heteropolaire binding genoemd.



Figuur 2.2. Ionbinding van NaCl.

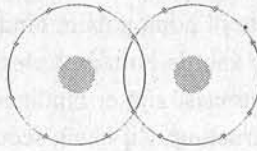


Figuur 2.3. Ionrooster van NaCl (+ = Na⁺, - = Cl⁻).

In vaste stoffen met ionbinding vormen zich kristallen door een regelmatige stapeling van de ionen. Deze stapeling wordt veroorzaakt door het feit, dat een positieve lading elke negatieve lading in de buurt aantrekt en omgekeerd. Elk positief ion tracht zich zo veel mogelijk met negatieve ionen te omringen en elk negatief met positieve. De afstand tussen de ionen wordt bepaald door de grootte van de elektrostatische krachten. Het standaardvoorbeeld van de ionbinding is te vinden in keukenzout: het NaCl-kristal (zie Figuur 2.3).

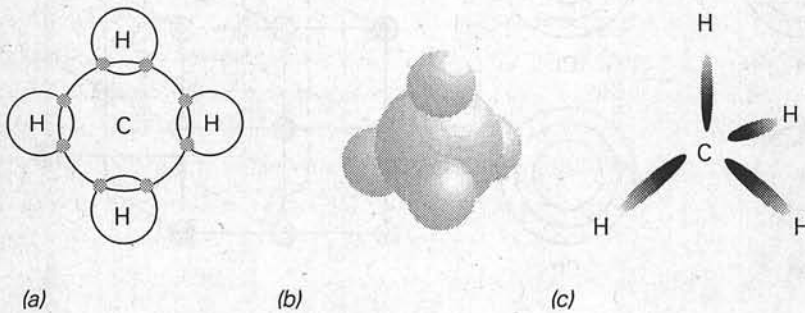
Covalente of homopolaire binding

De covalente binding komt vooral voor bij de metalloïden (zuurstof O₂, chloor Cl₂). De edelgasconfiguratie wordt hier verkregen, doordat één of meer valentie-elektronen van elk atoom gelijktijdig tot de beide atomen horen, zie Figuur 2.4. Ook verschillende atoomsoorten kunnen covalente bindingen vormen. De covalente



Figuur 2.4. Twee-atomig molecuul (bijvoorbeeld Cl_2) met covalente binding.

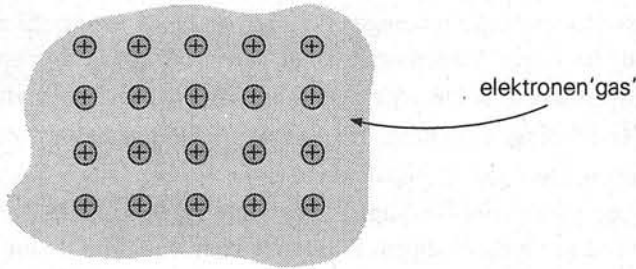
bindingen zijn vooral belangrijk voor de organische verbindingen. Het koolstofatoom heeft vier valentie-elektronen die bewegen in elliptische banen, waarvan de lengte-assen gericht zijn naar de hoekpunten van een regelmatig viervlak. In elk van deze banen kan een ander valentie-elektron worden opgenomen voor de vorming van een covalente binding. Methaan, CH_4 is hiervan een voorbeeld (zie Figuur 2.5). De onderlinge binding van koolstofatomen in ketenmoleculen is ook covalent. Vaak vindt men een dubbele binding tussen koolstofatomen, zoals in etheen ($H_2C=CH_2$). Dergelijke dubbele bindingen spelen een rol bij de opbouw van lange ketens uit eenvoudige grondstoffen (polymerisatie), wat van groot belang is voor de kunststof-industrie.



Figuur 2.5. Modellen voor methaan CH_4 . a. tweedimensionaal model; b. driedimensionaal model; c. binding van covalente elektronen.

Metaalbinding

De gemeenschappelijke valentie-elektronen zijn bij de metaalbinding niet beperkt tot enkele atomen, maar behoren in feite tot het gehele kristal. Een metaalkristal is een stapeling van positief geladen ionen (zie Figuur 2.6), waarin de valentie-elektronen zich vrij kunnen bewegen. Dit elektronengas verzorgt de binding. De valentie-elektronen zijn dus niet aan een bepaalde plek gebonden. De overige elektronen blijven gelokaliseerd aan de positief geladen ionen. De metaalbinding is in het algemeen wat zwakker dan de heteropolaire of de homopolaire bindingen.



Figuur 2.6. Metaalbinding.

Overgangen tussen covalente binding en ionbinding, dipoolvorming en secundaire bindingen

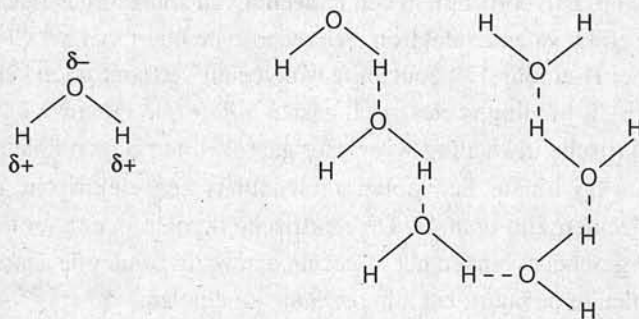
In een metalloïd molecuul met covalente binding van twee gelijke atomen, zoals Cl_2 , zijn de valentie-elektronen gelijkelijk over de beide atomen verdeeld. Het molecuul is elektrisch symmetrisch. Hiertegenover staan de ionbindingen, waar de valentie-elektronen van het ene atoom naar het andere zijn overgegaan. Er komen ook veel bindingen voor, die hier tussenin liggen: een combinatie van ionbinding en van covalente binding. Bijvoorbeeld, in een molecuul van zoutzuurgas (HCl) bevindt het gemeenschappelijke valentie-elektron zich meer in de buurt van het Cl-atoom dan in de buurt van het H-atoom. Het zoutzuurgasmolecuul vertoont *polariteit*, met andere woorden de (H-Cl)-binding is elektrisch gezien *polair* (zie Figuur 2.7). Het symbool δ geeft de elektrische *deellading* weer. Het gaat dus niet om complete elementaire ladingen, zoals bij ionen. Een polair molecuul is een elektrische *dipool*. Symmetrische moleculen zijn *apolair*. De elektrische dipolen in een molecuul kunnen, zoals hiervoor geschetst, binnen het molecuul aanwezig zonder de aanwezigheid van andere moleculen in de buurt: het zijn *permanente* dipolen.



Figuur 2.7. Het polaire HCl-molecuul.

Ook in beginsel apolaire moleculen kunnen een, zij het zwak, dipoolkarakter vertonen. Omdat de elektronen rond een atoomkern bewegen, zullen de centra van de negatieve en de positieve ladingen op een willekeurig tijdstip hoogst waarschijnlijk niet samenvallen. Een atoom is dus een zwakke dipool, waarvan de richting steeds varieert. Een ander atoom dat in de buurt van dit atoom is, ondervindt natuurlijk de invloed van de dipool van het eerste atoom: in het tweede atoom ontstaat een *geïnduceerde* dipool. Het zal duidelijk zijn, dat ook permanente dipolen in staat zijn dipolen in een apolair molecuul te induceren.

Van-der-Waals- of *secundaire* bindingen berusten op de aantrekkingskrachten tussen de polen van de hiervoor genoemde dipolen, maar er zijn, in tegenstelling tot de primaire bindingen, geen strikte regels voor het aantal atomen of moleculen waar-tussen dergelijke bindingen ontstaan. De secundaire bindingen zijn zwakker dan de primaire bindingen. Deze laatste bepalen met name de chemische eigenschappen van stoffen, terwijl de secundaire bindingen, met name bij de kunststoffen, van belang zijn voor de fysische eigenschappen. Een mooi voorbeeld van de interactie tussen permanente dipolen zijn de dipoolkrachten tussen watermoleculen (zie Figuur 2.8). Hierdoor heeft water een vrij hoog kookpunt en een grote verdampingswarmte vergeleken met apolaire vloeistoffen van ongeveer gelijke molecuulmassa. De waterstofbinding, of beter waterstofbrug, is een dipoolinteractie waarbij een polair waterstofatoom betrokken is, zoals in water. In veel kunststoffen bepalen de secundaire bindingen tussen de (macro)moleculen, zoals de waterstofbrug, behalve de fysische, ook de mechanische eigenschappen. De covalente bindingen in de ketenmoleculen worden maar zelden direkt belast. Bijgevolg zijn kunststoffen in het algemeen minder sterk dan metalen (metaalbinding) en keramische stoffen (ion- of hetero-polaire binding).



Figuur 2.8. Het polaire watermolecuul en de bindingen in vloeibaar water.

2.3. Metaalkristallen

2.3.1. Roosters

Een groot deel van de vaste stoffen is kristallijn. Dat wil zeggen, dat deze stoffen een nette rangschikking van atomen hebben: deze liggen in rijen, die te samen vlakken vormen. Met het blote oog zijn deze vlakken te zien als de regelmatig gevormde grensvlakken van kristallen, bijvoorbeeld van keukenzout (NaCl).

De mate van ordening van atomen of (macro)moleculen heeft grote invloed op de

eigenschappen van de stoffen. De covalente binding tussen koolstofatomen kan bijvoorbeeld leiden tot een starre rangschikking (= ordening) van die atomen: diamant. Een gemengde ion/covalente binding treedt op in een belangrijke klasse van stoffen gebaseerd op siliciumdioxide (SiO_2). SiO_2 kan zowel een regelmatig geordende structuur (kwarts) als een onregelmatige structuur (glas) vormen. In kwarts bezetten de silicium- en de zuurstof atomen vaste plaatsen in een ruimtelijk netwerk. In glas zijn de SiO_2 -moleculen ongeordend. Glas is amorf.

Glas en diamant zijn voorbeelden van uitersten. Metalen liggen tussen deze uitersten in. Metaalatomen zijn geordend op een ruimtelijk netwerk. Een stuk metaal is opgebouwd uit verschillende gebieden met elk een ruimtelijk netwerk van een eigen oriëntatie. Zo'n gebied heet een kristalliet of een korrel. Ook de korrelgrootte van een metaal is van belang voor de eigenschappen van het metaal in kwestie. Aan de korrelgrens verandert het ruimtelijk netwerk van oriëntatie. De korrelgrens is in feite de doorsnijding van het grensvlak tussen twee kristallieten of korrels en kan als een amorf gebied beschouwd worden.

Bij de meeste metalen is het ruimtelijk netwerk waarop de metaalatomen zijn gerangschikt, verrassend eenvoudig. In dit netwerk is de typische onderlinge atomaire afstand circa 0,3 nm. De atomen voeren trillingen uit (bij kamertemperatuur met een frequentie van ongeveer 10^{13} Hz) met een amplitude van enkele procenten van de atomaire afstand. Bij temperatuurverhoging neemt de amplitude toe: het metaal zet uit. De atoomtrillingen belemmeren de beweging van de elektronen; vandaar dat de elektrische weerstand van een metaal in het algemeen stijgt met de temperatuur.

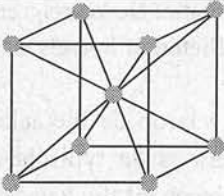
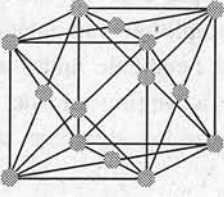
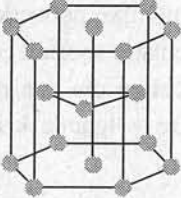
Het kleinste repeterende volume-element van het ruimtelijke netwerk waarmee de ruimte gevuld kan worden, heet *eenheidscel*. Slechts enkele soorten eenheidscellen kunnen een ruimte geheel vullen. Soorten eenheidscellen die een ruimte geheel kunnen vullen, worden kristalsystemen genoemd. De volgende kristalsystemen komen bij metalen veel voor:

1. kubisch Het kleinste volume-element dat de ruimte door stapeling geheel kan vullen, is een kubus: drie onderling loodrechte, even lange assen.
2. tetragonaal Het kleinste volume-element dat de ruimte door stapeling geheel kan vullen, is een rechthoekig blok: drie onderling loodrechte assen waarvan twee even lang.
3. hexagonaal Het kleinste volume-element dat de ruimte door stapeling geheel kan vullen, is een regelmatig zeszijdig prisma: drie gelijke assen met een onderlinge hoek van 120° en een vierde as van een lengte ongelijk aan de drie vorige, loodrecht op het vlak door de vorige drie.

De eenheidscellen kunnen op verschillende manieren met atomen bezet zijn. De geometrie van deze bezetting heet *kristalrooster*. De voor het betreffende kristalrooster karakteristieke assen heten roosterparameters of roosterconstanten. Voor het kubische kristalrooster is de roosterparameter dus de ribbe van de kubus. Voor metalen zijn belangrijk (zie Tabel 2.2) (Ref.4):

1. kubisch ruimtelijk gecentreerd rooster: krg (Engels: body centered cubic = bcc)
2. kubisch vlakken gecentreerd rooster: kvg (Engels: face centered cubic = fcc)
3. hexagonaal dichtst gepakt rooster: hdp (Engels: hexagonal close packed = hcp)

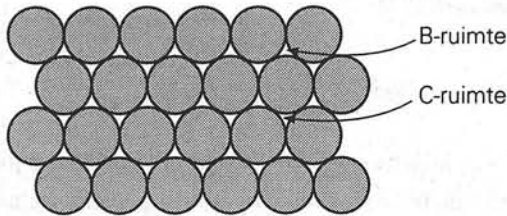
Tabel 2.2. *Kristalroosters van metalen.*

| | <i>kristalrooster</i> | <i>metalen</i> |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
|  | KRG = BCC | W, Mo, α -Fe |
|  | KVG = FCC | Cu, Al, Au, Ni, Pb, γ -Fe |
|  | HDP = HCP | Mg, Zn, Ti |

De valentie-elektronen veroorzaken de metaalbinding. De bindingskrachten zijn in alle richtingen even groot en zo sterk, dat de atomen zo dicht mogelijk tegen elkaar worden getrokken. Zo ontstaan dichtste-bolstapelingen, waarin elk atoom het grootste mogelijke aantal van twaalf naaste buren heeft. Bij metalen komen twee dichtste-bolstapelingen voor: *kvg* en *hdp*. Soms zijn de bindingskrachten minder effectief. Er ontstaat dan een wat ijlere pakking: *krg*, waarin elk atoom acht naaste buren heeft.

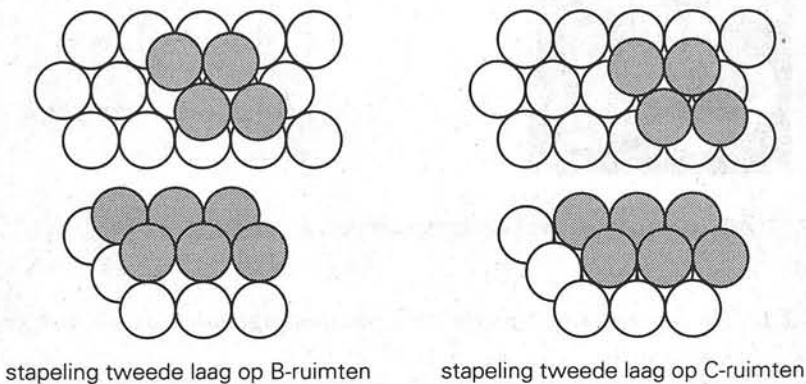
In de eerste kolom van Tabel 2.2 zijn deze roosters schematisch weergegeven. De cirkels in deze structuren geven bij benadering de middenposities van de trillende atomen aan; in werkelijkheid is de ruimtevulling door atomen zodanig dat deze elkaar op de dichtst gepakte richtingen raken.

Een dichtst gepakte laag is gegeven in Figuur 2.9. Een betere vulling van de ruimte is niet mogelijk. In het vlak heeft elk atoom zes naaste burens. Tussen de atomen zijn min of meer driehoekige ruimten: de helft hiervan heeft een punt naar boven (B-ruimten), de andere helft heeft een punt naar beneden (C-ruimten). Als we de atoommiddelpunten in het vlak aanduiden met A, en de middelpunten van de B- en C-ruimten met B en C, dan vormen de A's, de B's en de C's elk een hexagonaal netwerk.



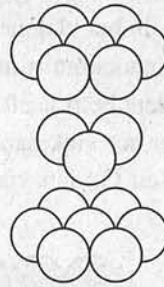
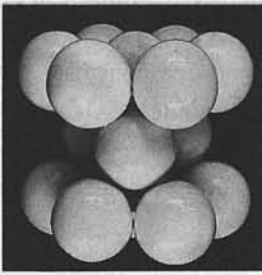
Figuur 2.9. Dichtst gepakte laag.

We leggen een tweede dichtst gepakte laag op de B-posities. De verkregen stapeling duiden we aan met AB. De B-ruimten van de tweede laag liggen boven de C-ruimten van de eerste laag. De atomen van de tweede laag hadden we ook boven de C-ruimten van de eerste laag kunnen leggen. Principieel maakt dat niets uit (verifieer dat in Figuur 2.10).



Figuur 2.10. Stapeling op B-ruimten geeft identiek resultaat aan stapeling op C-ruimten.

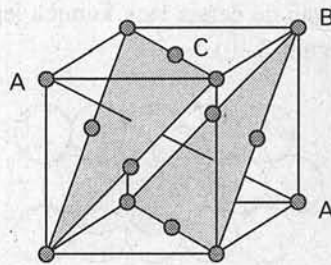
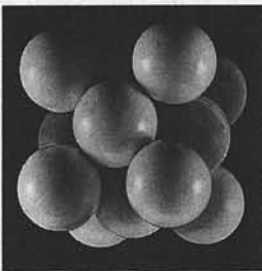
Bij de derde laag hebben we weer de keus: boven de B-ruimten of boven de C-ruimten van de tweede laag. Liggen in de derde laag de atomen boven de B-ruimten van de tweede laag, dan liggen ze boven de C-ruimten van de eerste laag. De stapeling is dan ABC. Liggen in de derde laag de atomen boven de C-ruimten van de tweede laag, dan liggen ze boven de A-posities van de eerste laag. De stapeling is dan ABA.



Figuur 2.11. ABA-stapeling, hexagonaal dichtst gepakt.

De stapeling *ABA* is het hdp-rooster (zie Figuur 2.11). De dichtst gepakte vlakken van het hdp-rooster zijn de basisvlakken. De dichtst gepakte richtingen liggen dus in dit basisvlak. In de dichtst gepakte richtingen raken de atomen elkaar.

De stapeling *ABC* is het kvg-rooster (zie Figuur 2.12). De dichtst gepakte vlakken zijn de octaedervlakken loodrecht op de lichaamsdiagonaal van de kubus. Het krg-rooster is geen dichtste bolstapeling. Dit rooster is dus minder bezet dan het hdp- of het kvg-rooster.



Figuur 2.12. ABC-stapeling, kubisch vlakken gecentreerd.

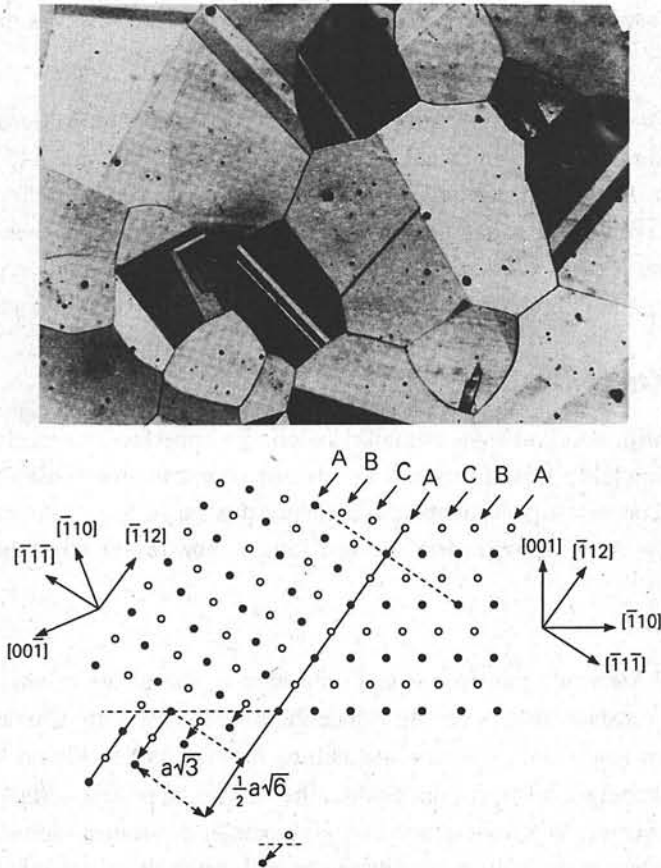
Vraag 2.1 *In het krg-rooster zijn de lichaamsdiagonalen de dichtst gepakte richtingen.*

Ga na, dat in het krg-rooster elk atoom slechts acht naaste burenen heeft.

Vraag 2.2 *Ga na, dat de lichaamsdiagonaal van het kvg-rooster een as van driedvoudige symmetrie is.*

Een metaalkristal kunnen we opvatten als een ruimte waarin het kristalrooster op een bepaalde manier georiënteerd is. Gewoonlijk is het zo, dat de oriëntaties van de kristalroosters van twee aangrenzende metaalkristallen geen enkele relatie vertonen. Soms gebeurt het, dat de kristalroosteroriëntatie van het ene kristal zodanig is, dat de

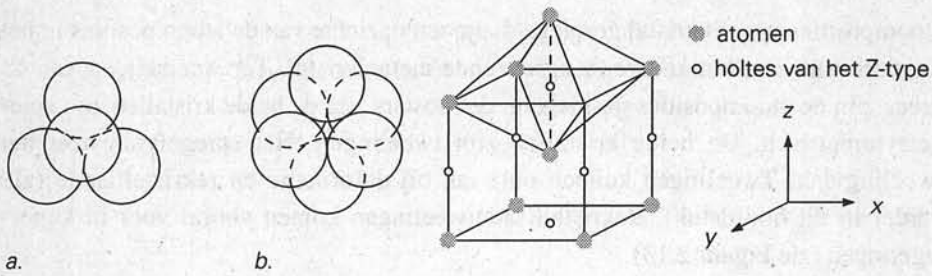
atoomposities van dit kristal gespiegeld zijn ten opzichte van de atoomposities in het kristalrooster van het andere, aangrenzende metaalkristal. Ter weerszijden van de grens zijn de atoomposities gespiegeld: de roosters van de beide kristallen zijn spiegelsymmetrisch. De beide kristallen zijn tweelingen. Het spiegelvlak heet het tweelingvlak. Tweelingen kunnen ontstaan bij deformatie en rekristallisatie (zie verder in dit hoofdstuk). Rekristallisatietweelingen komen vooral voor in koperlegeringen (zie Figuur 2.13).



Figuur 2.13. Rekristallisatietweelingen in koper.

De hiervoor genoemde kristalroosters omvatten ook holten, ook als alle beschikbare posities met atomen bezet zijn. In de dichtste bolstapeling komen twee soorten holten voor: tetraedrische en octaëdrische (zie Figuur 2.14). Het krg-rooster vertoont ook twee soorten holten: op de middens van de kubusassen en op de middens van de kubusvlakken.

Vraag 2.3 Laat zien, dat deze holten identiek zijn.



Figuur 2.14. Tetraeder- (a) en octaederholten (b).

Figuur 2.15. Onregelmatig achthvlak met Z-type holten.

Elke holte is omringd door zes atomen: twee dichtbij en vier op wat grotere afstand. Deze zes atomen vormen samen een onregelmatig achthvlak (Figuur 2.15). De verbindinglijn van de twee meest nabije atomen vormt de as van dit achthvlak. Al naar gelang deze evenwijdig is aan de X-, de Y- of de Z-richting, zegt men dat de holte van het X-, het Y- of het Z-type is. Op elk atoom is één holte van elk type aanwezig; het totale aantal holten van deze soort is dus drie keer zo groot als het aantal atomen.

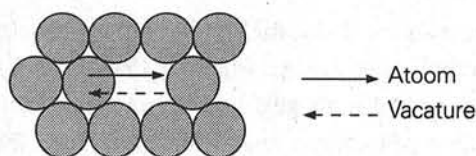
2.3.2. Kristalfouten

De in de praktijk voorkomende metaalkristallen zijn imperfect in vergelijking met de hiervoor behandelde kristalroosters. De daarin voorkomende fouten hebben zeer grote invloed op vele eigenschappen, zoals mechanische sterkte, vervormbaarheid en oppervlaktekwaliteit. Er zijn drie soorten fouten: puntfouten, lijnfouten en vlakfouten.

Puntfouten

Een veel voorkomende puntfout is een onbezette roosterplaats of *vacature*. Vacatures kunnen ontstaan als een gevolg van de thermische beweging van de atomen. De atomen trillen rond vaste evenwichtsposities, maar er is een kleine kans dat een atoom zoveel energie heeft, dat dat atoom zijn evenwichtspositie verlaat en daardoor een vacature vormt. Bij temperatuurverhoging nemen de atomen thermische energie op. Hierdoor neemt de trillingsamplitude toe en hebben de atomen dus een grotere kans om hun roosterplaats te verlaten. De beweging van de atomen is dus een thermisch geactiveerd proces: hoe hoger de temperatuur, hoe meer atomen hun vaste plaats zullen verlaten. Toch bedraagt de vacatureconcentratie juist onder de smelttemperatuur van een metaal slechts 0,01 tot 0,1%. Slechts één op de duizend à tienduizend roosterplaatsen is onbezet.

Vraag 2.4 *Ga na (zie Figuur 2.16) dat de bewegingsrichting van een vacature tegengesteld is aan die van het atoom dat de vacature heeft veroorzaakt.*



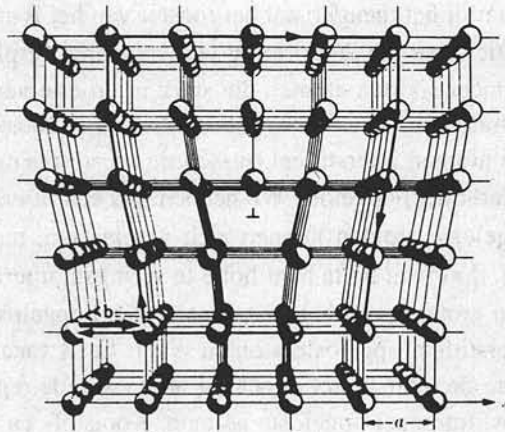
Figuur 2.16. Bewegingsrichting van een vacature.

Vacatures spelen een grote rol bij de diffusie in *mengkristallen*. Bestaat een metaal uit twee of meer soorten atomen die plaatsen op hetzelfde rooster bezetten, dan hebben we een *substitutioneel mengkristal*: bijvoorbeeld weinig B-atomen opgelost in het A-metaal, waarbij het mengkristal het rooster van het A-metaal heeft. Ook de B-atomen kunnen zich dan via de vorming van vacatures verplaatsen. Bestaat een metaal uit twee of meer soorten atomen die sterk in grootte verschillen: A-atomen met veel kleinere B-atomen, waarvan slechts de A-atomen roosterplaatsen bezetten, dan zijn de overige atomen interstitieel (tussen de roosterplaatsen, bijvoorbeeld in tetraeder- of octaederholtes) opgelost. We hebben dan een *interstitieel mengkristal*. De interstitieel opgeloste atomen kunnen zich verplaatsen, met andere woorden: kunnen diffunderen, door van holte naar holte te springen, uiteraard op voorwaarde dat het aantal holten groter is dan het aantal interstitieel opgeloste atomen. Voor de diffusie van de interstitieel opgeloste atomen is dus geen vacaturevorming nodig, zodat de diffusie van de interstitieel opgeloste atomen in de regel sneller is dan de diffusie van de substitutioneel opgeloste atomen. Koolstof- en stikstofatomen zijn veel kleiner dan ijzeratomen en kunnen dus tot bepaalde concentraties interstitieel in ijzer opgelost worden. Chromaatomen zijn ongeveer even groot als ijzeratomen en worden dus substitutioneel in ijzer opgelost. Op grond van het voorgaande kan gezegd worden, dat de diffusiesnelheid van koolstofatomen in ijzer bij dezelfde temperatuur groter is dan de diffusiesnelheid van chromaatomen in ijzer. De snelheid van veel reacties in metalen, bijvoorbeeld die van precipitatie (zie §4.3.2) wordt bepaald door de diffusiesnelheid van de betrokken atomen.

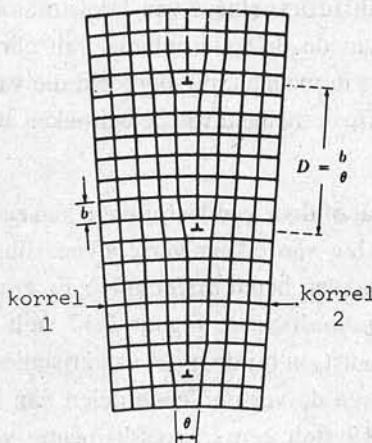
Lijnfouten of dislocaties

Bij stolling van een metaal of door kouddeformatie kan een situatie ontstaan waarbij roostervlakken ten opzichte van elkaar verschoven zijn. De lijnvormige begrenzingen van dergelijke vlakken heten *dislocaties*. Er zijn twee typen dislocaties: *schroefdislocatie* en *randsdislocatie*. Figuur 2.17 stelt een randsdislocatie voor. Randsdislocaties kunnen ontstaan bij de groei van kristallen, als een klein oriëntatieverschil aanwezig is tussen de verschillende delen van het groeiende kristal (zie Figuur 2.18). Figuur 2.19 stelt een schroefdislocatie voor. Deze kan men zich indenken als een spiraalvormige opgaande band (Figuur 2.20). Heeft de dislocatie het kristal doorlopen, dan is het kristal over een atoomafstand afgeschoven. Deze afstand heet de burgersvector b van de dislocatie. Bij een randsdislocatie staat de

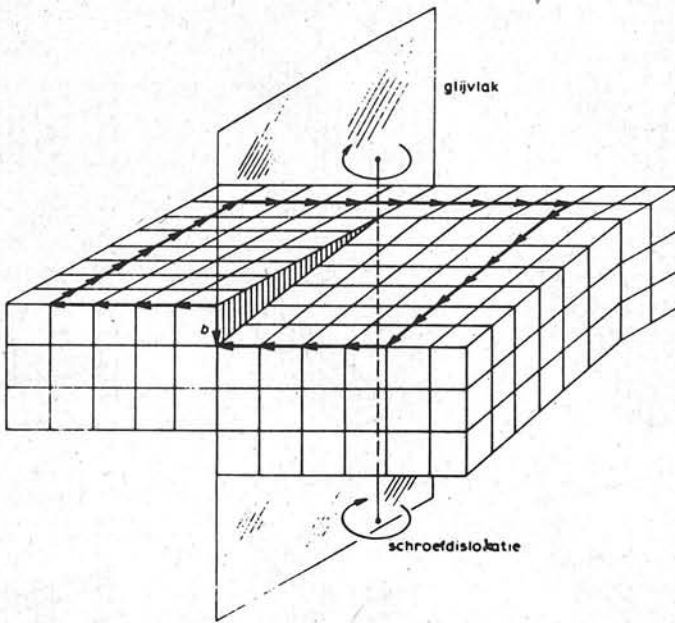
burgersvector loodrecht op de dislocatielijn en bij de schroefdislocatie evenwijdig aan de dislocatielijn (zie Figuur 2.17 en Figuur 2.19). In Figuur 2.21 wordt getoond hoe dislocaties kunnen ontstaan als gevolg van een gedeeltelijke afschuiving langs een roostervlak. Getoond worden een randdislocatie (a), een schroefdislocatie (b) en een gemengde dislocatie (c). Tijdens kouddeformatie vindt altijd afschuiving langs roostervlakken plaats (zie §5.3.1). Kouddeformatie betekent dus altijd een vergroting van de dislocatieconcentratie in het gedeformeerde metaal. Een verhoging van deze dislocatieconcentratie heeft vèrstrekkende gevolgen voor de hardheid, taaheid en de treksterkte van het gedeformeerde metaal.



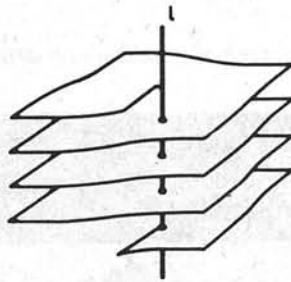
Figuur 2.17. Randdislocatie.



Figuur 2.18. Kleine oriëntatieverschillen leidend tot randdislocaties.



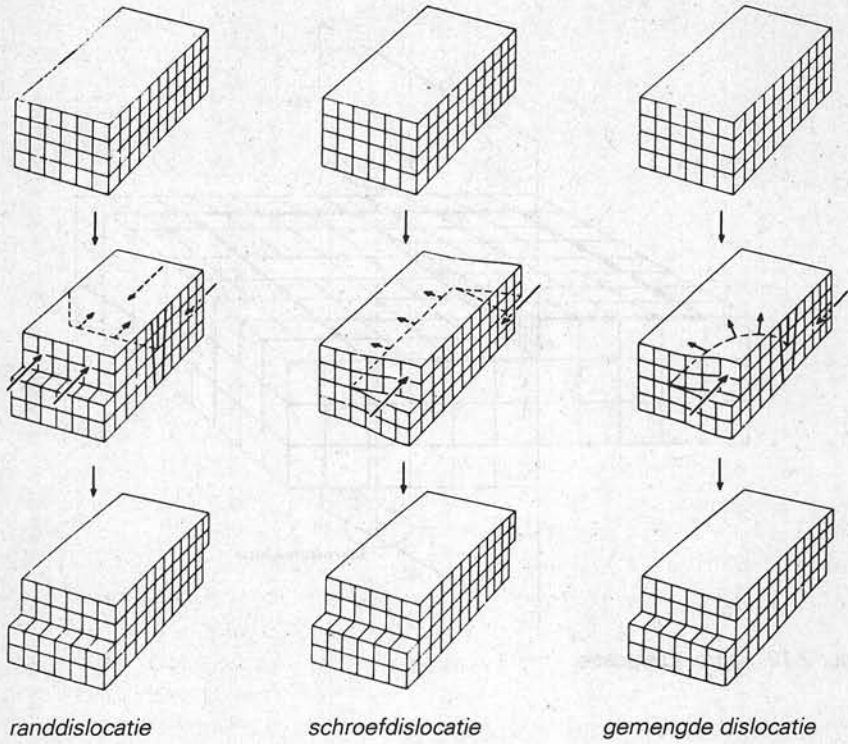
Figuur 2.19. Schroefdislocatie.



Figuur 2.20. Spiraal van een schroefdislocatie

Vlakfouten

Een metaalkristal wordt begrensd door vlakken. Deze vlakken kunnen het oppervlak van het metaal in kwestie zijn of het grensvlak met een ander metaalkristal. Deze grensvlakken vertonen een ordening die plaatselijk onvolmaakt is. Er is hier sprake van vlakfouten. Technische metalen bestaan bijna altijd uit grote aantallen kristal-lieten of korrels. De grootte van de kristal-lieten (= korrelgrootte) varieert meestal van 0,01 tot 1 mm. Het hangt van de dikte van het metaal af, of deze korrelgrootten groot te noemen zijn. Nemen we bijvoorbeeld het sigarendoosje uit Figuur 2.22. De dikte van het hierin toegepaste staalplaat is 0,2 mm. In de dikterichting bevindt zich dus slechts een beperkt aantal korrels!



Figuur 2.21. Het ontstaan van dislocaties door afschuiving langs roostervlakken.



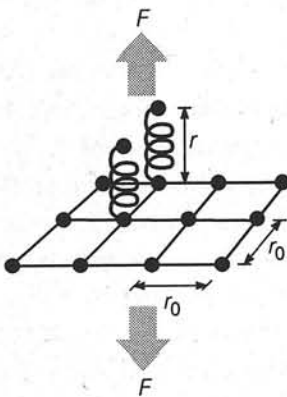
Figuur 2.22. Sigarendoosje.

De bindingselektronen van het metaal kunnen de kristalgrens overschrijden en er zo voor zorgen dat een stuk metaal, uit vele kristallen bestaand, toch coherentie vertoont en niet als los zand aan elkaar hangt. Het aantal naaste burens aan de kristalgrens is voor een afzonderlijk atoom kleiner dan in het hart van het kristal en de energie van een atoom aan de kristalgrens is hoger dan in het hart van de korrel. Een scheikundig oplosmiddel tast de kristalgrens hierdoor eerder aan dan het hart van het kristal. Dit verschijnsel wordt in de praktijk toegepast bij het etsen, waardoor de kristalgrenzen onder de microscoop zichtbaar gemaakt kunnen worden.

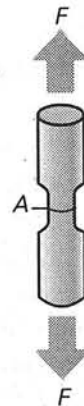
Hiervoor is gebleken, dat de pakking van atomen in de behandelde kristalroosters afhankelijk van de richting is. Dit geldt voor alle kristalroosters. In een metaalkristal staan de atomen te trillen rond evenwichtsposities. De metaalbinding kan voorgesteld worden door elastische veren te tekenen tussen de atomen (zie Figuur 2.23). Het is te verwachten dat de elastische constanten, bijvoorbeeld de elasticiteitsmodulus of E-modulus, afhankelijk zijn van de afstand tussen de metaalatomen. Stel, we hebben een trekstaaf met een dwarsdoorsnede A (zie Figuur 2.24). Deze staaf heeft elastisch een relatieve verlenging, $\epsilon = \Delta L/L_0$, ondergaan. Hiermee correspondeert een inwendige spanning, $\sigma = F/A$, met F = toegepaste kracht. De E-modulus wordt gegeven door: $E = \sigma/\epsilon$. Stel, het metaal heeft een kubisch rooster met slechts atomen op de hoekpunten van de kubus en de kracht F werkt loodrecht op de getekende dwarsdoorsnede. Als het metaal vrij van spanning is, bedraagt de ribbe van een kubus r_0 . De dwarsdoorsnede bevat dan $A/(r_0)^2$ atomen en elk atoom ondervindt een kracht, dF , gelijk aan:

$$dF = \frac{\sigma A}{A/(r_0)^2} = \sigma (r_0)^2 \quad (2.1)$$

Veronderstellen we, dat de rek gelijkmatig over de lengte van de staaf verdeeld wordt, dan geldt:



Figuur 2.23. Veermodel voor metaalatomen (Ref. 5).



Figuur 2.24. Trekstaaf met doorsnede A (Ref. 5).

$$\varepsilon = \frac{dr}{r_0}$$

De E-modulus wordt nu gegeven door:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{dF}{(r_0)^2} \frac{r_0}{dr} = \frac{1}{r_0} \frac{dF}{dr} \quad (2.2)$$

De term dF/dr vertegenwoordigt de interactiekrachten tussen de atomen. Vergelijking (2.2) maakt aannemelijk dat de waarde van de E-modulus afhangt van deze interactiekrachten, maar ook van r_0 , met andere woorden: van de interatomaire afstand in het rooster (dit voorbeeld is ontleend aan Ref. 5).

In een polykristallijn stuk metaal, waarin de oriëntaties van de afzonderlijke metaalkorrels volkomen willekeurig zijn, zullen de waarden van de eigenschappen, bijvoorbeeld die van de E-modulus, een gemiddelde zijn van de mogelijke waarden langs de verschillende richtingen in het betreffende kristalrooster. Naarmate het aantal korrels in een bepaalde doorsnede van het metaal kleiner wordt, wordt de kans dat de waarde van een eigenschap als E-modulus afwijkt van het gemiddelde, groter. Dit kan tot gevolg hebben, dat de waarde van de mechanische eigenschappen of van de verwerkingseigenschappen afhankelijk is van de richting waarlangs men deze eigenschappen bepaalt of waarlangs men deze eigenschappen beïnvloedt tijdens bewerkingen.

2.3.3. De versterking van metalen en metaallegeringen

Alle metalen, hieronder ook te verstaan metaallegeringen, bevatten dislocaties (zie §2.3.2). De aanwezigheid van dislocaties is voor metalen zeer belangrijk. Een beweging van een dislocatie door een kristal betekent het opschuiven van een deel van het kristal langs het glijvlak over één atoomafstand (zie Figuur 2.21). Voor de verplaatsing van een dislocatie is veel minder kracht nodig dan voor het afschuiven van het gehele kristal tegelijkertijd. Vergelijk het opschuiven van een plooi in een op de vloer liggend tapijt met het verschuiven van het gehele tapijt ineens.

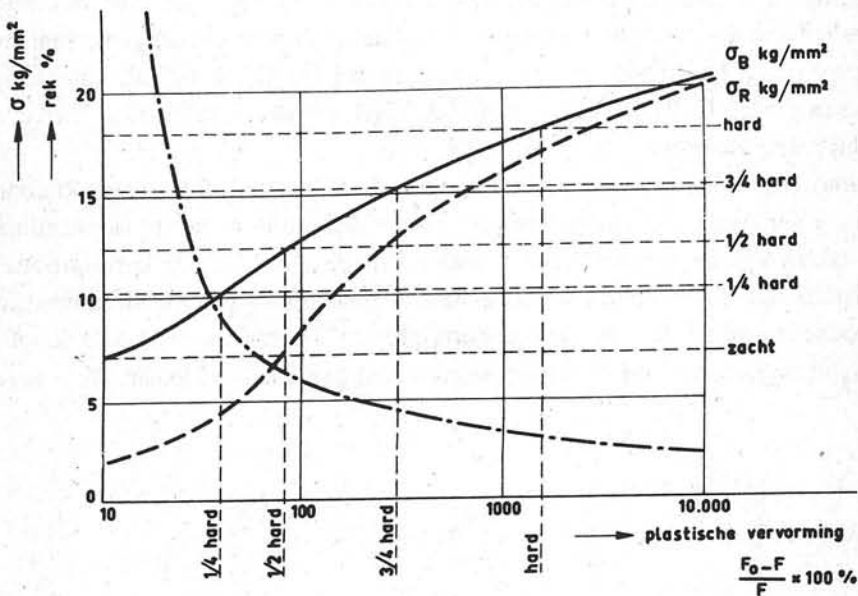
Metalen zonder dislocaties zouden dus veel lastiger te vervormen zijn dan metalen met dislocaties en zouden dus veel sterker zijn. Daartegenover staat dat, gegeven het feit dat metalen nu eenmaal dislocaties bezitten, het belemmeren van de beweging van dislocaties overeenkomt met het vergroten van de weerstand die een metaal biedt tegen een aan te brengen vervorming: het metaal wordt sterker. In feite is de belemmering van de beweging van dislocaties de *enige* manier om de in de praktijk voorkomende metalen te versterken.

Voor een metaallegering bestaand uit één fase zijn er vier manieren om de beweging van dislocaties te belemmeren; deze vier manieren worden bijvoorbeeld toegepast bij aluminiumlegeringen (zie §4.3.2):

- | | |
|-------------------------------------------------|--------------------------------|
| 1. aanbrengen van nog meer dislocaties | (<i>verstevinging</i>) |
| 2. verkleinen van de gemiddelde kristal grootte | (<i>rekristallisatie</i>) |
| 3. vreemde atomen in vaste oplossing brengen | (<i>oplosharding</i>) |
| 4. vreemde deeltjes aanbrengen | (<i>precipitatieharding</i>) |

Verstevinging

In de kvg- en de krg-roosters worden de dislocaties gemakkelijk verplaatst (zie ook Hoofdstuk 5). Rond een dislocatie zijn de roostervlakken vervormd. Men zegt, dat elke dislocatie een elastisch spanningsveld rond zich heeft. Het is voorstelbaar, dat via deze spanningsvelden dislocaties wisselwerking met elkaar hebben. Het blijkt, dat deze wisselwerking de beweging van de afzonderlijke dislocaties belemmert. Bij lage temperaturen is de uitwendige kracht op een metaal de belangrijkste oorzaak voor dislocatiebeweging. Door het uitoefenen van grote krachten treedt afschuiving van de kristallen op langs glijvlakken. Hierbij ontstaan nieuwe dislocaties die dus de beweging van de al aanwezige dislocaties belemmeren: het stuk metaal wordt versteefd. De verstevinging van ongelegeerd zacht staal en die van technisch zuiver aluminium zijn voor de vormgeving van groot belang (zie Hoofdstuk 5). De verstevinging van technisch zuiver aluminium wordt in termen van de verandering van de sterkte en hardheid en verlenging bij de trekproef gegeven in Figuur 2.25; zie ook Tabel 2.3.



Figuur 2.25. Verstevinging van Al99,5 bij koudvervorming door trekken of walsen.

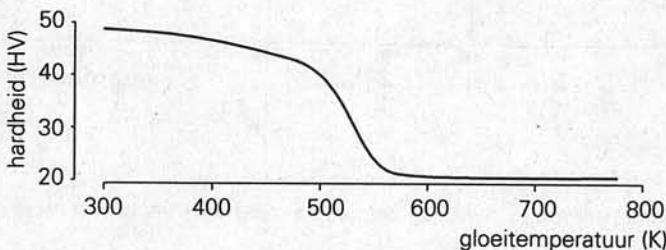
Tabel 2.3. Sterkte van koudvervormd technisch zuiver aluminium Al99,5.

| toestand | rekgrens (MPa) | treksterkte (MPa) | breukrek (%) |
|----------|----------------|-------------------|--------------|
| zacht | 1-2 | 7-8 | 50-60 |
| 1/4 hard | 4 | 10 | 10 |
| 1/2 hard | 7 | 12 | 7 |
| 3/4 hard | 13 | 15 | 4-5 |
| hard | 17,5 | 18 | 2-3 |

Herstel en rekristallisatie

Door de versterking wordt de (koud)vervormbaarheid van het metaal verminderd en ten slotte uitgeput, waardoor het metaal gaat scheuren. Het effect van de versterking kan worden opgeheven door gloeien. Boven een bepaalde temperatuur is de beweeglijkheid van de atomen en daarmee de beweeglijkheid van de dislocaties zodanig toegenomen dat zij door het kristal kunnen gaan bewegen. De toestand met een verhoogde dislocatiedichtheid, veroorzaakt door de koudvervorming is thermodynamisch niet stabiel: elke dislocatie vertegenwoordigt een hoeveelheid elastische energie. De vermindering van deze elastische energie is de drijvende kracht voor *herstel* en *rekristallisatie*. Bij herstel door gloeien wordt de vermindering bereikt door een herrangschikking van de dislocaties tot regelmatige patronen. De inwendige spanningen, en daarmee de hardheid, verminderen, waardoor de vervormbaarheid gedeeltelijk wordt *hersteld*. De temperatuur waarbij dit gebeurt heet de hersteltemperatuur, T_{herstel} . De waarde van T_{herstel} is ongeveer $0,3 T_m$, met T_m de smeltemperatuur in graden K. Bij herstel verandert de vorm van de kristallen niet. Dit gebeurt wel bij *rekristallisatie*.

Bij rekristallisatie wordt de vermindering van de dislocatiedichtheid bereikt door de vorming van nieuwe kristallen, die veel minder dislocaties bevatten. Het resultaat is een daling van de hardheid, zoals getoond in Figuur 2.26. De korrelgrootte na rekristallisatie is afhankelijk van de ervoor uitgevoerde kouddeformatie: hoe groter de kouddeformatie, hoe kleiner de korrelgrootte. De rekristallisatie verloopt via kiemvorming van nieuwe korrels en de groei van deze nieuwe kiemen. Beneden een



Figuur 2.26. Hardheid van aluminium (72% koudvervormd) als functie van de gloeitemperatuur bij een vaste gloeitijd (Ref. 7).

kritische deformatie worden geen nieuwe kiemen gevormd en treedt rekristallisatie niet op. Zodra de uitgegroeide nieuwe korrels elkaar raken, is de rekristallisatie voltooid. Voortgaand gloeien leidt slechts tot korrelgroei, waarbij de grote korrels groeien ten koste van de kleine korrels. Bij gloeien van een stuk metaallegering boven $0,4$ à $0,5 T_m$, maar met een deformatiegraad beneden de kritische, treedt alleen herstel op. Bij veel zuivere metalen ligt de kritische deformatiegraad in de buurt van $0,02$. Bij legeringen is deze meestal hoger. Bij vervormingen vlak boven de kritische deformatiegraad kan bij uitgloeien boven $0,4$ à $0,5 T_m$ sterke korrelgroei optreden. De temperatuur $T_{rekr} = 0,4$ à $0,5 T_m$ heet de *rekristallisatietemperatuur*. Deze is niet nauwkeurig bepaald. Behalve van de deformatiegraad hangt deze ook af van de zuiverheid en de voorgeschiedenis van het metaal.

Vervormingen bij temperaturen hoger dan $T_{herstel}$ heten warmdeformaties en bij temperaturen beneden $T_{herstel}$ heten kouddeformaties. Bij kouddeformatie treedt altijd versteviging op. Bij warmdeformatie treedt altijd herstel van de vervormingsmogelijkheden op. Meestal worden warmdeformaties uitgevoerd bij temperaturen hoger dan T_{rekr} (zie ook §5.3.1.2). Voorbeelden van warmdeformatie zijn warmwalsen en warmextrusie.

Grote korrels kunnen bij een eventuele kouddeformatie in het vervolg van het productieproces oorzaak zijn van de vorming van *sinaasappelhuid* op het verkregen produkt. Voor metaallegeringen die nog verder koudvervormd moeten worden, geldt daarom de eis dat deze fijnkorrelig zijn. Bedenk hoe weinig korrels de dwarsdoorsnede van het sigarendoosje telt! Door een juiste combinatie van versteviging en rekristallisatie kan men dus de gewenste korrelgrootte instellen. Bij de rekristallisatie is het dus mogelijk dat de nieuwe korrels kleiner zijn dan de oude. Een bijkomend effect hiervan is, dat de treksterkte van een metaallegering groter wordt naarmate de korrels kleiner zijn: het verband tussen korrelgrootte en rekgrens van een metaal wordt gegeven door de zogenaamde Hall-Petch relatie:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (2.3)$$

Hierin is

σ_y = rekgrens: de spanning waarbij in een trekproef voor het eerst plastische deformatie optreedt.

σ_0, k = constanten afhankelijk van de metaallegering

d = de gemiddelde diameter van de korrels

Na de rekristallisatie kan men door een gepaste nieuwe kouddeformatie de sterkte van de legering verder verhogen tot het gewenste niveau.

Oplosharding

Vreemde atomen in vaste oplossing in een metaal (zie §3.3) hebben in het algemeen afmetingen ongelijk aan die van het basismetaal. Bezet een vreemd atoom een plaats

op het rooster van het basismetaal, dan treden elastische spanningen op in het rooster van het basismetaal. De spanningsvelden rond de vreemde atomen hebben wisselwerking met de spanningsvelden rond de dislocaties en hinderen de dislocatiebeweging. Voor het effect van oplosharding is het noodzakelijk dat de vreemde atomen in oplossing blijven.

Precipitatieharding

De vierde mogelijkheid om de sterkte van een metaallegering te beïnvloeden is precipitatieharding of veroudering (Engels: 'precipitation hardening' of 'age hardening'). Het begrip precipitatie betekent hier uitscheiding uit een oververzadigde vaste oplossing (zie §3.3). Bij veel metaallegeringen daalt de vaste oplosbaarheid in het basismetaal van een vreemde atoomsoort met dalende temperatuur. Door deze dalende oplosbaarheid kan gemakkelijk een oververzadigde vaste oplossing verkregen worden: men kan een stuk metaallegering gloeien op een temperatuur met verhoogde oplosbaarheid en vervolgens afschrikken (= snel afkoelen naar een lage temperatuur, bijvoorbeeld door onderdompeling in water), waardoor de vaste oplosbaarheid ook bij die lage temperatuur gehandhaafd blijft. Deze toestand is uiteraard thermodynamisch niet stabiel en bij een beperkte temperatuurverhoging (*veroudering*) is deze oververzadiging de drijvende kracht voor de precipitatie van de opgeloste atomen. Een *noodzakelijke* voorwaarde voor precipitatie is dus een teruglopende oplosbaarheid. *Voldoende* voorwaarde is dit niet voor een technologisch interessante precipitatieharding: de verbetering van de mechanische eigenschappen moet empirisch blijken voldoende groot te zijn. De aanwezige precipitaten vormen obstakels voor de beweging van dislocaties en zijn derhalve versterkend. Het verschijnsel is vooral belangrijk voor aluminiumlegeringen en wordt in §4.3.2 verder behandeld.

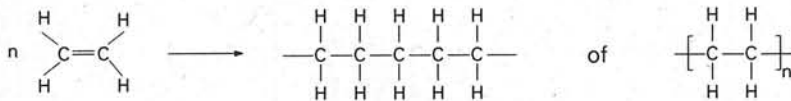
2.4. Kunststoffen

2.4.1. De opbouw van polymeren

Synthetische organische polymeren zijn zonder twijfel de meest toegepaste nieuwe stoffen van de twintigste eeuw. Moleculair gezien is het hoofdkenmerk van een polymeer de zeer grote molecuulmassa in de orde van 10^5 g/mol (zie ook Ref. 6). Men noemt deze stoffen dan ook hoog-moleculair. Laag-moleculaire stoffen hebben molecuulmassa's in de orde van 10^2 g/mol. Kunststoffen zijn polymeren met meestal een of meer toevoegingen. De toevoeging kan een ander polymeer zijn, er ontstaat dan een polymeerlegering (of polymeerblend), maar ook worden hulp- en vulstoffen toegevoegd voor specifieke doeleinden.

De synthetische organische polymeren zijn opgebouwd uit laag-moleculaire mono-

meren. Deze monomeren zijn als een keten covalent aan elkaar gebonden. Soms is deze keten vertakt. Bij het vormen van een polymeerketen is vaak de onverzadigdheid, dat wil zeggen de aanwezigheid van dubbele bindingen in het betreffende monomeer, belangrijk. Door het omklappen van de dubbele binding kan een keten worden gevormd. Een eenvoudig voorbeeld is de vorming van polyetheen uit etheen:



De laatste weergave is een verkorte schrijfwijze voor het gevormde polymeer. De vraag is hoe groot de waarde van n moet zijn, opdat men kan spreken van polyetheen (zie Tabel 2.4).

Tabel 2.4. Ketenvorming op basis van etheen.

| n | stof | smelttemperatuur (°C) |
|-----|------------|-----------------------|
| 1 | ethaan | -172 |
| 2 | butaan | -135 |
| 4 | n-octaan | -57 |
| 200 | polyetheen | +130 |

Boven een kritische waarde van n (in dit geval ongeveer $n = 200$) is de ketenlengte nauwelijks meer van invloed op eigenschappen als de smelttemperatuur van de stof. Men spreekt dan van een polymeer.

Ketenvorming kan ook plaatsvinden met monomeren zonder dubbele bindingen. In een polymeerketen is altijd een repeterende eenheid te vinden. Ook is het mogelijk twee of meer verschillende soorten monomeren te laten polymeriseren tot één keten, in dat geval spreekt men van een copolymeer. Tabel 2.5 geeft een overzicht van enkele belangrijke polymeren. In polymere materialen kunnen de ketens voorkomen als *enkelvoudige ketens*. Het is echter ook mogelijk dat de ketens gecombineerd zijn tot *netwerken*.

Enkelvoudige ketens zijn in hoofdzaak lineair, hoewel ook vertakkingen kunnen voorkomen. Een redelijk schaalmodel voor een ketenmolecuul is een mensenhaar met een lengte van een meter. Gewoonlijk zijn deze ketens niet gestrekt, maar vormen klwens die verstrengeld zijn. Tussen de ketens zijn er slechts Van der Waals bindingen, zoals waterstofbruggen, zodat polymeren met uitsluitend lineaire ketens lage waarden voor de E-modulus hebben. De verstrengeling van de ketens belemmert het vloeien. Daardoor is de viscositeit vrij hoog, zodat de vormgeving via de visceuse toestand veel energie vereist.

Tabel 2.5. Repeterende eenheden van enkele belangrijke polymeren.

| afkorting | naam | repeterende eenheid |
|-----------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PE | polyetheen | $\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{---C} & \text{---C} \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]$ |
| PP | polypropeen | $\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{---C} & \text{---C} \\ & \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} \right]$ |
| PS | polystyreen | $\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{---C} & \text{---C} \\ & \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right]$ |
| PVC | polyvinylchloride | $\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{---C} & \text{---C} \\ & \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array} \right]$ |
| PMMA | polymethylmetacrylaat | $\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{CH}_3 \\ & \\ \text{---C} & \text{---C} \\ & \\ \text{H} & \text{OCOCH}_3 \end{array} \right]$ |
| PTFE | polytetrafluoretheen | $\left[\begin{array}{cc} \text{F} & \text{F} \\ & \\ \text{---C} & \text{---C} \\ & \\ \text{F} & \text{F} \end{array} \right]$ |
| PA / PA6 | polyamide / nylon-6 | $\left[\begin{array}{ccc} \text{O} & (\text{H}) & \text{H} \\ & & \\ \text{---C} & \text{---C} & \text{---N} \\ & & \\ & \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_5$ |
| POM | polyoxymethyleen | $\left[\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{---C---O} \\ \\ \text{H} \end{array} \right]$ |
| PETP | polyetheentereftalaat | $\left[\begin{array}{ccccccc} \text{H} & \text{H} & & \text{O} & & \text{O} & \\ & & & & & & \\ \text{---C} & \text{---C} & \text{---O} & \text{---C} & \text{---} & \text{C} & \text{---O} \\ & & & & & & \\ \text{H} & \text{H} & & & & & \end{array} \right]$ |
| PC | polycarbonaat | $\left[\begin{array}{ccccccc} & & \text{CH}_3 & & \text{O} & & \\ & & & & & & \\ \text{---O} & \text{---} & \text{C} & \text{---} & \text{O} & \text{---C} & \\ & & & & & & \\ & & \text{CH}_3 & & & & \end{array} \right]$ |

In *netwerken* zijn de ketens met elkaar verbonden, en wel covalent, zodat in wezen een gigantisch groot molecuul ontstaan is. Uit het voorgaande volgt de hoofdingeling van de polymeren:

- a. *Thermoplasten* bestaan uit enkelvoudige ketens die vloeibaar worden bij temperatuurverhoging en bij afkoeling weer een vaste vorm aannemen.
- b. *Rubbers* bestaan in beginsel ook uit enkelvoudige ketens, waartussen bruggen zijn aangebracht (door vulcanisatie, zie Hoofdstuk 4).
- c. *Thermoharders* bestaan uit netwerken van ketens; de vorming van deze netwerken vindt meestal plaats bij temperatuurverhoging en wordt uitharding genoemd.

Deze indeling is gebaseerd op het aantal verbindingen tussen de ketens. Bij thermoplasten zijn geen verbindingen tussen de ketens aanwezig, bij rubbers is een zeker aantal verbindingen noodzakelijk om blijvende vervorming te voorkomen, terwijl bij de thermoharders het aantal knooppunten nog groter is en een betrekkelijk star netwerk is gevormd. Een gevormde thermoharder wordt bij temperatuurverhoging wel wat zachter, maar wordt niet meer vloeibaar. Een beschrijvend overzicht van enkele belangrijke kunststoffen geeft Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Belangrijke kunststoffen.

| A. Thermoplasten | | |
|-------------------------|------------------------|--------------------------------------------|
| <i>afkorting</i> | <i>naam</i> | <i>beschrijving</i> |
| PE | polyetheen | vrij zacht en taai |
| PP | polyproppeen | sterker dan PE |
| PVC | polyvinylchloride | hard |
| PS | polystyreen | hard en bros |
| PMMA | polymethylmetacrylaat | hard en zeer transparant |
| PTFE | polytetrafluoretheen | bestand tegen chemicaliën, mechanisch zwak |
| B. Rubbers | | |
| SBR | styreen-butadieen | slijtvast |
| PIB | polyisobuteen | gasdicht |
| C. Thermoharders | | |
| PF | fenol-formaldehyde | bakeliet, hard |
| UF | ureum-formaldehyde | kleurloos, hoge oppervlakteglans |
| UP | onverzadigde polyester | helder, meestal glasgevuld |

2.4.2. Ketenstructuur

Een lineaire keten bestaat uit een 'ruggesgraat', de hoofdketen, waaraan zijgroepen zijn bevestigd. De zijgroepen bepalen mede de naam van de betreffende polymeer en in zeer belangrijke mate de eigenschappen. Copolymeren zijn opgebouwd uit

Tabel 2.7. Copolymeren.

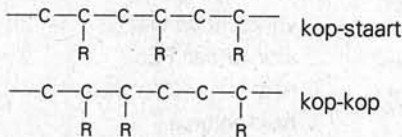
| <i>naam</i> | <i>soort polymeer</i> | <i>samenstellende monomeren</i> |
|-------------|-----------------------|------------------------------------|
| ABS | terpolymeer | acrylonitril + butadieen + styreen |
| SAN | dipolymeer | styreen + acrylonitril |
| EPR | dipolymeer | etheen + propreen |
| SBR of SBS | dipolymeer | styreen + butadieen |
| IIR | dipolymeer | isobuteen + isopreen |
| EPDM | terpolymeer | etheen + propreen + een dieen |

verschillende monomeren (zie Tabel 2.7). Polymeerketens zijn in het algemeen regelmatig opgebouwd, maar er zijn variaties mogelijk in:

- i. aansluiting van monomeren
- ii. plaatsing van zijgroepen
- iii. rangschikking rond een dubbele binding
- iv. vertakkingen
- v. copolymeerstructuur

ad i. Aansluiting van monomeren

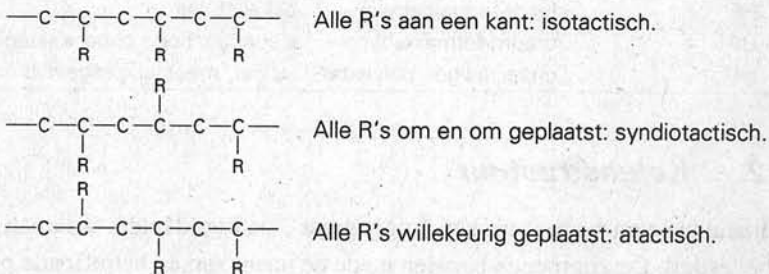
Deze aansluiting kan in principe als 'kop-staart' of als 'kop-kop'. Vrijwel altijd vindt de kop-staart aansluiting plaats; in enkele gevallen de kop-kop aansluiting. Dat wil bijvoorbeeld zeggen voor een vinylpolymeer (dat is een polymeer verkregen door polymerisatie van de onverzadigde vinylverbinding $\text{CH}_2=\text{CHR}$):



(N.B.: vaak worden bij de schematische weergave van polymeerketens de waterstofatomen niet aangegeven, alle andere groepen worden wel aangeduid)

ad ii. Plaatsing van zijgroepen

Bij de keten $-\text{CH}_2-\text{CHR}-\text{CH}_2-\text{CHR}-\text{CH}_2-\text{CHR}-$ kan deze regelmatig of onregelmatig zijn:



Bij de meeste polymerisatieprocessen worden overwegend atactische ketens gevormd. Voor de vervaardiging van isotactische en syndiotactische ketens bestaan speciale stereospecifieke polymerisatieprocessen. Op deze manier wordt polypropreen gemaakt. Atactisch polypropreen is onbruikbaar.

ad iii. Rangschikking rond een dubbele binding

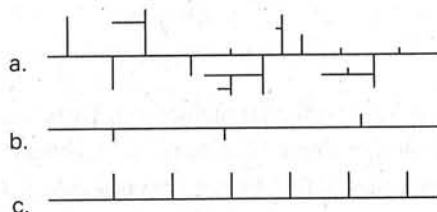
De dubbele binding is niet draaibaar, waardoor dus verschillende configuraties ontstaan:



De trans- en cis-configuraties van hetzelfde polymeer verschillen sterk in eigenschappen, ze vormen verschillende materialen. Natuurrubber is bijvoorbeeld cis-1,4-polyisopreen en gutta percha, een gomachtige stof die bij kamertemperatuur hard is, heeft de trans-configuratie.

ad iv. Vertakkingen

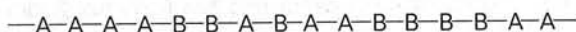
Vertakkingen verstoren de ketenregelmaat als ze op willekeurige plaatsen langs de keten voorkomen; zie Figuur 2.27.



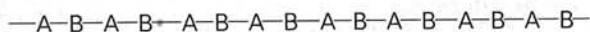
Figuur 2.27. a. Sterk vertakte keten met onregelmatige zijtakken; b. weinig vertakte keten; c. sterk vertakte keten, doch regelmatiger.

ad v. Copolymeerstructuur

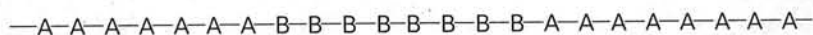
Bij copolymerisatie ontstaan onregelmatige ketens als de volgorde der monomeren willekeurig is (random-copolymeer):

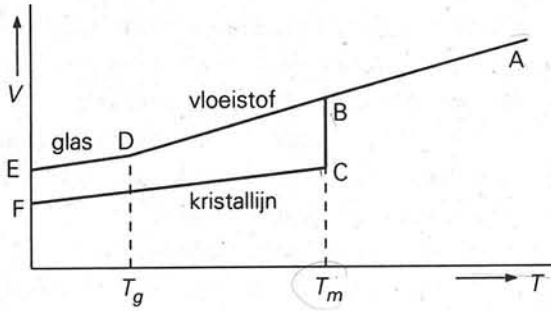


Een regelmatiger opbouw zien we bij alternerende copolymeren:



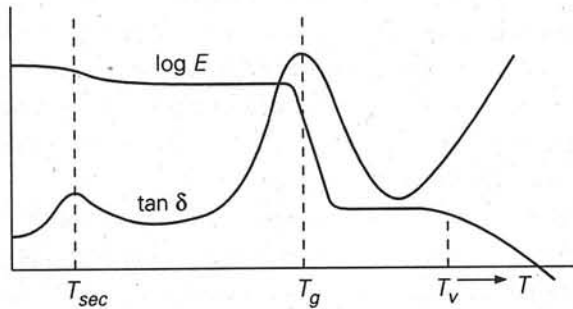
en bij blokcopolymeren:





Figuur 2.28. Soortelijk volume als functie van de temperatuur.

Er zijn ook stoffen die niet kunnen kristalliseren bij afkoeling vanuit de smelt. Bij een zekere temperatuur gaan deze stoffen stollen, zonder dat er een sprongsgewijze volumeverandering optreedt, de vloeistofoestand wordt als het ware ingevroren. Glas is een voorbeeld van een dergelijke stof. De temperatuur waarbij glas stolt heet het glaspunt, T_g (punt D in Figuur 2.28). Glasachtige materialen zijn dus ook in de vaste toestand amorf.



Figuur 2.29. $\log E$ en $\tan \delta$ van een amorf polymeer als functie van de temperatuur.

Ook veel polymeren zijn amorf. Ze volgen eveneens bij temperatuurverhoging de lijn EDA in Figuur 2.28. Bij de glasovergang gaat een polymeer echter niet onmiddellijk over in de vloeibare toestand, maar eerst nog in een rubberachtige toestand. Men spreekt dan van de *glas-rubber-overgangstemperatuur* T_g . Bij verdere verwarming gaat de rubber geleidelijk over in een vloeistof.

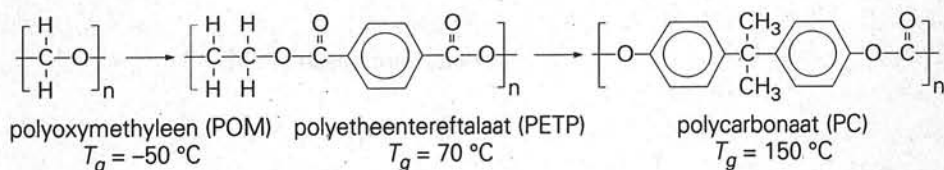
In plaats van te kijken naar het volume, is het aanschouwelijker om de vormvastheid van het materiaal te bekijken. Deze vormvastheid verdwijnt immers als de stof vloeibaar wordt. In termen van de E-modulus, die een maat is voor de weerstand tegen een elastische vervorming van een stof, is het gedrag geïllustreerd in Figuur 2.29. Voor een polymeer is er na een daling met een factor duizend à tienduizend een rubberplateau, dat op de temperatuurschaal langer is naarmate de polymeerketen-

lengte groter is. In de rubbertoestand worden de vervormingsmogelijkheden door een uitwendige kracht uitsluitend bepaald door de strekmogelijkheden van de gekluwde ketens. Zolang de uitwendige kracht niet te lang werkzaam is kunnen de ketens nog niet ten opzichte van elkaar vloeien, zodat de stof nog niet als vloeibaar beschouwd mag worden. Verwijdert men de uitwendige kracht, dan worden de gestrekte ketens weer gekluwd: het polymeer gedraagt zich als een elastiek. Bij een verdere temperatuurverhoging tot temperaturen boven het rubbergebied verkrijgen de ketens van een thermoplast een grotere bewegingsvrijheid: boven de vloeitemperatuur T_v gaat het materiaal vloeien en de E-modulus gaat ook verder dalen (zie Figuur 2.29).

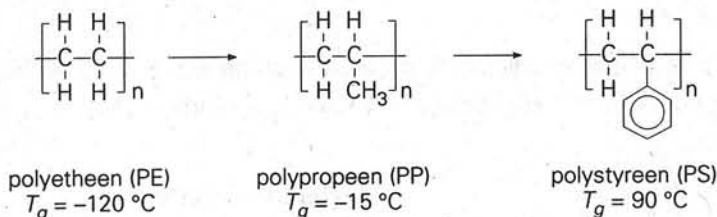
In de glastoestand zijn de ketens ongeordend en is de structuur vergelijkbaar met die van een vloeistof. Kan de stof zowel voorkomen in de glastoestand als in de kristallijne toestand, dan heeft de glastoestand een hoger soortelijk volume. Vandaar de afstand tussen de lijnen ED en FC in Figuur 2.28, *het vrije volume* V_f . Beneden T_g is V_f niet erg afhankelijk van de temperatuur; boven T_g neemt V_f snel toe met de temperatuur. Het vrije volume in de glastoestand laat soms nog geringe bewegingsmogelijkheden toe voor kleine ketendelen of voor zijgroepen. Bij de temperatuur waar het vrije volume groot genoeg wordt om zo'n beweging mogelijk te maken, zien we een daling van de E-modulus. Omdat deze soort daling veel kleiner is dan bij T_g , noemt men deze overgangen in de glastoestand 'secundaire glasovergangen'. Deze overgangen zijn nog duidelijker te zien bij meting van de mechanische demping. De *demping* is gedefinieerd als de tangens van de verlieshoek bij trillingsexperimenten, $\tan \delta$. Het is een maat voor de snelheid waarmee trillingen worden uitgedempt. Deze vertoont een groot maximum bij T_g en een kleiner maximum bij een secundaire overgang, T_{sec} (zie Figuur 2.29). De secundaire glasovergangen zijn van groot belang voor de slagsterkte (zie §4.5.2) van een glasachtige polymeer. Zij geven de mogelijkheid om energie op te nemen bij schokbelastingen: het polymeer is minder bros en heeft dus een verhoogde slagsterkte. Een voorbeeld van een secundaire overgang is die bij 25 °C van PMMA, die wordt veroorzaakt door het mogelijk worden van een rotatie van de zijgroep $-\text{COOCH}_3$ (zie Tabel 2.5).

De ligging van T_g wordt bepaald door de flexibiliteit van de polymeerketen en door de aantrekking tussen de ketens. De flexibiliteit van een keten wordt bepaald door de stijfheid van de *hoofdketen* en/of de aanwezigheid van zijgroepen. Als reeds bij een lage temperatuur vrij grote bewegingen van ketendelen mogelijk zijn, is ook T_g laag.

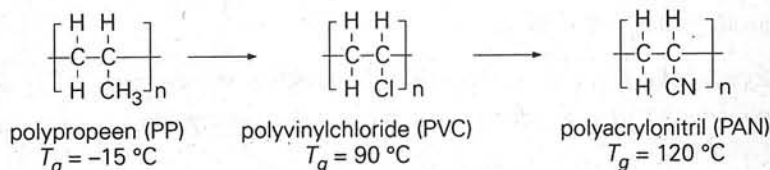
Een voorbeeld van de invloed van toenemende stijfheid van de *hoofdketen* wordt gegeven door de volgende reeks (zie ook Tabel 2.8):



De aanwezigheid van zijgroepen beperkt de flexibiliteit van de hoofdketen en zijgroepen kunnen dus de ketenstijfheid vergroten. Een voorbeeld van deze invloed wordt gegeven door de volgende reeks:



De invloed van interacties tussen de ketenmoleculen op T_g ligt voor de hand: hoe groter deze interacties, hoe groter de onderlinge hinder en hoe hoger T_g . De hierna volgende reeks illustreert dit duidelijk:



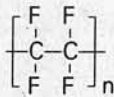
De zijgroepen zijn in deze reeks ongeveer even groot, dus de stijfheid van de ketens is ongeveer van gelijke orde, PP is apolair, PVC heeft een dipoolkarakter en PAN bevat nog sterkere dipolen: waterstofbruggen.

2.4.4. Semi-kristallijne polymeren

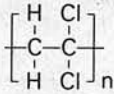
Onder de thermoplasten bevindt zich, naast de amorphe, een vrij groot aantal semi-kristallijne polymeren. Een noodzakelijke voorwaarde voor kristallisatie is een regelmatige ketenopbouw, die plaatsing van de ketenmoleculen op een kristalrooster mogelijk maakt. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden, zoals:

- i. De zijgroepen ter weerszijden van de hoofdketen zijn gelijk en de keten is symmetrisch; voorbeelden zijn:

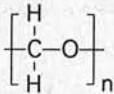




polytetrafluoretheen (PTFE)

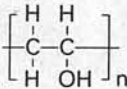


polyvinylideen (PVDC)



polyoxymethyleen (POM)

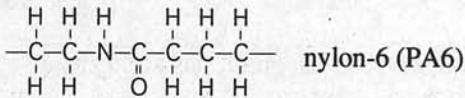
- ii. De keten is niet symmetrisch, maar de zijgroepen zijn klein genoeg om in de holten van een rooster geplaatst te worden; een voorbeeld is:



polyvinylalcohol (PVAL)

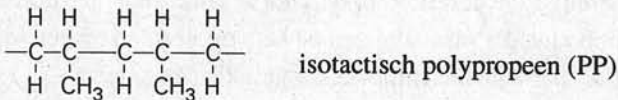
De OH-groep is klein genoeg ten opzichte van het H-atoom om kristallisatie in een polyetheen-kristalrooster mogelijk te maken, zij het met enige verstoring. Bijvoorbeeld atactisch PVC kan niet kristalliseren, doordat het Cl-atoom veel groter is dan het H-atoom.

- iii. Er is slechts één zijgroep in de keten, die echter vrij kan draaien om de keten; de polyamiden of de nylons vormen hiervan een voorbeeld.

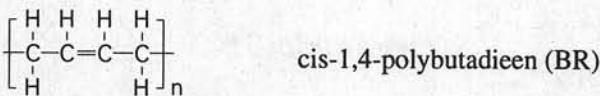


Hier kan het zuurstofatoom vrij draaien. In het kristal komen alle O-atomen van een keten in één vlak te liggen, zodat ze de pakking met de omliggende ketens niet verstoren.

- iv. De zijgroepen zijn regelmatig geplaatst, stereospecifiek. Een voorbeeld is:

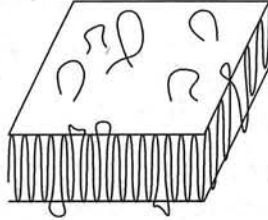


- v. Onverzadigde hoofdketens als deze grotendeels de *cis*- of de *trans*-vorm hebben; een voorbeeld is:



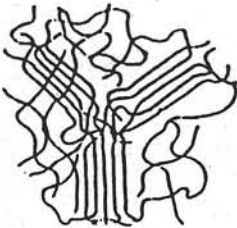
Bij al deze voorbeelden moet worden opgemerkt dat niet alle, in beginsel kristal-

liseerbare polymeren, ook daadwerkelijk kristalliseren. De kristallisatiesnelheid kan te laag zijn. Bij kristallisatie gaan de polymeerketens parallel tegen elkaar liggen. De ketens liggen niet over hun gehele lengte gestrekt, maar liggen min of meer regelmatig gevouwen in lamellen (zie Figuur 2.30). Manipulatie van deze lamelstructuur, bijvoorbeeld door verstrekken, kan leiden tot vezelstructuren waarin de ketens wel over hun gehele lengte gestrekt en evenwijdig liggen. Deze vezels hebben een grote treksterkte, zoals de door DSM ontwikkelde PE-vezel Dyneema.

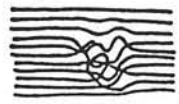


Figuur 2.30. Kristallisatie in lamelvorm.

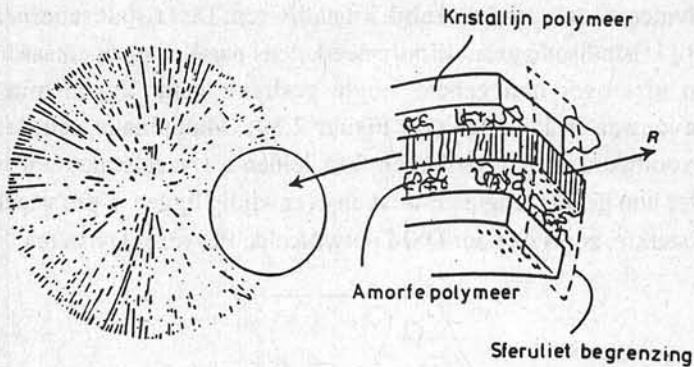
Doordat polymeren bestaan uit flexibele ketens van verschillende lengte, die bovendien ook nog 'fouten' kunnen bevatten zoals vertakkingen, is de kristalliniteit nooit 100%. Kristalliserende kunststoffen zijn *semi-kristallijn*, tussen de kristallieten bevindt zich amorf polymeer. Naast het volumepercentage amorf polymeer is de ligging van de amorse gedeeltes van belang voor de eigenschappen. Het oudste model voor een semi-kristallijn polymeer is de franje-micel structuur (Engels: fringed micel). Hierin liggen de kristallijne gebieden ingebed in een amorse fase, waarbij de ketens van het ene gebied in het andere doorlopen (zie Figuur 2.31). In een ander model, het parakristallijne model, liggen de amorse gebieden binnen de kristallen, dus juist andersom (zie Figuur 2.32). Beide situaties komen in kunststoffen voor. In vanuit de smelt gekristalliseerde polymeren neemt men vaak sferulieten waar: bolvormige aggregaten van kristallieten met ingesloten amorse gebieden die vanuit een primaire kern zijn gegroeid. De afmetingen van de sferulieten (zie Figuur 2.33) liggen in de orde van 1 tot 5 μm .



Figuur 2.31. Franje-micel structuur.

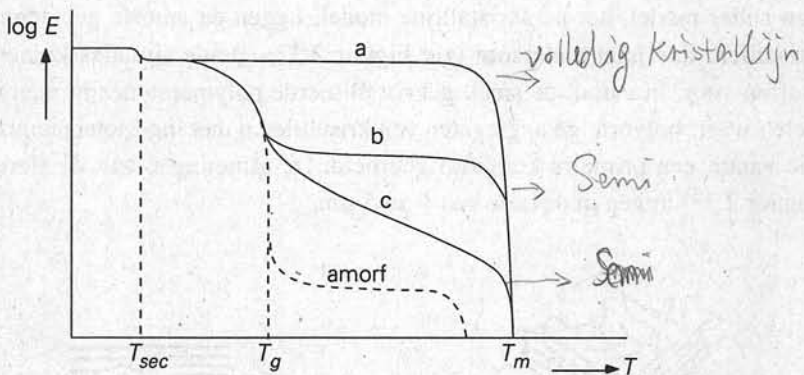


Figuur 2.32. Parakristallijn model.

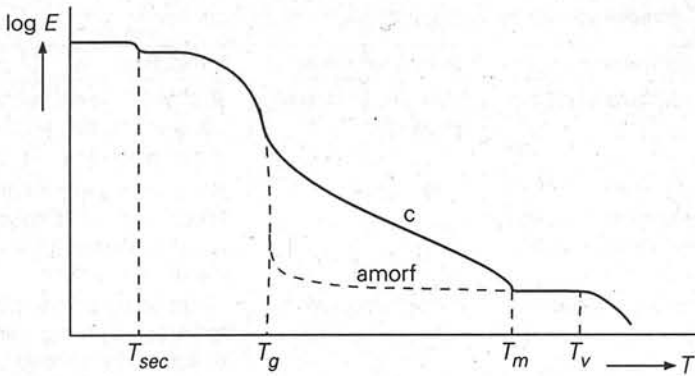


Figuur 2.33. Sferuliet.

Het gedragspatroon van semi-kristallijne polymeren is duidelijk verschillend van dat van de zuiver amorphe polymeren. Op het schema *glas-rubber-vloeistof* wordt het schema *kristal-vloeistof* gesuperponeerd: de amorphe fase is nog altijd aanwezig. Figuur 2.34 geeft de E-modulus als functie van de temperatuur. Indien een polymeer volledig kristallijn zou zijn, wordt de lijn *a* gevolgd: geen overgang glas-rubber, maar wel een scherpe daling bij T_m . Een semi-kristallijn polymeer volgt idealiter lijn *b*, maar de structuur in de kristallijne gedeelten is niet overal perfect. Het gevolg is een statistische verdeling van smeltpunten met als bovengrens het smeltpunt van het polymeerkristal. Hierdoor neemt de E-modulus tussen het glaspunt en het smeltpunt geleidelijk af: lijn *c*. Meestal gaat het polymeer bij smelten direct in de vloeistoffase over. Bij zeer hoog-moleculaire stoffen kan T_v , boven T_m liggen, dan blijft na smelten een deel van het rubbergebied behouden, zie Figuur 2.35.



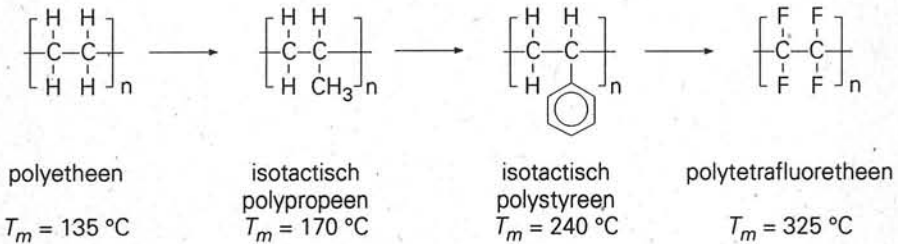
Figuur 2.34. Log E van een semi-kristallijn polymeer als functie van de temperatuur.



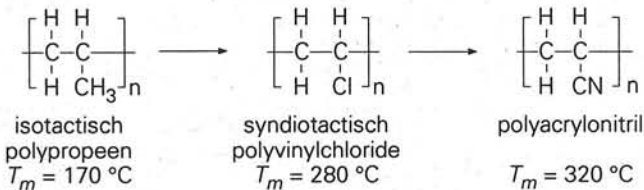
Figuur 2.35. Log E van een semi-kristallijn, hoog-moleculair polymeer als functie van de temperatuur.

Het smeltpunt van een polymeer ligt altijd hoger dan zijn glaspunt, het verschil bedraagt meestal circa $200\text{ }^\circ\text{C}$. Voor een semi-kristallijn polymeer kan T_g beneden kamertemperatuur liggen, zoals bij PE, POM en PP. Dit betekent dat voor deze soort polymeren de kamertemperatuur ligt tussen T_g en T_m in Figuur 2.34 en Figuur 2.35. De E-modulus is dan bij kamertemperatuur lager dan die van glasachtige polymeren, maar hoger dan die van rubbers. Daardoor zijn deze kunststoffen bij kamertemperatuur soepel, 'leerachtig'.

De factoren die de glas-rubber-overgangstemperatuur bepalen, bepalen ook de ligging van het smeltpunt. De invloed van de flexibiliteit komt tot uitdrukking in de volgende reeks:



De invloed van interacties komt tot uiting in de reeks:



Aangezien voor het begrip van het gedrag van polymeren de overgangspunten van groot belang zijn, zijn in Tabel 2.9 de overgangen nogmaals beschreven.

Tabel 2.9. Definities van de overgangstemperaturen in kunststoffen.

| | <i>overgangspunt</i> | <i>betrokken fasen</i> | <i>toelichting</i> |
|-----------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T_{sec} | secundaire overgang | glas-glas of kristallijn-kristallijn | slechts kleine daling van E , maar van groot belang wegens bros of taai gedrag |
| T_g | glas-rubber-overgangstemperatuur of glastemperatuur | glas-rubber | sterke daling van E (circa factor 1000) voor amorf polymeer, geleidelijke daling voor semi-kristallijn polymeer |
| T_v | vloeitemperatuur | rubber-vloeistof | treedt op bij amorphe polymeren, soms ook bij hoogmoleculaire kristallijne polymeren |
| T_m | smelttemperatuur | kristallijn-vloeistof | treedt alleen op bij semi-kristallijne polymeren |

3 Legeringen, oplossingen, mengsels, bijmengsels en composieten

Na bestudering van dit hoofdstuk kan de student:

1. *binaire toestandsdiagrammen lezen*
2. *het verband onderzoeken tussen mengvormen en mengverhoudingen enerzijds en verwerkings- en gebruikseigenschappen anderzijds door waar mogelijk gebruik te maken van toestandsdiagrammen.*

3.1. Inleiding

In dit hoofdstuk wordt enig inzicht gegeven in het verband tussen chemische samenstelling en structuur op basis van toegepaste thermodynamica. Hierbij zal blijken dat de structuren kunnen afhangen van de temperatuur. Hierop berusten warmtebehandelingen die door het toevoeren of afvoeren van warmte de structuur, en dus de eigenschappen, van een materiaal kunnen beïnvloeden. Bijvoorbeeld bij het metaal ijzer is de structuur boven 912 °C anders dan bij kamertemperatuur.

Een zuivere stof, zoals zuivere koffie, bestaat niet. Een materiaal, zoals dat door de industrieel ontwerper gebruikt wordt, is altijd een combinatie van verschillende stoffen. Dit komt niet alleen doordat er nu eenmaal altijd verontreinigingen aanwezig zijn, maar ook doordat specifieke eigenschappen alleen gerealiseerd kunnen worden door combinatie van stoffen. Vooraf moet dus het effect van de verschillende stoffen bekend zijn. Twee voorbeelden kunnen deze relatie tussen samenstelling en eigenschappen illustreren:

- i. Sigarendoosjes (zie Figuur 2.22) worden vervaardigd uit staal met circa 0,05 gew% koolstof (staal is een legering van ijzer met koolstof). Kleine aantallen koolstofatomen in ijzer kunnen de vervormingsmogelijkheden bij kamertemperatuur zeer sterk beïnvloeden. De materiaalkeuze voor sigarendoosjes is mede gebaseerd op het bekende verband tussen het koolstofgehalte van staal en de vervormingsmogelijkheden ervan bij kamertemperatuur.
- ii. Plastic koffiebekertjes worden gemaakt van slagvast polystyreen, dat is polystyreen waaraan een kleine hoeveelheid rubber is toegevoegd. Het verband tussen slagsterkte en percentage rubber moet bekend zijn: te weinig rubber helpt niet, te veel rubber maakt het materiaal te slap.

De in dit hoofdstuk gebruikte begrippen zijn ontwikkeld in de loop van eeuwen van verwerking van stoffen tot materialen. Het is niet mogelijk deze begrippen strikt te definiëren. Toch is het voor begripsvorming over het verband tussen samenstelling

Tabel 3.1. *Definities van de in de techniek gebruikte combinaties van atomen en moleculen.*

| <i>begrip</i> | <i>definitie</i> |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| legering | Combinatie van een metaalatoomssoort met een andere metaal- atoom- of molecuulsoort die op het oog uit een enkel metaal bestaat. |
| legeringselement | Atoomsoort die aan een andere metaalatoomssoort opzettelijk wordt toegevoegd, opdat het verkregen, macroscopisch gezien enkelvoudige metaal een bepaalde gewenste eigenschap heeft. |
| oplossing | Vaste of vloeibare combinatie van een atoom- of molecuulsoort met andere atoom- of molecuulsoort(en) zonder dat er tussen de aanwezige soorten een chemische binding bestaat; de aanwezige atoom- of molecuulsoorten kunnen niet met mechanische middelen worden gescheiden en zij worden geacht in éénzelfde aggregatie-toestand te verkeren. |
| mengsel | Combinatie van een atoom- of molecuulsoort met andere atoom- of molecuulsoorten; de aanwezige atoom- of molecuulsoorten kunnen in beginsel met mechanische middelen worden gescheiden. |
| composiet | Mengsel, waarvan de bestanddelen zijn samengebracht met het doel de eigenschappen (fysisch, chemisch of mechanisch) van het hoofdbestanddeel te verbeteren. |
| bijmengsels | Atoom- of molecuulsoorten die, in kleine gehalten aanwezig, nuttig of schadelijk zijn voor de gewenste eigenschappen. |
| onzuiverheid | Atoom- of molecuulsoort die schadelijk is voor de gewenste eigenschappen. |
| vulstof | Component die aan het hoofdbestanddeel van een composiet wordt toegevoegd. |
| hulpstof | Stof die in een kleine hoeveelheid aan een polymeer wordt toegevoegd om de fysische, mechanische of verwerkingseigenschappen te beïnvloeden. |

en eigenschappen noodzakelijk te beschikken over deze begrippen. In Tabel 3.1 zijn de definities verzameld zoals ze in dit boek worden gebruikt.

Onder het begrip legering vallen de meeste toegepaste metalen, zoals staal (ijzer-koolstof, met laag C-percentag), gietijzer (ijzer-koolstof, met hoog C-percentag), brons (koper-tin) en messing (koper-zink). De meeste kunststoffen zijn mengsels. Het verschil tussen een legering en een mengsel is vaak afhankelijk van de schaal waarop men de legering bekijkt: op macroscopische schaal toont de legering zich als een enkelvoudig metaal, zoals de definitie ook aangeeft. Op microscopische schaal blijken vele legeringen te bestaan uit mengsels van verschillende soorten kristallen. Een legering die uit twee atoomsoorten bestaat, noemt men binair, uit drie ternair, uit vier quarternair. Gewoonlijk telt men gelatiniseerd niet verder. Die atoomsoort in een legering waarvan de concentratie het hoogst is, heet het basismetaal. De overige atoomsoorten of molecuulsoorten heten legeringselementen, bijmengsels of onzuiverheden. Deze laatste twee vinden vaak hun oorsprong in de bereiding van de legering: ze zitten in de grondstoffen of worden opzettelijk toegevoegd. Voorbeelden van bijmengsels en onzuiverheden in staal zijn:

| bijmengsels | onzuiverheden |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Mn, Si en Al | P, S, O, en N |
| atoomsoorten die altijd worden toegevoegd bij de bereiding van staal | atoomsoorten die ongewenst zijn in staal |

Vraag 3.1 *Koolstof wordt gebruikt bij de bereiding van ijzer; zonder koolstof kan ijzer niet bereid worden uit ijzererts. Is koolstof in ijzer een legeringselement, een bijmengsel of een onzuiverheid?* *bijmengsel*

Het verschil tussen legeringselement, bijmengsel en onzuiverheid is niet altijd duidelijk. Koper verslechtert in het algemeen de corrosieweerstand van aluminiumlegeringen, maar veel aluminiumlegeringen danken juist hun sterkte aan de aanwezigheid van Cu-atomen.

Vraag 3.2 *Hoe zou u Cu in aluminiumlegeringen willen noemen?*

special toegevoerd → legeringselement
De naamgeving van legeringen en mengsels wordt bepaald door gewoonte en traditie. Pas sinds betrekkelijk korte tijd zijn er duidelijke afspraken over naamgeving. In dit boek wordt zo veel mogelijk het volgende systeem gevolgd: het basiselement gevolgd door de andere aanwezige elementen in volgorde van dalend gehalte uitgedrukt in massaprocenten.

3.2. Opbouw van metaallegeringen

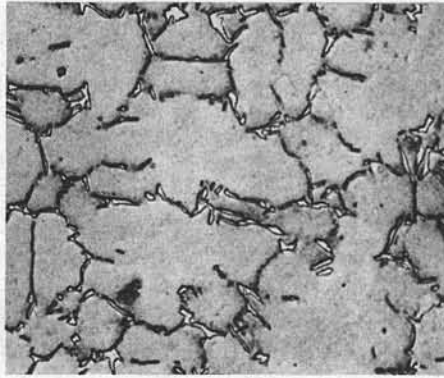
Indien men een basismetaal, dat dus in beginsel één atoomsoort bevat, legeert met één andere atoomsoort, dan zijn onder meer de volgende legeringsvormen mogelijk:

- i. vaste oplossing
- ii. mengsel van twee vaste oplossingen
- iii. mengsel van een vaste oplossing en een chemische verbinding van de twee atoomsoorten
- iv. mengsel van kristallen van het basismetaal en van de tweede atoomsoort

In geval *iv* lossen de atomen van de toegevoegde atoomsoort niet op in de kristallen van het basismetaal: in vaste toestand zijn de twee atoomsoorten niet wederzijds oplosbaar. Voorbeelden hiervan zijn vele legeringen met lood als basismetaal. Microscopisch zijn de verschillende kristallieten te onderscheiden, macroscopisch meestal niet (zie Figuur 3.1).

De opbouw van een legering uit bijvoorbeeld mengsels en vaste oplossingen (zie Tabel 3.1) wordt de structuur van de legering genoemd. Het begrip structuur heeft hier dus niets te maken met het begrip kristalrooster. Door etsing kan men de verschillende kristallieten microscopisch zichtbaar maken. Men spreekt van het

etsing



Figuur 3.1. Kristallieten in een legering van lood en 5 gew% antimoon (accuplaat).

structuurbeeld of de microstructuur van de legering.

Verschillen de beide atoomsoorten van een binaire legering weinig in grootte, dan kunnen de atomen van het legeringselement, B, een vaste oplossing vormen met de atomen van het basismetaal, A. De B-atomen bezetten plaatsen op het rooster van het A-metaal en substitueren dus A-atomen. Er is een substitutioneel mengkristal ontstaan. Zijn de B-atomen zo klein, dat zij de interstitiële holten van het A-rooster kunnen bezetten, dan ontstaat er een interstitieel mengkristal, zie §2.3.2.

Lossen in vaste toestand de B-atomen in het A-metaal in elke verhouding op, dan is er volledige mengbaarheid. De aard van het kristalrooster is dan onafhankelijk van de samenstelling van de binaire legering. Volledige mengbaarheid is alleen mogelijk als voldaan wordt aan de Hume-Rothery regels:

1. de diameter van de B-atomen verschilt niet meer dan circa 15 % van die van de A-atomen
2. beide atoomsoorten bezitten hetzelfde kristalrooster
3. beide atoomsoorten bezitten hetzelfde aantal valentie-elektronen

共价电子

Voorbeelden van volledige mengbaarheid zijn de binaire legeringen Au-Ag, Au-Cu, Cu-Ni, Fe-Cr. Wordt aan de Hume-Rothery regels niet voldaan, dan treedt er hoogstens een gedeeltelijke mengbaarheid in de vaste toestand op. De substitutionele oplosbaarheid van de atoomsoort B in het basismetaal A is geringer, naarmate de atoomdiameters van A en B meer van elkaar verschillen. Voegt men zo veel van het legeringselement toe, dat de substitutionele oplosbaarheid van B-atomen in het basismetaal niet meer toereikend is (de vaste oplosbaarheid wordt overschreden), dan bestaat de legering naast mengkristallen van het basismetaal A met B uit ofwel:

1. kristallen van zuiver B
2. mengkristallen rijk aan B, arm aan A
3. chemische verbindingen van A en B

Is het legeringselement B een metaal dan heet de chemische verbinding van A- met B-atomen een intermetallische verbinding. Er komen ook verbindingen voor van het basismetaal met een metalloïde als legeringselement. Het bekendste voorbeeld is Fe_3C , optredend in staal. De metalloïden C, N, H zijn in vele gevallen tot slechts vrij kleine gehalten interstitieel in een basismetaal oplosbaar en zullen in veel legeringen aanleiding geven tot de vorming van carbiden, nitriden en hydriden. Deze chemische verbindingen kunnen de eigenschappen van de legering sterk beïnvloeden.

In substitutionele mengkristallen kunnen de atomen van de legeringselementen volstrekt willekeurig roosterplaatsen van het basismetaal bezetten. Als de interactiekrachten tussen verschillende atomen groter zijn dan tussen gelijke atomen, dan is een vermindering van de vrije energie mogelijk door omringing van de A-atomen met B-atomen. Dan kan ordening optreden.

Vraag 3.3 *In §2.3.2 werd een atomaire opvatting gegeven van de E-modulus. Stel, de atomen A en B vormen bij kamertemperatuur een vaste substitutionele oplossing tot 2 at% B. Dit betekent dat ongeveer 2 van de honderd plaatsen van het rooster van het A-metaal bezet zijn door B-atomen. Boven 2 at% B vormt zich een intermetallische verbinding AB. Is de waarde van de E-modulus van de vaste oplossing afhankelijk van het gehalte van de B-atomen in at%?*

3.3. Toestandsdiagrammen voor binaire metaallegeringen

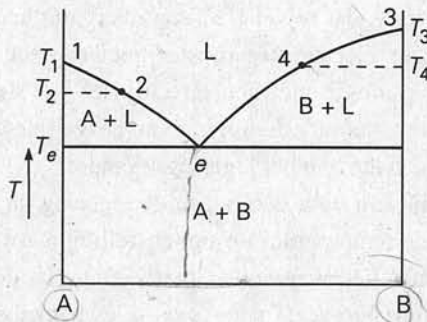
Lossen we suiker op in water, dan is een bekend gevolg dat het vriespunt van water verandert. Op analoge wijze zal het stolpunt van een zuiver metaal veranderen door toevoeging van een legeringselement. Sommige metalen vertonen bij temperatuurstijging vanaf kamertemperatuur overgangen vòòr het bereiken van de smelttemperatuur. Het kristalrooster kan overgaan van het ene naar het andere type. Het bekendste voorbeeld is ijzer, dat bij 912 °C een overgang heeft van krg/bcc-rooster naar kvg/fcc-rooster. IJzer met het krg-rooster heet α -ijzer en ijzer met het kvg-rooster heet γ -ijzer. In analogie met het verschijnsel van de vriespuntsdaling van water kan men verwachten, dat ook de ligging van dergelijke overgangspunten mede bepaald wordt door het gehalte aan het legeringselement.

Het is dus zeer belangrijk om voor een bepaalde legering na te kunnen gaan welke structuur bij een bepaalde temperatuur en samenstelling aanwezig is. Deze informatie wordt voor de thermische evenwichtssituatie gegeven door toestandsdiagrammen. De in de voorgaande paragraaf aangegeven legeringsbestanddelen duidt men aan met het begrip fase: een fase is een legeringsbestanddeel van homogene samenstelling en kristalrooster, dat mechanisch gescheiden kan worden van de overige

bestanddelen. Een toestandsdiagram geeft dus aan welke fasen in thermisch evenwicht aanwezig zijn bij een bepaalde temperatuur en een bepaald gehalte in at% of gew% aan legeringselement. Bij de bespreking van toestandsdiagrammen duidt men de legering aan als het systeem. De toestandsdiagrammen voor ternaire legeringen zijn ruimtelijk: de temperatuuras staat verticaal en de drie samenstellingsassen vormen een horizontaal vlak. Deze diagrammen worden weergegeven met doorsneden voor een bepaalde temperatuur (zie §4.3.2). In deze paragraaf beperken wij ons tot binaire systemen. Deze kunnen bestaan uit twee verschillende atoomsoorten, maar ook uit één atoomsoort en een chemische verbinding. De samenstellende stoffen van een legering heten *componenten*. Een component kan dus een atoomsoort zijn of een chemische verbinding.

3.3.1. *Onoplosbaarheid in de vaste toestand; eutecticum, peritecticum en intermetallische verbinding*

In Figuur 3.2 wordt een toestandsdiagram van een systeem A-B met onoplosbaarheid in de vaste toestand en volledige oplosbaarheid in de vloeibare toestand gegeven. In het gebied L kan alleen vloeistof bestaan. Daar is dus slechts één fase. Bij stolling van een legering van A met een zeker gehalte B, zeg samenstelling 2, ligt de temperatuur waarbij de stolling begint, T_2 , lager dan de smelttemperatuur T_1 van A. Bij stolling van een legering van B met een zeker gehalte A, zeg samenstelling 4, ligt de temperatuur waarbij de stolling begint, T_4 , lager dan de smelttemperatuur T_3 van B. Verhoogt men nu wederzijds het legeringsgehalte, dat betekent bij A meer B en bij B meer A, dan bereikt men een temperatuur waarbij beide legeringen gelijk stollen. De beide legeringen hebben dan dezelfde samenstelling, die *eutectische samenstelling* genoemd wordt. Juist boven de stoltemperatuur is er een smelt met de eutectische samenstelling. Bij stolling krijgt men dan een mengsel van fijn verdeeld A en B. Dit mengsel heet eutecticum. De stoltemperatuur van deze samenstelling heet de eutectische temperatuur T_e . De temperaturen waarbij de verschillende



Figuur 3.2. Binair toestandsdiagram van een systeem A-B met wederzijdse onoplosbaarheid in de vaste toestand.

legeringen beginnen te stollen heten de liquidus-temperaturen en de lijn door deze liquidus-temperaturen wordt kortweg de liquidus genoemd (de lijn 1e3 in het toestandsdiagram A-B).

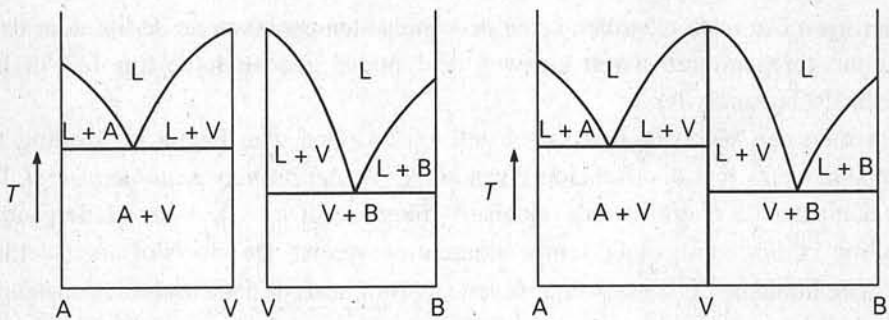
Laat men een vloeistof met samenstelling 2 stollen, dan begint de stolling bij temperatuur T_2 met de afscheiding van zuiver A: *het primair gestolde metaal*. Dit betekent dat de overblijvende vloeistof rijker wordt aan B. Voor verdergaande stolling is dus voortgaande temperatuurdaling vereist. De vloeistofsamenstelling volgt de liquidus. De laatst overgebleven vloeistof heeft de eutectische samenstelling bereikt bij de eutectische temperatuur. Hier beneden wordt alles vast. De horizontale lijn door de eutectische temperatuur heet de eutectische lijn. Tussen de eutectische lijn en de liquidus zijn steeds twee fasen met elkaar in evenwicht; voor samenstelling 2 zijn deze fasen: zuiver A en vloeistof met een samenstelling gegeven door de liquidus. Omdat A en B in de vaste toestand volstrekt niet in elkaar oplossen, heeft men na de stolling twee vaste fasen: A en B.

Het toestandsdiagram van A-B vertoont drie tweefasengebieden: $L + \text{vast A}$, $L + \text{vast B}$ en $\text{vast A} + \text{vast B}$. In het eutectische punt zijn drie fasen met elkaar in evenwicht: $L + \text{vast A} + \text{vast B}$. In de microstructuur zijn de primair gestolde metalen zichtbaar als grove kristallen (dendrieten, zie §5.2.3). De ruimte hiertussen wordt opgevuld met eutecticum. Dit is veel fijner en een eutecticum bestaat dikwijls uit afwisselende platen (lamellen) van de betrokken vaste fasen; in dit geval van A en B.

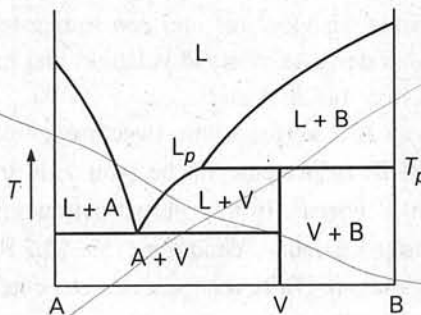
Indien de zuivere elementen A en B van een binaire legering een chemische verbinding V vormen, dan kan men twee mogelijkheden onderscheiden:

1. V kan bij opwarming onveranderd blijven bestaan tot deze tenslotte smelt in evenwicht met de vloeibare fase van dezelfde samenstelling: een congruent smeltende verbinding.
2. V kan bij opwarming ontbonden worden in een vloeibare en een vaste fase, die beide in samenstelling verschillen van de oorspronkelijke verbinding: een incongruent smeltende verbinding.

Het toestandsdiagram van een binair systeem met een congruent smeltende verbinding is op te vatten als de samenvoeging van twee toestandsdiagrammen (zie Figuur 3.3). Bij het opwarmen van een incongruent smeltende verbinding V begint bij temperatuur T_p (zie Figuur 3.4) het smelten. De eerst gevormde vloeistof heeft als samenstelling die van het punt gegeven door L_p op de liquidus. Tegelijkertijd vormt zich vaste stof B. Bij deze temperatuur zijn dus drie fasen met elkaar in evenwicht. Bij een verdere warmtetoevoer blijft de temperatuur constant totdat de verbinding V volledig ontleed is. Een dergelijk evenwicht heet een peritectisch evenwicht. Bij nog verdere warmtetoevoer stijgt de temperatuur en lost vast B op in de vloeistof L. Daar waar de samenstellingslijn V de liquidus snijdt, is voor de samenstelling V de vaste



Figuur 3.3. *Binair systeem met congruent smeltende verbinding.*



Figuur 3.4. *Binair systeem met incongruent smeltende verbinding.*

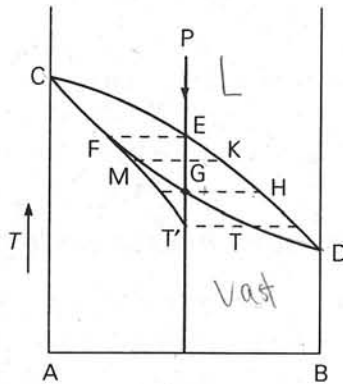
stof B volledig opgelost. Bij temperatuurdaling vindt dit proces in omgekeerde volgorde plaats.

Vraag 3.4 *Beschrijf wat er gebeurt als een legering met samenstelling V (Figuur 3.4) afgekoeld wordt vanuit de vloeistoffase.*

Het verwerken van metaallegeringen via de vloeibare fase heet gieten. Men probeert hierbij de laagst mogelijke temperatuur waarbij de te verwerken metaallegeringen vloeibaar zijn en gelijkmatig kunnen stollen, te vinden. In de tweefasengebieden $L + \text{vast metaal}$ zijn de metaallegeringen brij-achtig: vaste deeltjes in een vloeistof. De grootte van de deeltjes bepaalt dan tot welke dikte een metaallegering kan worden uitgegoten. Bij de eutectische samenstelling hoort voor een binaire metaallegering veelal de laagste temperatuur waarbij die legering nog volledig gesmolten is en waarbij die legering stolt met een stolpunt. Daarom is het begrijpelijk dat praktisch belangrijke gietlegeringen samenstellingen hebben in de buurt van de eutectische samenstelling van het binaire legeringssysteem waarop die gietlegeringen zijn gebaseerd. Bekende voorbeelden zijn gietijzer en de gietlegeringen gebaseerd op aluminium en silicium.

3.3.2 Volledige oplosbaarheid in vaste toestand; mengkristallen

Als twee componenten, zowel in vaste als in vloeibare toestand, volledig mengbaar zijn, bestaat het toestandsdiagram uit twee éénfasegebieden: de vaste fase en de vloeibare fase, waartussen een tweefasegebied ligt, waarin de vaste fase in evenwicht is met de vloeibare fase (zie Figuur 3.5). De laagste temperaturen waarbij de legeringen met samenstellingen tussen A en B vloeibaar zijn worden gegeven door de liquidus en de hoogste temperaturen waarbij de legeringen nog juist vast zijn door de solidus. Wordt in het tweefasegebied een temperatuur gekozen, dan liggen voor een binaire legering de gemiddelde samenstelling van de vaste fase en de gemiddelde samenstelling van de vloeibare fase vast. Alleen de zuivere componenten vertonen een stol/smelpunt, alle legeringen met tussenliggende samenstellingen vertonen een stol/smelttraject.



Figuur 3.5. Toestandsdiagram bij volledige mengbaarheid in vaste toestand en onvolledige diffusie (kristalsegregatie).

Zowel bij stollen als bij smelten moet voor de tussenliggende samenstellingen de samenstelling van de vaste mengkristallen en van de vloeibare fase voortdurend veranderen. De vaste mengkristallen volgen hierbij de solidus (CFGD), zie Figuur 3.5, en de vloeibare fase volgt hierbij de liquidus (CEHD). Een homogene smelt met samenstelling P zou bij een evenwichtsstolling een homogene vaste stof geven met dezelfde samenstelling. In de praktijk is er zelden sprake van evenwicht. Bij het begin van de stolling in punt E scheiden zich vaste kristallen af met samenstelling F. Hierdoor wordt de vloeistof rijker aan component B. Bij verdere temperatuurdaling wordt de samenstelling van de vloeistoffase uiteindelijk gegeven door het punt H, de laagste temperatuur waarbij in evenwicht nog vloeistof aanwezig zou zijn. In evenwicht zou de samenstelling van de vaste fase van F naar G moeten gaan. Deze verandering zou gerealiseerd moeten worden door diffusie van B-atomen uit de

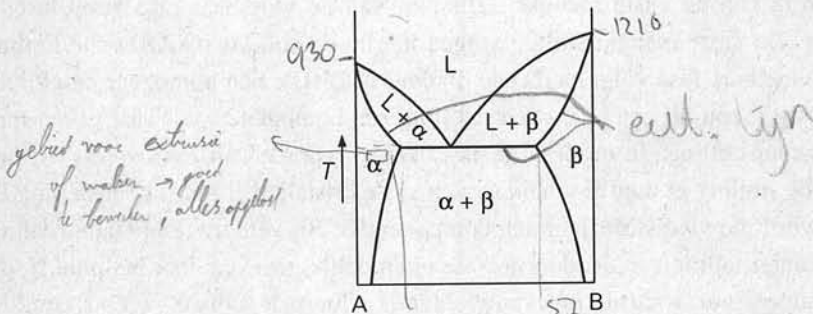
vloeistof naar het inwendige van de al gestolde A-rijke kristallen. Deze diffusie in de vaste stof verloopt zeer traag en is dus alleen bij een zeer traag verlopemde stolling mogelijk. In werkelijkheid houdt de diffusie in de vaste stof de diffusie in de vloeistof natuurlijk niet bij en verloopt de gemiddelde samenstelling van de vaste stof ongeveer als de lijn FT' in Figuur 3.5. De diffusie in de vloeistof is daarentegen snel genoeg en de laatst gestolde vaste stof heeft daarom de samenstelling T. Als gevolg van dit alles treedt kristalsegregatie op, dat is het naast elkaar voorkomen van kristallen met verschillende samenstelling. Kristalsegregatie is vaak voor de verdere verwerking van metaallegeringen ongewenst. Homogeengloeien kan de kristalsegregatie opheffen. Dit gebeurt door langdurig gloeien bij temperaturen juist beneden de smelttemperatuur van de laagstsmeltende component. Binaire legerings-systemen met volledige oplosbaarheid in de vaste toestand zijn: Cu-Ni, Au-Ag, Cu-Au, Fe-Cr, Fe-Ni.

Vraag 3.5 *Is de mate waarin kristalsegregatie ^{meer met grote afkoelsnelheid.} optreedt afhankelijk van de toegestane afkoelsnelheid?* *Ja*

Vraag 3.6 *Waarom neemt men als temperatuur voor het homogeen gloeien een temperatuur juist beneden de smelttemperatuur van de laagstsmeltende component?*

3.3.3. **Beperkte oplosbaarheid in vaste toestand**

Tussen de uiterste gevallen van onoplosbaarheid en volledige oplosbaarheid in de vaste toestand ligt de mogelijkheid van de beperkte oplosbaarheid. In het binaire legeringssysteem A-B (zie Figuur 3.6) zijn er dan A-rijke en B-rijke mengkristallen, meestal respectievelijk de α - en de β -mengkristallen genoemd. De wedzijdse oplosbaarheid neemt gewoonlijk af met dalende temperatuur. De maximale oplosbaarheid als functie van de temperatuur wordt gegeven door de oplosbaarheidslijn. Bij de eutectische temperatuur is er eutectisch evenwicht tussen de α - en de β -



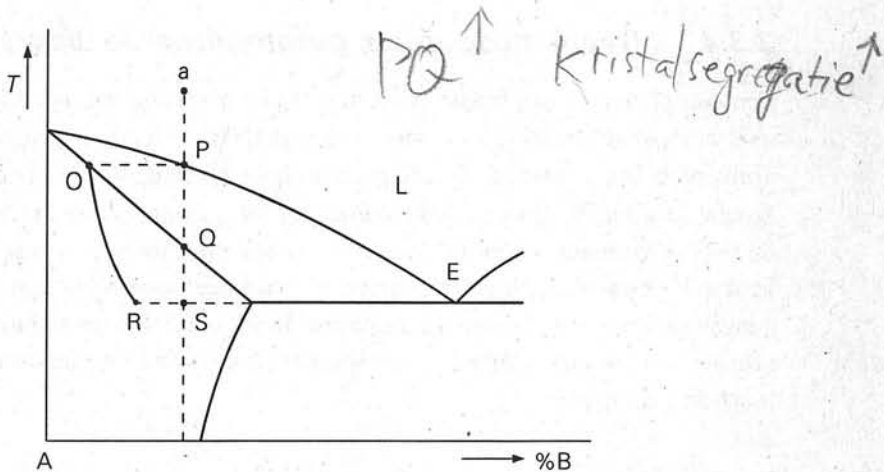
Figuur 3.6. Toestandsdiagram voor een systeem met beperkte oplosbaarheid in de vaste toestand.

mengkristallen en de vloeibare fase: $L \leftrightarrow \alpha + \beta$. Bij temperaturen beneden de eutectische lijn kan men afhankelijk van de gemiddelde samenstelling van de legering aantreffen: α -mengkristallen, α - en β -mengkristallen, en β -mengkristallen.

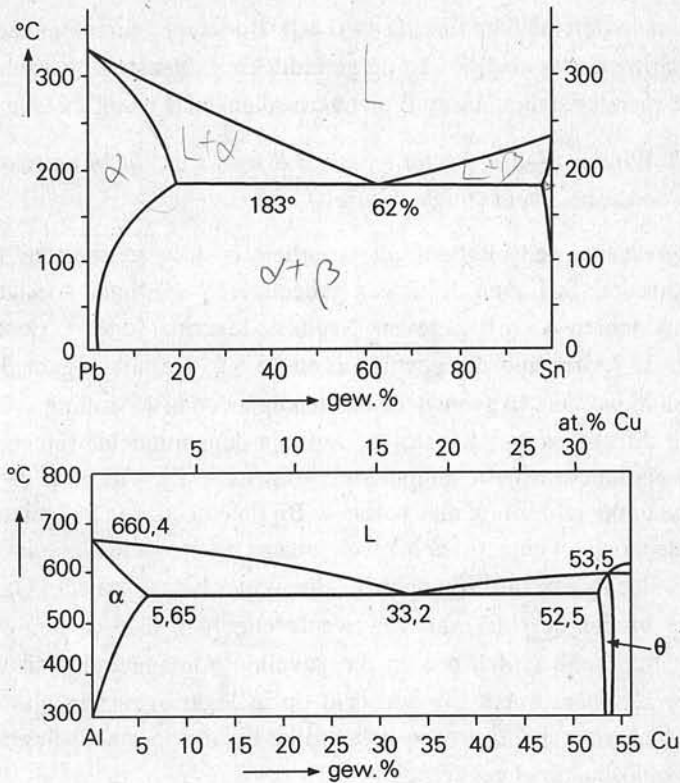
Vraag 3.7 Wijs in Figuur 3.6 tot en met 3.8 steeds de lijnen aan voor de vaste oplosbaarheid van de α -fase.

Ook in systemen met gedeeltelijke oplosbaarheid in de vaste toestand kan kristal-segregatie optreden. In Figuur 3.7 is een gedeelte van een binair toestandsdiagram voor de componenten A en B gegeven. Neem de legering gegeven door punt a. In analogie met de redenering die gevolgd is in §3.3.2, zie ook Figuur 3.5, kan het volgende gesteld worden. In evenwichtsomstandigheden is de stolling voltooid bij Q. Als er weinig diffusie in de vaste stof is, verloopt de gemiddelde samenstelling van de vaste stof als functie van de temperatuur volgens de lijn OR en is de stolling bij de eutectische temperatuur nog niet voltooid. Bij de eutectische temperatuur stolt de nog resterende vloeistof eutectisch, hoewel volgens het toestandsdiagram de legering bij het punt S slechts één fase zou hebben. Hoe groter het stoltraject PQ, met andere woorden hoe breder de 'lus' van het tweefasengebied $L + \alpha$, hoe ernstiger de kristalsegregatie. Vaak is dan ook in die gevallen homogengloeien vereist. Het genoemde verschijnsel treedt bijvoorbeeld op in legeringen van aluminium met magnesium. In Figuur 3.8 zijn twee belangrijke binaire toestandsdiagrammen met gedeeltelijke oplosbaarheid gegeven.

Vraag 3.8 Wat is de maximale temperatuur voor homogengloeien voor een binaire legering met beperkte wederzijdse vaste oplosbaarheid?



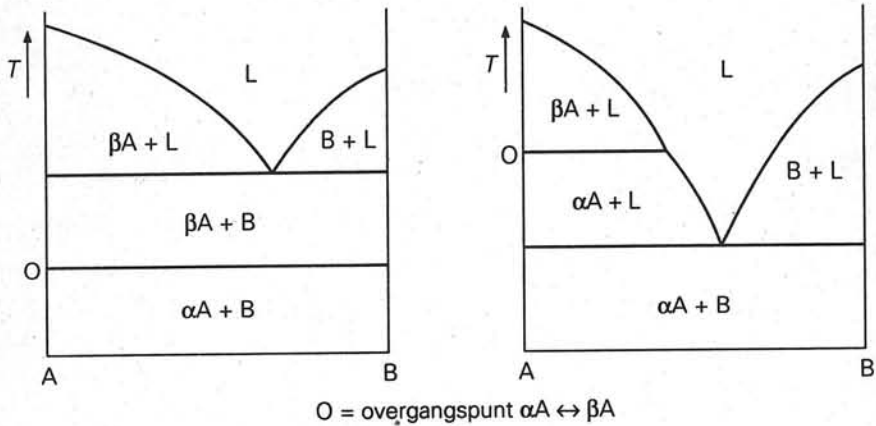
Figuur 3.7. Toestandsdiagram van een eutectisch binair systeem met onvolledige diffusie (kristalsegregatie).



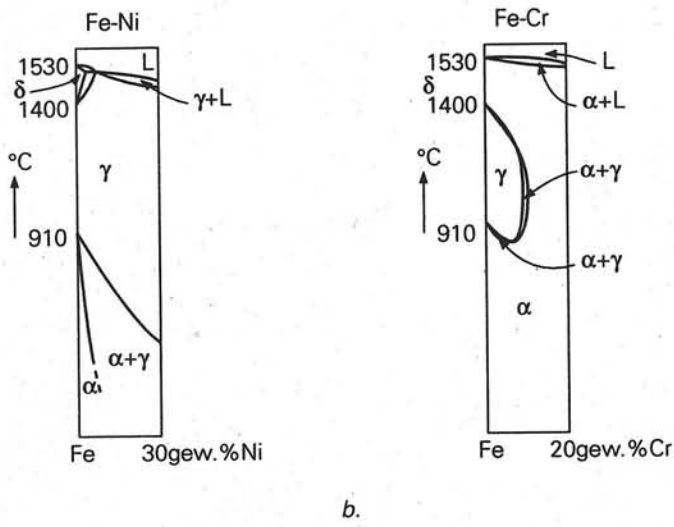
Figuur 3.8. Enkele praktisch belangrijke binaire toestandsdiagrammen met beperkte oplosbaarheid.

3.3.4. Overgangspunten; gecompliceerde diagrammen

Een component in een binair systeem met een overgang van het ene kristalrooster naar het andere geeft bij volkomen onmengbaarheid met de tweede component een horizontale lijn in het toestandsdiagram ter hoogte van de overgangstemperatuur (zie Figuur 3.9). Indien één of beide modificaties mengkristallen vormt, c.q. vormen, met de tweede component, zal de ligging van de overgangstemperatuur in afhankelijkheid van de samenstelling veranderen. Een tweede component kan zowel de overgangstemperatuur verhogen als verlagen. In Figuur 3.10a en Figuur 3.10b zijn de effecten van de toevoegingen van respectievelijk Ni en Cr op de overgangstemperatuur van ijzer te zien.

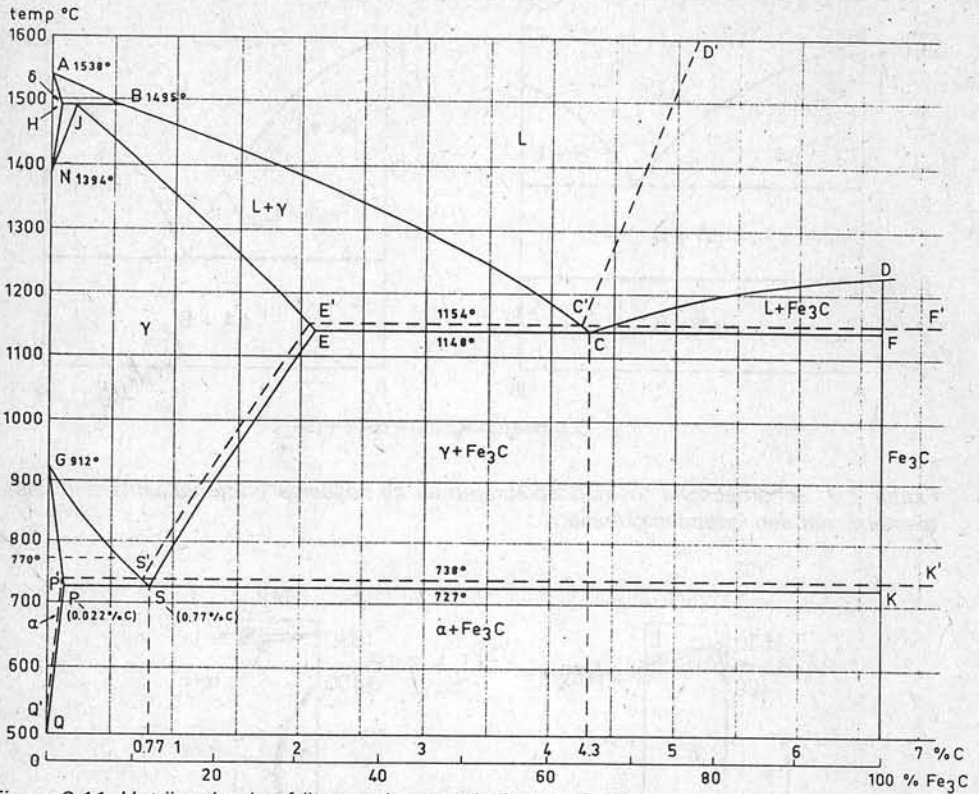


Figuur 3.9. Schematische toestandsdiagrammen bij volledige onmengbaarheid in vaste toestand met een fasetransformatie.

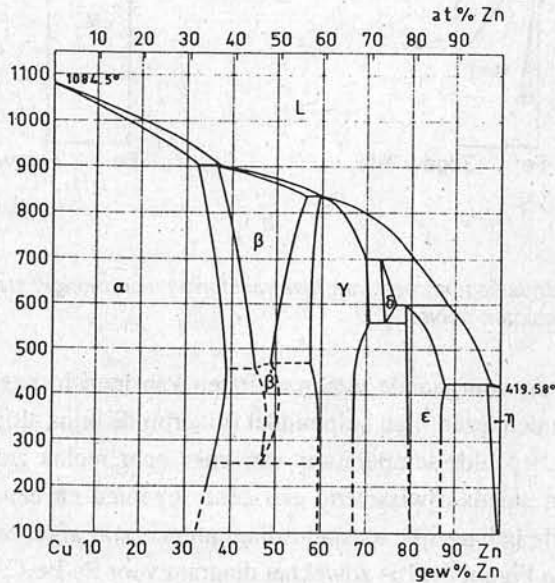


Figuur 3.10. Toestandsdiagrammen met fasetransformatie in mengkristallen. a. Fe-Ni: open gebied; b. Fe-Cr: gesloten gebied.

Met behulp van de voorgaande uiteenzettingen kan men in beginsel alle binaire toestandsdiagrammen lezen. Een hulpmiddel is hierbij de bijna altijd opgaande regel, dat men bij een bepaalde temperatuur van links naar rechts gaand in een binair toestandsdiagram steeds afwisselend een éénfasegebied en een tweefasegebied tegenkomt. Enkele belangrijke toestandsdiagrammen zijn afgebeeld in Figuur 3.11 en Figuur 3.12. In Figuur 3.11 is zowel het diagram voor Fe-Fe₃C (getrokken lijnen) als het diagram voor Fe-C (streeplijnen voor zover niet samenvallend met de getrokken lijnen) weergegeven.



Figuur 3.11. Het ijzer-koolstofdigram (toestandsdiagram Fe-C).



Figuur 3.12. Toestandsdiagram Cu-Zn.

Vraag 3.9 Gaat de hulpregel op voor de tot nu toe gegeven toestandsdiagrammen?

Vraag 3.10 Bij een bepaalde temperatuur heeft een binaire legering van A en B twee fasen α en β . Verandert de verhouding tussen de hoeveelheden van α en β als het gehalte aan B in deze legering toeneemt?

3.4. Samengestelde kunststoffen

3.4.1. Polymeer-polymeermengsels

In tegenstelling tot de metalen is moleculaire mengbaarheid zeldzaam onder amorphe polymeren; onder kristalliserende polymeren komt deze in het geheel niet voor. Het enige systeem met volledige mengbaarheid dat praktisch wordt toegepast, is het systeem PPO + PS (bekend als Noryl van General Electric). PPO (= polyfenyleen-oxyde) heeft een hoge T_g , een hoge prijs en is moeilijk verwerkbaar; PS (= polystyreen) heeft een veel lagere T_g en is goedkoop. Een legering van PPO en PS heeft één T_g , met een waarde die ligt tussen die van de samenstellende componenten, afhankelijk van de samenstelling: het gehalte PPO (of het gehalte PS) van de legering. De waarde voor T_g daalt evenredig met het volumepercentage PS.

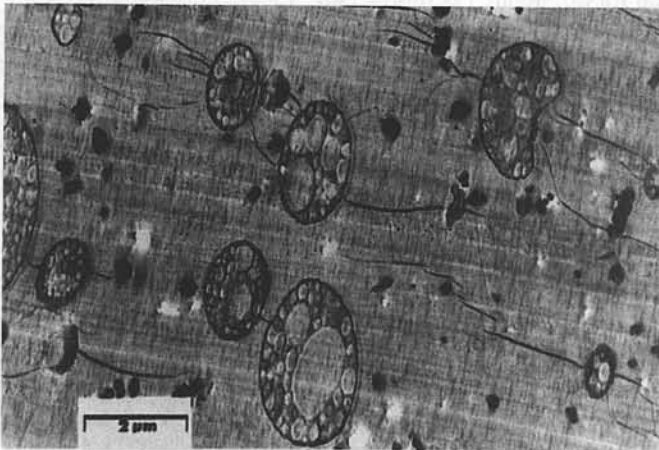
De meeste polymeer-polymeerp paren zijn dus onmengbaar. Het gevolg is dat bij menging een dispersie ontstaat, dat wil zeggen een fijne verdeling (maar niet op moleculaire schaal!) van het ene polymeer in het andere. Het polymeer dat in de kleinste concentratie aanwezig is, vormt meestal de gedispergeerde fase. Het andere polymeer is dan de continue fase of matrix. De fysische eigenschappen van de beide componenten blijven in zo'n dispersie meestal behouden: zo vertoont een dergelijk mengsel twee waarden voor T_g .

Evenals bij sommige metaallegeringen kunnen de mechanische eigenschappen van een polymeer verbeterd worden door een tweede, onmengbare polymeerfase te introduceren. Voorwaarde is wel, dat er een goed contact, een goede verankering is tussen de gedispergeerde fase en de matrix. In dat geval is het geheel beter dan de som der delen, een betere term dan polymeermengsel is daarom het half-Engelse woord *polymeerblend*. De samenstelling van polymeermengsels wordt meestal uitgedrukt in volumeverhoudingen. Het grote voordeel van polymeerblends is dat nieuwe polymeermaterialen eenvoudig kunnen worden ontwikkeld: door uit te gaan van bestaande polymeren, waardoor de lange weg van de ontwikkeling van een nieuw basispolymeer wordt vermeden.

Een al vrij oude en bekende polymeerblend is *slagvast polystyreen* (HIPS = High Impact Polystyrene). Polystyreen is hard en bros. Door het dispergeren van rubberbolletjes (meestal butadieenrubber) in het polystyreen neemt de slagvastheid

aanzienlijk toe. Door hun visco-elastisch karakter zijn de rubberdeeltjes in staat schokken op te vangen, ook lopen macro- en microscheuren vast op de rubberbolletjes. In Figuur 3.13 zijn de twee fasen te onderscheiden. Analoog aan slagvast polystyreen bestaan er ook slagvaste modificaties van andere polymeren zoals PP, PVC en PA.

Een geforceerde methode om twee onmengbare polymeren toch tot moleculair contact te brengen, is het maken van een copolymeer (zie §2.4.2). Deze methode wordt bij sommige slagvaste polystyrenen ook toegepast, styreen en butadieen worden dan gecopolymeriseerd. Deze copolymeren hebben een T_g , die ligt tussen die van de twee samenstellende polymeren. Ook hier is de verandering in T_g evenredig met de volumeverhouding.



Figuur 3.13. Bolletjes butadieenrubber in een matrix van polystyreen.

3.4.2. Mengsels van polymeren met niet-polymeren; composieten

Zeer veelvuldig worden andere stoffen aan polymeren toegevoegd. Men zegt dan ook vaak: kunststoffen zijn polymeren plus additieven. Deze additieven kunnen onderverdeeld worden in hulpstoffen en vulstoffen.

Hulpstoffen past men toe om de verwerking tot eindproduct te vergemakkelijken of om de fysische en mechanische eigenschappen te veranderen of te verbeteren. Voorbeelden van hulpstoffen zijn: glijmiddelen om de verwerkbaarheid door extrusie (van bijvoorbeeld hard PVC) mogelijk te maken, stabilisatoren tegen degradatie door lucht of licht, vlamvertragers, kleurstoffen. Een overzicht van hulpstoffen voor polymeren geeft Tabel 3.2. De hoeveelheden van deze toevoegingen zijn meestal klein: tussen tienden van procenten en enkele procenten.

Tabel 3.2. Hulpstoffen in polymeren.

| <i>hulpstof</i> | <i>functie</i> |
|-----------------|-------------------------------------------------------|
| glijmiddel | vergemakkelijkt transport in de verwerking |
| anti-oxydant | bescherming tegen oxydatie door zuurstof uit de lucht |
| UV-stabilisator | bescherming tegen UV-straling uit het zonlicht |
| antistaticum | voorkomt elektrostatische oplading |
| pigment | kleurstof |
| vlamvertrager | brandwerend middel |
| weekmaker | maakt polymeer flexibeler, verlaagt E-modulus |

Vulstoffen worden in grotere gehalten toegevoegd, tot percentages van circa 60 vol%. Een kunststof bestaande uit een polymeer plus een hoeveelheid vulstof van minstens 40 vol% wordt een composiet genoemd. De redenen voor het innemen van vulstoffen kunnen zeer verschillend zijn: verhoging van de E-modulus, sterkte en verwekingstemperatuur, vermindering van de krimp bij de vormgeving en verlaging van de kostprijs. Voorbeelden van vulstoffen zijn: houtmeel, roet, koolstofvezels, glaspoeder, glasvezels, krijt, kwartsmeel, molybdeensulfide, diverse metaaloxiden. Een overzicht van de effecten van verschillende vulstoffen wordt gegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Veel voorkomende vulstoffen en hun functie.

| <i>vulstof</i> | <i>effect</i> |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| vezels (glas, aramide of koolstof) | verbetering mechanische eigenschappen |
| kwarts 石英 | verbetering mechanische eigenschappen |
| mica | verbetering mechanische eigenschappen |
| krijt | kostprijsverlaging |
| talk | kostprijsverlaging |
| houtmeel | kostprijsverlaging |
| roet | verbeteren weerstand tegen slijtage van rubber, UV-stabilisator |
| weekmakers | verlaging T_g , verlaging elasticiteitsmodulus |
| blaasmiddelen | schuimvorming |

In veel gevallen is de vulstof in de composiet aanwezig in de vorm van nagenoeg bolvormige deeltjes. De invloed op de mechanische eigenschappen uit zich dan voornamelijk in een verhoging van de E-modulus. De sterkte wordt in het algemeen nauwelijks beïnvloed. Vrijwel altijd zien we een afname van de breukrek en dikwijls een geringe verlaging van treksterkte en slagsterkte (zie §4.5.2.6).

Een voorbeeld van een deeltjes-versterkt polymeer is rubber met roet. Roet als vulmiddel verhoogt de weerstand tegen slijtage van rubber in zeer grote mate. Voor 1920 was de gunstige werking van roet onbekend; met andere, minder effectieve vulmiddelen was de autoband na 8000 km versleten. Dankzij de inneming van roet

is de maximale gebruiksafstand van de gemiddelde autoband tegenwoordig tien maal zo groot.

De deeltjes van het vulmiddel zijn niet altijd bolvormig. Ook kubusjes (zand), plaatjes (talk, mica) en vezels komen voor. De versterkende werking van niet bolvormige vulmiddelen is over het algemeen groter dan die van bolvormige, omdat het specifieke oppervlak (verhouding oppervlak/volume) groter is.

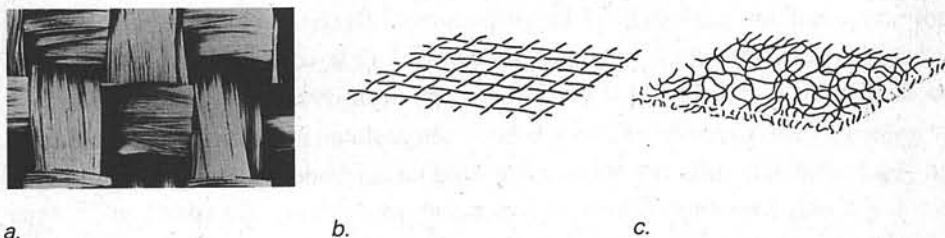
Vezelversterkte kunststoffen

Belangrijke composietmaterialen zijn de vezelversterkte kunststoffen. Vezelvormige deeltjes, vooral lange dunne, hebben een zeer groot specifiek oppervlak vergeleken met bolvormige deeltjes. Vezelvormige deeltjes zijn daarom effectiever voor het verhogen van de E-modulus. Ook de sterkte wordt in positieve zin beïnvloed.

Er zijn composieten met lange en met korte vezels. De korte vezels zijn typisch enkele millimeters lang en hebben een diameter in de orde van 10 μm . Composieten met korte glasvezels zijn er van vrijwel alle thermoplastische polymeren. Een nadeel van vezelversterkte thermoplasten is dat bij de verwerking, zoals door extrusie, nogal wat vezelbreuk optreedt. Composieten met lange vezels zijn daarom overwegend opgebouwd met thermoharders. Het is bovendien aanzienlijk gemakkelijker om vezelbundels, matten en weefsels te impregneren met een laag-moleculaire, dus betrekkelijk goed vloeiende hars, dan met een hoogvisceus vloeibare thermoplastische polymeer. Als thermoharders komen vooral polyesters (UP) en epoxy-harsen in aanmerking. Als vezelmateriaal wordt hoofdzakelijk glas gebruikt (GVK = glasvezelversterkte kunststof); daarnaast, voor hoogwaardige toepassingen, ook moderne vezels als koolstof en aramide, soms ook in combinatie met elkaar. Glasvezels worden met name toegepast omdat ze goedkoop zijn, terwijl de E-modulus en de treksterkte van glas aanzienlijk hoger zijn dan die van polymeren. De glaswapening in thermoharders is meestal gestructureerd, de vezels kunnen op de volgende manieren gerangschikt zijn (zie ook Figuur 3.14):

- i. in strengen 1
- ii. in weefsels die uit strengen of uit getwijnde garens zijn opgebouwd 2
- iii. in matten 3

In het eerste geval wordt een versterking in één richting verkregen, in de richting van de strengen. Bij weefsels treedt het effect van de wapening in twee richtingen op. In matten zijn de weefsels willekeurig in drie richtingen georiënteerd. Het gevolg van deze willekeurige verdeling is dat enerzijds de versterking driedimensionaal is, maar dat anderzijds de versterking per richting kleiner is dan bij de eerste twee gevallen.



Figuur 3.14. Structuren in glasgevulde composieten: a. geweven glasstrengen; b. glasweefsel; c. glasmat.

Glasvezels in polymeren versterken slechts als de hechting tussen glas en polymeer optimaal is. Meestal is het nodig om het glas te behandelen met een hechtingsmiddel. Omdat glas hygroscopisch is, kan er water van buitenaf langs de glasvezels in de composiet naar binnen dringen. Dit water kan de hechting tussen glas en polymeer teniet doen. Om dit te voorkomen zorgt men ervoor dat de vezels niet door het oppervlak van het product steken door het aanbrengen van een buitenlaag van zuiver polymeer (Engels: 'gel-coat').

Vrij recent zijn methoden ontwikkeld om ook thermoplasten met lange vezels te wapenen. Een veelbelovende techniek is het polymeer in vezelvorm (bijvoorbeeld PP-vezels) en glasvezels samen te weven, waarna door temperatuur- en drukverhoging in een pers de composiet tot stand komt.

Schuimen

Een bijzondere vulstof voor polymeren is gas, meestal in de vorm van lucht. Het verkregen product heeft een luchtige structuur en wordt schuim genoemd. Schuimen worden in grote hoeveelheden toegepast als verpakkingsmateriaal, voor demping, als kussenmateriaal, voor thermische en geluidsisolatie. Ze worden vervaardigd van zowel thermoplasten als thermoharders en rubbers. De eigenschappen van een kunststofschuim hangen niet alleen af van het polymeer waarvan ze gemaakt zijn, maar ook van de afmetingen, de vorm, de hoeveelheid en de mate van openheid van de holten. De dichtheid van de verkregen kunststof kan variëren van die van het oorspronkelijke polymeer tot één die een factor 200 kleiner is.

Het oudst bekende opgeschuimde polymeer was natuurrubber waarin lucht werd geklopt. Tegenwoordig wordt voor het verkrijgen van een schuim een blaasmiddel toegepast dat, meestal door verhitting, gas produceert binnenin het polymeer. Afhankelijk van het schuimprocédé heeft het geproduceerde schuim open of gesloten cellen. In een open celstructuur diffundeert het gevormde gas snel naar buiten en wordt vervangen door lucht. In een gesloten celstructuur duurt dit vervangingsproces veel en veel langer. De polymeren die het meest in schuimen worden toegepast zijn de polyurethanen. Deze leveren een breed scala aan mogelijkheden, variërend van stijve blokken met gesloten cellen voor thermische isolatie tot flexibele, open

celtypes voor de productie van kussens en matrassen. Een ander bekend schuim is polystyreenschuim, beter bekend als 'piepschuim', dat een open celstructuur heeft. Producten vervaardigd uit schuimen hebben een hoge verhouding tussen de buigstijfheid en de dichtheid. Dit is vooral het geval in *structuurschuimen* (of *integraalschuimen*). Deze structuurschuimen hebben een gesloten buitenhuid, de kern bestaat uit geschuimd materiaal. Soms bestaat de huid uit een ander polymeer, maar meestal wordt één polymeer voor binnen- en buitenkant gebruikt; de huid komt dan tot stand doordat gedurende het vormgevingsproces het gas door verwarming uit de buitenhuid verdreven wordt.

4

Enkele belangrijke materialen

Na bestudering van dit hoofdstuk kan de student:

1. Een overzicht van de belangrijke metalen en kunststoffen opstellen
2. Globale waarden voor belangrijke eigenschappen, zoals *E*-modulus, relatieve dichtheid, corrosievastheid en sterkte aangeven
3. Indelingen maken van ijzer en staal, van aluminiumlegeringen, van koperlegeringen, van magnesium-legeringen, van thermoplasten, van thermoharders en van elastomeren
4. Voor elk van de materiaalklassen globaal de relatie leggen tussen structuur en eigenschappen

4.1. Een overzicht

De variatie aan beschikbare materialen in de moderne samenleving is ontstellend groot. Deze grote variatie is de reden, dat in dit hoofdstuk lang niet alle voor de Industrieel Ontwerper beschikbare materialen genoemd worden. Toch is het van belang een overzicht te krijgen van de beschikbare materialen. Omdat materialen stoffen zijn die worden toegepast in produkten, wordt het krijgen van een dergelijk overzicht vergemakkelijkt door te denken aan produkten en na te gaan welke materialen in deze produkten voorkomen. Vervolgens kan men onderzoeken in welke classificatie men deze materialen kan indelen. Het schema van deze gedachtengang kan men vinden in Tabel 4.1. Ook bij glas en keramiek zijn de structuur, de verwerking en de eigenschappen van een produkt nauw met elkaar verbonden. Helaas vallen zij buiten de opzet van dit boek. Gelukkig is de wereld van de metalen en de kunststoffen ruim genoeg voor een introductie in de Materiaalkunde.

Tabel 4.1. *Materiaalclassificatie.*

| <i>produkt</i> | <i>dagelijkse materiaalbenaming</i> | <i>classificatie</i> |
|-------------------|-------------------------------------|----------------------|
| theekopje | porselein | keramiek |
| laboratoriumbeker | pyrex | glas |
| sigarendoosje | blik | metaal |
| vliegtuig | aluminium | metaal |
| fietsband | rubber | kunststof |

De metalen en de kunststoffen zijn tot heden gangbare materialen. Slechts indien aan de functie-eisen van een bepaald produkt niet voldaan kan worden via metalen of kunststoffen, zullen andere stoffen in aanmerking komen. De wijn is drinkbaar dankzij het glas, en daarom is een wijnglas van glas gemaakt en niet van kunststof of metaal. Een indeling van metalen en kunststoffen is gegeven in Tabel 4.2. Voor het krijgen van een overzicht is het handig te beschikken over enkele karakteristieken van de hier genoemde materialen. Van deze karakteristieken kan men gebruik maken bij het onderscheiden ervan. Zo kan bijvoorbeeld met een zakmagneet bekeken worden of een metaal magnetisch is. Naast deze karakteristieken zullen ook, waar mogelijk, enige typische toepassingen genoemd worden. De beschrijving van deze karakteristieken zal uiteraard globaal zijn.

Metalen

Metalen glimmen vooral na polijsten, maar veel metalen bedekken zich in aanraking met lucht met een oxydel laag waardoor ze dof schijnen. De eede metalen blijven echter glimmen. Metalen zijn meestal onbrandbaar. Metalen zijn zwaar in vergelijking met kunststoffen en metalen voelen meestal koud aan. Metalen zijn sterk, hebben een hoge smeltemperatuur en geleiden goed warmte en elektrische stroom.

Ferro-Metalen

IJzer en staal

IJzer en staal roesten in aanraking met lucht en water net zo lang door tot er een gat in valt. IJzerroest is roestbruin. IJzer en staal zijn zwaar, magnetisch en sterk. Staal komt voor als buis, als U-, I- en L-profielen, als plaat, heel dik voor de bouw van schepen, dun voor de bouw van koelkasten en auto's en heel dun voor sigarendoosjes en drankblikjes. Platen en profielen van staal kunnen vaak gemakkelijk gelast worden. Staal is goedkoop. Beitels, waterpomptangen, steeksleutels en matrijzen voor de verwerking van kunststoffen zijn van staal. Betonijzer voor gewapend beton is een speciaal soort staal. Roestvast staal is roestvast gemaakt door te legeren met chroom (minimaal ongeveer 13 gew% Cr). Het is dan magnetisch. Niet-magnetisch roestvast staal bevat ook nog nikkel (ongeveer 18 gew% Cr en ongeveer 10 gew% Ni).

Gietijzer

Gietijzer roest bijna niet, ook niet in aanraking met lucht en water. Putdeksels zijn van gietijzer en de vroegere wandelpier op Scheveningen was van gietijzer. Allerlei grillige vormen kunnen in gietijzer gegoten worden: de lantaarnpalen op de Markt in Delft, de metro-uitgangen in Parijs, Rembrandt op zijn plein in Amsterdam. Gietijzer verdraagt nauwelijks trekspanningen, maar des te beter drukspanningen: de pilaren van de overkapping van station Den Haag Hollandsch Spoor. Bij overbelasting op trek breken veel gietijzersoorten bros.

Tabel 4.2. Gangbare constructiematerialen.

| | | | | |
|-------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| ferro metalen | | koolstofstaal gelegeerd staal gietijzer gietstaal | | |
| non-ferro metalen | lichte metalen | aluminium + legeringen magnesium + legeringen titaan + legeringen | | |
| | zware metalen | koper + legeringen zink + legeringen nikkel + legeringen wolfram + legeringen | | |
| kunststoffen | thermoplasten | PVC PE PP PS PMMA PTFE NYLONS PETP PPE PC | | |
| | | thermoharders | fenolharsen UF AF polyesters epoxies | |
| | | | rubbers | natuurrubber SBR EPDM PUR siliconrubbers styreenbutadieen-blokcopolymeer |
| | | | | schuimen |
| | | composieten | | |

Gietstaal

Staal heeft een veel hogere smeltemperatuur dan gietijzer. Gietstaal is dus veel moeilijker te gieten dan gietijzer. Ingewikkelde hoog op sterkte belaste onderdelen, meestal voor kapitaalgoederen, worden van gietstaal vervaardigd. Als zodanig is gietstaal niet zeer interessant voor de industrieel ontwerper.

Non-Ferro Metalen

Aluminiumlegeringen

Aluminiumlegeringen zijn licht, roesten niet, maar kunnen slecht tegen soda. Ze zijn niet zo licht als kunststoffen, maar veel lichter dan staal. Aluminiumlegeringen zijn niet magnetisch. Ze hebben onmiskenbaar de kleur van aluminiumverf, maar de legeringen met veel silicium zijn veel grijzer dan de andere legeringen. De meeste aluminiumlegeringen zijn niet zo sterk als staal. Een produkt van een aluminiumlegering is veel slapper dan hetzelfde produkt van staal. Aluminiumlegeringen zijn meestal duurder dan staallegeringen in vergelijkbare toepassingen. Technisch zuiver aluminium is nog makkelijker te vervormen dan technisch zuiver ijzer. Aluminiumlegeringen smelten bij veel lagere temperaturen dan staal en gietijzer.

Magnesiumlegeringen

Magnesiumlegeringen zijn nog lichter dan aluminiumlegeringen. Ze oxyderen bijna niet, maar ze oxyderen wel steeds verder, hoewel in droge lucht onmerkbaar langzaam. Ze zijn lastig plastisch te vervormen bij gewone temperaturen, zodat ze veel in gietstukken verwerkt worden. De bewerking met beitels gaat makkelijk, maar levert uiterst brandbare spanen op!

Titaanlegeringen

Titaanlegeringen zijn lichter dan ijzer en staal, maar niet zo licht als aluminiumlegeringen. Ze roesten niet, blijven glimmen als ze eenmaal gepolijst zijn en hebben een uitmuntende weerstand tegen allerlei agressieve milieus. Ze kunnen net zo sterk zijn als vele staalsoorten, maar ze geven aan een constructie niet de hoge stijfheid die een staalsoort aan dezelfde constructie met dezelfde afmetingen zou geven, echter wel hoger dan een aluminiumlegering. De verhoudingen tussen de rekgrens, de elasticiteitsmodulus en de dichtheid zijn bij titaanlegeringen zeer gunstig. De vervormbaarheid van plaat van titaanlegeringen is niet erg hoog.

Koperlegeringen

Ongelegeerd koper is excellent voor de geleiding van elektriciteit en warmte. Het kan goed bij gewone temperaturen vervormd worden. Het wordt dan zo sterk als gewoon staal. Gepolijst koper glimt bijna als goud. Koper aan de lucht blootgesteld wordt groen, zie Hugo de Groot op de Markt in Delft. De legeringen van koper en zink heten messing (Engels: brass) en zijn geel. De legeringen van koper en tin heten brons en worden in het gebruik bruinrood. Stuivers zijn geslagen uit brons. De koperlegeringen bezitten een goede weerstand tegen de aantasting door (zee)water; ze zijn niet magnetisch.

Zinklegeringen

Zinklegeringen smelten bij zeer lage temperaturen, en zijn gesmolten zeer dun vloeibaar; daarom zijn ze zo gemakkelijk te gieten: dinky toys en modeltreinlocomo-

tieven. Ze zijn goed bestand tegen regenwater. Zinkplaat kan gemakkelijk tot plaat vervormd worden: zinken dakgoten en regenpijpen. Staal wordt vaak voorzien van een Zn-laag: verzinken. De ouderwetse vuilnisemmers en de verzinkt stalen portalen van de bovenleiding van de spoorwegen gaan echt lang mee.

Nikkel- en wolframlegeringen

Nikkellegeringen zijn vrij goed bij gewone temperaturen te vervormen, ze zijn relatief edel: chemisch weinig reactief. Daarom worden nikkellegeringen als muntmetaal gebruikt (dubbeltje, kwartje, gulden, rijksdaalder). Wolframlegeringen hebben een zeer hoog smeltpunt en een grote weerstand tegen de geleiding van elektriciteit. De gloeidraden in gloeilampen zijn van wolfram.

Goud- en zilverlegeringen

Goud en zilverlegeringen hebben een uitstekende weerstand tegen allerlei chemische milieus. Zij hebben lage weerstand tegen de geleiding van elektriciteit. Elektrische contacten in allerlei elektronische apparatuur zijn van goud- en zilverlegeringen. Ook sieraden worden veelvuldig van goud- en zilverlegeringen gemaakt. Bij kamertemperatuur vertonen de meeste goud- en zilverlegeringen een uitstekende vervormbaarheid, wat bij het maken van sieraden gemakkelijk is. De kleur van goudlegeringen wordt sterk bepaald door de legeringssamenstelling: roder door meer koper, witter door meer nikkel of palladium.

Kunststoffen

Kunststoffen zijn licht, sommige drijven zelfs op water; ze zijn in elk geval lichter dan metalen. Kunststoffen glimmen niet erg, sommige zijn doorzichtig en ze kunnen door toevoeging van pigmenten gekleurd worden. Kunststoffen kunnen niet tegen hitte. Vele verliezen hun vorm bij temperatuurverhoging. In aanraking met lucht en water blijven kunststoffen bij normale temperaturen onveranderd. Kunststoffen kunnen branden en geven bij verbranding roet en gassen af. Kunststoffen worden verdeeld in drie grote groepen: *thermoplasten*, *thermoharders* en *elastomeren* of *rubbers*. In §4.4 worden de karakteristieken van afzonderlijke kunststoffen gegeven.

Thermoplasten

Thermoplasten bestaan uit lange ketenmoleculen. Ze worden bij temperatuurverhoging min of meer vloeibaar waardoor ze gespuitsgiet kunnen worden. Ze nemen bij afkoeling weer de vaste vorm aan, waarin ze toegepast worden.

Thermoharders

Thermoharders bestaan uit netwerken die zeer nauwmazig zijn. Deze netwerken worden gevormd tijdens de vormgeving door een chemische reactie tussen de uitgangskomponenten, het prepolymer en de harder. Een eenmaal gevormd product verweert niet meer bij temperatuurverhoging, vandaar de naam thermoharder.

Rubbers

Bij de rubbers is eveneens sprake van een netwerk in het vormgegeven produkt. Dit netwerk is evenwel veel ijler dan bij de thermoharders. Rubbers bestaan uit lange ketenmoleculen, zoals thermoplasten, maar om te voorkomen dat deze stoffen onder een mechanische belasting gaan vloeien, zijn de rubberketens lokaal chemisch met elkaar verbonden, verknoopt. Deze verknoping heet vulcaniseren en werd oorspronkelijk verzorgd door zwavelatomen (een uitvinding van Goodyear, in de eerste helft van de 19de eeuw). Tegenwoordig worden ook andere vulcaniseermiddelen toegepast.

4.2. IJzer, staal, gietijzer en gelegeerd staal

4.2.1. De kracht van ijzer, staal en gietijzer

In de wereld van de verbeelding spelen materialen een grote rol. Er zijn mensen eerlijker als goud, de Neanderthalers leefden in het Stenen Tijdperk en het Verenigd Koninkrijk had in de jaren 80 een IJzeren Dame als Eerste Minister die naar het scheen stalen zenuwen had.

IJzer en staal vormen sinds het verstrijken van de Bronstijd het fundament van de technologische ontwikkeling. Ondanks de betekenis die materialen als kunststoffen, aluminium en zijn legeringen en keramiek voor de maatschappij hebben, zijn staal en gietijzer de dragende materialen voor de moderne wereld. Daarnaast moet bedacht worden, dat stoffen als kunststoffen, aluminium en zijn legeringen, en keramiek niet gewonnen en verwerkt kunnen worden zonder de beschikbaarheid van stalen gereedschappen en werktuigen. Met andere woorden, hun ontwikkeling berust op de beschikbaarheid van staal en gietijzer.

Staal en gietijzer zijn legeringen van ijzer en koolstof. Zij vertonen een enorme variatie in eigenschappen. Zij kunnen zowel via de vloeibare fase als door warm- en kouddeformatie in een grote variëteit aan vormen worden gebracht. Door warmtebehandeling kunnen de ijzer-koolstof legeringen een groot bereik aan sterkte vertonen. Bovendien zijn de meeste ijzer-koolstof-legeringen goedkoop. Er zijn eigenlijk maar twee nadelen: de relatieve dichtheid, dat is de dichtheid ten opzichte van water, van de ijzer-koolstof legeringen is hoog (circa 7,9; vergelijk aluminium 2,7 en een kunststof als polyethen 0,9) en, helaas, de meeste ijzer-koolstof-legeringen roesten. Toch zijn door de goede eigenschappen de ijzer-koolstof-legeringen de meest toegepaste legeringen in onze dagelijkse omgeving.

Het aantal ijzer-koolstof-legeringen is groot. Voor een verantwoorde keuze is begrip van het verband tussen samenstelling, warmtebehandeling, structuur en eigenschappen noodzakelijk. De variatie in eigenschappen kan geïllustreerd worden met de

hardheid. Deze kan voor ijzer-koolstoflegeringen uiteenlopen van 80 HV tot 1000 HV. Bovendien kan de hardheid variëren binnen één produkt. Een eenvoudige timmermansvijl is hiervan een voorbeeld: de vijltanden zijn aanmerkelijk harder dan het hart van de vijl.

IJzer is het op drie na meest voorkomende element in de aardkorst. Bij het huidige gebruik zijn de bekende voorraden nog genoeg voor twee eeuwen. IJzer vraagt relatief weinig energie om vrijgemaakt te worden uit zijn ertsen: 54 MJ per kg ijzer te vergelijken met 180 MJ per kg aluminium, 108 MJ per kg koper, 415 MJ per kg magnesium en 500 MJ per kg titaan. IJzer, staal en gietijzer zijn dus in het algemeen aanmerkelijk goedkoper dan de non-ferro metalen.

IJzer, staal en gietijzer zijn zo vertrouwd, dat het niet nodig lijkt deze termen nader te definiëren. Het metaal dat via de reductie van ijzerertsen met koolstof verkregen wordt (meestal in de hoogoven), heet ruwijzer en bevat circa 4 gew% koolstof, circa 1 gew% mangaan en circa 1 gew% silicium. Gietijzer bevat minimaal 2 gew% koolstof, maar gewoonlijk circa 4 gew% en staal heeft een koolstofgehalte kleiner dan 2 gew%.

staal $\leq 2\%$ gew

4.2.2. IJzer

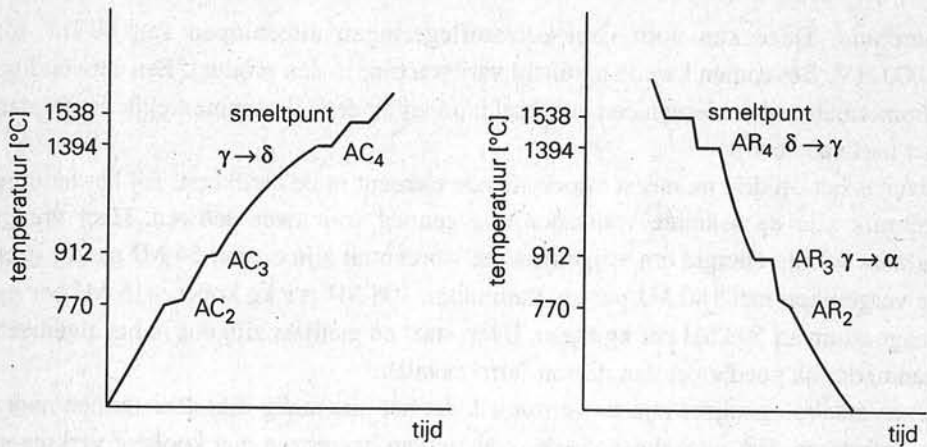
Zuiver ijzer is een zacht, goed vervormbaar metaal met bij kamertemperatuur een treksterkte van circa 200 MPa en een breukrek van meer dan 40%. De hardheid bedraagt circa 100 HV en de 0,2%-rekgrens is circa 100 MPa. Deze eigenschappen hangen sterk af van de zuiverheid van het ijzer. Kleine hoeveelheden onzuiverheden, zoals stikstof, zuurstof, koolstof en fosfor veroorzaken grote spreidingen in deze waarden. Ook de korrelgrootte beïnvloedt deze waarden.

Bij atmosferische druk en temperaturen beneden 912 °C heeft ijzer het krg/bcc-rooster: men spreekt van α -ijzer (α -Fe). Tijdens verwarming verandert bij 912 °C het kristalrooster en krijgt ijzer het kvg/fcc-rooster: men spreekt van γ -ijzer (γ -Fe). Bij doorgaande verwarming verandert het kristalrooster bij 1394 °C opnieuw: ijzer krijgt dan weer het krg/bcc-rooster. Het ijzer boven deze temperatuur wordt δ -ijzer (δ -Fe) genoemd. Het smeltpunt bij atmosferische druk ligt bij 1538 °C. Bij opwarming (Chauffage) en afkoeling (Refroidissement) treedt bij het passeren van deze overgangspunten een warmte-effect op, waardoor de temperatuur tijdelijk constant blijft: een Arrêt vertoont. Overeenkomstig zijn de overgangspunten genummerd in Figuur 4.1.

De overgang A_1 komt alleen voor bij ijzer-koolstof-legeringen (zie de bespreking van het ijzer-koolstof diagram). De overgang A_2 (770 °C) is de overgang van magnetisch ijzer naar niet-magnetisch ijzer: het Curiepunt. IJzer met het kvg/fcc-rooster is nooit magnetisch.

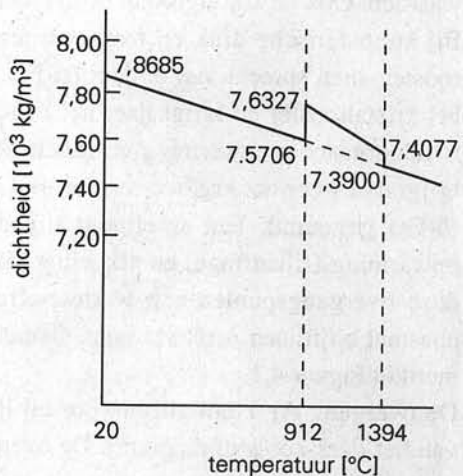
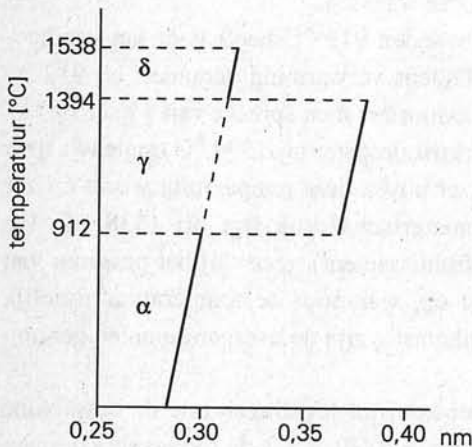
$\alpha = \text{bcc}$
 < 912
 $\gamma = \text{fcc}$
 > 912
 $\delta = \text{bcc}$
 > 1394

2



Figuur 4.1. Opwarm- en afkoelkrommen van ijzer.

Bij A₃ en A₄ ondergaan belangrijke fysische eigenschappen, zoals dichtheid, uitzettingscoëfficiënt en geleidingsvermogen, een plotselinge verandering. Zeer belangrijk is ook dat in γ -Fe de oplosbaarheid van koolstof veel groter is dan in α -Fe. In essentie berust hierop de mogelijkheid de eigenschappen van ijzer-koolstof legeringen te verbeteren door warmtebehandeling. In Figuur 4.2 en Figuur 4.3 worden de roosterparameters van ijzer en de dichtheid van ijzer uitgezet als functie van de temperatuur. De lijnen voor α -Fe geven door verlenging de lijnen voor δ -Fe; α -Fe is in feite gelijk aan δ -Fe. Tabel 4.3 geeft een overzicht van enkele belangrijke fysische eigenschappen van ijzer.



Figuur 4.2. Roosterconstanten van de kristalroosters van ijzer als functie van de temperatuur.

Figuur 4.3. Dichtheid van ijzer als functie van de temperatuur.

*hoger temp
=> lager dichtheid*

2. De driefasenlijn waarop L in evenwicht is met austeniet en cementiet of grafiet (1148 °C). Voor het metastabiele diagram wordt het evenwicht voorgesteld door: $L \leftrightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$. Het eutecticum, zie punt C in het diagram heet het *ledeburiet-eutecticum*. Voor het stabiele diagram wordt het evenwicht voorgesteld door: $L \leftrightarrow \gamma + \text{grafiet}$.
3. De driefasenlijn waarop austeniet in evenwicht is met ferriet en cementiet (727 °C). Het evenwicht wordt voorgesteld door: $\gamma \leftrightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$. Uit de homogene austenietfase (de γ -fase) ontstaat bij punt S in het diagram een *euctoïde*: uit een vaste fase scheiden zich twee andere vaste fasen af. Het euctoïde heet *perliet*. Dit punt wordt ook vaak het perlieteutecticum genoemd.

Er is in het ijzer-koolstof diagram een samenstellingsgrens aan te geven tussen legeringen met en zonder de eutectische reactie tijdens stolling: deze grens ligt bij ongeveer 2 gew% C. Voor de ijzer-koolstof legeringen met minder dan 2 gew% C geldt bijna altijd het ijzer-cementiet diagram; deze worden staal genoemd. Voor de ijzer-koolstof legeringen met meer dan 2 gew% C geldt meestal het ijzer-grafiet diagram; deze worden gietijzer genoemd.

Zoals blijkt uit Figuur 3.11 ontleedt bij een voldoende langzame afkoeling de austeniet met een koolstofgehalte van 0,77 gew% in ferriet met slechts 0,02 gew% C en cementiet met 6,67 gew% C. Deze reactie verloopt bij 727 °C. Bij verdergaande langzame afkoeling scheidt zich uit de ferriet nog enig Fe_3C af. De afgescheiden cementiet is onder deze omstandigheden bolvormig. Bij een wat versnelde afkoeling worden bij de euctoïdische reactie lagen van ferriet en cementiet afgescheiden. Er worden vertakte lagen van cementiet gevormd en de ferriet vult de ruimten tussen de vertakkingen op. Deze lagenstructuur heet perliet.

De euctoïdische samenstelling ligt bij 0,77 gew% C. Staal met een koolstofgehalte lager dan deze waarde wordt *onderperlitisch* staal genoemd; staal met een koolstofgehalte hoger dan dit gehalte wordt *bovenperlitisch* staal genoemd. Een onderperlitische ijzer-koolstof legering zal bij langzame afkoeling uit het austeniet-gebied ferriet gaan vormen, zodra de temperatuur lager is dan die van het snijpunt van de samenstellingslijn met de lijn GS in het ijzer-koolstof diagram (zie Figuur 3.11). Deze ferriet vormt zich op de austeniet-korrelgrenzen. De temperatuur van het snijpunt heet de A_3 -temperatuur. Bij 727 °C gaat de resterende austeniet over in ferriet en cementiet; deze overgangstemperatuur wordt de A_1 -temperatuur genoemd. In een bovenperlitische ijzer-koolstof legering vormt zich bij afkoelen vanaf het passeren van de lijn ES cementiet; de bijbehorende overgangstemperatuur wordt A_{cm} genoemd.

Koolstof in staal kan zowel interstitieel opgelost als in de vorm van metaalcarbide, zoals Fe_3C , aanwezig zijn. Staal komt voor als kneedlegering (bijvoorbeeld gewalst of gesmeed), of als gietlegering of als sinterlegering. Men onderscheidt *ongelegerde* en *gelegerde* staalsoorten. Ongelegerd staal bevat naast koolstof niet meer

dan de volgende gehalten van de volgende elementen:

Si: 0,7 gew% Mn: 1,6 gew% Al: 0,3 gew% Cu: 0,4 gew%

Daarnaast bevat staal in het algemeen nog als onzuiverheden: P, S, N. Deze onzuiverheden kunnen de kwaliteit van het staal nadelig beïnvloeden. Naar de gehalten van deze onzuiverheden worden staalsoorten in kwaliteitsklassen ingedeeld. Tabel 4.5 geeft enkele typen ongelegeerd staal met bijbehorende eigenschappen.

Tabel 4.5. Eigenschappen en typische toepassingen van ongelegeerde koolstofstaalsoorten.

| koolstofgehalte (gew%) | algemene beschrijving | typische toepassingen |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0,01 - 0,1 | zacht, taai, lasbaar, niet hardbaar door afschrikken hoge koudvervormbaarheid | koudvervorming: sigarendoosjes, limonadeblikjes |
| 0,1 - 0,25 | sterk, taai, lasbaar, koudvervormbaar niet hardbaar door afschrikken | autocarrosseriën, algemeen technisch gebruik als profielen, buizen en assen |
| 0,25 - 0,6 | sterk, hardbaar door afschrikken niet lasbaar | smeedstukken als zuigerstangen, krukassen |
| 0,6 - 0,9 | sterk, hardbaar door afschrikken niet lasbaar | als sterkte belangrijker is dan taaiheid, bijvoorbeeld gereedschappen, maar ook pianosnaren |
| 0,9 - 2,0 | slijtvast, zeer hard ten koste van taaiheid en vervormbaarheid niet lasbaar | snijgereedschap, zoals vijlen, beitels en zaagbladen |

Handwritten note on the left side of the table: niet lasbaar (with a bracket pointing to the 0,1 - 0,25 and 0,25 - 0,6 rows)

4.2.3.1. De structuur van staal bij normale afkoeling uit het austenietgebied

Stalsoorten met minder dan 2 gew% C vormen tot in het austenietgebied een homogene interstitiële oplossing van koolstof in ijzer. De C-atomen bevinden zich dan in de octaederholten van het kvg/fcc-rooster. Er zijn evenveel octaederholten als Fe-atomen.

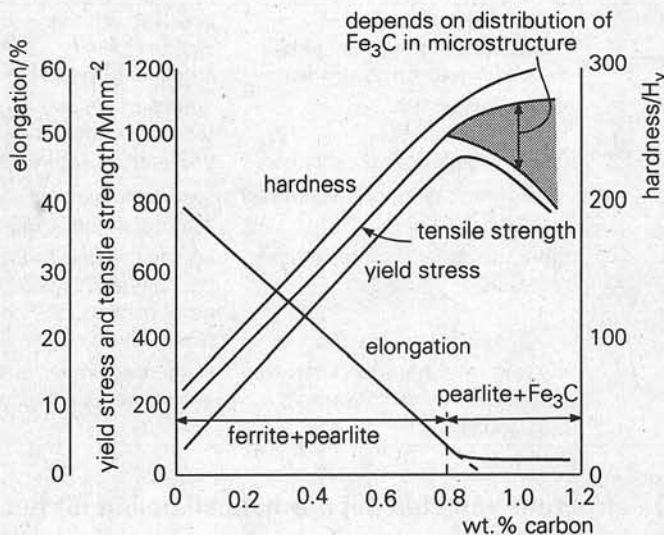
Vraag 4.1 *Laat in een berekening zien, dat nooit meer dan ongeveer één tiende van de beschikbare octaederholten bezet is met C-atomen.*

In de ferriet (krg/bcc-rooster) is koolstof veel minder goed oplosbaar dan in austeniet, doordat de beschikbare holten kleiner zijn. Bij afkoeling van austeniet tot beneden de A_1 -temperatuur zal er dus een scheiding tussen ijzer en koolstof op moeten treden. Bij deze scheiding ontstaan ferriet en cementiet. Bij het austeniteren, dat is verwarmen tot in het austenietgebied, treedt het omgekeerde op: cementiet wordt ontleed en koolstof gaat in de austeniet in oplossing.

De microstructuren die na normale afkoeling in lucht vanuit het austenietgebied

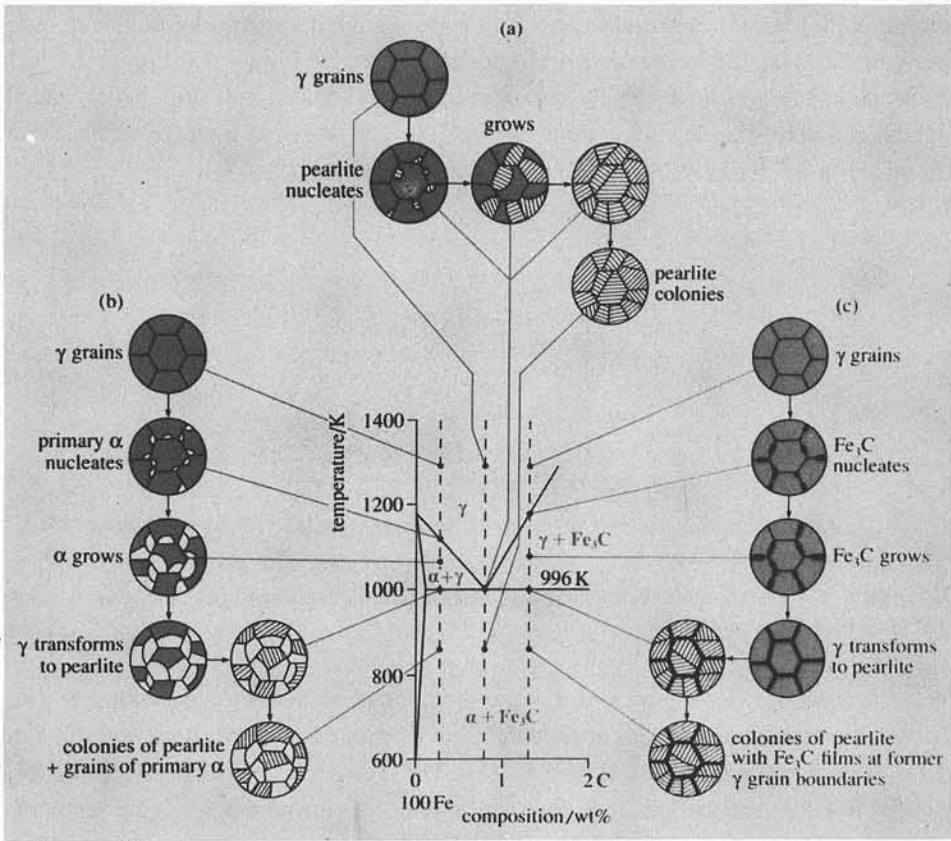
verkregen worden, hangen uiteraard af van het koolstofgehalte van de betreffende staalsoort. De hiervoor aangegeven warmtebehandeling – austeniteren gevolgd door afkoeling in rustige lucht – wordt *normaal gloeien* genoemd.

Figuur 4.4 geeft de waarden bij kamertemperatuur van enkele mechanische eigenschappen als functie van het koolstofgehalte in gew% voor normaal gegloeid ongelegeerd koolstof staal (Engels: 'plain carbon steel'). De verandering van eigenschappen hangt samen met het toenemende gehalte aan cementiet bij stijgend koolstofgehalte van ongelegeerd staal. Cementiet is hard en bros; verhoging van het cementietgehalte betekent een toename van de sterkte en een daling van de vervormbaarheid van het staal.

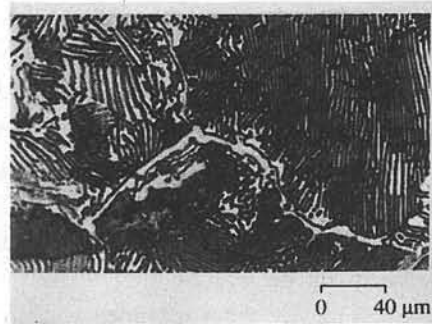
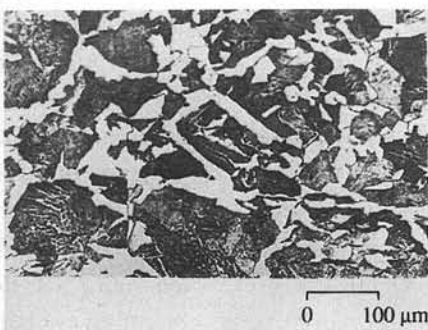


Figuur 4.4. Mechanische eigenschappen van normaalgegloeid ongelegeerd koolstofstaal als functie van het koolstofgehalte (Ref. 7).

Figuur 4.5 geeft een beeld van de afhankelijkheid van de microstructuur van het koolstofgehalte en van de temperatuur. In Figuur 4.5a wordt de ontwikkeling van de microstructuur van een ijzer-koolstof-legering met de eutectoïdische samenstelling gegeven. De analoge ontwikkeling voor het onderperlitisch staal is gegeven in Figuur 4.5b en voor het bovenperlitisch staal in Figuur 4.5c. Hierbij wordt aangekend dat het normaal gloeien van bovenperlitische staalsoorten gebeurt in een temperatuurgebied van 30-50 °C boven de A_1 -temperatuur (zie ook §4.2.3.2). De verkregen structuurbeelden van onder- en bovenperlitisch staal worden getoond in Figuur 4.6a en Figuur 4.6b.



Figuur 4.5. Microstructuren tijdens langzame afkoeling vanuit het austenietgebied (Ref. 7).



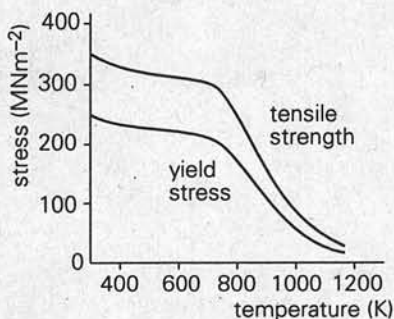
(a)

(b)

Figuur 4.6. Microstructuren van onder- en bovenperlitisch staal na afkoeling vanuit het austenietgebied (Ref. 7).

In normaalgegloeid onderperlitisch staal is cementiet aanwezig als platen in de lamellaire perliet. De eigenschappen van de perliet worden in hoge mate bepaald door de cementiet en steken scherp af tegen de zachte en taai ferriet. Zo zeer zelfs,

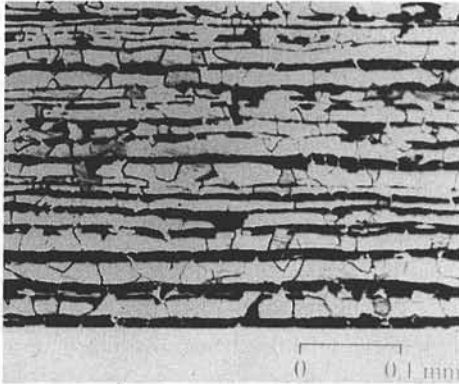
dat de perliet bijna beschouwd kan worden als een apart structuurbestanddeel. Hoe meer perliet dus, hoe sterker de betreffende staalsoort, zie Figuur 4.4. Figuur 4.7 laat zien hoe enkele mechanische eigenschappen bij een bepaald koolstofgehalte veranderen als functie van de temperatuur. Boven 500 °C dalen deze waarden scherp. Van dit verschijnsel maakt men gebruik bij de vormgeving van staal.



Figuur 4.7. Temperatuurafhankelijkheid van treksterkte en rekgrens voor 0,15 gew% koolstofstaal (Ref. 7).

Warmdeformatie wordt gewoonlijk uitgevoerd als de staalsoorten austenitisch zijn. Uit het toestandsdiagram valt af te leiden, dat de minimumtemperatuur waarbij een 0,15 gew% C-staal austenitisch is, 870 °C is. Dit is ongeveer de temperatuur waarbij in Figuur 4.7 de treksterkte sterk daalt. In de praktijk past men nog hogere temperaturen toe (tot ongeveer 1300 °C), omdat dan de benodigde vervormingskrachten kleiner zijn.

We hebben gezien, dat de in de praktijk voorkomende staalsoorten verontreinigingen bevatten. Direct na stolling van het staal liggen de verontreinigingen als een netwerk rond de kristallieten. Door de warmvervorming wordt dit netwerk verbroken en worden de verontreinigingen als gevolg van de richting van de vervorming, bijvoorbeeld bij warmwalsen, in bepaalde banen evenwijdig aan de walsrichting gebracht. Er ontstaat een *vezelstructuur* (zie Figuur 4.8). Deze vezelstructuur is er de oorzaak van dat de eigenschappen, met name de vervormingseigenschappen, van de warmvervormde staalsoort niet in alle richtingen gelijk zijn. Zo is bijvoorbeeld de rek loodrecht op de walsrichting vrijwel altijd ongelijk aan die evenwijdig aan de walsrichting. De eigenschappen vertonen *anisotropie*. Deze vezelvorming is uitermate lastig te vermijden.



Figuur 4.8. Vezelstructuur in koolstofstaal als gevolg van warmvervorming (Ref. 7).

4.2.3.2 Gloeien van ongelegeerd staal

Herstelgloeien beneden de eutectoïdische temperatuur

De staalsoorten met minder dan 0,2 gew% C vormen het grootste gedeelte van de totale staalproductie. Hun hoge breukrek is belangrijk wegens de daarmee samenhangende goede vervormbaarheid, ook bij kamertemperatuur: kouddeformatie. Ze worden ook wel 'zacht staal' genoemd. Het zal duidelijk zijn, dat de kouddeformatie niet onbeperkt kan worden voortgezet. Voor het gedeeltelijk herstel van de vervormingsmogelijkheden na kouddeformatie en voor de vermindering van restspanningen kan men het staal herstel- of spanningsarm gloeien. Dit wordt uitgevoerd bij temperaturen beneden de eutectoïdische temperatuur: bij circa 550 °C.

Voor de staalsoorten met dergelijke lage koolstofgehalten heeft het herstelgloeien verschillende voordelen. Het bespaart energiekosten in vergelijking met het normaalgloeien. Er treden geen transformaties op bij het afkoelen, zie §4.2.3.4 en Figuur 3.11. Het herstelgloeien wordt meestal uitgevoerd onder de rekristallisatietemperatuur van ferriet, omdat anders het gevaar bestaat voor excessieve korrelgroei na kleine kouddeformatie. Het voornaamste doel van het herstelgloeien is dus het verminderen van spanningen, ontstaan door verspaning, lassen of kleine koudvervormingen. Herstelgloeien heeft gewoonlijk geen effect op de microstructuur van de gegloeide staalsoort.

Rekristalliserend gloeien beneden de eutectoïdische temperatuur

Hierbij gloeit men bij een hogere temperatuur, zodanig dat volledige rekristallisatie van de ferriet mogelijk is. Een volledige rekristallisatie van zowel de ferriet als de perliet treedt in de praktijk meestal niet op, maar het grootste gedeelte van de vermindering van de sterkte kan samenhangen met de ferrietrekristallisatie (zie Tabel 4.6: de grootste daling van de treksterkte treedt op bij de verhoging van de gloei-temperatuur van 600 naar 650 °C, en niet bij de verhoging van 650 naar 750 °C).

Tabel 4.6 .Rekristallisatie van 90% koudgewalst koolstofstaal met 0,09 gew% C, gloeitijd 1 uur.

| | | | | | | | |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| gloeitemperatuur (°C) | 20 | 400 | 550 | 600 | 650 | 750 | 950 |
| treksterkte (MPa) | 860 | 850 | 760 | 640 | 420 | 390 | 360 |
| breukrek (%) | 5 | 9 | 13 | 22 | 28 | 31 | 32 |

Normaalgloeien en zachtgloeien

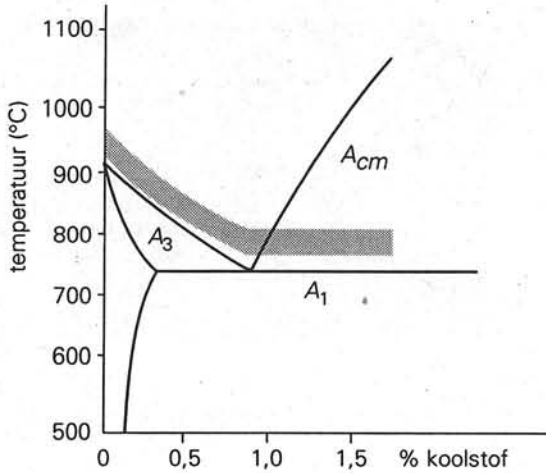
Een rekristallisatie is bij staal altijd mogelijk door het staal te verhitten boven de austeniteertemperatuur. Dit is belangrijk voor staal, dat niet onderhevig is geweest aan kouddeformatie, zoals gietwerk en smeedwerk. De hiermee te bereiken korrelverfijning berust op het passeren van de $(\alpha + \gamma)/\gamma$ grens in het toestandsdiagram en de aanwezigheid van de cementiet. Rekristallisatie als gevolg van een structuuromzetting is dus niet mogelijk in vele andere constructiemetalen, zoals aluminiumlegeringen, omdat dergelijke fase-overgangen in deze legeringen niet voorkomen.

Normaalgloeien

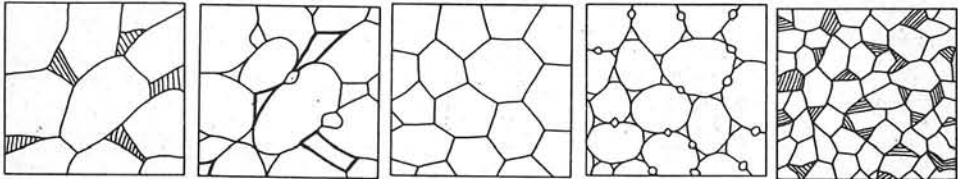
Hierbij gloeit men op een temperatuur 30-50 °C boven de A_3 -temperatuur, gevolgd door afkoelen in rustige lucht (zie §4.2.3.1). Bij bovenperlitisch staal gloeit men 30-50 °C boven de A_1 -temperatuur. Zie Figuur 4.9. Bij deze gloeiing treedt korrelverfijning op (zie Figuur 4.10). Bij een beperkte austeniteertijd resulteert dit na afkoeling aan lucht in een fijnkorrelige lamellaire perlietstructuur, die karakteristiek, *normaal* voor de betreffende staalsoort is. Een typerende microstructuur is gegeven in Figuur 4.11. *Alle* door andere wamtebehandelingen, lassen of koudvervorming veroorzaakte structuurveranderingen kunnen door normaalgloeien opgeheven worden. Bovenperlitische staalsoorten worden niet vaak normaalgegloeid, omdat de te bereiken structuurverbetering betrekkelijk klein is. Om een homogene austenietfase te krijgen zou bij temperaturen boven de lijn E-S gegloeid moeten worden, waardoor ongewenste korrelgroei optreedt.

Zachtgloeien

Zachtgloeien is gloeien juist beneden de A_1 -temperatuur. Hierbij krijgt het staal de laagst mogelijke hardheid; de microstructuur van staal met de laagst mogelijke hardheid vertoont bolvormige cementiet in ferriet. Alle staalsoorten, ook de hooggelegeerde staalsoorten, hebben de laagste hardheid bij een microstructuur van bolvormige (globulaire) carbiden in een ferritische matrix. De laagste hardheid geeft de beste vervormbaarheid bij de niet-verspanende bewerkingen: kouddeformaties zoals buigen, dieptrekken en koudwalsen. Voor verspanende bewerkingen (alle bewerkingen met beitels of zagen) is ook de bewerkbaarheid in de zachtgegloeide toestand het best, behalve voor ongelegeerde staalsoorten met een koolstofgehalte van minder dan 0,5 gew%. Die staalsoorten zijn gewoon te zacht: de spanen vervormen sterk: ze smeren, en dat geeft een ruw oppervlak. Hieruit volgt de volgende regel voor het gloeien vòòr verspanende bewerkingen van ongelegeerde staalsoorten:



Figuur 4.9. Normaalgloeitemperatuur aangegeven in het Fe-C diagram.



Original structure of equiaxed ferrite crystals and pearlite

Heating into γ region causes nucleation of γ crystals at pearlite colonies and at triple points, leading to

equiaxed crystals of γ . Provided the temperature is not too high, these new crystals will not grow

Cooling back into ferrite regions nucleates new crystals at triple points and along boundaries; sometimes also near centre of γ crystals

Final cooling through eutectoid completes transformation of γ crystals, but structure of ferrite and pearlite is now much finer than original

Figuur 4.10. Korrelverfijning van een ferriet + perliet structuur als gevolg van een dubbele fasetransformatie (Ref. 7).

koolstofgehalte minder dan 0,5 gew%: *normaalgloeien*

koolstofgehalte meer dan 0,5 gew%: *zachtgloeien*

Voor de kouddeformatie is verplaatsing nodig van dislocaties. De lamellaire carbiden in de perliet belemmeren deze dislocatiebeweging sterker dan de globulaire carbiden in de ferritische matrix. De hardheid, de treksterkte en de rekgrens van zachtgloeid staal liggen dus lager dan die van normaalgloeid staal (zie Tabel 4.7).



Figuur 4.11. Karakteristieke structuur van een normaalgegloeid 0,2 gew% C-staal (Ref. 3).

Tabel 4.7. Hardheid, treksterkte en rekgrens voor normaalgegloeid en zachtgegloeid ongelegeerd 0,4 gew% C-staal.

| | carbiden | hardheid (HV) | treksterkte (MPa) | rekgrens (MPa) |
|------------------|---------------------------------------|---------------|-------------------|----------------|
| normaal-gegloeid | in perliet, lamellair | 201 | 700 | 350 |
| zacht-gegloeid | in ferrietische grondmassa, globulair | 155 | 550 | 280 |

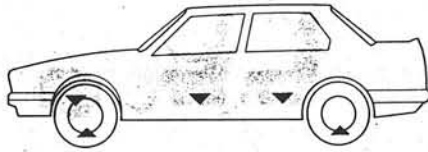
Het zachtgloeien berust op de vermindering van oppervlakte-energie die verkregen kan worden door de overgang van lamellaire cementiet in de perliet naar globulaire cementiet: de bolvorm heeft immers een kleiner oppervlak dan de plaatvorm bij hetzelfde volume. Voor deze omvorming in ongelegeerd koolstofstaal is slechts interstitiële koolstofdifusie nodig. In gelegeerde staalsoorten treft men ook carbiden aan van de legeringselementen zoals vanadium of chroom. Voor de globularisatie van deze carbiden is ook de diffusie nodig van substitusionele elementen. Aangezien de diffusie van substitusionele elementen veel langer duurt dan die van interstitiële elementen, duurt het zachtgloeien van gelegeerd staal veel langer dan van ongelegeerd koolstofstaal. De diffusiesnelheid in de ferriet is het hoogst vlak onder de A_1 -temperatuur. Men neemt gewoonlijk voor ongelegeerd staal 680-710 °C en de zachtgloeitijd is dan tussen 5-10 uur.

Vraag 4.2 *Waarom voert men het zachtgloeien niet uit bij temperaturen in het austenietgebied?*

4.2.3.3. Staal voor Carrosserieën

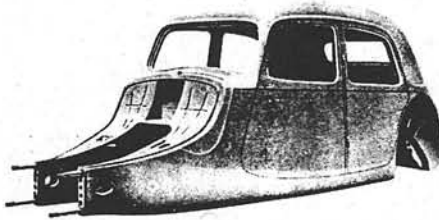
De opbouw van een auto moet voldoen aan enkele functie-eisen (het hierna volgende voorbeeld is ontleend aan Ref. 7). Welke zijn deze? De opbouw moet stijf en sterk zijn om

de passagiers en hun bagage, alsmede de noodzakelijke onderdelen van de auto (motor, versnellingsbak en overbrenging) te dragen en te beschermen bij temperaturen tussen -50 en $+50$ °C en een relatieve vochtigheid tussen 0 en 100%. Het materiaal moet er aantrekkelijk uitzien, ook na blootstelling aan zonlicht en pekewater, geschikt zijn voor massaproductie en zo goedkoop en zo licht mogelijk zijn. In stilstand wordt de auto vooral op buigende momenten belast (zie Figuur 4.12). In beweging komen daar de krachten bij ten gevolge van de verschillende versnellingen waaraan de auto onderhevig is. De gehele opbouw dient elastisch op deze krachten te reageren, zonder dat de optredende vervormingen al te groot zijn.



Figuur 4.12. Belangrijke krachten die werken op het chassis van een auto (Ref. 7).

Tot in de jaren 30 was de opbouw van een automobiel gebaseerd op een chassis met daarop bevestigd het koetswerk. In 1934 introduceerde Citroën de eerste zelfdragende carrosserie (zie Figuur 4.13). Met een relatief vrij eenvoudige beschouwing is in te zien, dat de zelfdragende carrosserie veel stijver is dan de constructie met een chassis.



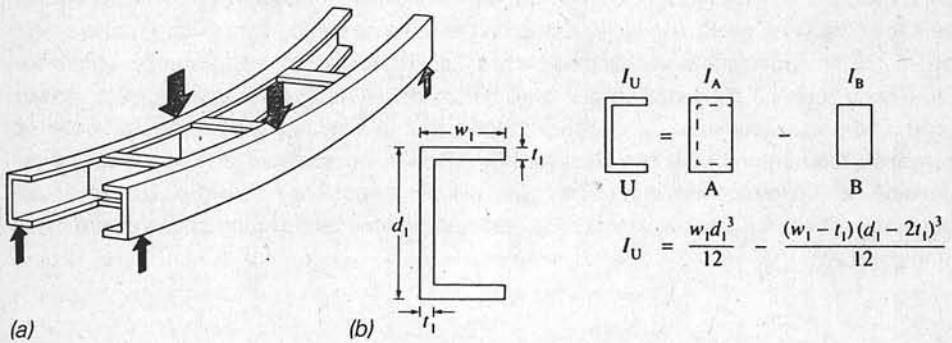
Figuur 4.13. Zelfdragende carrosserie bedacht door Citroën (Ref. 7).

Voor de kromtestraal R van een op buiging belaste ligger met buigend moment M geldt de buigingsformule:

$$R = \frac{EI}{M} \quad (4.1)$$

met E = E-modulus en I = lineair traagheidsmoment van de doorsnede ten opzichte van de neutrale lijn. Voor twee verschillende doorsneden belast met hetzelfde buigende moment en met dezelfde waarde van de E wordt dus de verhouding van de kromtestralen gegeven door:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{I_1}{I_2} \quad (4.2)$$



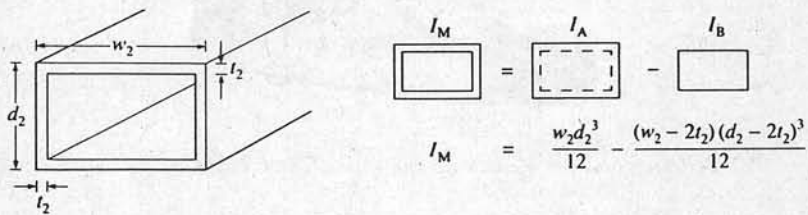
Figuur 4.14. a. Model van een autochassis en de buigingsgeometrie. b. U-profiel dwarsdoorsnede en het lineaire traagheidsmoment (Ref. 7).

Veronderstel dat het chassis bestaat uit twee U-balken (zie Figuur 4.14). Het lineaire traagheidsmoment voor deze constructie wordt gegeven door $I_U = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$ voor $d_1 = 100 \text{ mm}$, $w_1 = 30 \text{ mm}$ en $t_1 = 8 \text{ mm}$. Stel dat de verbindingstukken niet bijdragen tot de stijfheid, dan wordt het lineaire traagheidsmoment voor het chassis gegeven door:

$$I_{ch} = 2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Stel dat de zelfdragende carrosserie voorgesteld kan worden door een rechthoekige holle balk (zie Figuur 4.15) met $w_2 = 1,5 \text{ m}$, $d_2 = 1,2 \text{ m}$ en $t_2 = 0,4 \text{ mm}$, dan wordt het lineaire traagheidsmoment van deze balk gegeven door:

$$I_{car} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$



Figuur 4.15. Holle balk en het lineaire traagheidsmoment (Ref. 7)

De verhouding van de kromtestralen wordt dus:

$$R_{car}/R_{ch} = I_{car}/I_{ch} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 / 2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4 = 200$$

De balkconstructie is dus ongeveer 200 keer zo stijf als de chassisconstructie.

Welke staalsoort kan nu worden gebruikt voor deze zelfdragende carrosserie? Het antwoord op deze vraag kan worden gevonden via enkele kwalitatieve overwegingen. Het te gebruiken staal moet goed koudvervormbaar zijn, het moet goedkoop zijn, het moet lasbaar zijn en het moet te gebruiken zijn in het te verwachten temperatuurgebied, het moet

bovendien gemakkelijk voorzien kunnen worden van een mooi uiterlijk. Er is geen staalsoort of een ander materiaal die, c.q. dat aan alle eisen tegelijk voldoet. In het algemeen kan gezegd worden dat gelegeerde staalsoorten duurder zijn dan ongelegeerde koolstofstaalsoorten. We hebben gezien dat cementiet de sterkte verhoogt. Daardoor is een staalsoort met meer cementiet ook moeilijker te verwerken: grotere krachten zijn nodig om een bepaalde vervorming tot stand te brengen. Ook de lasbaarheid wordt door een hoog koolstof(cementiet)-gehalte ongunstig beïnvloed door het optreden van hardingsverschijnselen in en naast de las (zie §4.2.3.4). Als voorlopige conclusie van deze kwalitatieve overwegingen kan gezegd worden, dat een ongelegeerd koolstofstaal met een laag koolstofgehalte een goede keus lijkt als materiaal voor de zelfdragende carrosserie van een auto. In de praktijk past men inderdaad zacht ongelegeerd staal met een koolstofgehalte van minder dan 0,1 gew% toe.

4.2.3.4. Harden van staal

Sommige stalen voorwerpen zijn harder dan andere. Bekende voorbeelden uit de praktijk zijn de naalden van de naaimachine en de hamer van de timmerman. Hoe worden deze verhoogde hardheden verkregen? Het antwoord ligt in de overgang van austeniet naar ferriet en de rol van de koolstofatomen bij deze overgang. In deze paragraaf wordt slechts het begin van het antwoord gegeven.

De tot nu toe behandelde microstructuren van ongelegeerd staal ontstaan bij een langzame afkoeling in rustige lucht. De afkoelsnelheid kan men echter belangrijk verhogen door de gegloeide voorwerpen af te koelen in snel stromende lucht of onder te dompelen in een vloeistof, meestal water; de laatste behandeling heet *afschrikken*.

Bij een langzame afkoeling verloopt de overgang van austeniet naar ferriet en cementiet door een langzaam proces van kiemvorming en -groei dat onder andere beheerst wordt door de diffusiesnelheid van de C-atomen die moeten worden herverdeeld, eerst in vaste oplossing in de austeniet, later gebonden aan ijzer in cementiet. De omzettingen kunnen praktisch alleen maar verlopen bij een voldoende grote onderkoeling, zoals water ook alleen maar kan bevriezen bij temperaturen beneden 0 °C. Deze onderkoeling wordt groter, naarmate de afkoelsnelheid vanaf temperaturen in het austenietgebied groter is.

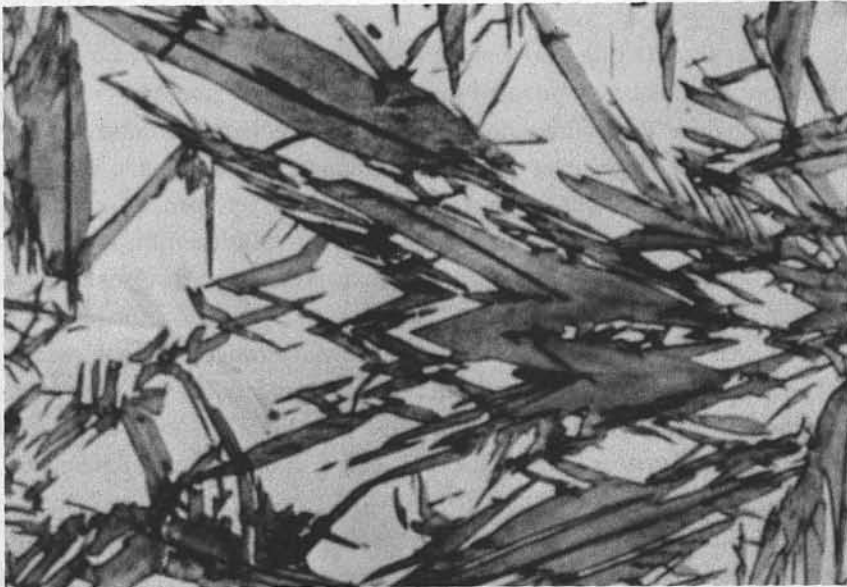
De bij deze grotere afkoelsnelheden optredende omzettingen kunnen niet meer beschreven worden met het ijzer-cementiet diagram omdat dit geldt voor metastabiele situaties. In Tabel 4.8 wordt de omzetting bij afkoeling vanuit het austenietgebied van een ongelegeerd staal met 0,45 gew% C in afhankelijkheid van de toegepaste afkoelsnelheid aangeduid.

Bij zeer snel afkoelen wordt martensiet gevormd. Dit ziet er in de microscopische doorsnede uit als naalden (zie Figuur 4.16). In werkelijkheid zijn de martensietkorrels plaatvormig. De vormingssnelheid van deze platen is zeer groot. De vormingstijd is minder dan 10^{-7} seconden. De vorming van martensiet is dus diffusieloos. De martensietvorming is een *omklapproces*: door kleine atoomverplaatsingen

Tabel 4.8. Afkoelsnelheid en microstructuur voor ongelegeerd 0,45 gew% C-staal.

| afkoelsnelheid | microstructuur |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| langzaam | ongeveer evenveel ferriet als perliet perliet heeft een grote afstand tussen de cementietlamellen (= lamelafstand) ferrietkorrelgrootte: groot grootte perlietgebieden: groot |
| stijgend | meer perliet, minder ferriet kleinere ferrietkorrels en perlietgebieden kleinere lamelafstanden |
| groot | uitsluitend zeer fijne perliet afzonderlijke lamelafstand met lichtmicroscop niet meer waar te nemen naam van deze microstructuur: <i>TROOSTIET</i> |
| zeer groot = afschrikken | volledige onderdrukking van de perlietvorming fijne naalden naam van deze microstructuur: <i>MARTENSJET</i> , zie Figuur 4.16 |

gaat het rooster van de austeniet over in dat van de martensiet. Diffusieloze fase-transformaties komen ook voor bij andere metalen met een overgangspunt; bijvoorbeeld: titaan en kobalt. Zij heten martensitische omzettingen.

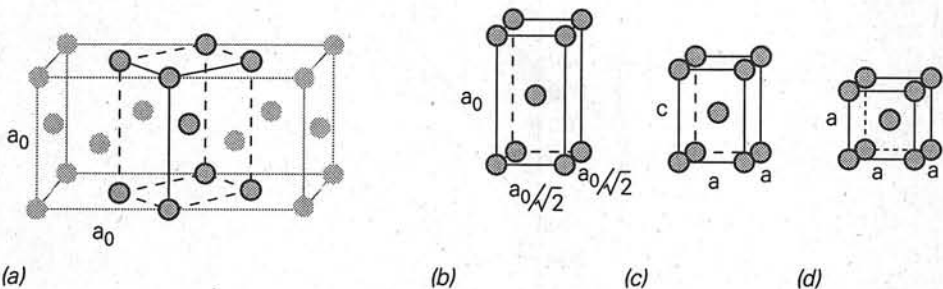


Figuur 4.16. Martensietstructuur als gevolg van afschrikken; martensiet is aanwezig in de vorm van platen; in de doorsnede geeft dit een naaldvorm (Ref. 3).

Martensitische omzettingen hebben de volgende kenmerken:

1. Het zijn transformaties van kristalroosters; zij kunnen dus alleen optreden in de vaste toestand.
2. Zij zijn diffusieloos; de samenstelling van de gevormde fase is gelijk aan die van de oorspronkelijke fase.
3. De hoeveelheid omgezette vaste stof is vrijwel tijdsafhankelijk.
4. De hoeveelheid omgezette vaste stof is voor een gegeven preparaat uitsluitend afhankelijk van de temperatuur (= onderkoeling) waarbij de omzetting plaatsvindt.

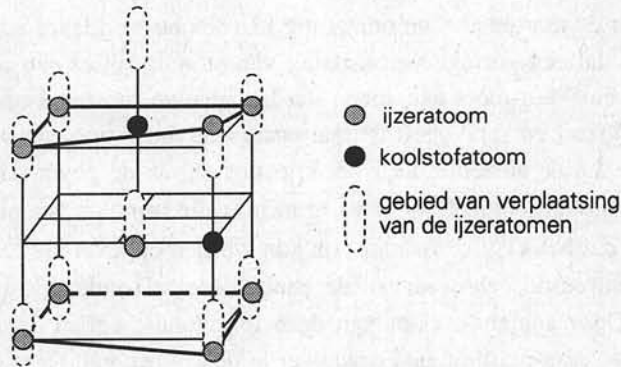
De snelheid van de martensitische omzetting kan slechts verklaard worden door te veronderstellen dat een geringe verplaatsing van atoomposities een nieuw kristalrooster kan geven. Men moet aannemen dat het nieuwe rooster reeds in het oude aanwezig is. Bij ijzer en staal geeft de martensitische omzetting een omzetting van het kvg-rooster van de austeniet naar het krg-rooster van de gevormde martensiet. Figuur 4.17 toont dat de omzetting van kvg naar krg in principe mogelijk is. Figuur 4.17a laat zien, dat het kvg/fcc rooster ook kan worden opgevat als een tetragonale ruimtelijk gecentreerde cel, waarvan de eenheidscel afzonderlijk gegeven is in Figuur 4.17b. Door samendrukken van deze tetragonale cel in de z-richting en uitrekken in de x- en y-richting gaat deze over in de krg/bcc-cel. Deze transformatie heet de Bain-transformatie en is in de eerste plaats bedoeld als een gedachtenexperiment om de principiële mogelijkheid van een dergelijke roostertransformatie te tonen.



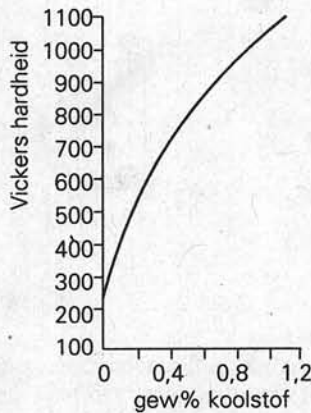
Figuur 4.17. Verband tussen krg/bcc- en kvg/fcc-rooster (Bain-transformatie). Het kvg-rooster (a) kan worden opgevat als tetragonaal ruimtelijk gecentreerd (a en b), dat door samendrukking in de z-richting en uitrekken in de x- en y-richtingen overgaat in het krg-rooster (c en d).

De in werkelijkheid optredende martensiettransformaties zijn ingewikkelder, bij staal onder meer door de aanwezigheid van de koolstofatomen. De oplosbaarheid van koolstof in ferriet met het krg-rooster is laag in vergelijking met die in austeniet, doordat de interstiële holten in het ferrietrooster veel kleiner zijn dan de afmetingen

van de C-atomen. Bij de martensitische omzettingen kan geen diffusie optreden en de C-atomen zijn dus gedwongen in oververzadigde oplossing te blijven in de martensiet. Dit kan alleen door het ferrirooster van de martensiet sterk te vervormen, waardoor de eenheidscel van de pas omgezette martensiet enigszins tetragonaal is (zie Figuur 4.18). De koolstofatomen in sterk oververzadigde oplossing aanwezig in de omgezette martensiet, geven aanleiding tot grote inwendige spanningen, wat de hoofdoorzaak van de grote hardheid van martensiet is. Hoe groter het gehalte aan de in oververzadiging aanwezige koolstofatomen is, hoe groter de hardheid van de gevormde martensiet is (zie Figuur 4.19).



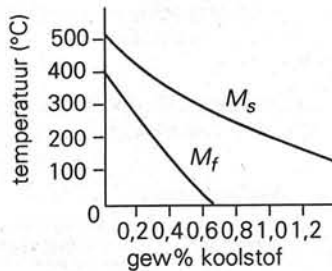
Figuur 4.18. Verplaatsing van de ijzeratomen in de z-richting van het krg-rooster door de aanwezigheid van koolstofatomen.



Figuur 4.19. De hardheid van martensiet als functie van het koolstofgehalte.

De hoeveelheid martensietomzetting wordt in hoofdzaak bepaald door de onderkoeling. De temperatuur waarbij de martensietomzetting start – M_s -temperatuur – en waarbij deze eindigt – M_f -temperatuur – hangt af van het koolstofgehalte. Hoe meer

C-atomen aanwezig zijn, hoe moeilijker de martensietomzetting kan plaatsvinden, ergo hoe groter de onderkoeling nodig voor het omklappen (zie Figuur 4.20). In analogie hiermee geldt in eerste benadering, dat hoe hoger het C-gehalte is, hoe lager de afkoelsnelheid kan zijn waarbij martensietvorming optreedt. Beneden een bepaald C-gehalte treedt in technische werkstukken van ongelegeerd staal geen martensietvorming op. Deze grens ligt bij circa 0,2 gew% C; de ongelegeerde constructiestaalsoorten met een C-gehalte $< 0,2$ gew% zijn dus niet hardbaar (zie ook Ref. 3). Bij hogere C-gehalten loopt de martensietomzetting bij afkoeling tot kamertemperatuur niet geheel af en blijft *restausteniet* over.

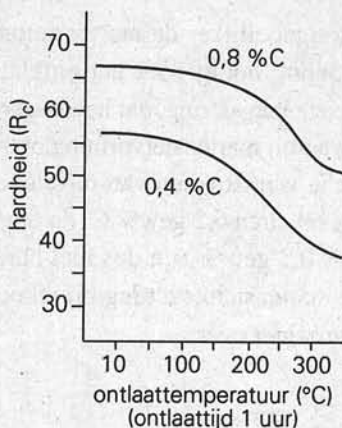


Figuur 4.20. Variatie van de M_s - en M_f -temperatuur als functie van het koolstofgehalte in ongelegeerd staal.

4.2.3.5. ^{softer} Ontlaten van staal

Ferriet, cementiet, austeniet en martensiet hebben alle verschillende soortelijke volumina. Bij het harden van staal kunnen dus volumeveranderingen optreden. De martensiettransformaties worden beïnvloed door de temperatuur waarop ze plaats vinden. Of de transformatie optreedt, hangt af van de lokale afkoelsnelheid. Bij een ongelijkmatige afkoeling van een werkstuk verloopt de martensietvorming ongelijkmatig of treden andere omzettingen op, afhankelijk van de afkoelsnelheid (zie Tabel 4.8). Hierdoor kunnen hoge spanningen, vervormingen en zelfs scheuren in het werkstuk ontstaan.

De tetragonale martensiet die ontstaat bij het harden van staal, is bij hogere koolstofgehalten (meer dan 0,5 gew%) buitengewoon bros en als zodanig niet te gebruiken. Als men gehard stalen voorwerpen te lang bij kamertemperatuur bewaart, kunnen ze spontaan scheuren door de aanwezige hardingsspanningen. Gehard staal moet daarom altijd worden *ontlaten*: verwarmen bij temperaturen tussen 150 en 700 °C. Het staal wordt zachter en taaier naarmate de ontlaattemperatuur hoger is. Tijdens het ontlaten treden veranderingen op in de microstructuur van het staal. Men onderscheidt hierbij verschillende *ontlaattrappen* (zie Tabel 4.9). Het verband tussen de ontlaattemperatuur en de hardheid wordt voor twee staalsoorten met verschillend koolstofgehalte gegeven in Figuur 4.21.



Figuur 4.21. Invloed van de ontlaattemperatuur op de hardheid van twee staalsoorten met verschillende koolstofgehalten bij een ontlaattijd van 1 uur.

Tabel 4.9. Ontlaattrappen voor ongelegeerd staal.

| trap | temperatuur (°C) | verandering van de microstructuur |
|------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 80 - 160 | uitscheiding van ϵ -carbide (= $Fe_{2,4}C$) uit de martensiet |
| 2 | 220 - 300 | restausteniet wordt omgezet in ferriet en een kleine hoeveelheid uitgescheiden carbide of Fe_3C microscopisch nauwelijks verschil met de uit trap 1 resulterende microstructuur |
| 3 | 260 - 360 | omzetting ϵ -carbiden in cementiet derde trap soms doorgezet tot 550 - 650 °C, er ontstaat dan ferriet + een heel fijne, bolvormige cementiet = <i>sorbiet</i> |
| 4 | 500 - 600 | (vooral voor <i>gelegeerd</i> staal) na de derde trap hebben de microstructuurbestanddelen nog dezelfde samenstelling als de oorspronkelijk austeniet. Dit is nog niet de evenwichtssituatie. In de vierde trap herverdeling van legeringselementen; vorming van samengestelde carbiden; bijv. $(MoFe)_2C$, $(CrFe)_7C_3$ |

Het *veredelen* van staal is een combinatie van harden en ontlaten op hoge temperatuur (550-650 °C). Het doel van het veredelen is de vorming van een microstructuur bestaande uit zeer fijne carbiden in een fijnkorrelige ferriet. Deze microstructuur vertoont de optimale combinatie van hoge sterkte en taaheid. Het veredelen wordt toegepast op staalsoorten, gelegeerd en ongelegeerd, met koolstofgehalten tussen 0,2 en 0,7 gew%, maar gewoonlijk heeft een zogenaamd veredelingsstaal een koolstofgehalte tussen 0,3 en 0,4 gew%. Een variant van het veredelen is het *patenteren* van

staaldraad. Hierbij onderbreekt men het afschrikken bij een temperatuur van circa 500-550 °C door de draad na het austeniteren direct door een bad vloeibaar lood van deze temperatuur te voeren. Gepatenteerd staaldraad wordt gebruikt als wapening in voorgespannen gewapend beton, liftkabels en pianosnaren. De te bereiken treksterkte ligt in de buurt van 1800 MPa.

Vraag 4.3 *Hoe beoordeelt u de lasbaarheid van een gehard stalen werkstuk?*

Vraag 4.4 *Hoe beoordeelt u de lasbaarheid van een gehard en ontlaten stalen werkstuk?*

Slecht

4.2.4. Gietijzer

In het diagram van Figuur 3.11 vinden we de gietijzersoorten in het gebied tussen 3 en 4,5 gew% C. Merk op dat in gietijzer meer koolstof aanwezig is dan maximaal in de austeniet kan oplossen. Verder zijn in ongelegeerd gietijzer altijd aanwezig: silicium (0,5 tot 3,5 gew%), mangaan, zwavel en fosfor. Gietijzer is relatief goedkoop en makkelijk te gieten, zodat veelvormige producten kunnen worden ontworpen. Zoals beton kan gietijzer zeer goed drukspanningen opnemen. Hierop berust de toepassing van gietijzer als decoratief dragend materiaal in de negentiende-eeuwse architectuur. Voorbeelden zijn de pilaren van de overkapping van het station Hollandsch Spoor in Den Haag (blijkens de naamplaat gegoten in 1888) en de gevel van het voormalige Haagse Filmhuis aan de Denneweg.

De eigenschappen van gietijzer zijn zeer sterk afhankelijk van de verschijningsvorm van de koolstof. De koolstof, die bij de stolling niet in de austeniet op kan lossen, kan in gietijzer voorkomen als Fe_3C of als grafiet. Welke verschijningsvorm optreedt hangt af van de samenstelling van het gietijzer en van de afkoelsnelheid na het gieten (= wanddikte). Een laag Si-gehalte en een hoge afkoelsnelheid bevorderen het ontstaan van Fe_3C , en daarmee van *wit gietijzer*. In *grijs gietijzer* komt de koolstof voor als grafiet in de vorm van grillige platen (lamellen). Door toevoeging van een kleine hoeveelheid magnesium (< 0,1 gew%) aan het vloeibare ijzer kort voor het gieten, ontstaan bolvormige grafiet-uitscheidingen, de zogenaamde nodulaire grafiet. Dit *nodulaire gietijzer* heeft totaal andere eigenschappen dan grijs gietijzer (zie Tabel 4.11).

Voor het verklaren van de in gietijzer optredende microstructuren wordt weer gebruik gemaakt van het ijzer-koolstof diagram (zie Figuur 3.11). Bij het gebruik van het ijzer-koolstof diagram voor gietijzer moeten twee voorbehouden worden gemaakt. Dit diagram geldt in feite alleen maar voor de zuiver binaire Fe-C legering en de afkoelsnelheid na de gieting bepaalt mede of het stabiele of het metastabiele diagram gebruikt moet worden. Koolstof heeft een groot effect op de vloeibaarheid van het gesmolten gietijzer: de samenstelling met 4,3 gew% C vertoont een hoge

vloeibaarheid en is uitgangssamenstelling voor allerlei ingewikkeld gietwerk. Gietijzer met dit koolstofgehalte heeft nog een aantrekkelijke eigenschap: het vertoont bij stolling als austeniet en grafiet nauwelijks slink. Slink is de volumeverkleining die optreedt bij stolling. Gegeven deze voordelen is het niet verwonderlijk, dat grijs nodulair gietijzer de meest toegepaste gietijzersoort is. De productie van nodulair gietijzer krijgt meer en meer de overhand.

Vraag 4.5 *Ga na of het meest voorkomende gehalte van koolstof in gietijzer klopt met de regel dat legeringen met een eutectische samenstelling de grootste dunvloeibaarheid hebben bij de laagst mogelijke temperatuur.*

Vraag 4.6 *Vloeibaar gietijzer heeft een dichtheid van circa 7600 kg/m³ en grafiet dat bij de eutectische temperatuur en samenstelling gevormd wordt, heeft een dichtheid van circa 2300 kg/m³. Verklaar kwalitatief de afwezigheid van slink van gietijzer.*

Vraag 4.7 *Waarom is de afwezigheid van slink handig bij het vervaardigen van gietwerk?*

Zodra koolstof gedeeltelijk of geheel bij de stolling als cementiet wordt afgescheiden, treedt wel slink op, omdat de dichtheid van cementiet ongeveer gelijk is aan die van ijzer. In staal is het koolstofgehalte veel lager dan 2 gew%. Gietstaal heeft een grote slink en is daardoor veel lastiger te gieten dan gietijzer.

Vraag 4.8 *Vergelijk de smeltemperatuur van staal met die van gietijzer.*

Gietijzer bevat verschillende andere elementen dan koolstof, die alle invloed hebben op de ligging van de lijnen in het ijzer-koolstof diagram. Vooral de invloed van silicium en fosfor is groot. Beide elementen verschuiven de ligging van het eutectisch punt in het ijzer-koolstofdiagram naar een lager koolstofgehalte volgens de formule:

$$\text{gew\% } C_{eut} = 4,26 - \frac{1}{3} (\text{gew\% Si} + \text{gew\% P}) \quad (4.3)$$

Of het gietijzer juist ondereutectisch of bovineutectisch is, kan beoordeeld worden met de koolstoffactor S_c :

$$S_c = \frac{\text{gew\% C}}{4,26 - \frac{1}{3} (\text{gew\% Si} + \text{gew\% P})} \quad (4.4)$$

Voorbeeld: gietijzer met gew% C = 3,3; gew% Si = 2,4; gew% P = 0,3
 $S_c = 3,3/3,36 = 0,98$
 dit gietijzer is juist ondereutectisch

Een koolstoffactor groter dan 1 zal in het algemeen worden vermeden: bij stolling scheidt zich in eerste instantie grafiet af. Deze primaire grafietuitscheiding heeft een ongunstige invloed op de mechanische eigenschappen van gietijzer.

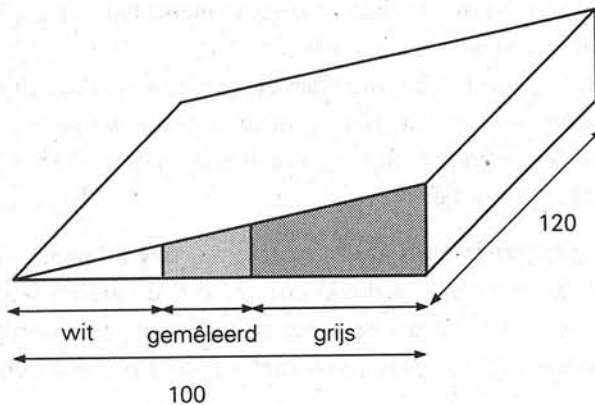
Teneinde voor het verklaren van de microstructuur van gietijzer toch met het normale ijzer-koolstofdiagram te kunnen werken, heeft men het koolstofequivalent C_{eq} ingevoerd:

$$C_{eq} = \text{gew\% C} + \frac{1}{3} (\text{gew\% Si} + \text{gew\% P}) \quad (4.5)$$

Een gietijzer met silicium en fosfor gedraagt zich dus alsof het meer koolstof bevat.

4.2.4.1. Ontstaan van de microstructuren van gietijzer

Naast de samenstelling van de legering bepaalt de afkoelsnelheid of het gietijzer stolt in overeenstemming met het stabiele ijzer-grafiet diagram of in overeenstemming met het metastabiele ijzer-cementiet diagram. De afkoelsnelheid die bij stolling optreedt, wordt bepaald door de wanddikte van het gietstuk, het vormmateriaal, de giettemperatuur en de gietsnelheid. Ter beoordeling van de invloed van deze factoren op de microstructuur wordt een wigvormig proefstuk gegoten (zie Figuur 4.22). Van deze wig bekijkt men het breukvlak. De kleur van dit breukvlak blijkt te corresponderen met de verschijningsvorm van de koolstof (zie Tabel 4.10). Aan de hand van het ijzer-koolstof diagram kan het ontstaan van de verschillende microstructuren in gietijzer beschreven worden. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen stolling en de afkoeling na stolling.



Figuur 4.22. De wigproef tot beoordeling van het stollen van gietijzer.

Tabel 4.10. *Verschijningsvorm van koolstof in gietijzer.*

| <i>kleur van breukvlak</i> | <i>verschijningsvorm van koolstof</i> | <i>benaming</i> |
|------------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| zilverwit | cementiet | wit gietijzer |
| zilverwit met grijze stippen | cementiet en grafiet | gemêleerd gietijzer |
| grijs | grafiet | grijs gietijzer |

Wit gietijzer

Bij de stolling van wit gietijzer ontstaat geen grafiet. In gietijzer met een C_{eq} van 3 gew%, dat uit het vloeistofgebied afgekoeld wordt, ontstaan bij het passeren van de lijn BC in Figuur 3.11 austenietkristallen met een koolstofgehalte van 1,3 gew%. Bij 1148 °C wordt de metastabiele eutectische lijn gepasseerd, waarbij het austeniet-cementiet eutecticum (*ledeburiet*) gevormd wordt. Verdere daling van de temperatuur geeft de vorming van cementiet uit de austeniet. Bij passeren van de eutectoïdische lijn van 727 °C ontstaat perliet uit de austeniet.

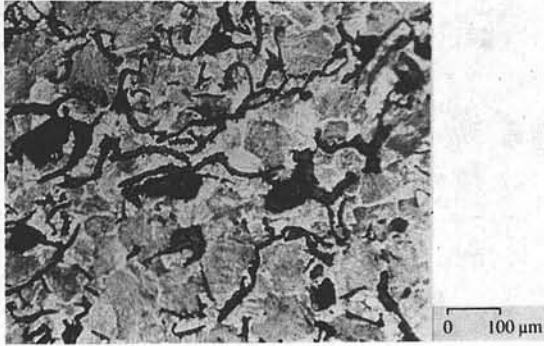
Grijs en nodulair gietijzer

Bij een ondereutectische samenstelling begint de stolling met de vorming van de austenietkristallen. Vervolgens wordt bij 1154 °C de stabiele eutectische lijn gepasseerd, waarbij het austeniet-grafiet eutecticum wordt gevormd. Afhankelijk van afkoelsnelheid en samenstelling, kan bij verdere afkoeling het stabiele diagram geheel of gedeeltelijk worden gevolgd.

- Bij een afkoeling volgens het stabiele diagram ontstaat uiteindelijk *ferritisch grijs gietijzer* of *ferritisch nodulair gietijzer*: hierin ligt alle grafiet als lamellen of als nodulen in een matrix van ferriet.
- Bij een afkoeling volgens het metastabiele diagram ontstaat uit de austeniet op een gegeven moment perliet. Het resultaat is *perlitisch grijs gietijzer* of *perlitisch nodulair gietijzer*: hierin ligt alle grafiet als lamellen of als nodulen in een grondmassa van perliet.

Het typische bij gietijzer is dat stabiele en metastabiele afkoeling ook gelijktijdig kunnen optreden. De austeniet in direct contact met de grafiet wordt omgezet in ferriet en grafiet, terwijl de verder liggende austeniet omgezet wordt in perliet. De microstructuur bestaat dan uit grafiet in ferriet met daar omheen perliet (zie Figuur 4.23).

Vraag 4.9 *Waarom kan grijs gietijzer wel drukspanningen opnemen, maar geen trekspanningen? Gebruik bij uw antwoord Figuur 4.23 en 4.24.*



Figuur 4.23. Microstructuur van grijs gietijzer (Ref. 7).

Gemêleerd gietijzer

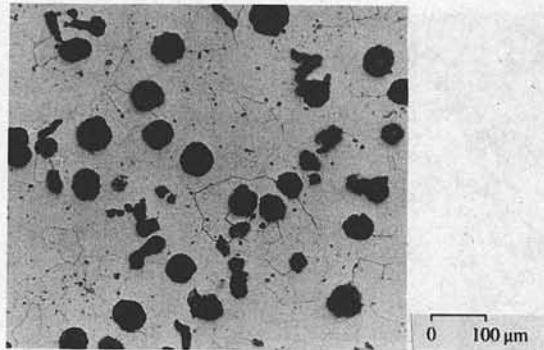
Bij het gemêleerd gietijzer heeft de *stolling* gedeeltelijk overeenkomstig het stabiele en gedeeltelijk overeenkomstig het metastabiele diagram plaatsgevonden. Men vindt hierin dus de koolstof niet alleen als cementiet maar ook in de vorm van grafiet. Deze microstructuur wordt onder andere aangetroffen in de overgang tussen wit en grijs gietijzer in de al besproken gietwig.

De afkoelsnelheid, en dus bij een gegeven gietmethode de wanddikte, heeft een belangrijke invloed op de microstructuur na volledige afkoeling. Daarom hangen de mechanische eigenschappen van gietijzer duidelijk af van de wanddikte; vooral bij grijs gietijzer met lamellair grafiet is dit effect vrij groot.

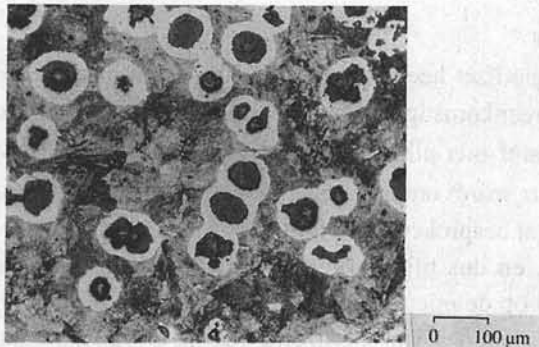
Vraag 4.10 *Geef aan waarom in gietstukken grote variaties in wanddikten ongewenst zijn.*

Gietijzer heeft lang de reputatie gehad te breken zonder enige voorafgaande plastische vervorming: gietijzer zou bros zijn. Dit is echter alleen maar het geval bij wit gietijzer en bij grijs gietijzer met een relatief hoog fosforgehalte ($> 0,2\%$). Het moderne grijze gietijzer is veel zuiverder van samenstelling, maar de onderling verbonden grafietlamellen (zie Figuur 4.23) laten geen hogere rek toe dan ongeveer $0,5\%$ (zie Tabel 4.11). Nodulair gietijzer, waarin de grafiet als separate bollen (nodulen) voorkomt (Figuur 4.24 en 4.25), is een taai materiaal, vooral als de matrix uit ferriet bestaat. Het nodulaire gietijzer bezit daardoor beduidend andere eigenschappen dan het grijze gietijzer, terwijl het toch een uitstekende gietbaarheid heeft (zie Tabel 4.11).

Vraag 4.11 *In welke microstructuur zal de kerfwerking groter zijn. In die van Figuur 4.23 of in die van Figuur 4.24?*



Figuur 4.24. Microstructuur van perlitisch nodulair gietijzer (Ref. 7).



Figuur 4.25. Microstructuur van ferritisch nodulair gietijzer (Ref. 7).

Tabel 4.11. Eigenschappen van gietijzer.

| soort | microstructuur | rekgrens (MPa) | treksterkte (MPa) | breukrek (%) | typische toepassing |
|---------------------|-------------------------------------------|----------------|-------------------|--------------|---------------------------------------------------------------|
| laag belast grijs | ferriet + perliet + grove grafietlamellen | – | 150 | 0,5 | kasten voor tandwielen, putdeksels, laagbelaste machineframes |
| hoog belast grijs | perliet + fijne grafietlamellen | – | 400 | 0,2 | frames voor draaibanken, tandwielen |
| ferritisch nodulair | ferriet + grafiet-nodulen | 250 | 375 | 20 | maximale schokweerstand: kogellagerhuizen |
| perlitisch nodulair | perliet + grafiet-nodulen | 450 | 750 | 5 | krukassen voor automotoren, tandwielen |

Noot: de druksterkten van grijs gietijzer zijn in het algemeen ongeveer 4 keer zo groot als de treksterkten

4.2.5. Gelegeerd staal

In §4.2.3 wordt uiteengezet hoe belangrijk de rol van koolstof voor de eigenschappen van staal is en welk een enorme variatie aan eigenschappen verkregen kan worden door de warmtebehandeling. Regelmatig wordt in de *Stahlschlüssel* (zie Ref. 8) een overdonderend overzicht van de belangrijke leverbare staalsoorten gepubliceerd. Hiervan vormen de ongelegeerde staalsoorten slechts een deel. Een zeer groot aantal staalsoorten is ook nog met andere elementen dan koolstof gelegeerd. Deze gelegeerde staalsoorten bevatten een grote variatie aan legeringselementen, zowel naar gehalte als naar aard. Een overzicht van de meest toegepaste legeringselementen geeft Tabel 4.12.

Tabel 4.12. Enkele legeringselementen in staal met hun specifieke invloed.

| element | oplosbaarheid in | | invloed op de doorharding | neiging tot vorming van harde carbiden |
|-------------|------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| | ferriet (gew%) | austeniet (gew%) | | |
| chroom | volledig | 12,8 | middelmatige verbetering | sterk |
| mangaan | 3 | volledig | middelmatige verbetering | groter dan ijzer minder dan chroom |
| molybdeen * | 37,5 | 3 | sterke verbetering | nog sterker dan chroom |
| nikkel | 10 | volledig, stabiliseert austeniet | milde verbetering | |
| vanadium | volledig | 1 | zeer sterke verbetering | zeer sterk |

Gelegeerde staalsoorten zijn vrijwel altijd duurder dan ongelegeerde staalsoorten. Er moeten dus dwingende redenen zijn waarom men gelegeerde staalsoorten heeft ontwikkeld en waarom men deze toepast. Hieronder volgen enkele van deze redenen.

1. De overgang van kleine naar grote werkstukken

Het harden zoals aangegeven in §4.2.3.4 berust op grote afkoelsnelheden te behalen door afschrikken. Hiervoor is het uiteraard nodig dat het werkstuk klein is, zodat ook het hart van het werkstuk met voldoende grote snelheid afgekoeld kan worden. Bij grotere werkstukken duurt het langer voor het binnenste afkoelt. De afkoeltijd is ruwweg evenredig met het kwadraat van de dikte. Wil men toch, dat ook in het binnenste van een dik werkstuk een martensitische omzetting optreedt, dan moet men de tijd waarbinnen nog de martensitische omzetting kan verlopen, vergroten. Anders gezegd, de diepte in het werkstuk waar nog de martensitische omzetting plaatsvindt, moet groter worden. Deze diepte heet de doorhardingsdiepte. Vergroting van de doorhardingsdiepte kan door het toevoegen van andere legeringselementen dan koolstof.

2. De daling van de hardheid bij het ontlaten van gehard koolstofstaal

Bij het ontlaten van gehard koolstofstaal treedt een vrij grote daling van de hardheid op. Deze daling kan tegengegaan worden door het staal te legeren met carbidevormende elementen. Tijdens de vierde ontlaattrap scheiden deze carbiden zich uit, wat bijdraagt tot de hardheid en sterkte.

3. De lage kruipsterkte

Bij een verhoogde temperatuur heeft een metaal de neiging na verloop van tijd toe te geven aan de spanning waaronder het staat; dit verschijnsel heet kruip. Boven circa 450 °C is ongeleerd staal niet in staat hoge spanningen langdurig te dragen. Door legeren (met Cr, Ni, en Mo) kan staal tot circa 750 °C gebruikt worden.

4. De lage weerstand tegen corrosie en oxydatie

Ongeleerd staal corrodeert snel bij kamertemperatuur in een vochtige omgeving. Boven circa 550 °C treedt een snelle oxydatie aan lucht op. Legeren met Cr kan dan een remedie zijn.

Een grove, zij het betrekkelijk willekeurige, indeling van de gelegeerde staalsoorten is op basis van het gehalte aan legeringselementen. Men onderscheidt:

| | |
|-------------------------|------------------------------------------------------------|
| <i>laaggeleerd:</i> | minder dan 2 gew% aan de kenmerkende legeringselementen, |
| <i>matig gelegeerd:</i> | tussen 2 en 10 gew% aan de kenmerkende legeringselementen, |
| <i>hooggeleerd:</i> | meer dan 10 gew% aan de kenmerkende legeringselementen. |

In de praktijk van het Industrieel Ontwerpen is vaak het uiterlijk van een produkt van doorslaggevend belang. Een voorbeeld kan dit belang verduidelijken.

Een scherp aardappelschilmesje kan vervaardigd worden van een ongelegeerd staal. De klassieke aardappelschilmesjes zijn inderdaad vervaardigd uit ongelegeerd staal. Toch zal voor het ronddraaiende mes van een moderne keukenmachine, dat in contact komt met een grote variëteit aan sappen, niet ongelegeerd staal gekozen worden. Dit zou roesten in contact met die sappen. Hoewel ijzer in het menselijk lichaam een nuttig element is, zal voor het materiaal van het mes in een keukenmachine de functie-eis 'roestvast in contact met de sappen uit de gangbare levensmiddelen en in de afwas (bij temperaturen tot ongeveer 100 °C)' gesteld worden.

Vraag 4.12 *Schat het koolstofgehalte van een ongelegeerd stalen aardappelschilmesje.*

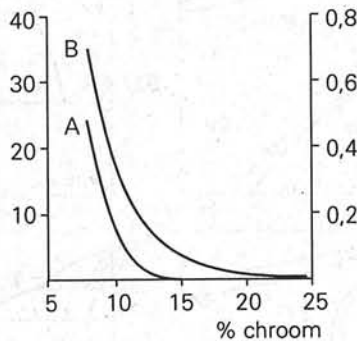
0,25 gew% C

Wij zullen ons hier beperken tot de *roestvaste* staalsoorten, die alle in de categorie *hooggeleerd* vallen. De roestvaste staalsoorten zijn waarschijnlijk de best bekende gelegeerde staalsoorten. Zij zijn ontwikkeld om een van de meest in het oog springende nadelen van staal te overwinnen: roesten.

Metalen kunnen worden aangetast door elektrochemische corrosie en door gassen uit de omgeving. Dit laatste treedt vooral op bij verhoogde temperaturen. Ongelegeerd staal is tegen geen van beide soorten aantasting bestand. Roesten is een vorm van

elektrochemische aantasting in een waterige omgeving. Roest is een poreuze oppervlaktelaag van ijzeroxyden en ijzerhydroxyden, die geen bescherming biedt tegen voortgaande aantasting. Door legeren met chroom kan ijzer voorzien worden van een ondoordringbare chromoxydelaag waardoor staal niet verder roest: *roestvast staal*. Deze term is op zich onjuist. In verdund zoutzuur of in verdund zwavelzuur en in *chloor*houdende waterige milieus kan gewoon roestvast staal aangetast worden.

Ijzer is een reactief element; in de elektrochemische spanningsreeks staat het ver beneden waterstof. Chroom is in feite nog onedeler. In een oxyderende omgeving wordt chroom snel geoxydeerd, waardoor de elektrodepotentiaal snel stijgt tot een waarde overeenkomend met die van zilver. Men zegt het chroom wordt gepassiveerd. Ook Fe-Cr oplossingen, met Cr substitusioneel opgelost in ferriet, kunnen door chroom worden gepassiveerd, mits het chromogehalte minstens 12 gew% Cr bedraagt. De corrosiesnelheid daalt tot praktisch nul (zie Figuur 4.26). Chroom is het *enige* element dat dit effect te weeg brengt. Andere elementen, bijvoorbeeld Ni, Mo, Si, kunnen de passivering hoogstens versterken maar niet veroorzaken.



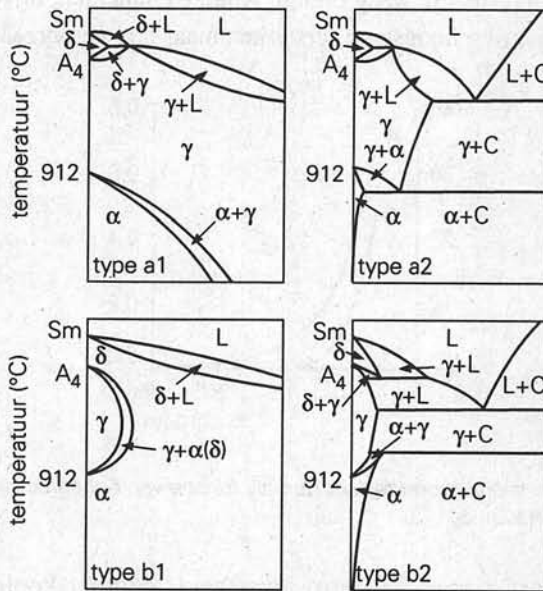
Figuur 4.26. Corrosie van chroomstaalsoorten als functie van het chroomgehalte in water (A) en in kokend salpeterzuur (B).

Koolstof is ongunstig voor de corrosievastheid, doordat koolstof met chroom carbiden vormt (zie Tabel 4.12). Chroom wordt dan aan de substitusionele ferrietoplossing onttrokken en kan niet meer met zuurstof reageren. Hierdoor daalt de corrosievastheid van deze vaste oplossing, terwijl de carbiden aanleiding kunnen geven tot de vorming van elektrochemische lokaalelementen (er zijn dan immers twee verschillende fasen aanwezig met elk een eigen potentiaal ten opzichte van de waterige omgeving), die het optreden van corrosie kunnen bevorderen. Bij aanwezigheid van koolstof is dus 12 gew% Cr niet voldoende om het ijzer te passiveren. Daarvoor is een, evenredig met het koolstofgehalte, hoger Cr-gehalte vereist. Het voorgaande is een illustratie van een betrekkelijk algemene regel:

Hoe groter de homogeniteit van een metaallegering, des te beter is de corrosievastheid.

In §4.2.2 bleek, dat ijzer verschillende kristalroosters kan hebben; bij temperatuurverhoging boven 912 °C gaat ijzer over van krg/bcc-ferriet naar kvg/fcc-austeniet. Door legeren is deze overgangstemperatuur te beïnvloeden. Twee groepen legeringselementen kunnen worden onderscheiden.

- De eerste groep geeft in de toestandsdiagrammen een vergroting van het austenietgebied: *austenietvormers*. Bij een volledige oplosbaarheid in de austeniet leidt dit tot volledige stabilisatie van de austeniet bij kamertemperatuur. Er treedt dus geen fase-overgang naar ferriet op (zie type a1 in Figuur 4.27). Bij een onvolledige oplosbaarheid in de austeniet wordt weliswaar het austenietgebied vergroot, maar bij dalende temperatuur daalt deze oplosbaarheid (zie type a2 in Figuur 4.27). Voorbeeld van type a1 is Ni; voorbeeld van type a2 is C.



Figuur 4.27. De verschillende effecten van legeringselementen op de faseformaties in ijzer: a1 en a2 – vergroting van het austenietgebied; b1 en b2 – verkleining van het austenietgebied.

- De tweede groep geeft in de toestandsdiagrammen een verkleining van het austenietgebied: *ferrietvormers*. Bij een volledige oplosbaarheid in de ferriet leidt dit tot een volledige stabilisatie van de ferriet. Er treedt dus geen fase-overgang naar de austeniet op (zie type b1 in Figuur 4.27). Bij een beperkte oplosbaarheid in de ferriet resulteert een toestandsdiagram zoals van type b2. Voorbeeld van type b1 is Cr; voorbeeld van type b2 is Nb.

Door het legeren kan men dus beïnvloeden of:

- i. het staal bij kamertemperatuur austenitisch of ferritisch is
- ii. een martensitische overgang kan optreden

Daarbij is het helaas zo dat de combinatie van legeringselementen van typen a en b niet voorspelbaar is. Combinaties van legeringselementen kunnen een heel ander effect hebben dan op grond van elk der afzonderlijke elementen verwacht zou worden.

Chroom is een ferrietvormer. IJzer met 12 gew% Cr is ferritisch (zie Figuur 4.27 b1). Nikkel is een austenietvormer. Door toevoeging van circa 8 gew% Ni aan ijzer met 18 gew% Cr krijgt men bij kamertemperatuur een austenitische staalsoort. Staalsoorten met tot circa 16 gew% Cr en een voldoende koolstofgehalte zijn bij kamertemperatuur ferritisch, maar kunnen bij temperatuurverhoging nog austenitisch worden. Bij afschrikken kan dus martensiet gevormd worden, waardoor de mechanische eigenschappen door harden en ontlaten sterk kunnen variëren. In beginsel kan roestvast staal dus ferritisch, austenitisch en martensitisch zijn. Enkele typische samenstellingen worden gegeven in Tabel 4.13.

Vraag 4.13 *Rechtvaardig de keuze van een gelegerd staal voor het ronddraaiende mes van een keukenmachine; welke staalsoort zou u kiezen?*

Vraag 4.14 *Uw bestek (mes, vork en lepel) en uw aanrecht zijn geheel vervaardigd uit roestvast staal; hoe bepaalt u in uw keuken of dit roestvast staal austenitisch, ferritisch of martensitisch is?*

Bij de keus van roestvast staal spelen enkele factoren een belangrijke rol: de gewenste corrosieweerstand in het te verwachten milieu van het produkt, de gewenste mechanische eigenschappen bij de gegeven belasting van het produkt en de gewenste vervormings- en verbindingseigenschappen van het roestvaste staal en de temperatuur tijdens het gebruik van het produkt. Voor de in Tabel 4.13 aangegeven groepen zullen hieronder toepassingsmogelijkheden worden gegeven.

Tabel 4.13. Enkele typische samenstellingen van roestvast staal.

| structuur | code | samenstelling (gew%) | | | | | opmerkingen |
|-------------------|-------------|----------------------|-------|-------|------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | C | Si | Mn | Cr | Ni | |
| ferriet | | | | | | | |
| | X6Cr13 | < 0,08 | < 1,0 | < 1,0 | 13 | | goed vervormbaar speciaal uit dunne plaat: chemische industrie, gevelbekleding |
| | X8Cr17 | < 0,10 | < 1,0 | < 1,0 | 17 | | |
| martensiet | | | | | | | |
| groep 1 | X12Cr13 | < 0,15 | < 1,0 | < 1,0 | 13 | | hardheid HV 393 schoepen van stoom- turbines; vleeshaken |
| groep 2 | X30Cr13 | 0,30 | < 1,0 | < 1,0 | 13 | | hardheid HV 513 keukenmes |
| groep 3 | X90Cr17 | 0,90 | < 1,0 | < 1,0 | 17 | | hardheid HV 695 slagersmesses; chirurgenmesses |
| groep 4 | X35CrMo17 | 0,35 | < 1,0 | < 1,0 | 17 | | 1,0 gew% Mo hardheid HV 513 zeewaterbestendig |
| austeniet | | | | | | | |
| | X6CrNi18.10 | 0,07 | < 1,0 | < 2,0 | 18 | 10 | niet-magnetisch, net als alle fcc metalen goed vervormbaar, door taaiheid minder goed te verspanen, aanrechten en bestek, goed te polijsten |
| | X8CrNi | < 0,07 | < 1,0 | < 2,0 | 12,5 | 13 | zeer goed koudvervorm- baar, iets gelig van kleur, bestek: lepels en vorken |
| | X10CrNi | < 0,10 | < 1,0 | < 2,0 | 18 | 12 | 2,5 gew% Mo, Nb |
| | MoNb18.10 | | | | | | zeewaterbestendig |

Ferritisch roestvast staal - te lassen

Met een laag koolstofgehalte (kleiner dan 0,12 gew% C) zijn deze staalsoorten niet-hardbaar en dus te lassen. De lasbaarheid is beperkt, doordat bij het lassen korrel-groei optreedt, wat nadelig is voor de mechanische eigenschappen. De staalsoorten uit deze groep zijn in het algemeen goed koud vervormbaar en bezitten een behoorlijke weerstand tegen corrosie, mits het milieu geen chloorionen bevat. Toepassing vinden zij in bestek (lepels en vorken) en andere huishoudelijke artikelen en als decoratie in de architectuur en de auto-industrie.

Martensitisch roestvast staal*niet lasbaar*

De martensitische roestvaste staalsoorten kunnen worden verdeeld in vier groepen; zie Tabel 4.14. Het stijgend koolstofgehalte met het stijgend chroomgehalte heeft uiteraard een groot effect op de hardheid en de andere mechanische eigenschappen. Deze staalsoorten zijn hardbaar en dus niet lasbaar. De corrosieweerstand van groep 1 is niet zeer groot, vooral niet als in zachtgegloeide toestand de chroomcarbiden zijn uitgescheiden. De corrosieweerstand van al deze staalsoorten is onvoldoende in chloorionen houdende milieus. De toevoeging van nikkel of molybdeen verbetert de weerstand tegen corrosie in deze milieus aanmerkelijk.

Tabel 4.14. Indeling van martensitische roestvaste staalsoorten.

| groep | koolstofgehalte | chromgehalte | opmerking |
|-------|-----------------|--------------|--------------|
| 1 | 0,12 - 0,15 | 12-14 | |
| 2 | 0,2 - 0,4 | 13-15 | |
| 3 | 0,6 - 1,40 | 14-16 | |
| 4 | 0,1 - 0,3 | 16-18 | met Ni of Mo |

*best***Austenitisch roestvast staal***lasbaar**niet magnetisch*

Deze staalsoorten zijn ook bij kamertemperatuur austenitisch en zijn, dus niet hardbaar, maar daardoor wel lasbaar. De austenitische staalsoorten zijn niet magnetisch. Indien de austenitische staalsoorten voldoende koolstof bevatten, is het mogelijk dat chroomcarbiden precipiteren op de korrelgrenzen. Hierdoor kan plaatselijk het chroomgehalte te laag worden voor de instandhouding van de corrosieweerstand. Bovendien kunnen de uitgescheiden chroomcarbiden aanleiding geven tot de vorming van elektrochemische lokaalelementen. Hierdoor kan interkristallijne corrosie optreden. Uitscheiding van chroomcarbiden kan worden voorkomen door het koolstofgehalte omlaag te brengen of kleine hoeveelheden titaan of niobium aan het staal toe te voegen, die sterker carbidevormend zijn dan chroom. Gloeien op een zo hoge temperatuur dat de carbiden in oplossing gaan en vervolgens afschrikken in water kan ook effectief zijn.

De austenitische staalsoorten hebben een kvg/fcc-kristalstructuur en ze zijn dus zeer goed koudvervormbaar. De corrosieweerstand van de austenitische roestvaste staalsoorten is in het algemeen beter dan die van de ferritische en martensitische roestvaste staalsoorten. Tegen atmosferische corrosie zijn de austenitische staalsoorten in het algemeen bestand, zelfs tegen zeelucht (chloorionen). Ze zijn dus toepasbaar in gevels en raamlijsten. Tegen zeewater zijn de austenitische staalsoorten *niet* bestand, behalve de austenitische staalsoorten die gelegeerd zijn met molybdeen, die in zeewater bruikbaar zijn, zij het niet zonder enige aantasting.

4.3. Non-Ferro Metalen

4.3.1. *De sier, de duurzaamheid en de lichtheid van het bestaan*

Tussen sier en lichtheid reikt het gamma van de non-ferro metalen, dat zijn alle metalen en hun legeringen die niet gebaseerd zijn op ijzer. De metalen die gedegen in de aardkorst voorkomen, zijn van ouds gebruikt juist op grond van hun chemische inactiviteit. Deze edele metalen veranderen niet in de loop van de tijd en juist daardoor vinden zij hun toepassing en verkrijgen zij hun symbolische waarde. Vanaf de Egyptische dodenmaskers tot de hedendaagse Constant verlovingsringen drukken de goudlegeringen dezelfde emotie uit: eeuwigheid. Op dezelfde eigenschap berust de toepassing van goud als monetair materiaal: de waarde lijkt eeuwig, maar ook goud kan aan inflatie onderhevig zijn.

Bij de lichte metalen valt op, dat zij in het algemeen, chemisch gezien, juist bijzonder actief zijn. Het heeft in de geschiedenis dan ook bijzonder lang geduurd voordat een metaal als aluminium uit zijn oxyden vrijgemaakt kon worden. De economische offers die hiervoor nodig waren, waren zo hoog dat aluminium duurder was dan goud (keizer Napoleon III van Frankrijk kon zich een aluminium bestek veroorloven!). De in het oog springende eigenschap van de lichte metalen en hun legeringen, hun lage dichtheid, legt een natuurlijk verband met een belangrijk toepassingsgebied: de transportmiddelen. Toch zijn er eigenlijk verrassend weinig transportmiddelen van aluminium en zijn legeringen gemaakt. Auto's, fietsen en treinen zijn nog steeds overwegend van staal (vergelijk de materiaalkeuze voor een zelfdragende carrosserie in §4.2.3.3). Kennelijk weegt het voordeel van de lage dichtheid niet zwaar genoeg bij de materiaalkeuze voor de genoemde transportmiddelen. Voor een verantwoorde materiaalkeuze moet het geheel van de functie-eisen en fabricage-eisen in ogenschouw worden genomen. Bij de uiteindelijke beslissing om een bepaalde constructie te realiseren moet dan nog rekening worden gehouden met de maatschappelijke context waarin het produkt vervaardigd, gebruikt en afgedankt wordt.

De non-ferro metalen worden verdeeld in de lichte metalen: alle metalen en hun legeringen met een dichtheid tot 4500 kg/m^3 en de zware metalen: alle metalen en hun legeringen met een hogere dichtheid. Het belang van de verschillende metalen en hun legeringen komt tot uitdrukking in de productiecijfers (zie Tabel 4.15). Mede op grond van deze gegevens is gekozen voor de behandeling van de volgende metalen en hun legeringen:

Lichte metalen: aluminium en zijn legeringen
magnesium en zijn legeringen

Zware metalen: koper en zijn legeringen

Tabel 4.15. Wereldproductie van enkele belangrijke metalen in 1991.

| <i>metaal</i> | <i>produktie in 1000 ton</i> |
|---------------|------------------------------|
| staal | 735.000 |
| aluminium | 18.479 |
| koper | 10.580 |
| lood | 5.540 |
| zink | 7.189 |
| tin | 195 |
| nikkel | 853 |
| magnesium | 344 |

De zuivere metalen hebben meestal te lage waarden voor met name de mechanische eigenschappen. Aluminium is in dit verband een treffend voorbeeld: de treksterkte van onbehandeld technisch zuiver aluminium bedraagt slechts 70-80 MPa. In hoofdstuk 2 zijn enkele methoden om deze eigenschappen te verbeteren, aangegeven. Het beginsel waarop deze methoden berusten, is algemeen en toepasbaar op alle metalen. Uiteraard hangen daarbij de te bereiken effecten af van het gekozen metaal of de gekozen metaallegering.

4.3.2. Aluminium en zijn legeringen

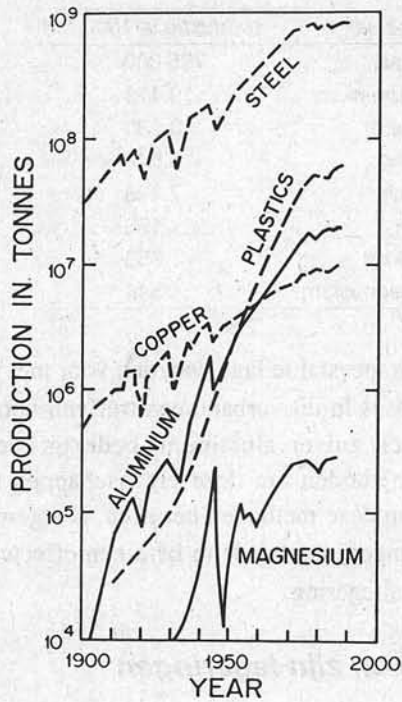
4.3.2.1. Zuiver aluminium, hergebruik en versterking

Aluminium (Al) is het meest in de aardkorst voorkomende metaal. Het beste erts, bauxiet, is ruim voldoende aanwezig. Dit betekent een groot voordeel ten opzichte van andere non-ferro metalen, zoals koper en nikkel, waarvan de ertsen vaak arm zijn. Figuur 4.28 laat de ontwikkeling zien in de productiecijfers van enige metalen en van kunststoffen. Het is duidelijk, dat de Al-productie pas in de 20ste eeuw van grote betekenis is geworden. In de meeste landen wordt aluminium toegepast in de volgende vijf gebieden:

1. bouw, 2. elektrotechniek, 3. transportwezen, 4. verpakkingen, 5. werktuigbouw

Het gebruik per hoofd van de bevolking en de voornaamste toepassing variëren sterk van land tot land. In de Verenigde Staten wordt circa 30 % van de Al-productie toegepast in de verpakkingsindustrie (frisdrankblikjes). Per hoofd van de bevolking wordt circa 27 kg Al per jaar gebruikt. In Nederland bedroeg het gebruik in 1990 circa 12 kg per hoofd, waarvan circa 10% als verpakking. De grootste toepasser van Al is in Nederland de bouw (ongeveer 28% van het jaarlijkse gebruik).

Het hergebruik (de recirculatie of recycling) van Al en zijn legeringen staat op het ogenblik sterk in de belangstelling. Logisch, want de Al-productie uit bauxiet - primair Al - vraagt zeer veel (elektrische) energie: 148 MJ per kg Al en 158 MJ per kg eindproduct van aluminium. Indien Al wordt hergebruikt is slechts de energie



Figuur 4.28. Ontwikkeling in productiecijfers van enige metalen en kunststoffen (Ref. 12).

nodig voor het opnieuw smelten en/of vormgeven. Deze bedraagt ongeveer 10 MJ per kg Al. Hergebruikt Al heet secundair aluminium. Toepassing van secundair Al geeft dus een belangrijke energiebesparing in vergelijking met de toepassing van primair aluminium.

In Nederland zijn belangrijke resultaten bereikt bij het hergebruik van aluminium. Naar schatting wordt in ons land circa 80% van de Al-legeringen toegepast in de bouw, na sloop van de betreffende gebouwen, hergebruikt (Ref. 9). Het aandeel van secundair Al in het totale gebruik van Al bedraagt in Nederland ongeveer 30%. Zonder problemen is het hergebruik van Al niet. De Al-legeringen worden verdeeld in *kneed- en gietlegeringen* (zie §4.3.2.3 en §4.3.2.4). De gietlegeringen bevatten in het algemeen een hoger gehalte aan legeringselementen dan de kneedlegeringen, die circa 85% van de totale toepassing vormen. Raffinage van Al-legeringen is nauwelijks mogelijk. Dit betekent, dat hergebruik als kneedlegering bij behoud van de genormaliseerde samenstellingen van Al-legeringen eigenlijk alleen mogelijk is als de verschillende Al-legeringen gescheiden in recirculatie komen. Dit is in de praktijk niet altijd uitvoerbaar, zodat in de secundaire Al-legeringen een tendens van oplopende legeringsgehalten ontstaat. Verlaging van het gehalte aan legeringselementen is mogelijk door het bijmengen van primair, zuiver Al. Ook is het mogelijk de her te

Tabel 4.16. Fysische eigenschappen van enige zuivere metalen.

| eigenschap | eenheid | Al | Mg | Ti | Be | Fe | Cu |
|-------------------------------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|
| smeltpunt | °C | 660 | 650 | 1678 | 1287 | 1535 | 1083 |
| kristalrooster bij 20 °C | | kvg | hdp | hdp | hdp | krp | kvg |
| dichtheid ten opzichte van water (= d) | | 2,7 | 1,74 | 4,51 | 1,85 | 7,87 | 8,96 |
| elasticiteits-modulus (= E) | GPa | 70 | 45 | 120 | 295 | 211 | 130 |
| E/d | | 26 | 26 | 26 | 160 | 27 | 14 |
| warmtegeleidings-coëfficiënt (20-100 °C) | W/m K | 238 | 156 | 26 | 194 | 78 | 397 |
| uitzettingscoëfficiënt (0-100 °C) | $10^{-6}/K$ | 23,5 | 26,0 | 8,9 | 12,0 | 12,1 | 17,0 |
| elektrische weerstand bij 20 °C | $\mu\Omega/cm$ | 2,67 | 4,2 | 54 | 3,3 | 10,1 | 1,69 |

gebruiken Al-legeringen te verwerken als gietlegeringen. Hiervoor zijn echter de toepassingsmogelijkheden beperkt. In de bouw wordt slechts een beperkt aantal Al-legeringen toegepast, zodat de beginvoorwaarden voor hergebruik hier vrij gunstig zijn. Ook in de verpakkingsindustrie wordt slechts een beperkt aantal Al-legeringen gebruikt. Per hoofd van de bevolking bevat het Nederlandse huisvuil circa 1,2 kg afval van Al en legeringen op een totaal van circa 350 kg per hoofd per jaar. De inzameling en het schoonmaken is hier dus het grote probleem voor het hergebruik.

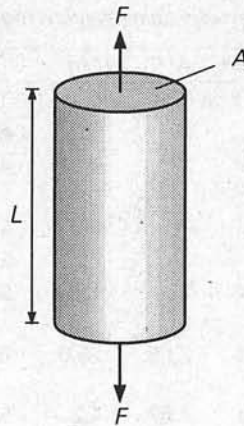
Tabel 4.16 geeft een overzicht van enkele belangrijke fysische eigenschappen van Al in vergelijking met enige andere zuivere metalen. Hieruit blijkt dat de E-modulus van Fe drie keer zo groot is als die van Al. De E-modulus is slechts weinig afhankelijk van de samenstelling van de legeringen. Staal heeft dus een drie keer zo grote E-modulus als Al-legeringen en het heeft ook een ongeveer drie keer zo grote dichtheid. Daarom is de relatieve E-modulus van staal, E/d , ongeveer zo groot als die van Al-legeringen. Ook als men de treksterkte van Al-legeringen met die van staal vergelijkt, is het vaak zinnig de relatieve sterkte, σ/d , te beschouwen. Dit wordt geïllustreerd door het volgende voorbeeld (dit voorbeeld is ontleend aan Ref. 7):

In Figuur 4.29 is een cilinder belast met een kracht F gegeven. De lengte van de cilinder is L , de diameter is $2R$. Is m de massa van de cilinder en stelt men de eis dat bij gegeven σ_y deze massa zo klein mogelijk is, dan moet $1/m$ zo groot mogelijk zijn. Voor het verband tussen $1/m$ en σ_y geldt (met d = dichtheid van het cilindermateriaal):

$$\frac{1}{m} = \frac{\sigma_y}{FLd} \quad (4.6)$$

De grootte σ_y/d moet dus zo groot mogelijk zijn.

Vraag 4.15 Leid de bovenstaande betrekking af.

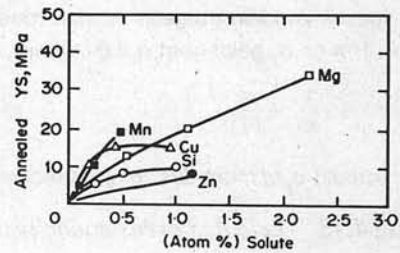
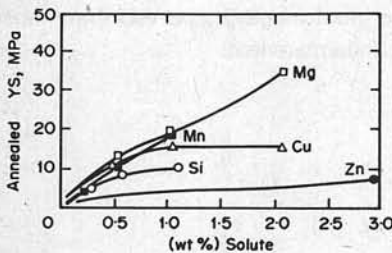


Figuur 4.29. Cilinder met lengte L en belasting F (Ref. 7).

In §2.3.3 zijn vier manieren aangegeven ter versterking van een metaal. Deze manieren zijn alle van belang voor Al. De vormgeving van Al-legeringen gebeurt vaak via koudeformatie, zodat versteving voor veel producten van Al en zijn legeringen belangrijk is. Daarnaast zijn oplosharding en precipitatie mogelijk. Voor oplosharding is het noodzakelijk dat de vreemde atomen in oplossing blijven. Mangaan- en magnesiumatomen geven de grootste oplosharding in Al. Tabel 4.17 en Figuur 4.30 geven hierover kwantitatieve informatie.

Tabel 4.17. Sterkte van aluminium-magnesium legeringen.

| Al-legering (gew% Mg) | treksterkte (MPa) | breukrek (%) |
|--------------------------|-------------------|--------------|
| 0,7 | 10 | 18 |
| 1 | 2 | 18 |
| 2 | 15 | 19 |
| 3 | 20 | 20 |
| 4 | 23 | 22 |
| 5 | 30 | 24 |

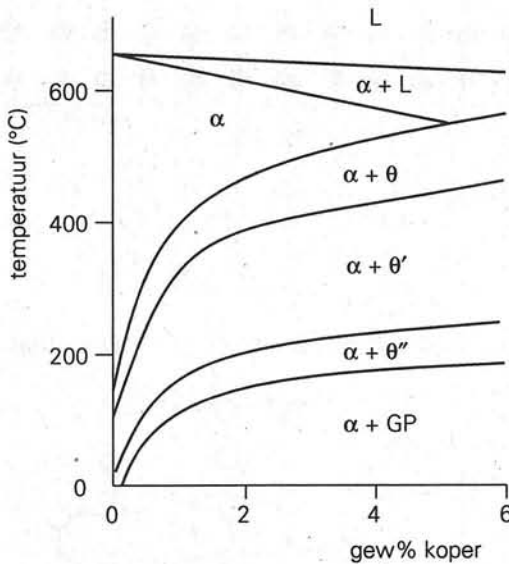


Figuur 4.30. Oplosharding van binaire Al-legeringen (Y_S = rekgrens als functie van het opgeloste gehalte legeringselement) (Ref. 12).

Voor Al-legeringen is *precipitatieharding* de belangrijkste mogelijkheid tot verbetering van de mechanische eigenschappen. Technologisch belangrijk zijn de precipitatie van:

1. Cu-houdende verbindingen in AlCu-legeringen,
2. MgSi-houdende verbindingen in AlMgSi-legeringen
3. MgZn-houdende verbindingen in AlMgZn-legeringen

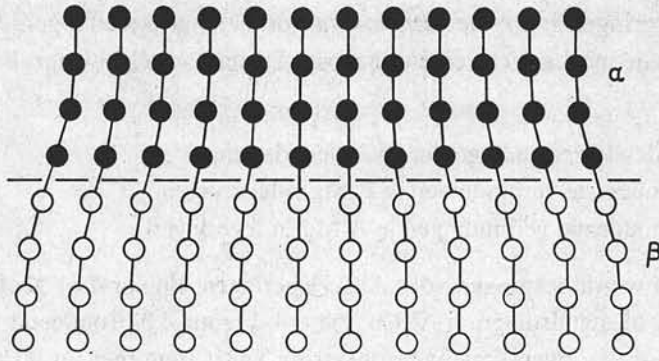
Het beginsel wordt besproken voor AlCu-legeringen. Figuur 4.31 geeft het Al-rijke deel van het toestandsdiagram Al-Cu, zie ook Figuur 4.37 (ontleend aan Ref. 10). Men verkrijgt een oververzadigde oplossing van Cu atomen in Al door een Al-legering met circa 4 gew% Cu te gloeien bij de eutectische temperatuur (men noemt dit oplosgloeien) en vervolgens af te schrikken naar kamertemperatuur. De thermisch geactiveerde precipitatie van Cu-atomen kan bij kamertemperatuur verlopen, maar ondergaat een wezenlijke versnelling door een beperkte temperatuurverhoging.



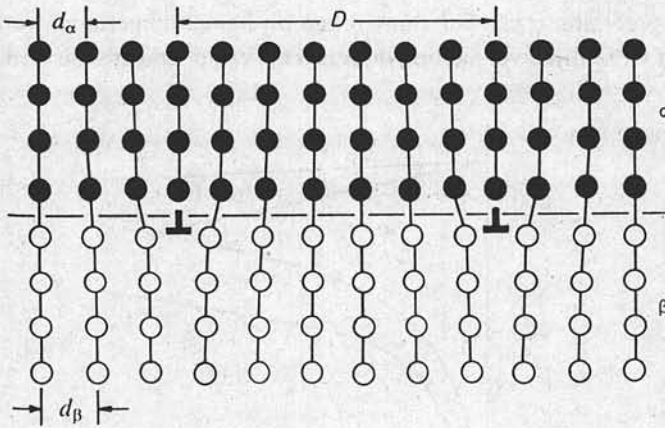
Figuur 4.31. Metastabiele oplosbaarheidslijnen voor θ' - en θ'' - en GP-precipitaten in het AlCu-systeem.

Vraag 4.16 Leg uit, dat precipitatie een thermisch geactiveerd proces is.

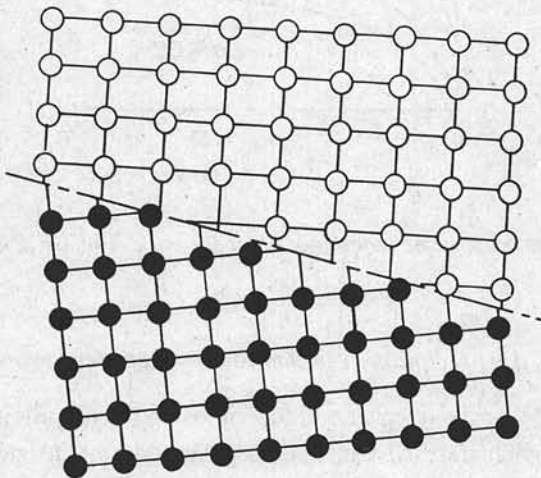
Precipitatie vanuit de vaste oververzadigde oplossing leidt uiteindelijk tot de vorming van de evenwichtsfase Al_2Cu , zoals gegeven door het toestandsdiagram in Figuur 4.37. Uitscheidende fasen kunnen ten opzichte van de vaste oplossing waaruit ze voortkomen de volgende kristallografische relaties hebben (Figuur 4.32, 4.33 en 4.34) (zie ook Ref.11):



Figuur 4.32. Coherent grensvlak met passingsfout (Ref. 11).



Figuur 4.33. Semi-coherent grensvlak met missingsdislocaties (Ref. 11).



Figuur 4.34. Incoherent grensvlak (Ref. 11).

incoherent

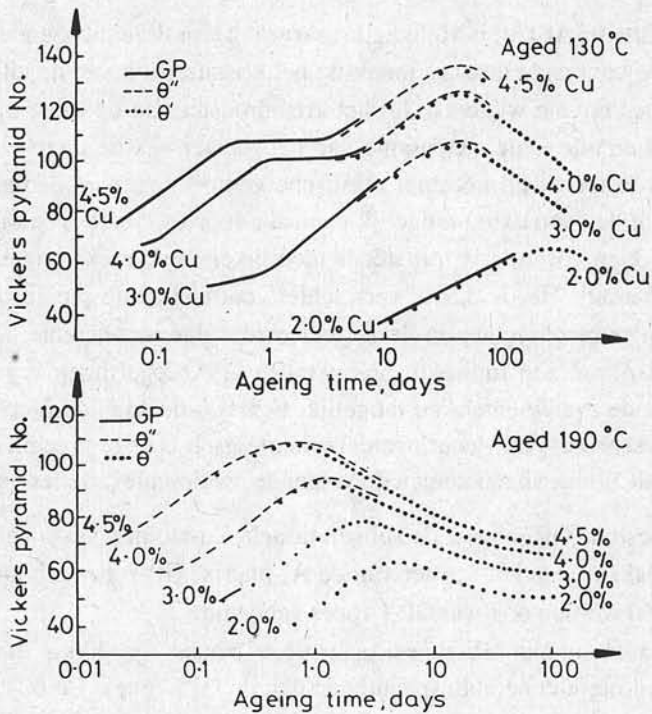
semi-coherent

coherent

De evenwichtsfase θ (Al_2Cu) is volledig incoherent. Door deze incoherentie verloopt de kiemvorming voor deze fase erg moeilijk: het kristalrooster van de uitscheidende fase sluit op geen enkele wijze aan bij het kristalrooster van de vaste oplossing (= matrix). Bij coherentie is de aanpassing van het rooster van de uitscheidende fase aan het matrixrooster, al of niet door elastische vervormingen, volledig. Bij semi-coherentie wordt de aanpassing mogelijk gemaakt door de creatie van mispassingsdislocaties. De kiemvorming wordt steeds moeilijker in de reeks 'coherent, semi-coherent, incoherent'. Het is dus te verwachten, dat coherente precipitaten eerder uitscheiden dan semicoherente, en deze weer eerder dan incoherente precipitaten. Men spreekt dan van een indirecte precipitatie. In Al-legeringen is ook directe precipitatie van de evenwichtsfasen mogelijk. Een voorbeeld is de precipitatie van silicium in afgeschrikte AlSi-legeringen. Technologisch is deze precipitatie minder belangrijk. In AlCu-legeringen komen de volgende precipitatievariëaties voor:

- a. Guinier-Preston (GP) zones: de substitutionele Cu-atomen verzamelen zich op de kubusvlakken van het rooster van de Al-matrix; GP-zones zijn dus volledig coherent. Zij worden ook wel GP-I-zones genoemd.
- b. θ'' -zones; analoog aan GP-zones, maar de θ'' -zones zijn dikker dan de GP-I-zones met grotere coherentiespanningen dan de GP-I-zones. De θ'' -zones heten ook GP-II-zones.
- c. θ' -fase met als chemische samenstelling Al_2Cu is in afwijking tot de evenwichtsfase kristallografisch semicoherent.
- d. θ -fase heeft ook als chemische samenstelling Al_2Cu en is kristallografisch volledig incoherent.

De samenhang tussen deze precipitatievariëaties en de hardheid wordt gegeven in Figuur 4.35. Hieruit blijkt direct, dat de maximale hardheid bereikt wordt met de niet-evenwichtsprecipitaten. Dit blijkt vrij algemeen te gelden: de uitscheiding van de evenwichtsprecipitaten bij voortgaande veroudering is gerelateerd aan een daling van de hardheid. Men spreekt van oververoudering. De temperatuurgebieden van het ontstaan van deze precipitaten zijn aangegeven in Figuur 4.31. Beneden de GP-lijn kunnen in beginsel bij voldoende lange gloeitijden alle genoemde precipitaten ontstaan. Indien de temperatuur hoger is dan een metastabiele oplosbaarheidslijn, dan worden de precipitaten beneden deze lijn niet gevormd. De volgende uitvoeringsparameters van de precipitatieharding kunnen de te bereiken waarden van de mechanische eigenschappen beïnvloeden:



Figuur 4.35. Hardheid als functie van verouderingstijd (Ref. 11).

a. tijd en temperatuur van het oplosgloeien

Deze parameters bepalen of de aanwezige legeringselementen volledig in oplossing kunnen gaan. Bij een te lange tijd of een te hoge temperatuur van het oplosgloeien treedt korrelgroei op van de Al-matrix, wat een nadelig effect heeft op de mechanische eigenschappen (zie Hall-Petch relatie, vergelijking 2.3).

b. kouddeformatie na oplosgloeien

Kouddeformatie na oplosgloeien creëert dislocaties die de kiemvorming van de precipitaten vergemakkelijken. Hierdoor ontstaan sneller fijnere precipitaten dan zonder toepassen van kouddeformatie, wat gunstig is voor de te bereiken mechanische eigenschappen.

c. tijd en temperatuur van het verouderen

Deze bepalen in sterke mate de soort en de grofheid van de te verkrijgen precipitaten. Men streeft naar fijn verdeelde precipitaten met de grootst mogelijke mispassing.

Oplosharding en precipitatieharding zijn uiteraard alleen mogelijk in aluminiumlegeringen. Aluminium wordt niet alleen gelegeerd ter verbetering van de sterkte, maar ook om enige andere, minder prettige, eigenschappen van Al in gunstige zin te beïnvloeden. De eigenschappen van Al kunnen worden verdeeld in vier brede categorieën:

1. Fysische eigenschappen

Een overzicht van de fysische eigenschappen van zuiver Al geeft Tabel 4.16. Al is een blauwachtig wit metaal met een hoog reflectievermogen, dat nog verhoogd kan worden door glansanodiseren. Het kristalrooster van Al is kvg/fcc, wat wijst op een uitstekende koudvervormbaarheid. Al heeft een relatief hoge thermische uitzettingscoëfficiënt.

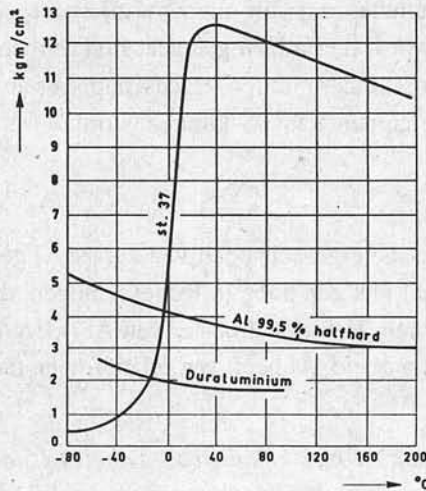
Vraag 4.17 Bereken voor Al met behulp van Tabel 4.16 de verhouding tussen dichtheid en soortelijke weerstand. Vergelijk deze waarde met die voor Cu. Let op de eenheden.

2. Mechanische eigenschappen

De E-modulus van een legering wordt vooral bepaald door de bindingen van de meest voorkomende atoomsoort. De lage E-modulus van Al is dus nauwelijks te verhogen door legeren. Zuiver Al heeft een zeer lage treksterkte. Daarentegen zijn er Al-legeringen die even sterk of zelfs sterker zijn dan gewoon staal. Toch kan men een staalconstructie niet zonder meer vervangen door een constructie uit een Al-legering. Doordat de E-modulus slechts eenderde van die van staal is, is de stijfheid van de constructie beduidend lager en kan eerder knik optreden. De kerfslagwaarde van Al stijgt bij dalende temperatuur en vertoont geen overgang bij 0 °C zoals staal (zie Figuur 4.36). Al-legeringen zijn dus geschikt voor cryogene (bij zeer lage temperatuur) toepassingen.

3. Chemische eigenschappen

Aluminium en zijn legeringen zijn altijd bedekt met een goed afsluitende huid van Al-oxyde. Daardoor is het onedele Al zeer goed bestand tegen atmosferische corrosie. De oxydel laag is van nature ongeveer 10 nm dik en kan door kunstmatige oxydatie verdikt worden. De oxydehuid is sterker naarmate het onderliggende Al zuiverder is. Vooral de aanwezigheid van Fe-, Cu- en Ni-atomen heeft een ongunstige invloed op de corrosieweerstand. Mg-atomen beïnvloeden deze corrosieweerstand vrijwel niet. Oplosharding met Mg-atomen betekent dus een verhoging van de rekgrens en treksterkte met behoud van de corrosieweerstand (zie ook de paragraaf over AlMg-legeringen). Sterke basen en een aantal sterke zuren (zoutzuur en zwavelzuur) tasten Al en zijn legeringen aan (ontvet Al dus niet met soda!). Zuiver Al is goed bestand tegen zeewater, neutrale en oxyderende zoutoplossingen, geconcentreerd salpeterzuur en de meeste organische zuren. Fluor geeft op Al een



Figuur 4.36. Kerfslagwaarden van staal, aluminium en duraluminium als functie van de temperatuur.

beschermende fluoridelaag. Direkt contact van Al met edelere metalen (Fe en Cu en hun legeringen, bijvoorbeeld) moet worden vermeden, omdat Al dan snel wordt aangetast. Roestvast staal en zink(legeringen) mogen metallisch contact maken met Al; roestvast staal omdat passivering optreedt en zink(legeringen) omdat de elektrodepotentiaal hiervan ten opzichte van veel elektrolyten ongeveer gelijk is aan die van Al. Aluminium en zijn legeringen hebben geen bekende schadelijke invloed op het menselijk organisme. Daarom is Al geschikt voor verpakking van levensmiddelen.

4. Verwerkingseigenschappen

Zuiver Al vertoont een vrij grote slink (circa 6%), waardoor de gietbaarheid niet zo goed is. Door de vorming van de oxydehuid is de lasbaarheid van Al en zijn legeringen duidelijk slechter dan die van laag-koolstofstaal. Aluminium is uitstekend koud vervormbaar. Bij deze koudvervorming eist men een glad oppervlak. Hiervoor is fijnkorrelig Al gewenst. Korrelverfijning verkrijgt men door toevoeging van titaan of zirkoon in lage gehalten (0,1 tot 0,2 gew%). De verspaanbaarheid van zuiver Al is vrij slecht door de grote rek bij breuk.

4.3.2.2. Aluminiumlegeringen

In het voorgaande kwamen verschillende nadelige eigenschappen van zuiver Al naar voren. Legeren biedt vaak een mogelijkheid om deze eigenschappen te verbeteren. De gewenste verbetering van sommige eigenschappen zal in het algemeen gevolgen hebben voor andere eigenschappen, bijvoorbeeld de verbetering van de sterkte zal vaak nadelige gevolgen hebben voor de mogelijkheden tot vervorming.

Vraag 4.18 *Oplosharding verhoogt de rekgrens. Verandert oplosharding de waarde van de E-modulus?*

Vraag 4.19 *AlMg₃¹ is een legering van Al99,5 met 3 gew% Mg in vaste oplossing; welke bewering is juist?*

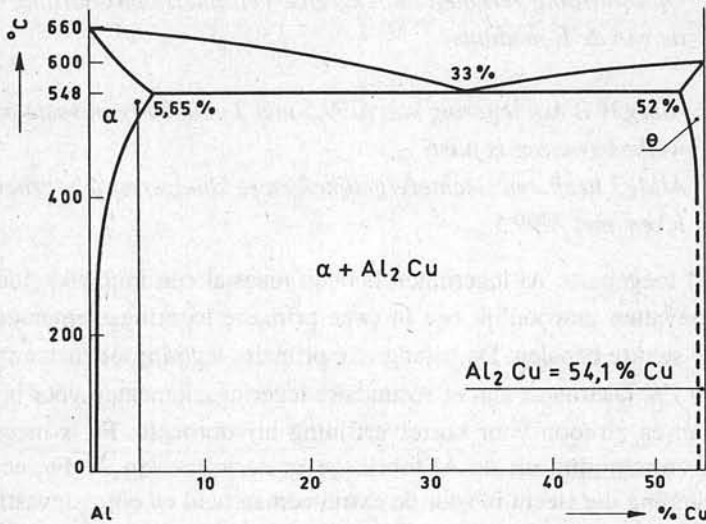
AlMg₃ heeft een slechtere/gelijke/betere koudvervormbaarheid vergeleken met Al99,5.

De industrieel toegepaste Al-legeringen hebben meestal een ingewikkelde samenstelling. Zij bevatten gewoonlijk een of twee primaire legeringselementen die het niveau van de sterkte bepalen. De belangrijke primaire legeringselementen zijn Mg, Mn, Si, Cu en Zn. Daarnaast zijn er secundaire legeringselementen voor bijzondere effecten: titaan en zirkoon voor korrelverfijning bijvoorbeeld. Fe is meestal aanwezig als verontreiniging uit de Al-fabricage in de vorm van Al₃Fe, een naaldvormige verbinding die slecht is voor de extrudeerbaarheid en corrosievastheid. Ter beperking van deze schadelijke effecten worden Mn en Cr in kleine gehalten toegevoegd (0,1-0,5 gew%). Steeds zijn aanwezig kleine gehalten Si, Zn en Cu; vooral Cu vermindert de corrosievastheid, zodat dit gehalte aan een maximum gebonden moet worden. De meest gebruikte Al-legeringen zijn gebaseerd op de volgende binaire of quasi-binaire systemen:

1. Al-Cu

Figuur 4.37 geeft het toestandsdiagram Al-Cu. De oplosbaarheid van Cu in Al is maximaal bij de eutectische temperatuur van 548 °C. In AlCu-legeringen treedt vaak kristalsegregatie op omdat het twee-fasengebied *L + primaire vaste fase* relatief breed is. De smelttemperatuur van het eutecticum, eventueel aanwezig als gevolg van deze kristalsegregatie, mag tijdens homogeniseren door oplosgloeien niet worden overschreden. Door kristalsegregatie kan al in de Al-legering met 2 gew% Cu enig eutecticum na stolling aanwezig zijn. Kristalsegregatie is ongewenst, omdat deze de oorzaak kan zijn van ongelijkmatigheid in eigenschappen na verouderen. Voor het homogeniseren kiest men op grond van het voorgaande een temperatuur juist beneden de eutectische temperatuur. Door langdurig homogeniseren juist onder de eutectische temperatuur kan de kristalsegregatie worden opgeheven.

¹ In het vervolg worden legeringen als volgt aangeduid: het scheikundig symbool van het basismetaleel, eventueel met zuiverheid, gevolgd door de scheikundige symbolen van de legeringselementen in dalend gewichtsperscentage, achter het scheikundig symbool het betreffende gewichtsperscentage van het voorgaand vermelde element. Wordt dit laatste niet vermeld, dan is dit percentage lager dan 1. De zuiverheid van het basismetaleel wordt gegeven door het gewichtsperscentage van het basiselement in de basislegering achter het symbool van het basiselement te vermelden. GA199,99Mg₃ is dus een AlMg gietlegering met 3 gew% Mg gemaakt van aluminium met een zuiverheid van 99,99 gew%. De hoofdletter G wordt gebruikt om gietlegeringen aan te duiden.



Figuur 4.37. Toestandsdiagram Al-Cu.

2. Al-Mg

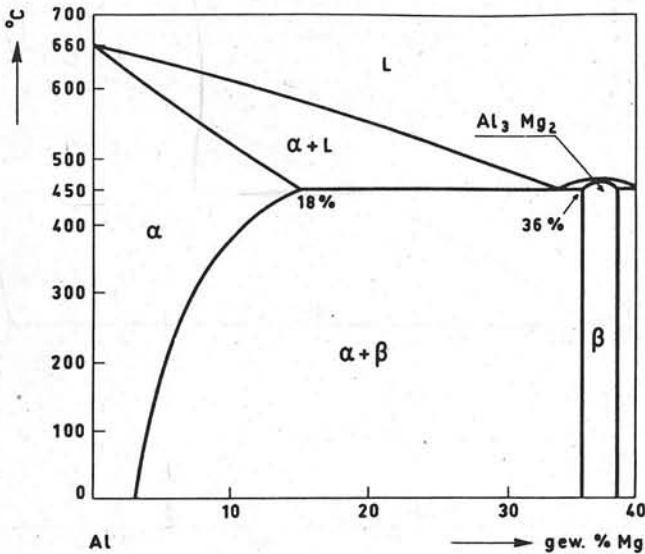
Figuur 4.38 geeft het Al-rijke gedeelte van het toestandsdiagram Al-Mg. De vaste oplosbaarheid van Mg in Al is vrij groot. Het tweefasengebied $L + \text{primair vaste fase}$ is vrij breed en Al-Mg legeringen vertonen dan ook een sterke kristalsegregatie, waardoor bij ongeveer 5 gew% Mg in de gegoten toestand het eutecticum kan optreden met daarin de intermetallische verbinding Al_3Mg_2 , ook wel aangeduid als Al_8Mg_5 . Dit eutecticum is nadelig voor de plastische vervormbaarheid. Door de kristalsegregatie, alsmede ten gevolge van de in beginsel mogelijke precipitatie (teruglopende oplosbaarheidslijn), bestaat er gevaar voor het optreden van interkristallijne corrosie. De mogelijke verbetering van de mechanische eigenschappen door precipitatie is gering en technisch niet interessant. Mg geeft wel een belangrijke oplosharding (zie Figuur 4.30).

3. Al-Mn

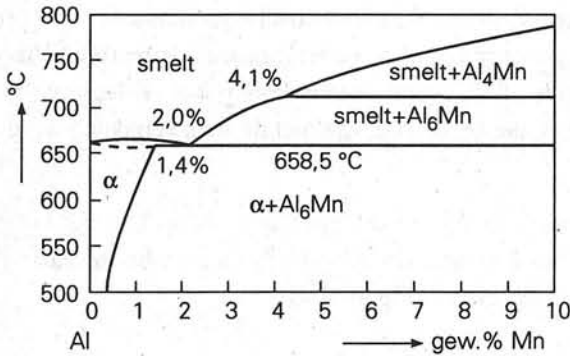
Figuur 4.39 geeft het Al-rijke gedeelte van het toestandsdiagram van Al-Mn. Ook Mn geeft een belangrijke oplosharding (zie Figuur 4.30). Precipitatieharding is in beginsel mogelijk, maar is technisch onbelangrijk. Daarom wordt het mangaangehalte in de toegepaste binaire AlMn-legeringen beperkt tot circa 2 gew%.

4. Al-Si

Figuur 4.40 geeft het toestandsdiagram Al-Si. De vaste oplosbaarheid van Si in Al is beperkt. Het tweefasengebied $\alpha + L$ is erg smal en er is een eutecticum bij 11,7 gew% Si. De AlSi-legeringen worden vooral toegepast als gietlegeringen. Silicium

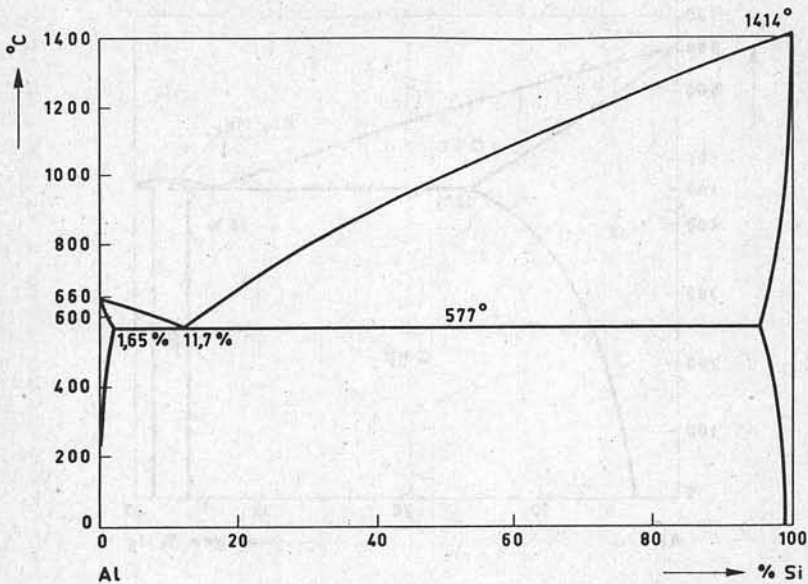


Figuur 4.38. Toestandsdiagram Al-Mg.



Figuur 4.39. Toestandsdiagram Al-Mn.

vermindert sterk slink. Zuiver Al heeft een slink van circa 6%, de slink van de legering met de eutectische samenstelling, de klassieke gietlegering silumin, bedraagt circa 3% en bij circa 25 gew% Si is de slink nul. In AlSi-legeringen met ongeveer de eutectische samenstelling ontstaan bij langzame afkoeling primair zeer grove plaatkristallen die de legering zeer bros maken. Door toevoegen van ongeveer 0,1 gew% Na, bijvoorbeeld in de vorm van een natriumzout, aan de smelt juist voor het gieten, treedt een buitengewone korrelverfijning op. Het eutecticum verschuift naar 14 gew% Si, waardoor de legering met 12 gew% juist ondereutectisch wordt. De microstructuur van de met natrium behandelde legering vertoont primaire Al-



Figuur 4.40. Toestandsdiagram Al-Si.

kristallen (dendrieten) in een fijne eutectische grondmassa. Deze smeltbehandeling wordt *veredelen* genoemd, niet te verwarren met de warmtebehandeling van staal met dezelfde naam of de warmtebehandeling van Al-legeringen (verouderen of precipitatieharding), die helaas ook wel met de term *veredelen* wordt aangeduid.

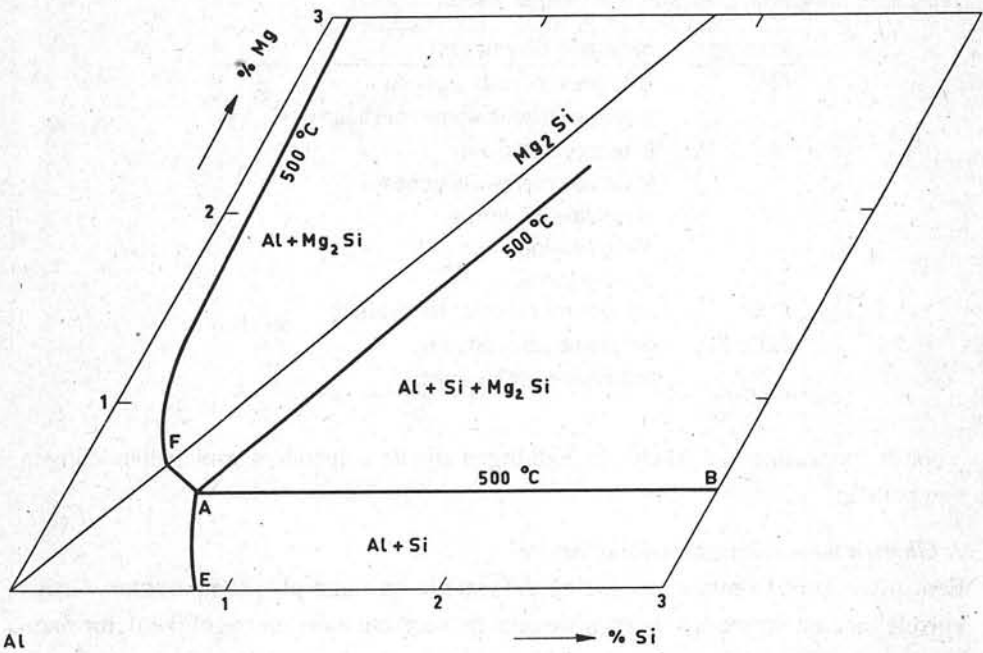
5. Al-Mg₂Si

Voor een juiste beschrijving van dit legeringssysteem kan niet volstaan worden met een binair toestandsdiagram. De Al-rijke hoek van het ternaire diagram van het systeem AlMgSi is gegeven in Figuur 4.41.

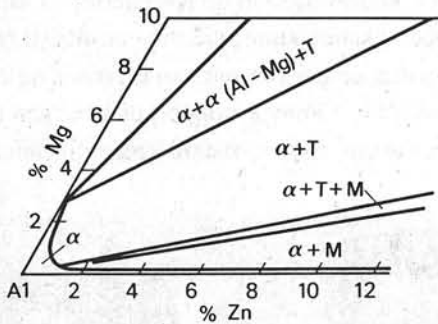
6. Al-MgZn₂

In het ternaire systeem Al-Zn-Mg komen verschillende verbindingen voor (zie Figuur 4.42). Van technisch belang is vooral de verbinding MgZn₂; de legeringen op basis van Al-MgZn₂ hebben een zeer grote sterkte. Een nadeel is de gevoeligheid voor spanningscorrosie. Toevoeging van Cu vermindert deze gevoeligheid en de te bereiken sterkte wordt nog verhoogd. Bij de warmtebehandeling en verwerking van deze legeringen moeten inwendige spanningen worden vermeden. In sommige van de Al-MgZn₂ legeringen verloopt de precipitatie al bij kamertemperatuur.

Zoals eerder opgemerkt, zijn de technisch belangrijke Al-legeringen zeer complex van samenstelling. De belangrijkste reden hiervoor is de wens om via oplosgloeien, afschrikken en verouderen/precipitatie de mechanische eigenschappen te verbeteren. Een overzicht van mogelijke precipitaten in enkele Al-legeringen vindt men in Tabel



Figuur 4.41. Aluminiumrijke hoek van de isotherme doorsnede bij 500 °C van het ternaire toestandsdiagram Al-Si-Mg.



Figuur 4.42. Aluminiumrijke hoek van de isotherme doorsnede bij 200 °C van het ternaire toestandsdiagram Al-Mg-Zn.

4.18. Bewerkingen waarbij grote hoeveelheden warmte in de Al-legeringen worden gebracht zijn in feite ook warmtebehandelingen en kunnen dus desastreuze gevolgen hebben voor de zo zorgvuldig verkregen microstructuur na de originele warmtebehandeling. Daarom zijn de Al-legeringen met sterkten verkregen door precipitatie in het algemeen niet lasbaar, tenzij de gelaste Al-legeringen opnieuw een warmtebehandeling kunnen ondergaan.

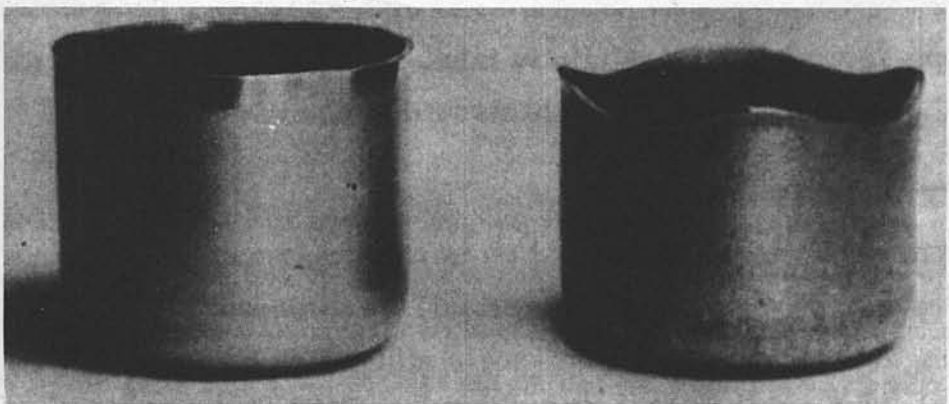
Tabel 4.18. Mogelijke precipitaten in Al-legeringen.

| <i>legering</i> | <i>mogelijke precipitaten</i> |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Al-Cu | GP-zones als dunne platen θ ruimtelijk gecentreerd hexagonaal CuAl_2 θ' tetragonaal CuAl_2 θ'' uit voormalige GP-zones |
| Al-Mg | sferoidale GP-zones β kvg Al_3Mg_5 β' hexagonaal |
| Al-Si | silicium met rooster als diamant |
| Al-Cu-Mg | GP-zones als staafvorm orthorombisch Al_2CuMg |

Voor de toepassing van Al en zijn legeringen zijn de volgende warmtebehandelingen van belang:

1. Gloeien voor rekristallisatie of herstel

Een grove korrel ontstaat na kleine deformatie en hoge gloeitemperatuur. Grove korrels moeten vermeden worden wegens de vergrote kans op ongelijke deformatie bij de vervorming (sinaasappelhuid bij kouddeformatie heeft als oorzaak een grove korrel van de koudgedeformeerde legering). Rekristalliserend gloeien elimineert de textuur (oriëntatie in de kristalstructuur waardoor eigenschappen richtingsafhankelijk worden) die bijvoorbeeld bij koudwalsen in de Al-legering is aangebracht; hiervoor in de plaats komt een rekristallisatietextuur, die minder uitgesproken is dan de oorspronkelijke walstextuur, zodat de anisotropie van eigenschappen en vervormingsmogelijkheden ook verminderd is. Orenvorming bij dieptrekken (zie Figuur 4.43) is een gevolg van anisotropie, die dus door rekristalliserend gloeien kan verminderen.



Figuur 4.43. Orenvorming bij dieptrekken.

Voor een fijne korrel na rekristallisatie zijn grote vervormingen vooraf nodig. Voor veel Al-legeringen blijkt empirisch dat de vereiste deformatiegraad in de orde van 50% ligt. Is zo'n grote vervorming niet mogelijk of is de vervorming onregelmatig, waardoor rekristalliserend gloeien een grote variatie in korrelgrootte zou geven, dan prefereert men vaak voor een herstel van de vervormingsmogelijkheden herstelgloeien. De vervormingstextuur wordt door herstelgloeien niet opgeheven en het gevaar voor orenvorming bij dieptrekken blijft dus bestaan. Herstelgloeien wordt vaak toegepast om de inwendige spanningen na vormgeving te verminderen. Men spreekt dan van uitgloeien. Met herstelgloeien kan men van volledig hard gedefor-meerde legeringen de hardheid terugbrengen tot 1/4 of 1/2 hard (zie Figuur 2.25). De uitgloeï/herstelgloeitemperaturen liggen meestal tussen 150 en 300 °C. De rekristal-lisatiegloeïing wordt meestal uitgevoerd bij temperaturen tussen 350 en 450 °C.

2. Warmtebehandelingen voor precipitatie

Bij oplosgloeien worden de versterkende elementen in vaste oplossing gebracht. De temperatuur van het oplosgloeien is dus afhankelijk van de legering, maar ligt meestal in de buurt van de temperatuur met de maximale oplosbaarheid voor de betreffende legeringselementen. Bij binaire Al-legeringen met een eutecticum is dat de eutectische temperatuur. Het afschrikken gebeurt gewoonlijk in water van kamertemperatuur, maar ook wel ter vermindering van de thermische spanningen in lucht of warm water (90-100 °C). Daarna volgt de *eigenlijke precipitatie of uitharding*. De uitharding kan bij kamertemperatuur gebeuren of bij verhoogde temperatuur, de laatste meestal tussen 120 en 200 °C. Een veel gebruikte code voor uitharding bij kamertemperatuur is T4 en voor de uitharding bij verhoogde tempe-ratuur is T6, zie ook Appendix Nomenclatuur.

4.3.2.3. Aluminiumkneedlegeringen

Een Al-legering is sterker dan zuiver Al, de vervormbaarheid van de Al-legeringen is daardoor in het algemeen kleiner dan die van zuiver Al. Heterogene Al-legeringen, dat zijn Al-legeringen met verschillende fasen, hebben in het algemeen een kleinere weerstand tegen corrosie dan homogene eenfasige legeringen. Legeringen met alleen oplosharding zijn eenfasig en hebben dus in het algemeen een vergrote corrosie-weerstand. Magnesium oplossen in Al is daarom gunstig: het geeft oplosharding zonder de corrosieweerstand nadelig te beïnvloeden, want de AlMg-legering is eenfasig. Echter, het AlMg-systeem vertoont een brede stollingslus (zie Figuur 4.38), zodat kristalsegregatie gemakkelijk optreedt wat leidt tot uitscheiding van een intermetallische verbinding. Dit is uiteraard nadelig voor de corrosieweerstand. Precipitatieharding en kouddeformatie kunnen Al-legeringen zeer versterken. Lassen impliceert de introductie van een grote hoeveelheid warmte in de te verbinden delen, waardoor in de warmtebeïnvloede zone naast de las de gunstige effecten van precipitatieharding of kouddeformatie verloren gaan. Deze voorbeelden tonen aan,

5400
2400
7100
1060
8100
1440
1350
6000
2000

x 450
12
900
200 5400

dat het legeren van Al ter verbetering van sommige eigenschappen vrijwel altijd nadelige effecten op andere eigenschappen heeft.

Op grond van de gunstige eigenschappen kan men de volgende toepassingsgebieden voor Al en zijn legeringen onderscheiden (zie Tabel 4.19). De Al-kneedlegeringen voor deze toepassingsgebieden zullen kort worden besproken.

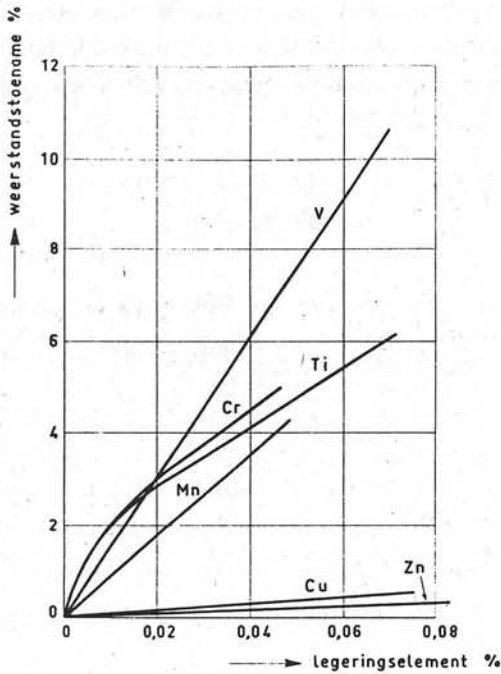
Tabel 4.19. Toepassingsgebieden van aluminiumlegeringen.

| <i>eigenschap</i> | <i>toepassingsgebied</i> |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| lage soortelijke weerstand voor elektrische stroom | gunstige verhouding tussen dichtheid en soortelijke elektrische weerstand |
| kvg/fcc kristalrooster | koudvervorming |
| lage smelttemperatuur | warmvervorming (warmextrusie) lassen |
| lage dichtheid | hoge verhouding van sterkte en dichtheid |
| dichte oxydel laag | weerstand tegen corrosie anodiseren |

1. Elektrische leidingen

Al en Al-legeringen hebben een lage verhouding tussen dichtheid en soortelijke weerstand. Hierdoor kan een massabesparing in vergelijking met leidingen gebaseerd op koper gerealiseerd worden, zodat de masten van hoogspanningsleidingen lichter kunnen worden. De functie-eisen voor bovengrondse hoogspanningsleidingen zijn tegenstrijdig: hoge sterkte en lage elektrische weerstand. Sterkte is te realiseren door legeren waardoor de elektrische weerstand ook toeneemt (zie Figuur 4.44). De soortelijke weerstand is laag bij grote zuiverheid van Al, maar dan is ook de sterkte laag. Algemeen geldt, dat oplosharding ook de soortelijke weerstand sterk verhoogt. Bij precipitatie daalt de soortelijk weerstand (zie ook §4.3.3). Kouddeformatie laat de soortelijke weerstand nagenoeg onveranderd. Elektrische leidingen bestaan dus vaak uit koudgetrokken draad. Bij recente Al-legeringen verhogen kleine hoeveelheden, zeer fijn verdeelde, intermetallische Al-Fe-verbindingen in wisselwerking met dislocaties de sterkte (Ref. 12). De gevraagde sterkte wordt ook wel verkregen door de leidingen te voorzien van een kern van staal draad. Ook ondergrondse leidingen worden wel uit Al of Al-legeringen vervaardigd wegens een vereenvoudiging van de fabricage: de koperdraadstrengen vervangt men door continu gegoten Al-geleiders.

Vraag 4.20 *Bepaal de massaverhouding tussen een draad van gelijke lengte en elektrische weerstand van respectievelijk Cu en Al (gebruik Tabel 4.16). Let op de eenheden.*



Figuur 4.44. Invloed van legeringselementen op de soortelijke elektrische weerstand van aluminium.

2. Koudvervorming

Koudvervorming creëert extra dislocaties in de legering. Door de interacties tussen de bestaande en de nieuwe dislocaties en tussen precipitaten en dislocaties wordt het steeds moeilijker nog meer nieuwe dislocaties te introduceren. De koudvervormbaarheid neemt dus af naarmate de deformatiegraad en het gehalte aan legeringselementen hoger zijn. Bij de kouddeformatie eist men:

- i. een glad oppervlak *na* de deformatie
- ii. kleine deformatiekrachten
- iii. isotropie van eigenschappen ?

Voor een glad oppervlak van het product is een fijnkorrelige legering vereist. Een grove korrel geeft eerder kans op een hobbelig oppervlak van het product (sinaasappelhuid). Een fijnkorrelige legering vraagt echter grotere vervormingskrachten dan een grofkorrelige legering (Hall-Petch relatie, vergelijking 2.3). Anisotropie kan leiden tot de al genoemde orenvorming (Figuur 4.43). Anisotropie vermijdt men zo veel mogelijk door textuur, dat is voorkeursoriëntatie van de korrels, zo veel mogelijk te elimineren door rekristalliserend gloeien.

Bij de kouddeformatie als methode voor massafabricage streeft men naar zo laag mogelijke fabricagekosten en dus zo klein mogelijke deformatiekrachten. Dit betekent dat de volgende legeringen in de aangegeven volgorde voor de kouddeformatie geschikt zijn (zie ook Tabel 4.20):

(technisch) zuiver Al → Al-legeringen met oplosharding → Al-legeringen met precipitatieharding

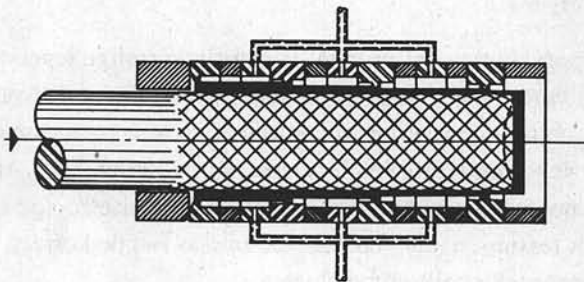
Tabel 4.20. Aluminiumkneedlegeringen voor kouddeformatie na uitgloeien.

| legering | AA-code | 0,2 % rekgrens (MPa) | breukrek (%) |
|--------------|---------|----------------------|--------------|
| Al99,5 | 1050 | 20 | 30 |
| Al99 | 1100 | 35 | 35 |
| AlMn1,2 | 3003 | 25 | 30 |
| AlMn1,2Mg1 | 3004 | 70 | 20 |
| AlMg1 | 5005 | 35 | 28 |
| AlMg4,5Mn0,4 | 5182 | 130 | 21 |

Noot: AA-code in Appendix Nomenclatuur.

De sterkteverhoging door kouddeformatie van technisch zuiver Al wordt gegeven door Figuur 2.25. Melkflesdoppen en huishoudfolie worden van technisch zuiver Al gemaakt. De Al-kneedlegeringen met oplosharding voor kouddeformatie zijn vooral de AlMg- en de AlMn-legeringen. Voor het bereiken van de maximale mogelijkheden voor kouddeformatie worden deze legeringen zacht gegloeid.

Bier- en frisdrankblikjes worden sinds 1962 ook uit Al-kneedlegeringen vervaardigd door dieptrekken en gladstrijken van de wand van het blikje (Ref. 12). Figuur 4.45 geeft een beeld van een fase uit het productieproces. Het gladstrijken gebeurt doordat de persplunjer de legering door steeds nauwere ringen in de matrix perst. Hierbij wordt de wanddikte steeds geringer: tot 0,30 mm. Deze techniek stelt de volgende fabricage-eisen aan de Al-kneedlegering: maximale koudvervormbaarheid met minimale anisotropie en een behoorlijke sterkte. De blikjes mogen niet scheuren



Figuur 4.45. Fase uit het productieproces van een aluminium frisdrankblikje (Ref. 12).

tijdens de fabricage. De AlMn- en de AlMg-kneedlegeringen komen het best tegemoet aan deze eisen (Ref.12).

Vraag 4.21 *Zijn de fabricage-eisen gedeeltelijk tegenstrijdig? Zo ja, geef deze tegenstrijdigheid aan.*

Mn heeft een beperkte oplosbaarheid in Al. De maximale oplosbaarheid van Mg in Al is belangrijk groter. Echter, bij gehalten vanaf 5 gew% Mg neigt de intermetallische verbinding Al_8Mg_5 tot precipitatie, speciaal in de zwaar gedeformeerde toestand. Voor het blikje zelf wordt veelal AlMn1,2Mg1 toegepast en voor het deksel AlMg4,5Mn0,4.

Vraag 4.22 *Stel, dat alle legeringselementen in de laatstgenoemde legeringen in vaste oplossing zijn. Vergelijk de sterkte van AlMn1,2Mg1 en van AlMg4,5Mn0,4.*

Vraag 4.23 *Het deksel bevat ook de drinkopening, die daarop is ingestanst. Waarom past men voor het deksel AlMg4,5Mn0,4 toe?*

Het effect van oplosverharding van Mg in Al wordt gegeven in Figuur 4.30. Duidelijk is dat een hoger gehalte aan Mg een vergroting van de deformatiekrachten betekent en dus een verkleining van de deformatiemogelijkheden. De AlMg-legeringen kunnen glanzend gepolijst worden en vooral de AlMg-legeringen gebaseerd op Al99,99 zijn zeer geschikt voor glansanodiseren (zie Ref. 13).

De precipitatiehardende Al-kneedlegeringen zijn uiteraard het best koud vervormbaar juist na het afschrikken en juist voor de precipitatieharding.

Vraag 4.24 *Waarom is de bewering in de laatste zin juist?*

De kouddeformatie juist na het oplosgloeien en voor het verouderen heeft een gunstig effect op de precipitatie: door de introductie van dislocaties wordt de precipitatie versneld, ergo kortere gloeitijden of lagere temperaturen van verouderen voor het bereiken van overeenkomstige waarden van de mechanische eigenschappen. Dislocaties vergemakkelijken de kiemvorming voor precipitatie. Er zijn precipitatiehardende Al-kneedlegeringen, die na het verouderen toch nog koudvervormd kunnen worden. De koudvervorming van precipitatiehardende kneedlegeringen is vooral van belang in de auto-industrie, waar een behoorlijke sterkte vereist wordt voor onderdelen vervaardigd via kouddeformatie. Een overzicht van enkele in de auto-industrie gebruikte Al-kneedlegeringen voor carrosserieplaat geeft Tabel 4.21. Bij sommige Al-kneedlegeringen verloopt de precipitatie al bij kamertemperatuur. Dit betekent, dat lakken bij verhoogde temperatuur een warmtebehandeling is en een merkbaar effect op de mechanische eigenschappen kan hebben.

Tabel 4.21. Aluminiumkneedlegeringen voor carrosserieplaat.

| legering Al+ | AA code | warmte- behandeling | 0,2 % rekgrens (MPa) | breukrek (%) |
|-----------------|---------|------------------------|-------------------------|-----------------|
| Cu2,6Si0,5Mg0,5 | 2036 | T4 | 195 | 24 |
| Mg4,5Mn0,2 | 5082 | uitgegloeid | 90 | 24 |
| Si1,1Mg0,6Mn0,4 | 6009 | T4 | 125 | 25 |
| Si1,1Mg0,6Mn0,4 | 6009 | T6 | 325 | 12 |

3. Warmvervorming

Bij de warmvervorming is uiteraard veel minder vervormingsarbeid vereist dan bij de koudvervorming. Vormen van warmdeformatie zijn warmwalsen, smeden en warmextrusie. Bij warmextrusie wordt een legering met een grote dwarsdoorsnede geperst door een opening met een kleine dwarsdoorsnede. De warmvervorming wordt moeilijker in de volgorde

(technisch) zuiver Al → Al-legeringen met oplosharding → Al-legeringen met precipitatieharding

Moeilijk vervormbare kneedlegeringen kunnen het best via warmextrusie vervormd worden: in de extrusiematrijs wordt in de doorsnede druk uitgeoefend, waardoor de kans op scheurvorming kleiner is dan bij walsen of smeden. Door de relatief lage smelttemperatuur zijn Al-legeringen in het algemeen geschikt voor warmextrusie. De deformatieweerstand tijdens de extrusie wordt vooral bepaald door het gehalte aan legeringselementen in vaste oplossing aanwezig op de extrusietemperatuur bij het begin van de extrusie. De extrusietemperatuur ligt veelal tussen 400 en 500 °C. De oppervlaktekwaliteit na de extrusie wordt vooral bepaald door de aanwezigheid van precipitaten en intermetallische verbindingen. De extrudeerbaarheid van een legering is niet te definiëren, maar de mogelijke extrusiesnelheid geeft hierover wel een aanwijzing: hoe hoger deze snelheid, hoe gemakkelijker een legering te extruderen is. Uit het voorgaande volgt, dat de microstructuur van de legering van grote invloed is op de extrudeerbaarheid. In Tabel 4.22 wordt een vergelijking gegeven van de extrudeerbaarheid van enkele Al-kneedlegeringen, waarbij de waarde van de typische warmextrusielegering AlMgSi0,5 op 100 wordt gesteld (zie ook Ref. 14). Bij warmextrusie verdwijnen de geïntroduceerde dislocaties direct door herstel en rekristallisatie (warmextrusie gebeurt bij temperaturen $> 0,5 T_m$). Opgeloste atomen en intermetallische verbindingen hebben interacties met dislocaties en hoe meer opgeloste atomen en intermetallische verbindingen aanwezig zijn, hoe trager de door de deformatie geïntroduceerde dislocaties verdwijnen. De eenvoudige legeringen hebben dus een betere extrudeerbaarheid dan de ingewikkelde Al-kneedlegeringen (zie Tabel 4.22). Worden aan de geëxtrudeerde legering sterkte-eisen gesteld, dan zal men toch een legering met een lagere extrudeerbaarheid kiezen. De AlMgSi-legeringen vormen vaak een aantrekkelijk compromis tussen sterkte en extrudeerbaarheid.

Tabel 4.22. Sterkte en extrudeerbaarheid van aluminiumkneadlegeringen.

| legering Al | AA-code | warmte-behandeling | 0,2% rekgrens (MPa) | breukrek (%) | relatieve extrudeerbaarheid |
|---------------|---------|--------------------|---------------------|--------------|-----------------------------|
| 99,5 | 1050 | uitgegloeid | 20 | 30 | 160 |
| Mn1Cu | 3003 | uitgegloeid | 35 | 35 | 120 |
| Mg0,5Si0,5 | 6060 | T6 | 165 | 10 | 100 |
| Mg0,7Si0,4 | 6063 | T6 | 215 | 12 | |
| Mg1Si0,6 | 6061 | T6 | 275 | 12 | |
| Mg0,9Si1 | 6082 | T6 | 260 | 8 | 60 |
| Mg1 | 5005 | uitgegloeid | 40 | 30 | |
| Mg1,5 | 5050 | uitgegloeid | 55 | 24 | |
| Mg2,5 | 5052 | uitgegloeid | 90 | 25 | |
| Mg5 | 5056A | uitgegloeid | 110 | 17 | 25 |
| Mg4,5Mn | 5083 | uitgegloeid | 145 | 22 | 20 |
| Cu2,5Mg2,5 | 2117 | T4 | 125 | 18 | |
| Cu4Mg1Si | 2017A | T4 | 275 | 22 | 20 |
| Cu4Mg1,5 | 2024 | T6 | 395 | 10 | |
| Cu4SiMg | 2014 | T6 | 410 | 13 | |
| Zn4,3Mg3,3Cu | 7079 | T6 | 470 | 14 | |
| Zn5,5MgCu1,5 | 7075 | T6 | 500 | 11 | 9 |
| Zn6,8Mg2,7Cu2 | 7178 | T6 | 540 | 10 | |

4. Hoge verhouding van sterkte en dichtheid

Deze Al-kneadlegeringen zijn alle precipitatiehardende legeringen. Bijgevolg zijn in het algemeen de lasbaarheid en de corrosieweerstand matig. Er zijn drie klassen te onderscheiden: AlMgSi, AlCu en AlZnMg(Cu). Hiervan bezitten de AlMgSi-legeringen de beste corrosieweerstand (voor veel toepassingen ruim voldoende) en de laagste sterkte, zie Tabel 4.22. Sommige AlCuMg- en AlZnMgCu-legeringen vertonen na oplosgloeien en afschrikken precipitatie bij kamertemperatuur en kunnen daarom gelast worden.

Vraag 4.25 *Waarom zijn de op kamertemperatuur uithardende Al-kneadlegeringen lasbaar?*

De legeringen voor warmextrusie AlMgSi worden in het algemeen verouderd bij temperaturen tussen 160 en 190 °C. Dit beperkt uiteraard hun lasbaarheid. Na het lassen moet men opnieuw verouderen of genoeg nemen met een lasverbinding die zwakker is dan de verbonden delen. Om dit te vermijden maakt men soms mechanische verbindingen. Een voorbeeld is de fietsvelg van geëxtrudeerde AlMgSi-legering: de velg verkrijgt men door een profiel rond te buigen en de einden te verbinden met stalen pennen die in de ogen van de profieldoorsnede gestoken worden.

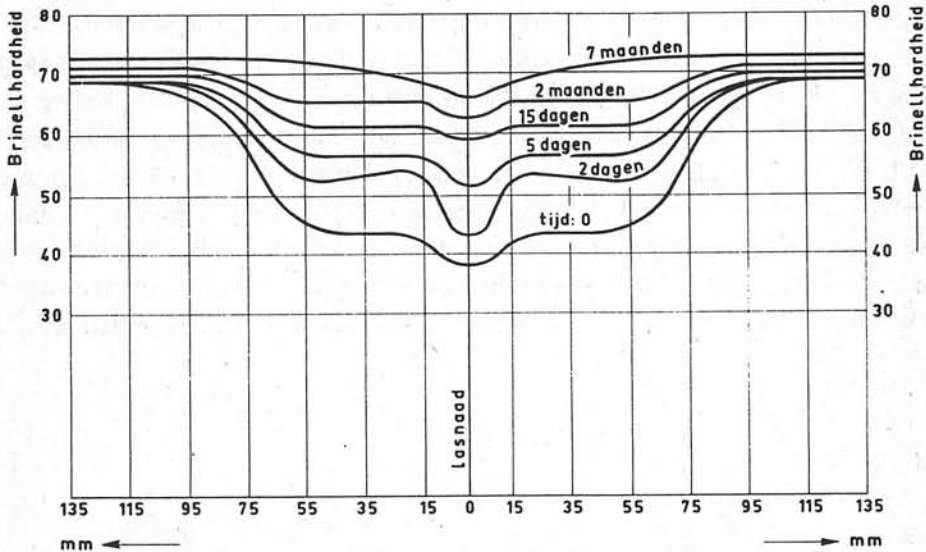
Tot de AlCuMg-legeringen behoort de oudst bekende precipitatiehardende Al-kneadlegering dural. Precipitatie in AlCuMg is mogelijk bij kamertemperatuur, maar

wordt veelal uitgevoerd bij verhoogde temperatuur. De toevoeging van Si maakt harding bij verhoogde temperatuur noodzakelijk. De geringe corrosieweerstand van deze legeringen wordt voor plaat ondervangen door er aan beide kanten een dunne laag zuiver Al op te walsen (Alclad). De technische AlCuMg-legeringen hebben alle een ingewikkelde samenstelling. Die met ongeveer 4 gew% Cu zijn het sterkst, maar daardoor het moeilijkst vervormbaar. Daarom worden voor klinknagels indien mogelijk de legeringen met maar circa 2,5 gew% Cu gebruikt. Een belangrijker criterium voor de keus van de legering voor klinknagels is echter de wens dat de klinknagel mechanische eigenschappen heeft overeenkomstig met die van de te verbinden onderdelen. Daarom zijn er ook klinknagels beschikbaar op basis van technisch zuiver Al en van de Al-kneedlegeringen met hoge sterkte.

De AlZnMg(Cu)-legeringen zijn de Al-legeringen met de hoogste sterkte. Zij zijn echter gevoelig voor spanningscorrosie en kerfwerking bij vermoeiing. De gevoeligheid voor spanningscorrosie wordt verminderd door toevoeging van Cu en Cr. Het gehalte aan Zn en Mg kan nu verhoogd worden omdat de negatieve invloed, die deze hebben op de kerfwerking en de spanningscorrosie, gedeeltelijk opgeheven wordt door Cu en Cr. De gevoeligheid voor spanningscorrosie wordt ook verminderd door verlaging van de thermische spanningen. Daarom worden de AlZnMg(Cu)-legeringen vaak afgeschrikt na het oplosgloeien in water van 90 tot 100 °C in plaats van in water van kamertemperatuur. De precipitatie in sommige AlZnMg-legeringen kan verlopen bij kamertemperatuur, zodat deze legeringen lasbaar zijn (zie Figuur 4.46). De verouderstemperatuur voor vele van de AlZnMg(Cu)-legeringen ligt in de buurt van 120-130 °C. Voor een beperking van de gevoeligheid voor spanningscorrosie stelt men, dat zonder Cu het gehalte aan Zn+Mg lager dan 6 gew% moet zijn. Bij 2 gew% Cu geldt het Zn-gehalte < 8,5 gew% en het gehalte aan Zn+Mg < 11 gew%. Tabel 4.23 geeft enkele AlZnMg(Cu)-legeringen die hieraan voldoen. Het koper heeft hierin een dubbel effect: de gevoeligheid voor spanningscorrosie wordt minder, de algemene gevoeligheid voor corrosie wordt verminderd. Daarom worden voor de vliegtuigbouw met zuiver Al geplaatste AlZnMg(Cu)-legeringen geleverd. De AlZnMg(Cu)-legeringen worden vooral toegepast waar de statische sterkte doorslaggevend is.

Tabel 4.23. AlZnMg(Cu)-legeringen.

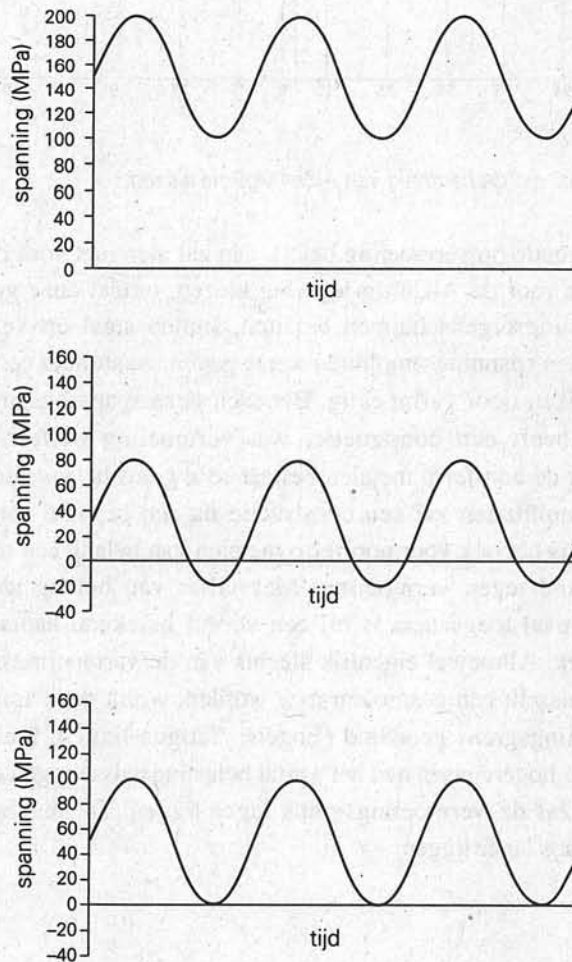
| legering | AA-code | gehalte Zn (gew%) | gehalte Mg (gew%) | gehalte Zn+Mg (gew%) | eigenschappen |
|----------|---------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------------|
| AlZnMg | 7008 | 5,0 | 1,0 | 6,0 | matige sterkte, lasbaar |
| | 7046 | 7,1 | 1,3 | 8,4 | hoge sterkte, lasbaar |
| AlZnMgCu | 7075 | 5,6 | 2,5 | 8,1 | hoge sterkte, niet lasbaar |



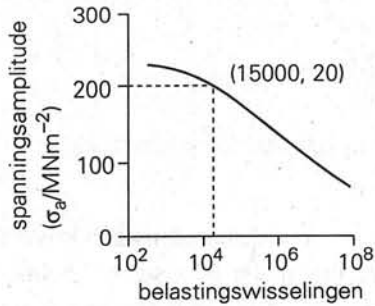
Figuur 4.46. Herstel van de hardheid van AlZn4Mg2 na lassen.

Wordt een constructie op vermoeiing belast, dan zal men niet voor de AlZnMg(Cu)-legeringen, maar voor de AlCuMg-legering kiezen, omdat deze gunstige waarden voor de vermoeiingseigenschappen bezitten. Indien staal op vermoeiing belast wordt, dan is er een spanningsamplitude aan te geven, waaronder een constructie niet meer kan bezwijken door vermoeiing. Beneden deze spanningsamplitude, de vermoeiingsgrens, heeft een constructie, wat vermoeiing betreft, een oneindige levensduur. Voor de non-ferro metalen bestaat zo'n grens helaas niet. Ook voor zeer lage spanningsamplituden zal een constructie na een bepaald aantal wisselingen bezwijken. Toch is het ook voor non-ferro metalen van belang een indicatie te geven voor de weerstand tegen vermoeiing. Meestal is van belang welke spanningsamplitude maximaal toegestaan is bij een vooraf berekend aantal belastingswisselingen tot breuk. Alhoewel eigenlijk slechts van de vermoeiingssterkte voor een bepaald aantal wisselingen gesproken mag worden, wordt deze amplitude toch ook vaak de vermoeiingsgrens genoemd (Engels: 'fatigue limit'). Stelt men voor een bepaalde legering hogere eisen aan het aantal belastingswisselingen dat moet worden verdragen, dan zal de vermoeiingsgrens lager liggen. De maximale spanningsamplitude moet dus lager liggen.

Bij het bepalen van de vermoeiingsgrens is ook van belang wat de gemiddelde spanning is waaromheen de wisseling plaatsvindt. Enkele belastingstoestanden met verschillende gemiddelde spanningen zijn gegeven in Figuur 4.47. Bij een spanningswisseling tussen 100 en 200 MPa (a), met dus een gemiddelde spanning van 150 MPa, zal eerder breuk optreden dan bij een belastingswisseling tussen -20 en 80 MPa (b). De optimale waarde van de gemiddelde spanning ligt bij 0 MPa. Een veel voorkomend type belasting is de sprongbelasting (c). Hierbij varieert de spanning tussen nul en een maximale spanning. De gemiddelde spanning is dus gelijk aan de spanningsamplitude. In Figuur 4.48 is het verband tussen vermoeiingsgrens en aantal wisselingen weergegeven voor een sprongbelasting voor een AlCuMg-legering.



Figuur 4.47. Belastingstoestanden met verschillende gemiddelde belastingen.



Figuur 4.48. Spanningsamplitude als functie van het aantal belastingswisselingen voor de 2014-T6 Al-legering (Ref. 7).

In de praktijk zullen de belastingswisselingen niet even groot zijn. Naast het aantal toegestane wisselingen is het dus zaak van tevoren een schatting te maken van de grootte van de belastingswisselingen. Op grond hiervan kan met behulp van de *regel van Miner* (formule 4.7) de levensduur geschat worden.

Stel dat in een constructie-onderdeel in een maand van gebruik n_1 belastingswisselingen met amplitude σ_1 optreden, n_2 met amplitude σ_2 , n_3 met amplitude σ_3 , algemeen dus n_i met amplitude σ_i en dat N_1, N_2, N_3 en N_i het aantal belastingswisselingen is waarvoor elk van de spanningsamplituden fataal zou zijn. Het betreffende constructie-onderdeel kan slechts één keer falen. Elk der combinaties van spanningsamplitude en aantal wisselingen vertegenwoordigt een fractie van n/N van de totale levensduur. Volgens de regel van Miner geldt dat breuk optreedt als:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (4.7)$$

De regel van Miner is niet erg nauwkeurig en kan alleen maar worden gebruikt als een eerste schatting van de levensduur. Het volgende voorbeeld (ontleend aan Ref. 7) is een toepassing van de regel van Miner.

Een van een AlCuMg-legering vervaardigd onderdeel wordt in elke maand bedrijfstermijn als volgt belast:

| aantal belastingswisselingen | spanningsamplitude van de sprongbelasting |
|------------------------------|-------------------------------------------|
| 20 | 210 MPa |
| 400 | 140 MPa |
| 1000 | 70 MPa |

Hier geldt de vermoeiingscurve uit Figuur 4.48. Schat met de regel van Miner de levensduur van dit onderdeel. Uit Figuur 4.48 volgt voor het aantal belastingswisselingen waarbij de gegeven spanningsamplituden fataal zijn:

$$210 \text{ MPa} \rightarrow 10^4, \quad 140 \text{ MPa} \rightarrow 10^6, \quad 70 \text{ MPa} \rightarrow 10^8$$

Volgens de regel van Miner geldt:

$$\frac{20}{10^4} + \frac{400}{10^6} + \frac{1000}{10^8} = 2,4 \cdot 10^{-3}$$

De levensduur van het constructie-onderdeel is dus $(2,4 \times 10^{-3})^{-1}$ maanden = 35 jaar.

5. Lassen

De eigenschappen van de las zouden minstens gelijk moeten zijn aan die van de te verbinden delen. Bij legeringen die hun sterkte hebben verkregen door kouddeformatie of door precipitatieharding kan hier moeilijk aan worden voldaan wegens de warmtebeïnvloede zone ter weerszijden van de las. De lasbaarheid neemt dus af in de volgende volgorde:

| | | | | | | |
|-------------------------------|---|------------------------------------------|---|------------------------------------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ongelegeerd ongedeformeerd | → | legeringen met alleen oplosharding | → | legeringen uithardend op kamer- temperatuur | → | legeringen die na lassen nog warmtebehandeling kunnen ondergaan of nog acceptabele sterkte hebben |
| (technisch) | | | | | | |
| zuiver Al | | AlMg/AlMn | | AlZnMg | | AlMgSi |

Niet lasbaar zijn dus de meeste legeringen op basis van AlCuMg en de legeringen met hoge sterkte op basis van AlZnMgCu met een speciale warmtebehandeling. Lassen introduceert structurele inhomogeniteiten aan weerszijden van de las, wat op zich gevaar voor lokale corrosie kan inhouden. De keus van de legering voor de lasdraad wordt voornamelijk bepaald door de economie van het lasprocédé: het gemak waarmee scheurvrije lassen gelegd kunnen worden. Hiervoor worden voornamelijk AlMg- en AlSi-legeringen gebruikt. Vaak worden bij Al-legeringen verbindingen op andere wijzen verkregen: stalen pinnen in fietsvelgen en lijmen en klinken in de vliegtuigbouw.

Vraag 4.26 *Koud gedeformeerde 3/4-harde plaat van technisch zuiver Al wordt gelast; bespreek de sterkte van de verkregen verbinding in vergelijking met de rest van de plaat.*

6. Weerstand tegen corrosie

In Tabel 4.24 worden de elektrodepotentialen van enige metalen en legeringen vermeld. In het algemeen moet contact tussen Al en zijn legeringen met metalen die hoger in deze reeks staan worden vermeden, omdat dan elektrochemische corrosie kan optreden. Echter, het optreden hiervan wordt niet alleen bepaald door de plaats in de spanningsreeks van het contactmetaal. Bijvoorbeeld is het contact tussen Al of Al-legeringen en roestvast staal in het algemeen mogelijk, omdat roestvast staal bedekt is met een passieve laag. Het contact met Cu of zijn legeringen en metalen edeler dan Cu moet echter vermeden worden: dit geeft een ernstige aantasting.

Tabel 4.24. Elektrodepotentialen van enige metalen, vaste oplossingen en intermetallische verbindingen ten opzichte van een 0,1M kalomel-elektrode in een waterig elektrolyt van 53 g/l NaCl en 3 g/l waterstofperoxyde bij 25°C.

| stof | potentiaal (V) |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|
| magnesium | -1,73 |
| Al ₈ Mg ₅ | -1,24 |
| zink | -1,10 |
| Al-Zn-Mg vaste oplossing (4 % MgZn ₂) | -1,07 |
| MgZn ₂ | -1,05 |
| Al ₂ CuMg | -1,00 |
| alclad 6061 - alclad 7075 | -0,99 |
| Al-5.gew% Mg vaste oplossing | -0,88 |
| AlMg 5083 - AlMg 5456 | -0,87 |
| MnAl ₆ | -0,85 |
| Al99,95 - AlMg 5052 - AlMg 5086 | -0,85 |
| Al99,6 1060 - AlMn 3004 - AlMg 5050 | -0,84 |
| Al99 1100 - AlMn 3003 - AlMgSi 6063 - AlMgSi 6061 - Alclad 2024 | -0,83 |
| cadmium | -0,82 |
| Al-1 gew% Si vaste oplossing | -0,81 |
| Al-2 gew% Cu vaste oplossing | -0,75 |
| Al-4 gew% Cu vaste oplossing | -0,69 |
| AlCu 2014, T4 | -0,69 |
| zacht staal | -0,58 |
| FeAl ₃ | -0,56 |
| lood | -0,55 |
| CuAl ₂ | -0,53 |
| NiAl ₃ | -0,52 |
| tin | -0,49 |
| silicium | -0,26 |
| koper | -0,20 |
| roestvast staal | -0,09 |
| nikkel | -0,07 |
| chroom | -0,49 tot +0,18 |

Legeringselementen kunnen in Al aanwezig zijn in vaste oplossing of als intermetallische verbindingen. Tabel 4.24 geeft ook de elektrodepotentiaal van vaste oplossingen van Al en enkele van de relevante intermetallische verbindingen. In het algemeen heeft de homogene vaste oplossing van de verschillende modificaties waarin een legering kan bestaan de hoogste weerstand tegen elektrochemische corrosie. Intermetallische verbindingen kunnen door hun afwijkende elektrodepotentialen corrosieproblemen veroorzaken. Daarom moeten de gehalten aan Ni, Cu en Fe in Al-legeringen beperkt worden. Al₆Mn heeft praktisch dezelfde elektrodepotentiaal als Al-legeringen. In Al₆Mn is Fe in zekere mate oplosbaar, zodat verwacht kan worden dat Mn het nadelige effect van Fe kan compenseren. Magnesium in Al-legeringen

kan aanleiding geven tot de vorming van Al_3Mg_5 (zie §4.3.2.2) hetgeen interkristallijne corrosie bevordert. Mg en Si in Al-legeringen aanwezig in de atomaire verhouding 2 : 1 vormen Mg_2Si met een elektrodepotentiaal vergelijkbaar met die van Al. Een homogene oplossing van Mg in Al heeft eveneens een elektrodepotentiaal vergelijkbaar met die van Al.

In eerste benadering kan worden verondersteld dat de verhoudingen zoals vermeld in Tabel 4.24 ook gelden in contact met andere elektrolyten. Zolang Mg dus in homogene oplossing in Al is, bezitten de AlMg-legeringen een uitstekende corrosieweerstand. Ook de corrosieweerstand van de AlMgSi-legeringen zal in het algemeen vergelijkbaar zijn met die van zuiver Al. Helaas heeft kouddeformatie een ongunstige invloed op de corrosieweerstand van met name de AlMg-legeringen die dan ook hoogstens in de halfharde toestand gebruikt worden. De AlCu-legeringen hebben in het algemeen een matige corrosieweerstand

Op grond van het voorgaande komen als legeringen met een uitstekende corrosieweerstand in aanmerking: Al99,5 of zuiverder, AlMg met 0,7-4 gew% Mg, AlMgSi-legeringen en de AlMgZn-legeringen.

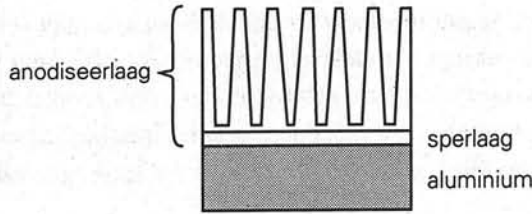
Vraag 4.27 *Wat zijn de bezwaren van toepassing van AlMg-legeringen met een Mg-gehalte tussen 5 en 10 gew% indien hoge eisen gesteld worden aan de corrosieweerstand?*

7. Anodiseren

Anodiseren is een belangrijke oppervlaktebehandeling voor Al en Al-legeringen (zie Ref. 13 voor een overzicht van oppervlaktebehandelingen). Bij anodiseren wordt door elektrochemische (ook wel genoemd elektrolytische) oxydatie een oxydelaag op een metaal aangebracht. Anodiseren wordt vooral toegepast op Al en zijn legeringen, maar ook op magnesium en titaan en hun legeringen. In de elektrochemische cel waarin het anodiseren wordt uitgevoerd, is het te oxyderen werkstuk de anode.

Al en zijn legeringen zijn normaal bedekt met een afsluitende oxydelaag. Deze vormt tijdens het anodiseren de sperlaag. Boven op deze sperlaag wordt tijdens het anodiseren een poreuze deklaag gevormd (zie Figuur 4.49). Het aantal poriën neemt af met de badspanning, c.q. stroomdichtheid (zie Tabel 4.25). De poreuze laag is geschikt om allerlei kleurstoffen vast te houden. De poriën blijken te kunnen worden gesloten door het werkstuk onder te dompelen in kokend water. Het anodiseren verbetert enkele oppervlakte-eigenschappen:

1. de corrosieweerstand (toepassing in de architectuur)
2. de slijtageweerstand
3. glans (decoratie en reflectoren)
4. hechting voor lak en verf



Figuur 4.49. Deklagen op het oppervlak van aluminium (Ref. 13).

Tabel 4.25. Aantal poriën in afhankelijkheid van badspanning (elektrolyt: 15% zwavelzuur, temperatuur 10 °C).

| badspanning (V) | aantal poriën ($10^6/\text{mm}$) |
|-----------------|------------------------------------|
| 15 | 771 |
| 20 | 517 |
| 30 | 277 |

De toegepaste laagdikte hangt af van de beoogde toepassing (zie Tabel 4.26). Het anodiseer-resultaat is sterk afhankelijk van de oppervlakteruwheid voor het uitvoeren van deze behandeling en van de onderliggende microstructuur van het oppervlak. Anodiseren is in beginsel mogelijk bij alle Al-legeringen, zowel kneed- als giet-legeringen. Om een goed resultaat te krijgen is een zuiver basismetaal met een glad oppervlak nodig. De legering moet een kleine korrelgrootte hebben. Aanwezige legeringselementen en verontreinigingen (denk aan mogelijk afwijkende elektrodepotentialen) hebben een invloed op de kleur van de anodiseerlaag (AlSi-legeringen worden grijs of zelfs zwart). Kristalsegregaties uit zich in kleurverschillen. Bij geëxtrudeerde of gewalste legeringen kunnen strepen zichtbaar zijn als gevolg van segregaties. Verschillen in afkoelsnelheid na gieten of verschillen in deformatiegraad na walsen of extruderen kunnen ook kleurverschillen opleveren.

Tabel 4.26. Anodiseerdikte in afhankelijkheid van beoogde toepassing.

| toepassing | laagdikte (μm) |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| hechting van lak en verf | 3 |
| reflectoren en glans | 3 |
| matig corrosief milieu | 3 |
| decoratie binnenshuis en buitenshuis bij regelmatig schoonmaken | 6 |
| onderhoudsvrije toepassing buitenshuis | 10-20 |
| hardanodiseren voor verhoogde slijtvastheid | > 100 (bij deze laagdikte is glans verloren gegaan; glans wordt minder bij toenemende laagdikte) |

Gegoten legeringen, zowel in zand-, als coquille- en spuitgietwerk, kunnen porositeiten vertonen. Hier dringt het elektrolyt tijdens het anodiseren in, wat aanleiding kan geven tot vlekken (wit als de gebruikte elektrolyt zwavelzuur was). In spuitgietwerk ontstaan stromingspatronen door variaties in afkoeling en stolling, gepaard gaande met samenstellingsvariaties. Gietwerk wordt vanwege deze problemen bijna nooit geanodiseerd.

Vraag 4.28 *Noem vier redenen waarom anodiseren van gietstukken van Al-legeringen zo weinig toepassing vindt.*

Voor een goed resultaat is dus een zuiver basismetaal met een zeer glad oppervlak en een kleine korrelgrootte en zo weinig mogelijk segregaties vereist. Het zeer gladde oppervlak verkrijgt men door polijsten; de AlMg-legeringen kunnen zeer gemakkelijk glanzend gepolijst worden. Legeringselementen en verontreinigingen die intermetallische verbindingen vormen (Fe, Cu, Ni) zijn schadelijk (zie Tabel 4.24 met elektrodepotentiaalen). Anodiseren ter verbetering van de corrosieweerstand is altijd mogelijk, zij het dat de AlCu-legeringen een slecht resultaat geven. Voor een sierbehandeling is een fijne verdeling van de onzuiverheden (Fe, Si) vereist. De zuiverheid van het basisaluminium moet minstens Al99,5 zijn. Voor de speciale glansbehandelingen, bijvoorbeeld voor spiegels, bijouerieën en autoversieringen komen legeringen met een laag gehalte aan Fe in aanmerking. Enkele Al-legeringen geschikt voor anodiseren geeft Tabel 4.27.

Tabel 4.27. Aluminiumlegeringen voor anodiseren.

| <i>legering</i> | <i>AA-code</i> | <i>opmerking</i> |
|------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------|
| industriële sierbehandeling; fijne verdeling van onzuiverheden (Fe,Si) | | |
| Al99,5 | | |
| Al99,5Mg1-3 | | De AlMg-legeringen kunnen gemakkelijk gepolijst worden |
| Al99,5MgSi | | |
| speciale glansbehandelingen; een laag gehalte aan Fe | | |
| Al99,99 | | |
| Al99,98Mg0,5 | | |
| Al99,6Mg0,8Si | 5657 | |

4.3.2.4. Aluminiumgietlegeringen

Gietbaarheid is een belangrijk, maar niet te definiëren kenmerk van gietlegeringen. Men kan de gietbaarheid van een legering alleen in vergelijking met andere legeringen bespreken. Meestal wordt daartoe een zogenaamde gietspiraal gegoten, waarbij de lengte van de steeds dunner wordende spiraal een maat is voor de gietbaarheid. Het gieten als vervaardigingsmethode heeft vooral als voordeel dat

ingewikkelde producten in een enkele fabricage­stap verkregen kunnen worden (zie Hoofdstuk 5).

Het vullen van kleine wanddikten vereist een vloeibare metaallegering met een zo groot mogelijke dunvloei­baar­heid bij een zo laag mogelijke giettemperatuur. Een legering die over een lang stoltraject tweefasig is (in het tweefasengebied L+S van het betreffende toestands­diagram) voldoet niet aan de eis van dunvloei­baar­heid. Hieruit volgt, dat gietlegeringen bij voorkeur samen­stelingen hebben in de buurt van het eutecticum van het binaire toestands­diagram waarop ze gebaseerd zijn: de laagste temperatuur waarbij de hoogste dunvloei­baar­heid optreedt. Is het eutecticum, uit oogpunt van mechanische eigenschappen, niet bruikbaar, dan liggen de gietlegeringen in het gebied waar de lus van het tweefasengebied L+S nog smal is. De meest klassieke Al-gietlegering heeft dus een samen­stelling dicht in de buurt van het eutecticum Al-Si (zie Figuur 4.40).

De stolling berust op de onderkoeling van de smelt beneden de evenwichts­temperatuur. Hoe groter de onderkoeling, hoe meer kristalkiemen (nodig voor de stolling) gevormd kunnen worden, en hoe kleiner de korrelgrootte na stolling is. Deze kleinere korrelgrootte vertaalt zich in een grotere waarde voor de 0,2%-rekgrens en treksterkte. Het materiaal van de gietvorm en de giettechniek zijn bepalend voor de bij het gieten bereikte afkoel­snel­heden; een zandvorm geeft kleinere afkoel­snel­heden dan een metalen coquille, terwijl bij spuitgieten de hoogste afkoel­snel­heden bereikt worden (zie Tabel 4.28 en Figuur 4.50). De geschiktheid van de GAlSi-legeringen als gietlegering berust mede op de beperking van de slink als gevolg van de Si-toevoeging (zie §4.3.2.2). In de GAlMg-legeringen treedt een belangrijke oplos­harding op met een uitstekende corrosieweerstand en in de GAlCu-legeringen is precipitatie­harding mogelijk, maar is de corrosieweerstand minder. Op grond van het voorgaande kan men de Al-gietlegeringen in drie groepen indelen. Tabel 4.29 en 4.30 geven een overzicht van enkele GAl-legeringen (Ref. 7). In Tabel 4.30 betekent 5: uitstekend en 1: slecht.

Tabel 4.28. 0,2% rekgrens en breukrek voor de GAlSi 12-legering.

| <i>gietmethode</i> | <i>0.2% rekgrens (MPa)</i> | <i>breukrek (%)</i> |
|--------------------|----------------------------|---------------------|
| zandgietwerk | 70-100 | 5-10 |
| coquille­gietwerk | 80-110 | 6-12 |
| spuitgietwerk | 140-180 | 1-3 |

Tabel 4.29. Samenstelling en eigenschappen van enige aluminiumgietlegeringen.

| legering | AA code | samenstelling (gew%) | | | | | | giet-wijze | warmte behan- deling | 0,2% rek- grens (MPa) | breuk- rek (%) |
|----------------|---------|----------------------|-----|------|------|------|-----|------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------|
| | | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | | | | |
| groep 1 | | | | | | | | | | | |
| GAlSi12 | B413.0 | 12 | 0,5 | 0,05 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | z | – | 85 | 8 |
| | | | | | | | | c | – | 95 | 9 |
| | | | | | | | | s | – | 160 | 2 |
| GAlSi12Cu | | 12 | 0,8 | 1,0 | 0,3 | 0,3 | –,– | z | – | 90 | 3 |
| | | | | | | | | c | – | 105 | 3 |
| | | | | | | | | s | – | 170 | 2 |
| GAlSi10Mg | | 10 | 0,5 | 0,05 | 0,3 | 0,3 | 0,1 | z | – | 100 | 4 |
| | | | | | | | | z | T6 | 170 | 1 |
| | | | | | | | | c | – | 105 | 4 |
| | | | | | | | | c | T6 | 190 | 1 |
| | | | | | | | | s | – | 170 | 2 |
| GAlSi8Cu3 | 380.0 | 8 | 0,8 | 3,0 | 0,4 | 0,2 | 1,2 | z | – | 125 | 2 |
| | | | | | | | | c | – | 135 | 2 |
| | | | | | | | | s | – | 200 | 2 |
| GAlSi7Mg | A356.0 | 7 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | z | T6 | 205 | 4 |
| | | | | | | | | c | T6 | 225 | 4 |
| groep 2 | | | | | | | | | | | |
| GAlMg3Si | 515.0 | 1,1 | 0,5 | 0,05 | 0,2 | 3,0 | 0,1 | z | – | 90 | 5 |
| | | | | | | | | z | T6 | 140 | 5 |
| | | | | | | | | c | – | 90 | 7 |
| | | | | | | | | c | T6 | 150 | 6 |
| GAlMg3 | | 0,5 | 0,5 | 0,05 | 0,2 | 3,0 | 0,1 | z | – | 85 | 5 |
| | | | | | | | | c | – | 85 | 8 |
| GAlMg3Cu | | 1,3 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 3,0 | 0,3 | z | – | 90 | 4 |
| | | | | | | | | c | – | 100 | 5 |
| GAlMg5 | | 0,5 | 0,5 | 0,05 | 0,2 | 5,0 | 0,1 | z | – | 110 | 5 |
| | | | | | | | | c | – | 120 | 7 |
| groep 3 | | | | | | | | | | | |
| GAlCu4Ti | | 0,2 | 0,2 | 4,8 | 0,05 | –,– | 0,1 | z | T6 | 230 | 5 |
| | | | | | | | | c | T6 | 245 | 8 |
| GAlCu4TiMg | 204.0 | 0,2 | 0,2 | 4,5 | 0,05 | 0,2 | 0,1 | z | T4 | 250 | 10 |
| | | | | | | | | z | T6 | 295 | 6 |
| | | | | | | | | c | T4 | 260 | 13 |
| | | | | | | | | c | T6 | 320 | 7 |

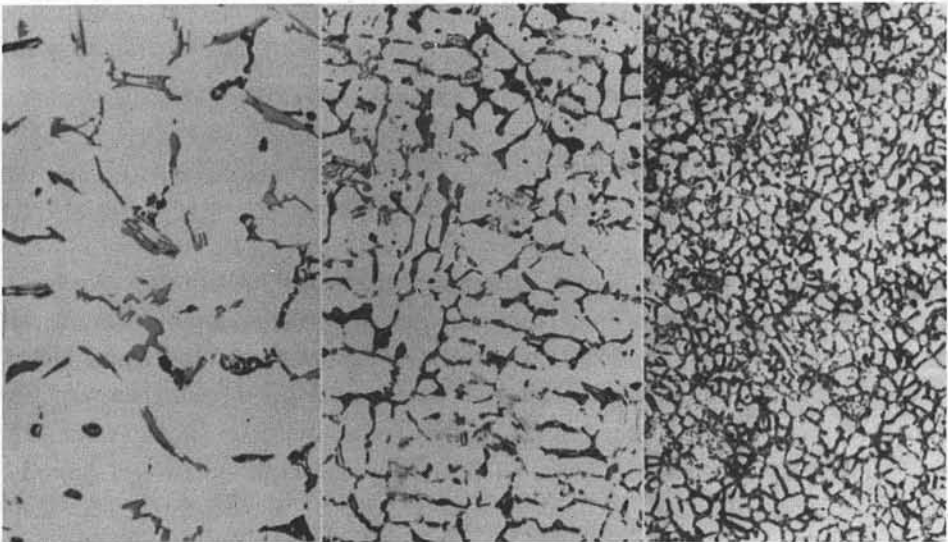
Noten: z = zandgietwerk
c = coquillegietwerk
s = spuitgietwerk

T4 = verouderd bij kamertemperatuur
T6 = verouderd bij verhoogde temperatuur

alle waarden in deze tabel zijn richtwaarden

Tabel 4.30. Verwerkings- en gebruikseigenschappen van enige aluminiumgietlegeringen.

| legering | AA code | giet- baarheid | polijst- baarheid | verspaan- heid | lasbaar- baarheid | corrosieweerstand | |
|----------------|---------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------|
| | | | | | | atmosfeer | zeewater |
| groep 1 | | | | | | | |
| GAISI2 | B413.0 | 5 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 |
| GAISI2Cu | | 5 | 2 | 3 | 5 | 2 | 0 |
| GAISI10Mg | | 5 | 3 | 3 | 5 | 4 | 3 |
| GAISI8Cu3 | | 5 | 3 | 4 | 4 | 1 | 0 |
| GAISI7Mg | | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 3 |
| groep 2 | | | | | | | |
| GAIMg3Si | | 3 | 5 | 5 | 2 | 5 | 5 |
| GAIMg3 | | 2 | 5 | 5 | 2 | 5 | 5 |
| GAIMg3Cu | | 2 | 5 | 5 | 2 | 2 | 1 |
| GAIMg5 | | 2 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 |
| groep 3 | | | | | | | |
| GAICu4Ti | | 2 | 4 | 5 | 1 | 1 | 0 |
| GAICu4TiMg | 204.0 | 2 | 4 | 5 | 1 | 1 | 0 |



zandgietwerk

coquilliegietwerk

spuitgietwerk

toenemende afkoelsnelheid
toenemende sterkte



Figuur 4.50. Effecten van afkoelsnelheden voor verschillende gietvormmaterialen.

1. GAl-legeringen met een uitstekende gietbaarheid

Deze legeringen zijn alle gebaseerd op het systeem AlSi. De beste gietbaarheid heeft de eutectische gietlegering GAISI2 met 0,1 gew% Na. Een vrij recente ontwikke-

ling is de vervanging van natrium voor de veredeling (zie §4.3.2.2) door zeer kleine concentraties strontium. De eutectische gietlegering wordt vaak silumin genoemd. Kleine toevoegingen van Mg, tot circa 0,5 gew%, maken een precipitatieharding mogelijk, wat gunstig is voor de sterkte van de legering. Kleine toevoegingen van Cu zijn vooral gunstig voor de verspaanbaarheid, maar ongunstig voor de corrosieweerstand.

2. GAl-legeringen met een goede corrosieweerstand (zeewater)

Deze zijn gebaseerd op het systeem AlMg. In deze legeringen mogen geen Cu of andere metalen edeler dan Al voorkomen. Het gehalte Mg is niet hoger dan 10 gew%. Het Al-Mg-toestandsdiagram vertoont een vrij brede lus voor het tweefasengebied L+S. Een nadeel is dan ook het optreden van kristalsegregatie, die groter is naarmate het gehalte aan Mg toeneemt. Bovendien wordt het stoltraject van deze legeringen langer met toenemend Mg-gehalte, zodat de gietbaarheid van de legering navenant slechter wordt (zie §5.2.2.2).

3. GAl-legeringen met een goede mechanische sterkte

Deze zijn gebaseerd op het systeem AlCuMg, AlSiMg of eventueel AlZnMg. De legeringen op basis van AlCuMg hebben een matige corrosieweerstand en zijn moeilijk gietbaar. De legering GAlSi7Mg is een goed compromis tussen sterkte en gietbaarheid.

4.3.3. Koper en zijn legeringen

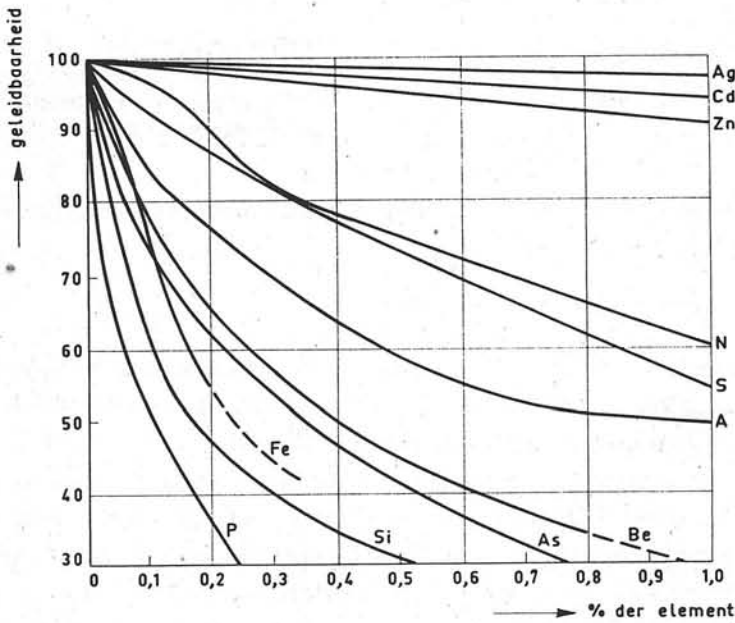
4.3.3.1. Zuiver koper

Koper is het oudst bekende door de mens gebruikte metaal. Gelegerd koper heeft toepassing gevonden als messing, dat is de soortnaam van alle legeringen van koper en zink, en als brons, dat is de soortnaam van alle legeringen van koper en tin. Na de ontdekking van elektriciteit heeft koper een zeer belangrijke rol gekregen voor het transport ervan. Na zilver heeft koper het hoogste soortelijk geleidingsvermogen voor elektriciteit. Ongeveer de helft van al het geproduceerde koper wordt gebruikt als geleider van elektriciteit. Koper is in feite erg schaars. De meeste ertsen bevatten minder dan 3 gew% Cu. Dus is aandacht voor hergebruik noodzakelijk. Dit betekent ook, dat kopertoepassingen in consumentenprodukten zodanig moeten zijn, dat hergebruik mogelijk is. De eigenschappen van koper kunnen ondergebracht worden in de volgende vier categorieën:

1. Fysische eigenschappen

Enkele relevante fysische eigenschappen worden gegeven in Tabel 4.16. De geleidbaarheid voor elektriciteit wordt vaak uitgedrukt in een percentage van de 'International Annealed Copper Standard (IACS)'. Dit is de geleidbaarheid van een koperdraad met een lengte van 1 meter en een massa van 1 gram met een elektrische

weerstand van 0,15328 Ohm (Ref. 10). Het soortelijk geleidingsvermogen van koper wordt beïnvloed door het gehalte aan en de aard van de onzuiverheden, al of niet in vaste oplossing. Met name zuurstof en fosfor zijn in dit verband ongunstig (zie Figuur 4.51). Fosfor wordt in koper en koperlegeringen vaak toegepast als desoxydator (zie Tabel 4.31). Als zuurstof aanwezig is in de vorm van Cu_2O dan is de invloed van zuurstof op het soortelijk geleidingsvermogen gering. In het algemeen geldt, dat de invloed van de onzuiverheden veel belangrijker is als ze in vaste oplossing in koper voorkomen dan wanneer deze zijn geprecipiteerd.



Figuur 4.51. Effect van onzuiverheden op het soortelijk elektrisch geleidingsvermogen van koper.

2. Mechanische eigenschappen

De waarde van de verhouding tussen de E-modulus en relatieve dichtheid is vrij laag. In de zachtgegloeide toestand bedraagt de 0,2%-rekgrens slechts 40 MPa. Door kouddeformatie kan deze waarde worden verhoogd tot circa 400 MPa (de waarde voor laag-koolstof staal bedraagt circa 190 MPa). Koper kent geen overgang van brose naar taaie breuk als functie van de temperatuur. De kerfslagwaarde van koper stijgt met dalende temperatuur.

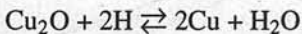
3. Chemische eigenschappen

Waterstof lost interstitieel op in koper. Bij gietstukken kan een te hoog waterstofgehalte aanleiding geven tot porositeit. Als naast waterstof ook zuurstof aanwezig is

Tabel 4.31. Drie eindraffinageprodukten van de bereiding van zuiver koper.

| soort koper | zuurstofgehalte (gew%) | kenmerken |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. zuurstofhoudend ('Tough Pitch Copper') | 0,03- 0,05 | zuurstof aanwezig als Cu ₂ O kans op waterstofziekte niet te lassen of te gloeien |
| 2. gedeseoxydeerd met fosfor | < 0,03 | fosforgehalte 0,015- 0,05 gew%, gevolg: sterke verhoging van elektrische weerstand alleen voor constructieve toepassingen geen waterstofziekte |
| 3. zuurstofvrij goed geleidend ('Oxygen Free High Conductivity' =OFHC) | < 0,03 | geen waterstofziekte iets meer andere verontreinigingen, dus wat lager soortelijk elektrisch geleidingsvermogen |

dan wordt de oplosbaarheid van waterstof bepaald door het chemisch evenwicht met koperoxyde:



Het gevormde water zal zich verzamelen in bellen op de korrelgrenzen waardoor haarscheuren kunnen ontstaan (waterstofziekte). Deze belvorming treedt vooral op als zuurstofhoudend koper in een vochtige omgeving verhit wordt. De ontstane haarscheuren maken het koper uitermate bros. Daarom mag zuurstofhoudend koper niet worden verhit of worden gelast. In vochtige lucht bij kamertemperatuur vormt koper een beschermende laag van basisch kopercarbonaat of -sulfaat: de bekende groene koperkleur. Toevoeging van Al als legeringselement verhoogt de toch al grote weerstand tegen oxydatie. Chloriden tasten koper en zijn legeringen slechts weinig aan. Veel koperlegeringen zijn uitermate goed bestand tegen zeewater en tegen een marine atmosfeer. Ook hier verbetert de toevoeging van Al de corrosieweerstand.

4. Verwerkingseigenschappen

Koudvervorming zorgt voor een grote versteviging (zie ook onder punt 2). De vervormbaarheid van koper is zowel warm als koud zeer groot. De rekristallisatietemperatuur ligt tussen 150 en 200 °C. Door geringe toevoegingen, bijvoorbeeld van 0,1 gew% Ag of Cd, wordt de rekristallisatietemperatuur verhoogd tot 250 à 300 °C. De verspaanbaarheid van zuiver koper is vrij slecht: de spaan breekt niet af, het metaal wordt versmeerd, waardoor een ruw oppervlak ontstaat. Toevoeging van telluur (circa 0,5 gew% Te), waardoor brosse en harde kopertelluridedeeltjes in het koper ontstaan, verbetert de verspaanbaarheid aanzienlijk.

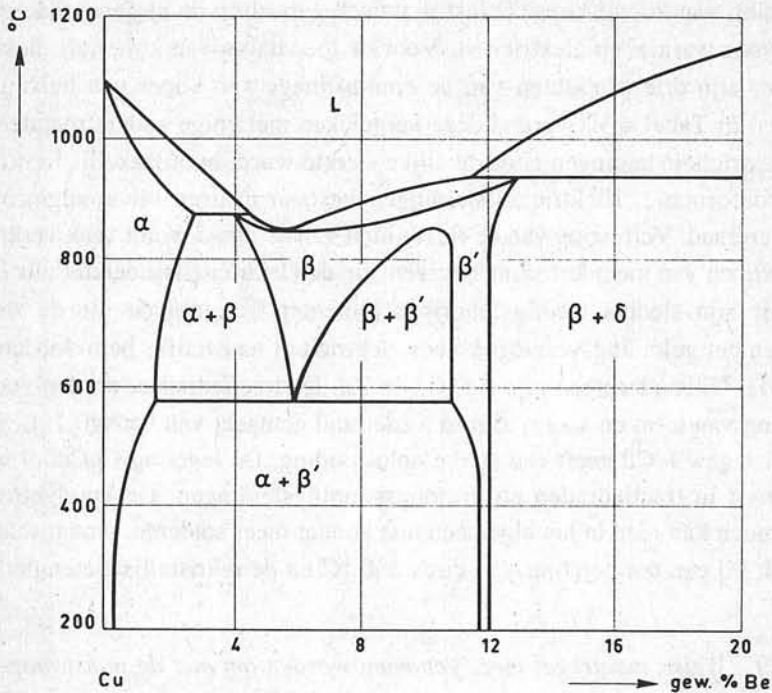
De toepassing van zuiver koper berust praktisch geheel op de al genoemde goede geleiding voor warmte en elektriciteit. Voor de toepassing van koper als elektriciteitsgeleider zijn drie produkten van de eindraffinage van koper van belang (zie Tabel 4.31). In Tabel 4.32 worden deze vergeleken met enige andere metalen. De voor de elektriciteitsleidingen noodzakelijke sterkte wordt hoofdzakelijk verkregen door kouddeformatie. Elektriciteitsleidingen bestaan daarom uit koudgetrokken zuiver koperdraad. Verhoging van de flexibiliteit van de draad wordt vaak verkregen door het twijnen van meerdere dunne draden; zie de elektriciteitssnoeren thuis en op de fiets. Er zijn slechts weinig legeringselementen beschikbaar die de sterkte verhogen en het geleidingsvermogen voor elektriciteit nauwelijks beïnvloeden (zie Figuur 4.51). Uitzonderingen zijn Ag, Cd en Zn. De tractiedraden, draden voor de bovenleiding van tram en spoor, zijn in Nederland gemaakt van $\text{CuAg}_{0,1}$. Legeren met 0,7 tot 1 gew% Cd geeft een sterke oplosharding. De legering $\text{CuCd}_{0,9}$ wordt ook toegepast in tractiedraden en in hoogspanningsleidingen. De koudgetrokken koperen draden kan men in het algemeen niet zonder meer solderen, omdat solderen plaats vindt bij een temperatuur van circa 250 °C en de rekristallisatietemperatuur 150-200 °C is.

Vraag 4.29 *Welke maatregel moet genomen worden om met de minst mogelijke bezwaren toch te solderen?*

Tabel 4.32. Relatief geleidingsvermogen van verschillende metalen.

| metaal | elektrisch geleidingsvermogen (%IACS) | thermisch geleidingsvermogen (%IACS) |
|-----------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
| zilver | 106 | 108 |
| koper (TPC) | 101- 102 | |
| koper (gedesoxydeerd) | 80 - 90 | |
| koper IACS | 100 | 100 |
| koper OFHC | 98 - 99 | |
| goud | 72 | 76 |
| aluminium | 62 | 56 |
| magnesium | 39 | 41 |
| nikkel | 25 | 15 |
| ijzer | 17 | 17 |
| staal | 13 - 17 | 13 - 17 |
| lood | 8 | 9 |
| zink | 29 | 29 |

Elektroden van puntlasapparaten vragen speciale combinaties van sterkte en geleidingsvermogen. Het toestandsdiagram Cu-Be (zie Figuur 4.52) geeft de principiële mogelijkheid voor precipitatieharding. De temperatuur van het oplosgloeien of homogeniseren is circa 800 °C en voor het verouderen ligt de temperatuur tussen



Figuur 4.52. Toestandsdiagram Cu-Be.

300 en 350 °C. Het soortelijk elektrisch geleidingsvermogen is in de gehomogeniseerde toestand lager dan in de toestand na verouderen. De door het verouderen te bereiken mechanische eigenschappen kunnen door kouddeformatie na homogeniseren nog aanzienlijk verbeterd worden.

Vraag 4.30 *Waarom biedt het toestandsdiagram Cu-Be de principiële mogelijkheid tot precipitatieharding?*

Vraag 4.31 *Verklaar het effect van kouddeformatie na homogeniseren op de precipitatie in een CuBe-legering (zie Tabel 4.33).*

Het soortelijk elektrisch geleidingsvermogen van de CuBe-legeringen ligt aanzienlijk lager dan dat van hiervoor besproken koperlegeringen. De sterkten zijn bijzonder hoog (zie Tabel 4.33). Voorbeelden van het gebruik van CuBe-legeringen zijn niet-vonkend gereedschap, membranen en manometerbuizen en de al genoemde elektroden voor puntlasapparaten. Beryllium is giftig en duur, en ook CuBe-legeringen zijn duur in vergelijking met messing. Voor veel contactveren of lampvoeten worden daarom messing of Al-legeringen toegepast.

Tabel 4.33. Relatief elektrisch geleidingsvermogen en 0,2%-rekgrens van enkele koperlegeringen.

| legering | toestand/ deformatie | warmte- behandeling | elektrisch geleidings- vermogen (%IACS) | 0,2%-rekgrens (MPa) |
|----------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------------------|------------------------|
| zuurstof- houdend koper | zacht | | 100-102 | 40 |
| | hard | | 99 | 360 |
| OFHC | zacht | | 99 | 40 |
| CuAg0,08 | zacht | | 99 -100 | 40 |
| | hard | | 99 | 360 |
| CuCd0,9 | zacht | | 94 | 270 |
| | hard | | 88 | 580 |
| CuBe2 | | gehomo- geniseeerd | 20 | 220 |
| | | verouderd | 30 | 1070 |
| | gedeformeerd | verouderd | 30 | 1300 |

4.3.3.2. Binaire koperlegeringen

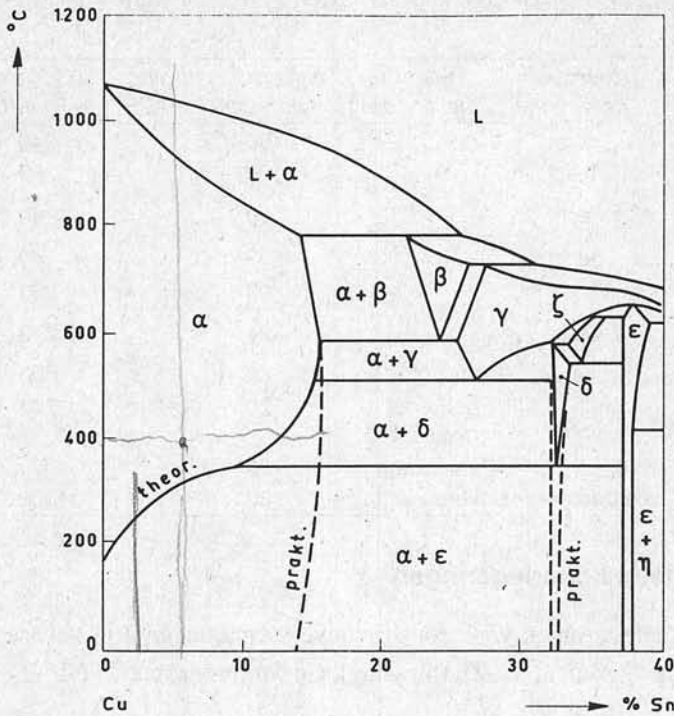
De meeste koperlegeringen voor constructieve toepassingen zijn gebaseerd op de volgende binaire systemen: Cu-Zn (messing), Cu-Sn (brons) en Cu-Ni.

1. Cu-Zn

Figuur 3.12 geeft het toestandsdiagram Cu-Zn. De α -fase is een vaste oplossing van zink in koper en heeft uiteraard een kvg/fcc-kristalrooster. De β -fase heeft een krg/bcc-kristalrooster. Bij een lage temperatuur treedt in de β -fase een ordening van zinkatomen op: de zo ontstane β' -fase kan daarom beschouwd worden als een geordende fase met ongeveer als atomaire samenstelling CuZn. De technisch gangbare CuZn-legeringen bevatten in het algemeen tot 46 gew% Zn, zodat de overige fasen in het toestandsdiagram niet relevant zijn. Zink geeft een hoge oplosharding, zodat voor constructief gebruik vaak hoge zinkgehalten worden gekozen. De α -fase is uitstekend koud te deformereren. De β -fase is vooral bij hoge temperatuur (boven de overgang $\beta \leftrightarrow \beta'$) goed te deformereren. De warmvervormbaarheid van de α -fase is vooral goed bij temperaturen boven 800 °C.

2. Cu-Sn

Figuur 4.53 geeft het toestandsdiagram Cu-Sn. De α -fase is een vaste oplossing van tin in koper met als kristalrooster kvg/fcc. De β -fase is ook een vaste oplossing met als kristalrooster krg/bcc. De omzettingssnelheden beneden 500 °C zijn zo laag, dat de evenwichtoplosbaarheidslijn van de α -fase vrijwel nooit gevolgd wordt. Praktisch kan men de vaste oplosbaarheid van Sn in Cu beneden 500 °C als onafhankelijk van de temperatuur beschouwen. Het oploshardingseffect van Sn is groter dan dat van Zn. De homogene α -CuSn-legeringen hebben een kvg/fcc-kristalrooster en dus een uitstekende koudvervormbaarheid.



Figuur 4.53. Toestandsdiagram Cu-Sn.

De δ -fase heeft een ingewikkeld kubisch kristalrooster met als atomaire samenstelling Cu_3Sn_8 en is praktisch op te vatten als een intermetallische verbinding, hard en bros. Het tweefasengebied $L + \alpha$ is zeer breed. Hierdoor treedt in legeringen met een Sn-gehalte hoger dan 5 gew% ernstige kristalsegregatie op, waardoor deze de genoemde δ -fase kunnen bevatten. Bovendien verloopt de in het diagram aangeven omzetting van de δ -fase onder praktische omstandigheden vrijwel nooit, zodat in CuSn-legeringen met een Sn-gehalte hoger dan 14 gew% vrijwel altijd de δ -fase voorkomt.

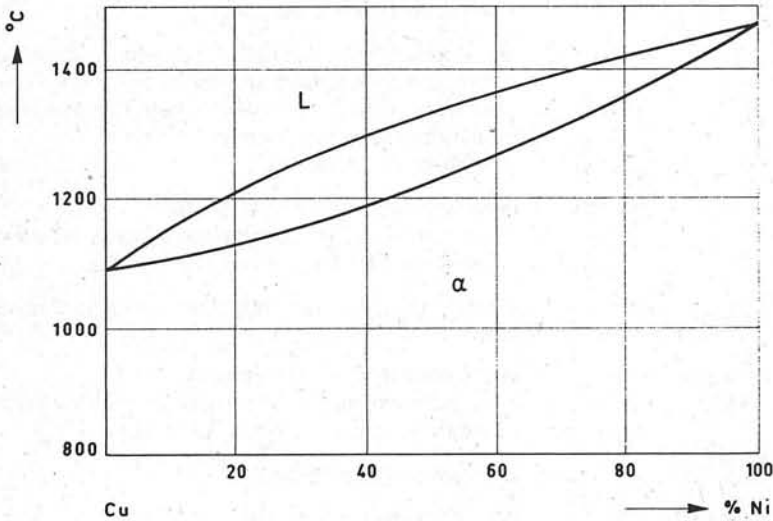
vraag 4.32 Welke omzetting zou in evenwicht plaats moeten vinden in de δ -fase?

Bij een stijgend Sn-gehalte kan de volumefractie van de δ -fase toenemen, zodat de hardheid van gegoten brons in het algemeen stijgt met het Sn-gehalte. Bij Sn-gehalten lager dan 14 gew% zou de δ -fase door homogeniseren in oplossing gebracht kunnen worden. De gloeibehandeling is langdurig en dus kostbaar. Kristalsegregatie vermijdt men liever door het Sn-gehalte te verlagen tot beneden 8 gew%, waardoor het homogeniseren sterk kan worden bekort, of zelfs achterwege kan blijven.

Vraag 4.33 Kies op basis van het CuSn-toestandsdiagram een temperatuur voor het homogeniseren van een CuSn-legering met een Sn-gehalte van 6 gew%.

3. Cu-Ni

Figuur 4.54 toont het CuNi-toestandsdiagram. De homogene vaste oplossing is continu. Nikkel geeft een oplosharding met maximale hardheid bij ongeveer 60 gew% Ni. De corrosievastheid stijgt met het nikkelgehalte. Het systeem Cu-Ni vormt de basis voor nieuwzilver, legeringen van Cu met Ni en Zn.



Figuur 4.54. Toestandsdiagram Cu-Ni.

4.3.3.3. Messing

De CuZn-legeringen heten messing (Engels: 'brass', Frans: 'laiton', Duits: 'Messing'). De meest toegepaste messingssoorten hebben een Zn-gehalte tussen 10 en 42 gew%. Tot circa 39 gew% Zn zijn de messingssoorten eenfasig (homogene α -fase). Zij worden α -messing genoemd. Messingssoorten met een Zn-gehalte tussen 46 en 50 gew% bestaan bij hoge temperaturen uitsluitend uit de β -fase, die zeer goed warmvervormbaar is. Bij afkoeling transformeert de β -fase naar de β' -fase, die hard en bros is. De aanwezigheid van deeltjes van de β' -fase verbetert de verspaanbaarheid: de spanen breken makkelijker af. Door het zinkgehalte te kiezen tussen 39 en 46 gew% combineert men het voordeel van de aanwezigheid van de harde en brose deeltjes van de β' -fase met het voordeel van de goede koudvervormbaarheid van de α -fase. In afwijking tot wat het toestandsdiagram aangeeft, bestaan bij kamertemperatuur de legeringen in dit samenstellingsgebied uit de α -fase en deeltjes

van de β' -fase. Men noemt deze legeringen ($\alpha + \beta$) messing, die, omdat ze bij hoge temperatuur voor een groot deel uit de β -fase bestaan, goed warmvervormbaar zijn. De goede verspaanbaarheid van deze legeringen is nog te verbeteren door toevoeging van 1-2 gew% Pb (automaatmessing, zie Tabel 4.34).

Tabel 4.34. Karakteristieken van messingsoorten.

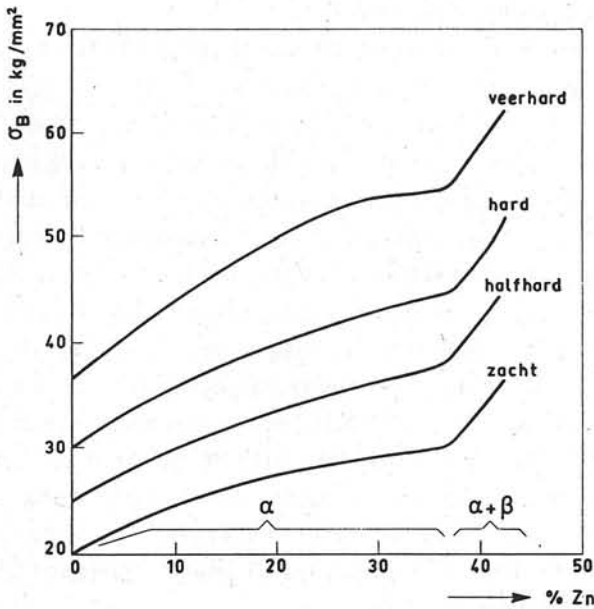
| aanduiding | type | kneed/giet | karakteristiek + toepassingen |
|------------|--------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CuZn10 | α | kneed | koudvervormbaar, siervoorwerpen |
| CuZn20 | α | kneed | goed koudvervormbaar, geringe neiging tot spanningscorrosie; siervoorwerpen, klembeugels, simpele veren, flexibele slang |
| CuZn30 | α | kneed | zeer goede koudvervormbaarheid; redelijk compromis tussen corrosievastheid (minder Zn beter) en warmvervormbaarheid (meer Zn beter) dieptrekken, blaasmuziekinstrumenten, eenvoudige condensorpijpen, veren |
| CuZn37 | α | kneed | belangrijkste messingsoort, in zachte toestand: dieptrekken zoals (patroon)hulzen in harde toestand: stampwerk zoals bij mechanische horloges, veertjes |
| CuZn40 | $\alpha + \beta$ | kneed | warm- en koudvervormbaar draad, hang- en sluitwerk, extrusie: buis en staf |
| CuZn42 | $\alpha + \beta$ | kneed | warmextrusie, goede verspaanbaarheid: automaatmessing (1-2 gew% Pb) voor automatische draaibanken, nippels, boeren en mouten |
| CuZn36 | $\alpha + \beta^*$ | giet | zandgietwerk, decoratie |
| CuZn38 | $\alpha + \beta^*$ | giet | coquilletgietwerk, decoratie |
| CuZn40 | $\alpha + \beta$ | giet | sputgietwerk, decoratie |

*) door lokale verschillen in afkoelsnelheid kunnen deze legeringen tweefasig zijn.

In Figuur 4.55 wordt de sterkte van messing gegeven als functie van het zinkgehalte. Duidelijk zijn in deze Figuur de effecten van oplosharding en van de aanwezigheid van de β' -fase te onderkennen. Tabel 4.34 geeft een globaal overzicht van karakteristieken en toepassingen van messingsoorten. Tabel 4.35 geeft de mechanische eigenschappen van enkele messingsoorten. Veel messingsoorten worden koudvervormd. Vanaf ongeveer 20 gew% Zn kunnen restspanningen, aanwezig na kouddeformatie, aanleiding geven tot de zogenaamde seizoenziekte. Dit is een vorm van spanningscorrosie veroorzaakt door sporen ammoniak in de atmosfeer. De gevoeligheid voor seizoenziekte kan grotendeels worden opgeheven door enkele uren herstelgloeien bij 250 tot 350 °C.

Tabel 4.35. Mechanische eigenschappen van enkele messingssoorten.

| aanduiding | type | kneed/giet | toestand | 0,2%-rekgrens (MPa) | breukrek (%) |
|------------|------------------|------------|-------------------|---------------------|--------------|
| CuZn15 | α | kneed | zachtgegloeid | 70 | 60 |
| | | giet | zandgegoten | 60 | 20 |
| CuZn30 | α | kneed | zacht | 110 | 70 |
| | | | koudeformatie 10% | 210 | 50 |
| | | | koudeformatie 30% | 400 | 18 |
| | | | koudeformatie 60% | 530 | 7 |
| | | | koudeformatie 90% | 580 | 4 |
| CuZn37 | α | kneed | zachtgegloeid | 95 | 55 |
| CuZn37Pb2 | α | kneed | zachtgegloeid | 100 | 30 |
| CuZn40 | $\alpha + \beta$ | giet | zandgegoten | 80 | 12 |
| | | giet | coquillegegoten | 100 | 10 |



Figuur 4.55. Sterkte van messing als functie van het zinkgehalte.

4.3.3.4. Brons

Brons is de benaming van de CuSn-legeringen. Evenals bij messing onderscheidt men giet- en kneedlegeringen. Bij de kneedbronzen is de aanwezigheid van de harde en brose δ -fase meestal ongewenst, met name indien een goede koudvervormbaarheid gewenst is. De kneedbronzen bevatten daarom zelden meer dan 8 gew% Sn. De kneedbronzen zijn dus éénfasig: α -fase met het kvg/fcc-kristalrooster. Door-

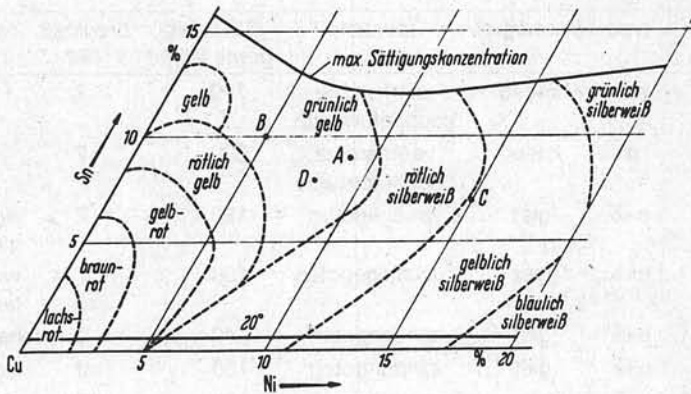
dat de oplosharding door Sn wat effectiever is dan die door een gelijk gehalte Zn, is de sterkte van de zachtgegloeide CuSn-legering hoger dan die van de CuZn-legering. Bovendien verstevigt α -brons meer dan α -messing. Na kouddeformatie heeft CuSn8 een waarde voor de 0,2%-rekgrens van circa 800 MPa (vergelijk de waarde voor CuZn30 met kouddeformatie 90% in Tabel 4.35). Mede in verband met de betrekkelijk lage waarde van de E-modulus zijn deze bronssoorten zeer geschikt voor veren. *CuSn 8*

Vraag 4.34 *Het brons voor stuivers bevat 93 - 94 gew% Cu, 3 - 4 gew% Sn en circa 1 gew% Zn. Beargumenteer op grond van het toestandsdiagram in Figuur 4.53 deze materiaalkeuze.*

Ook voor glijlagers wordt α -brons toegepast. Voor glijlagers is de aanwezigheid van de harde brosse δ -fase juist wel gewenst (zie hierna), maar de α -bronzen kunnen door kouddeformatie voldoende sterkte en slijtvastheid verkrijgen voor het gebruik in simpele, kleine en laagbelaste glijlagers.

De gietbronzen hebben in het algemeen een Sn-gehalte tussen 10 en 20 gew%. Ze bevatten meer δ -fase naarmate het Sn-gehalte hoger is. Hiertoe behoren ook de gietbronzen voor glijlagers met als typische samenstellingen CuSn14 en CuSn20. Bij glijlagers moet men rekening houden met het optreden van onvolledige smering. Om warmlopen en vastlopen te vermijden is het raadzaam dat het lagermetaal bestaat uit een harde fase ingebed in een zachte grondfase. De harde fase kan de as dragen, terwijl de zachte fase uitslijt, zodat in de uitgesleten holten zich de film van het smeermiddel kan bevinden. Bij eventueel direct metallisch contact op de harde fase blijft de uiteindelijke slijtage beperkt tot de slijtage aan de harde fase. Tegenwoordig worden zeer veel gesinterde lagers of lagers van nylon gebruikt als laagbelaste aslagers. De poriën van de gesinterde lagers bevatten het smeermiddel, zodat deze lagers vrij van onderhoud zijn. Toevoeging van lood aan brons verbetert nog de lagereigenschappen. Bij een eventueel drooglopen smelt het lood, dat niet in vaste oplossing aanwezig is in deze legeringen. Het gesmolten lood fungeert als een smeermiddel. Het loodgehalte kan oplopen tot 20 gew%. Universeel brons, 5-5-5-brons, is een CuSn5Zn5Pb5-legering met een voor lagers optimale combinatie van gietbaarheid, bewerkbaarheid en corrosievastheid. Het is geschikt voor niet te zwaar belaste onderdelen en lichte lagers. De 0,2%-rekgrens bedraagt circa 80 MPa. Tabel 4.36 geeft een overzicht van enkele soorten brons.

(Voor het gieten van klokken gebruikt men CuSn20. De klepels worden vervaardigd uit CuZn40Mn1Sn1Al1. CuSn10 wordt toegepast voor algemeen gietwerk. Voor standbeelden kiest men meestal samenstellingen tussen CuSn10 en CuSn20. De laatste is harder, slijtvaster, maar minder taai en minder bestand tegen schokken.)



Figuur 4.57. Koperrijke hoek van het toestandsdiagram Cu-Ni-Sn met daarin aangegeven de kleuren van de verschillende legeringen (Ref. 17).

De kleur van koperen dakplaten, zojuist vervaardigd van technisch zuiver koper, is bijna goud gelijk: het heeft een roodgouden uitstraling. Na blootstelling aan de lucht vormt zich meestal een laag van groenachtig basisch kopercarbonaat of basisch kopersulfaat: de bekende groene koperkleur. Ook de kop van Hugo de Groot op de Markt in Delft heeft deze kleur. Een gebruikte bronzen stuiver heeft een donkerder kleur dan een splinternieuwe, waarschijnlijk door de vorming van koperoxyde. Brons heeft altijd een donkerder kleur dan het geelkoperen messing. Ook bij langdurig gebruik blijft messing lichter dan brons. Een kandelaar zal men dus eerder van messing vervaardigen dan een kop van Beethoven voor op de piano, die meestal van brons is gegoten.

4.3.4. **Magnesium en zijn legeringen**

4.3.4.1. **Zuiver magnesium**

Magnesium is het lichtste metaal dat op grote schaal technisch wordt gebruikt. Zee-water en dolomiet zijn belangrijke bronnen voor magnesium. Voor de winning is zeer veel energie nodig (circa 20 kWh per kg Mg). Een groot gedeelte van het verkregen magnesium wordt niet-constructief toegepast: als legeringselement in Al of als opofferingsanode bij de anodische bescherming van stalen constructies. De constructieve toepassingen berusten steeds op de lage dichtheid. Deze vallen betrekkelijk scherp uiteen in twee gebieden:

- i. waar de kosten secundair zijn
- ii. waar de kosten van groot belang zijn

Tot het eerste gebied behoort de lucht- en ruimtevaartindustrie. Tot het tweede gebied behoren de toepassingen van magnesium in consumentenprodukten als verrekijkers en diplomatenkoffertjes. Het Kevermodel van de Volkswagen bevatte circa 22 kg Mg-gietlegeringen in de vorm van gespuitsgiete onderdelen van de motor. Dit model had een achterin geplaatste motor, zodat massabeperking cruciaal was bij dit historische automodel. Bovendien waren belangrijke redenen dat magnesium beschikbaar was in het vooroorlogse Duitsland waar de Kever ontworpen is en dat de verspanende bewerkbaarheid goed is.

De eigenschappen van magnesium kunnen verdeeld worden in de volgende brede categorieën:

1. Fysische eigenschappen

Een overzicht van de fysische eigenschappen geeft Tabel 4.16. Merk op, dat de verhouding tussen E-modulus en relatieve dichtheid praktisch gelijk is voor aluminium, magnesium en ijzer. Magnesium is een grijsachtig wit metaal met een hoog reflectievermogen, dat evenals aluminium geanodiseerd kan worden. De lineaire uitzettingscoëfficiënt van polykristallijn magnesium is nog iets hoger dan die van aluminium.

2. Mechanische eigenschappen

De lage E-modulus van magnesium is evenals bij andere metalen nauwelijks te verhogen door legeren. De eigenschappen van polykristallijn magnesium zijn sterk afhankelijk van de korrelgrootte. Grofkorrelig magnesium heeft een lage sterkte en rek: de 0,2%-rekgrens is circa 50 MPa en de rek bij breuk is circa 2%. Bij een zeer fijne korrel bedragen deze waarden 120 MPa en 12 - 15 %. Toevoegen van zirkoon in een gehalte van 0,5 gew% geeft korrelverfijning. Bij lage temperaturen is magnesium bros, zodat magnesium en magnesiumlegeringen niet in aanmerking komen voor cryogene toepassingen.

3. Chemische eigenschappen

Magnesium vormt geen volledig dichte en afsluitende oxydelaag aan het oppervlak, zodat aantasting aan lucht kan optreden. Bij kamertemperatuur en in droge lucht is de oxydatiesnelheid echter zeer laag, zodat magnesiumlegeringen dan onbepaald houdbaar zijn. Magnesium is zeer reactief en heeft een zeer negatieve elektrodepotentiaal (zie Tabel 4.24). In vochtige lucht treedt een ontoelaatbare aantasting op, zodat bescherming noodzakelijk is. In de meeste anorganische zuren lost magnesium snel op, behalve in chroomzuur en in fluorwaterstofzuur, die beschermende lagen op magnesium vormen. In basisch milieu wordt magnesium vrijwel niet aangetast. Sommige magnesiumlegeringen zijn gevoelig voor spanningscorrosie bij blootstelling aan gedestilleerd water of verdunde chloridehoudende oplossingen. Inhomogeniteiten aanwezig op de korrelgrenzen bevorderen het optreden van corrosie, met

name als de edelere elementen Fe, Cr en Ni aanwezig zijn. Hiervan zijn dus maximumgehalten voorgeschreven. Bescherming tegen corrosie wordt verkregen door het verdikken van de oxydelaag door een chromaatbehandeling, het aanbrengen van een MgF_2 -laag of, nog beter, door verven.

In massieve toestand is magnesium onbrandbaar. Draaikrullen en magnesiumpoeders kunnen echter bij kamertemperatuur ontbranden. Bij het verspanen van magnesium moet men voorzichtig zijn. Opeenhoping van draaikrullen moet men vermijden. Magnesiumbranden moeten niet bestreden worden met water of zand, maar met bluspoeder op basis van NaCl of met gietijzerspanen.

Vraag 4.35 *Leg de keuze van het blusmiddel voor magnesiumbranden uit.*

4. Verwerkingseigenschappen

Magnesium heeft een hexagonale dichtste bolstapeling (hcp) als kristalrooster. Voor de kouddeformatie bij kamertemperatuur zijn alleen de glijsystemen (zie § 5.3) in het basisvlak beschikbaar. Boven $220\text{ }^\circ\text{C}$ worden ook andere glijsystemen actief. Hieruit volgt, dat magnesium en zijn legeringen bij kamertemperatuur slecht vervormbaar zijn en dat versterking door kouddeformatie niet goed mogelijk is.

Vraag 4.36 *Vergelijk $220\text{ }^\circ\text{C}$ met een schatting voor de temperatuur voor rekristallisatie T_{rekr} op basis van de regel: $T_{\text{rekr}} \approx 0,4T_m$. Kan men vervorming van magnesium boven $220\text{ }^\circ\text{C}$ beschouwen als warmvervorming?*

Ongelegeerd magnesium zonder zirkoon kan maximaal 5 à 10 % koudvervormd worden. De door de toevoeging van 0,5 gew% Zr verkregen korrelverfijning maakt een koudvervorming tot circa 30% mogelijk. Boven $220\text{ }^\circ\text{C}$ is uiteraard warmvervorming mogelijk, waarbij een zekere voorkeur bestaat voor extrusie boven walsen: door de druk in de dwarsdoorsnede bij de extrusie beperkt men het risico van scheurvorming. De vervormingstemperatuur neemt men in het algemeen niet hoger dan $400\text{ }^\circ\text{C}$ ter beperking van de oxydatie en, voor de magnesiumlegeringen zonder zirkoon, ter beperking van de korrelgroei.

De verspaanbaarheid van magnesium en zijn legeringen is extreem goed, slechts zeer lage snijkrachten zijn nodig (zie Tabel 4.37). De verspanende nabewerking van Mg-gietstukken kan daardoor zelfs tegen lagere kosten gebeuren dan die van Al-gietstukken. Dit verklaart mede, dat magnesium en zijn legeringen in hoofdzaak in gietstukken verwerkt worden.

Tabel 4.37. Relatieve verspaanbaarheid van enkele metalen.

| metaal | relatieve vereiste snijkracht | draaisnelheid (m/s) | boorsnelheid (m/s) |
|-----------------|-------------------------------|---------------------|--------------------|
| magnesium | 1 | - 20 | 2,5 - 8,5 |
| aluminium | 1,8 | 1,25 - 12,5 | 1,0 - 6,5 |
| gietijzer | 3,5 | 0,5 - 1,5 | 0,2 - 0,65 |
| zacht staal | 6,3 | 0,65 - 3,3 | 0,25 - 0,5 |
| roestvast staal | 10,0 | 0,3 - 1,5 | 0,1 - 0,35 |

4.3.4.2. Magnesiumlegeringen

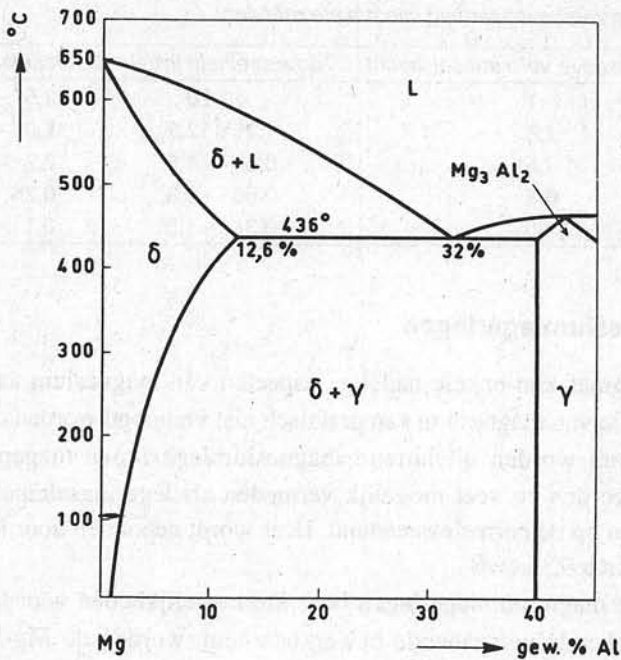
In de vorige paragraaf zijn enkele nadelige aspecten van magnesium aan de orde gekomen. De sterkte van magnesium kan praktisch niet verhoogd worden door kouddeformatie. Daarom worden uitsluitend magnesiumlegeringen toegepast. IJzer, nikkel en koper worden zo veel mogelijk vermeden als legeringselement wegens ongunstige effecten op de corrosieweerstand. IJzer wordt gebonden door toevoeging van mangaan tot circa 0,3 gew%.

Gegeven de bij de magnesiumlegeringen beperkte mogelijkheden voor kouddeformatie en de uitstekende verspanende bewerkbaarheid, worden de Mg-legeringen meestal direkt in de eindvorm gegoten. De kneedlegeringen worden voornamelijk via warmdeformatie vormgegeven. De verhouding tussen gietlegeringen en kneedlegeringen ligt juist andersom dan bij Al-legeringen: 85 : 15.

Beheersing van de korrelgrootte is zeer belangrijk bij Mg-legeringen. Toevoeging van zirkoon kan voor een belangrijke korrelverfijning zorgen. Voor de niet-zirkoon houdende Mg-legeringen zijn kleine toevoegingen van andere elementen nodig. De industrieel toegepaste Mg-legeringen bevatten meestal een of twee belangrijke legeringselementen. De toevoeging van zirkoon sluit sommige andere legeringselementen uit, zoals Al en Mn, die met Zr in de smelt onoplosbare verbindingen vormen. Zr verwijdert ook ijzer uit de smelt. De Zr-houdende Mg-legeringen zijn duurder dan de Zr-vrije legeringen. Derhalve worden in consumentenprodukten voornamelijk de Zr-vrije legeringen gebruikt. In deze laatste legeringen zijn Al en Zn belangrijke legeringselementen. De Mg-legeringen zijn gebaseerd op de volgende binaire systemen.

1. Mg-Al

Figuur 4.58 toont het Mg-rijke deel van het toestandsdiagram van Mg-Al. Aluminium is het voornaamste legeringselement voor de Zr-vrije Mg-legeringen. Het (δ +L)-gebied is zeer breed, zodat kristalsegregatie bij stolling belangrijk is. De sterkte van de MgAl-legeringen wordt in eerste instantie bepaald door het gehalte aan Al in vaste oplossing. Bij gegoten MgAl-legeringen neemt daardoor de sterkte toe met het Al-gehalte. Boven 6 gew% Al wordt steeds meer van de γ -fase gevormd, waardoor de sterkte terugloopt. Door homogeen gloeien op 400 °C wordt meer Al in

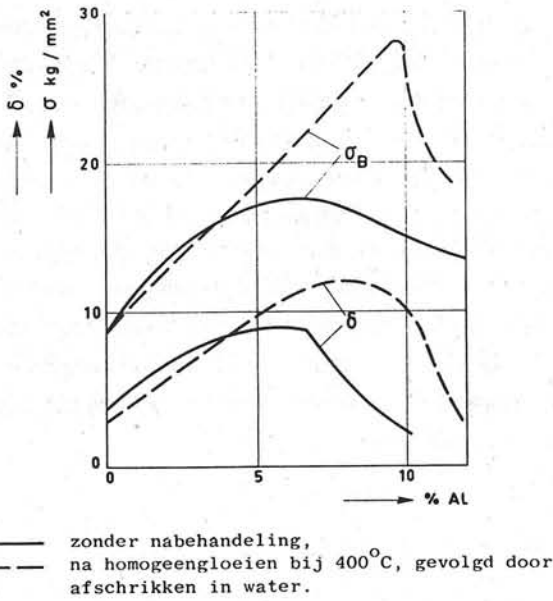


Figuur 4.58. Toestandsdiagram Mg-Al.

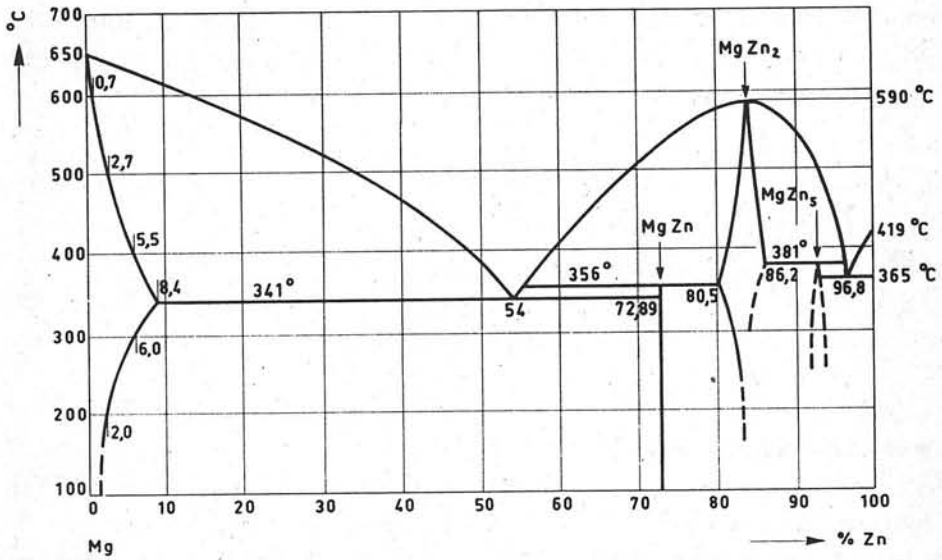
vaste oplossing gebracht en daalt de volumefractie van de harde en brossse γ -fase. Resultaat hiervan is een stijging van sterkte en rek tot 10 gew% Al (zie Figuur 4.59). Precipitatieharding is in beginsel mogelijk bij de MgAl-legeringen, maar technisch niet interessant. De meeste MgAl-legeringen bevatten niet meer dan 10 gew% Al.

2. Mg-Zn

Figuur 4.60 toont het toestandsdiagram Mg-Zn. Ook dit toestandsdiagram vertoont een zeer breed tweefasengebied aan de Mg-rijke kant. Ook hier is de principieel mogelijke precipitatieharding technisch niet interessant. Zink wordt nooit alleen toegepast als legeringselement, maar altijd in combinatie met Al of Zr. De toevoeging van Zn blijft meestal beperkt tot 3 gew%. Deze toevoeging heeft een gunstig effect op de rekgrens, terwijl de breukrek hetzelfde blijft. De Zn-toevoegingen kunnen de gietbaarheid negatief beïnvloeden doordat Zn aanleiding kan geven tot microporositeit. Een recente ontwikkeling zijn de MgZnCu-legeringen met tot 6 gew% Zn en tot 3 gew% Cu. De kopertoevoeging verbetert de taaigheid (rek) en maakt precipitatieharding interessant. De toevoeging van Cu heeft een vernietigend effect op de corrosieweerstand van de MgAlZn-legeringen, maar waarschijnlijk niet bij de MgZn-legeringen.



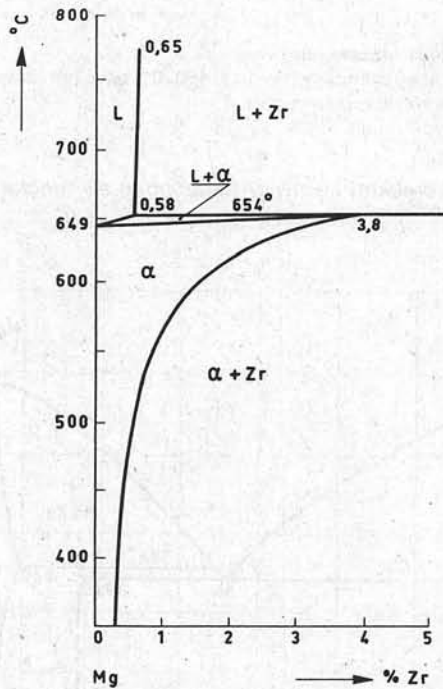
Figuur 4.59. Treksterkte en breukrek van MgAl-legeringen als functie van het aluminiumgehalte.



Figuur 4.60. Toestandsdiagram Mg-Zn.

3. Mg-Zr

Figuur 4.61 geeft het Mg-rijke deel van het toestandsdiagram Mg-Zr. De oplosbaarheid van Zr in vloeibaar Mg is klein. De binaire MgZr-legeringen zijn niet voldoende sterk voor technische toepassing. De aanwezigheid van 0,5 gew% Zr is al voldoende voor korrelverfijning. Naast Zr worden toegevoegd Zn, Zn + Th en Zn + zeldzame aarden (ZA). De ZA worden toegevoegd als 'Misch Metall', dat voor de helft uit cerium bestaat. In de Zr-houdende Mg-legeringen worden waterstof, aluminium en mangaan vermeden wegens de vorming van schadelijke hydriden, respectievelijk ongewenste intermetallische verbindingen. Toevoeging van ZA en Th heeft een gunstige invloed op de sterkte bij verhoogde temperatuur, waarbij deze elementen steeds in combinatie met Zr of Mn worden toegepast (hierbij moet de toevoeging van Mn zorgvuldig gedoseerd worden wegens het al genoemde gevaar van intermetallische verbindingen).



Figuur 4.61. Toestandsdiagram Mg-Zr.

Technische Mg-legeringen

Er bestaat geen internationaal aanvaarde codering voor Mg-legeringen. Meestal wordt de code van de American Society of Testing Materials gebruikt. In de Tabellen 4.38 en 4.39 wordt ook de ASTM-code gegeven. Voor zowel de giet- als de kneedlegeringen heeft men legeringen met hoge rekgrensen ontwikkeld gebaseerd op de toevoeging van Mn en ZA of Th.

Tabel 4.38. Enkele magnesiumgietlegeringen.

| legering | ASTM code | samenstelling (gew%) | | | | | | | toestand | 0,2% rek-grens (MPa) | breukrek (%) | opmerkingen |
|------------|-----------|----------------------|-----|-----|----|-----|-----|----|----------|----------------------|--------------|-------------------|
| | | Al | Zn | Mn | Cu | Zr | ZA | Th | | | | |
| MgAl6Zn3Mn | AZ63 | 6 | 3 | 0,3 | | | | | gegoten | 75 | 4 | t |
| MgAl8ZnMn | AZ81 | 8 | 0,5 | 0,3 | | | | | gegoten | 80 | 3 | s met 0,0015 % Be |
| MgAl10ZnMn | AZ91 | 9,5 | 0,5 | 0,3 | | | | | na prec. | 120 | 4 | z, cg |
| MgZn4,5Zr1 | ZK51 | | 4,5 | | | 0,7 | | | na prec. | 140 | 5 | m |
| MgZA3Zn3Zr | EZ33 | | 2,7 | | | 0,7 | 3,2 | | na prec. | 95 | 3 | z |
| | | | | | | | | | na prec. | 100 | 3 | cg |
| MgTh3Zr | HK31 | | | | | 0,7 | 3,2 | | na prec. | 90 | 4 | z,kr |

Tabel 4.39. Enkele magnesiumkneedlegeringen.

| legering | ASTM code | samenstelling (gew%) | | | | toestand | 0,2% rek-grens (MPa) | breukrek (%) | opmerkingen |
|----------|-----------|----------------------|-----|-----|-----|----------|----------------------|--------------|-------------|
| | | Al | Zn | Mn | Zr | | | | |
| MgMn1,5 | M1 | | | 1,5 | | plaat | 70 | 4 | l, c |
| | | | | | | extrusie | 130 | 4 | |
| | | | | | | gesmeed | 105 | 4 | |
| MgAl3Zn1 | AZ31 | 3 | 1 | 0,3 | | plaat | 120 | 11 | l, v |
| | | | | | | extrusie | 130 | 4 | |
| | | | | | | gesmeed | 105 | 4 | |
| MgAl6Zn1 | AZ61 | 6 | 1 | 0,3 | | extrusie | 180 | 7 | l |
| | | | | | | gesmeed | 160 | 7 | |
| MgAl8Zn | AZ80 | 8,5 | 0,5 | 0,2 | | gesmeed | 200 | 6 | |
| MgZn3Zr | ZK31 | | 3 | | 0,6 | extrusie | 210 | 8 | |
| MgZn6Zr | ZK61 | | 6 | | 0,8 | extrusie | 210 | 6 | |

Noten bij Tabel 4.38 en 4.39:

l = lasbaar

c = corrosievast

v = goed warmvormbaar

t = goede taaiheid

s = voor spuitgietwerk

na prec. = na precipitatieharding

m = neiging tot microporositeit

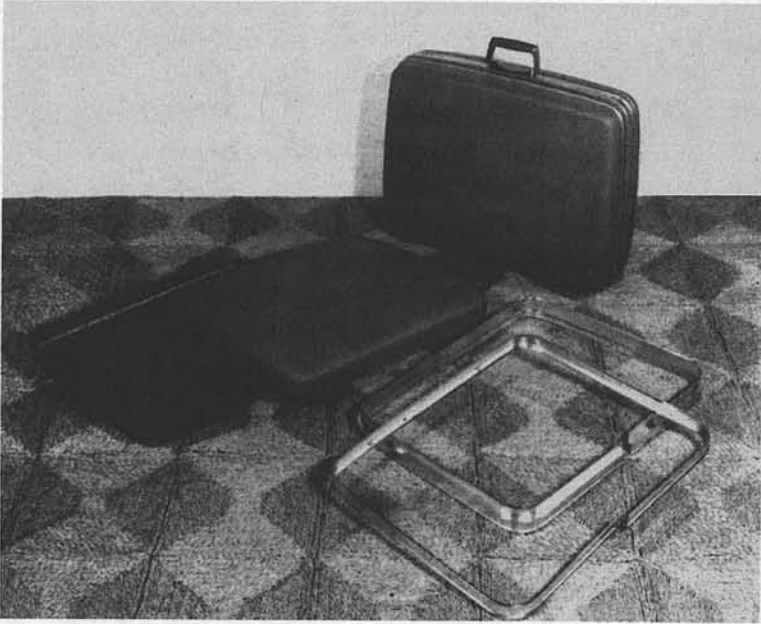
kr = kruipvast tot 350 °C

z = zandgietwerk

cg = coquilletgietwerk

Bij de kneedlegeringen is een karakteristiek verschijnsel, dat de rekgrens bij druk en trek sterk van elkaar verschillen. De rekgrenswaarden bij druk liggen 30 tot 40 % lager dan die bij trek. Dit verschil houdt verband met voorkeursoriëntaties van de kristallieten die ontstaan bij de plastische vervorming.

Voor gebruik in consumentenprodukten worden in het algemeen MgAl- en MgAlZn-legeringen gekozen. Warmtebehandeling in de vorm van oplosgloeien bij circa 420 °C, afschrikken in koud of warm water en precipiteren bij temperaturen rond 210 °C (de exacte temperatuur- en tijdcombinaties verschillen per legering) kan een verbetering geven van de mechanische eigenschappen. Figuur 4.62 geeft een voorbeeld van een toepassing van Mg-legering in een consumentenprodukt.



Figuur 4.62. Diplomatenkoffertje gemaakt van magnesiumplaat en -extrusieprofielen; de zijkanten zijn diepgetrokken en zijn voorzien van een vinyldeklaag (Ref. 20).

4.4. Kunststoffen

Binnen de drie groepen kunststoffen (thermoplasten, thermoharders en rubbers) bestaan zeer veel hoofdtypen, die elk gekenmerkt worden door een bepaalde chemische structuur van het macromolecuul. In elk hoofdtype is een grote variatie in de ketenlengte, ketenregelmaat, kristalliniteit en mengverhoudingen, zie Ref. 6.

4.4.1. Belangrijke thermoplasten

Polyethleen [PE] is een vrij zacht en taai polymeer met een hoge kristalliniteit dat in drie hoofdtypen voorkomt:

1. Lage Dichtheid Polyetheen [LDPE] met een relatieve dichtheid van gemiddeld 0,92 en een smelttemperatuur van 105 °C;
2. Hoge Dichtheid Polyetheen [HDPE] met een relatieve dichtheid van gemiddeld 0,95 en een smelttemperatuur van 130 °C;
3. Lineair Lage Dichtheid Polyetheen [LLDPE: 'Linear Low Density PE'] met een relatieve dichtheid variërend van 0,92 tot 0,95.

De waarde van de E-modulus neemt toe met de kristalliniteit en dus met de dichtheid en varieert van 200 tot 800 MPa. Voor alle typen geldt dat de waarde van de E-modulus daalt met temperatuur. Voor speciale toepassingen vervaardigt men PE met een Ultrahoge Molecuulmassa: UMPE, dat taai en zeer slijtbestendig is, en de grondstof vormt voor zeer sterke vezels (DSM-vezel Dyneema). Toepassingen van PE zijn verpakkingsfolie, zakken, flessen, buizen, emmers en kratten.

Polyproppeen [PP] heeft een hogere hardheid en een hogere waarde voor de E-modulus dan PE. Het is eveneens in hoge mate kristallijn en heeft een smeltpunt van circa 165 °C. Bij kamertemperatuur laat de slagsterkte te wensen over. Copolymerisatie met een rubber-monomeer of bijmengen van rubber verbetert deze slagsterkte. Een unieke eigenschap van PP is de grote bestandheid tegen herhaald buigen, zodat in PP-produkten bijvoorbeeld scharnieren kunnen worden geïntegreerd. Toepassingen van PP zijn verpakkingsfolie, flessen, kratten, auto-onderdelen (dan meestal met versterkende vulstoffen) en uiteraard scharnieren.

Polyvinylchloride [PVC] is een hard, amorf polymeer. De glasovergang ligt bij 85 °C. Ook PVC heeft een rubbermodificatie met een verbeterde slagsterkte. Men kan in PVC gemakkelijk laag-moleculaire vloeistoffen oplossen die het PVC weker maken. Met deze weekmakers krijgt men zacht of geplasticeerd PVC, in de praktijk vaak vinyl genoemd. Hard PVC vindt toepassing in buizen en fittingen, dakgoten, gevelpanelen en flessen. Met vooral krijt als vulstof wordt PVC ook gebruikt voor vloerbedekking. Weekgemaakt PVC wordt gebruikt in kunstleer, slangen en folies.

Polystyreen [PS] is een hard, amorf en zeer bros polymeer. De glasovergang ligt bij circa 90 °C. Ook PS kan met rubber gemodificeerd worden ter verbetering van de slagsterkte, ofwel door bijmenging ofwel door copolymerisatie met een rubbermonomeer. Voor deze modificatie wordt vooral butadieenrubber gebruikt. Deze modificatie heeft zoals alle met rubber gemodificeerde polymeren een lagere E-modulus dan het ongemodificeerde PS. Toepassingen vindt ongemodificeerd PS vooral als piepschuim voor warmte-isolatie en voor transparante bekertjes. Gemodificeerd of slagvast PS [TPS] wordt vooral toegepast in (ondoorzichtige) koffiebekertjes, verpakkingen voor zuivelprodukten en huishoudelijke artikelen.

Styreen-acrylonitril [SAN] heeft een vrij lage E-modulus, te vergelijken met TPS, maar een hogere slagsterkte. Bovendien is het beter bestand tegen hoge tempera-

turen. Het wordt gebruikt in huishoudelijke en elektrotechnische apparaten en accu-bakken.

Acrylonitril-butadieen-styreen [ABS] is soms een terpolymeer van de drie in de naam genoemde monomeren, maar meestal een mengsel van twee copolymeren, elk samengesteld uit twee van de drie monomeren. ABS heeft een vrij hoge slagsterkte en als glasovergang circa 110 °C. De E-modulus is slechts weinig lager dan die van ongemodificeerd PS. ABS wordt op grote schaal toegepast in auto-onderdelen (fronten en bumpers), speelgoed, telefoons, behuizingen voor computers en TV-kasten.

Acrylonitril-styreen-acryl-ester [ASA] is eveneens een terpolymeer op basis van styreen. Het heeft een hoge weerstand tegen veroudering (veroudering is een aantasting bij langdurige blootstelling aan atmosferische invloeden). In de overige eigenschappen lijkt het op ABS. Toepassingen zijn onderdelen voor boten, armaturen voor straatverlichting, brievenbussen op straat, kortom, artikelen die langdurig buitenshuis worden gebruikt.

Polymethylmethacrylaat [PMMA], beter bekend als perspex of plexiglas, is een amorf, transparant en hard polymeer. De E-modulus verandert niet veel bij temperatuurverhoging tot dicht onder de glasovergang van 110 °C. De meeste toepassingen berusten op de voortreffelijke doorzichtigheid van PMMA: zeer helder. Voorbeelden zijn veiligheidsglas, decoratiemateriaal, wegwijzers, lichtreclames.

Polyamide [PA], ofwel nylon, is een verzameling polymeren, waarvan de keten-opbouw chemisch verschillend is. Naar het aantal opeenvolgende koolstofatomen in de monomere keten heten ze: PA-6, PA-6,6, PA-11, PA-4,6 en PA-12. PA-6 en PA-6,6 werden aanvankelijk slechts als vezels toegepast. PA heeft een hoge kristalliniteit met vrij hoog smeltpunt: tussen 200 en 300 °C. Jammer genoeg daalt de E-modulus van PA vrij snel met de temperatuur. PA bezit goede waarden voor de slagsterkte, mede dankzij de absorptie van water uit de omgeving tot ettelijke gewichtsprocenten. PA bezit een goede slijtageweerstand en in contact met veel andere materialen een lage wrijvingscoëfficiënt. Hierom wordt PA veelvuldig toegepast in glijlagers en tandwielen. Voor veel toepassingen wordt de E-modulus verhoogd met glasvezels.

Polyoxymethyleen [POM] is een polymeer met een hoge kristalliniteit met een smeltpunt van 180 °C. De mechanische eigenschappen zijn zo goed, dat POM metalen geleidelijk in sommige toepassingen verdringt. Voorbeelden zijn tandwielen, staven, auto-onderdelen en onderdelen voor machines en pompen. Er is ook een variant bestaande uit een copolymeer met etheenoxide.

Polycarbonaat [PC] is een amorf, transparant polymeer met een glasovergang van 150 °C. De mechanische eigenschappen zijn zeer goed, vooral de slagsterkte. Het verdringt zowel glas als sommige metaallegeringen. Voorbeelden zijn veiligheids-glas, autolampen, beglazing in kassen, bumpers, dakconstructies, autobusbanken en camera's. Versterking met korte glasvezels geeft een uitbreiding van de toepassings-mogelijkheden op technisch gebied. Nadelig is de gevoeligheid voor spannings-corrosie in contact met organische verbindingen.

Polyetheentereftalaat [PETP, ook wel PET] is een polymeer met een behoorlijke kristalliniteit. De E-modulus daalt na 70 °C sterk, maar het blijft vast tot aan het smeltpunt van circa 225 °C. Toepassing vindt het als textielvezel en in folies, flessen (de PET-fles) en spuitgiertartikelen.

Polybuteentereftalaat [PBTP] verschilt in scheikundige structuur maar weinig van PETP en is ook een polymeer met een behoorlijke kristalliniteit. Het heeft een iets lager smeltpunt (210 °C) en is daardoor gemakkelijker te verwerken. De toepassingen in spuitgiertartikelen liggen in hetzelfde gebied als die van PETP.

Polyfenyleenoxyde [PPO] of polyfenyleenether [PPE] is een amorf polymeer met een glasovergang van 210 °C. Om de verwerking te vergemakkelijken wordt het meestal gemengd met PS: gemodificeerd PPO (handelsnaam onder andere Noryl). De mechanische eigenschappen zijn voortreffelijk. De toepassingen zijn auto-onderdelen, fijn-mechanische constructies en huishoudelijke apparatuur.

Polysulfon [PSU] is een amorf polymeer met zeer goede mechanische, elektrische en thermische eigenschappen. Het is bruikbaar van -100 tot +180 °C. Het wordt voornamelijk gebruikt in veeleisende mechanische en elektrotechnische toepassingen. In de medische techniek wordt het toegepast omdat het op 140 °C in stoom gesteriliseerd kan worden.

Polyfenyleensulfide [PPS] is een polymeer met een zeer hoge kristalliniteit met een smeltpunt van 290 °C. Het combineert goede mechanische eigenschappen met een zeer hoge thermische en chemische resistentie. Het is bovendien brandwerend en wordt onder andere toegepast als beschermlaag op metalen.

Polyimide [PI] spant de kroon met het temperatuurgebied waarin deze kunststof bruikbaar is: in lucht van -200 tot +260 °C, voor korte tijd tot 500 °C. De prijs is zeer hoog, zodat de toepassing beperkt blijft tot specialités in de ruimtevaart, de nucleaire industrie en de elektronische industrie. Recentelijk zijn aan PI verwante polyetherimiden, polyesterimiden en polyamidimiden ontwikkeld. Deze bezitten alle zeer goede mechanische, thermische en elektrische eigenschappen en zijn bovendien zelfdovend.

Polytetrafluoretheen [PTFE], Teflon, heeft een zeer hoog smeltpunt: 327 °C. Bovendien is PTFE goed bestand tegen allerlei chemicaliën en het heeft een extreem lage wrijvingscoëfficiënt. De mechanische eigenschappen zijn niet zo goed, PTFE kruipt sterk. De vormgeving is moeilijk: alleen mogelijk via een sinterproces. Wegens de goede thermische eigenschappen wordt het, dikwijls met versterkende vulstoffen, op een groot aantal gebieden toegepast: lagers, buizen, afdichtingen, elektrische isolatie en deklagen voor pannen.

Tetrafluoretheen-perfluoropreen [FEP] is een copolymeer dat in zijn eigenschappen lijkt op PTFE. FEP, is in tegenstelling tot PTFE, te verwerken als een thermoplast.

Polyvinylideenfluoride [PVDF] en *etheen-tetrafluoretheen-copolymeer [ETFE]* kunnen beschouwd worden als 'verdunde' PTFE's die in hun structuur en in hun eigenschappen tussen PTFE en PE en PP in liggen. Zij zijn verwerkbaar met de gangbare methoden en vinden soortgelijke toepassingen als PTFE.

Cellulose-acetaat [CA] en *cellulose-acetaat-butyraat [CAB]* zijn, in tegenstelling tot de voorgaande polymeren, niet volledig synthetisch, maar derivaten van plantaardige cellulose. Het zijn sterke, taaie en goed verwerkbare stoffen, die toepassing vinden in een groot aantal huishoudelijke en technische artikelen, zoals hamerkoppen, magneetbanden, speelgoed. CAB overtreft CA in vormvastheid en wordt gebruikt in auto-onderdelen en buizen.

Polybuteen [PB] is een semi-kristallijn polymeer dat behoort tot de reeks polyolefinen, dat zijn polymeren die, evenals PE en PP, uitsluitend uit koolstof en waterstof bestaan. Wegens zijn hogere prijs wordt het echter aanzienlijk minder gebruikt. Qua smeltpunt en E-modulus verschilt het niet veel van HDPE. Het onderscheidt zich van PE en PP door een verhoogde weerstand tegen haarscheurvorming, een verhoogde weerstand tegen spanningscorrosie en een verhoogde scheursterkte en taatheid. Belangrijke toepassingen zijn verwarmingsbuizen en folie voor zakken.

Polymethylpenteen [PMP] is eveneens een polyolefine, doch met een veel hoger smeltpunt dan PE en PP, 240 °C. PMP heeft een behoorlijke kristalliniteit, maar is toch transparant: de brekingsindices van de kristallijne en de amorfe fase zijn gelijk. PMP wordt onder andere gebruikt voor flessen. De belangrijkste handelsnaam is TPX.

Polyetherketon [PEEK] en *polyethersulfon [PES]* zijn nieuwe thermoplasten met zeer goede thermische en mechanische eigenschappen. Deze eigenschappen kunnen nog verbeterd worden door wapening met vezels. De toepassing ligt voorlopig nog vooral in de lucht- en ruimtevaart.

4.4.2. **Belangrijke thermoharders**

Fenol-formaldehyde [PF] is de eerste synthetische macromoleculaire stof (Bakeliet, 1907). De stof wordt voor toepassing vrijwel altijd met vulstoffen gemengd en is in enigszins voorgeharde toestand als perspoeder of persmassa beschikbaar voor de vormgeving. Belangrijke toepassingen zijn schakelaardozen, lampfittingen, spoelen, handvatten voor keukenpannen, maar ook geperste laminaten (spaanplaat en hardpapier) en isolatieschuim.

Ureum-formaldehyde [UF] is vergelijkbaar met PF, maar heeft een hogere E-modulus dan PF. Door zijn kleurloosheid en hoge oppervlakteglans is het uiterlijk van UF aantrekkelijker dan van PF.

Melamine-formaldehyde [MF] is kwalitatief weer beter dan UF. MF-perspoeders worden onder andere gebruikt voor serviesgoed, diverse elektrotechnische artikelen en decoratieve panelen (formica).

Onverzadigde polyesters [UP] kunnen met een tweede component als harder, bijvoorbeeld styreen, en met initiatoren en versnellers uitharden tot een netwerkstructuur. De reactie kan verlopen bij kamertemperatuur. Meestal wordt UP gebruikt in combinatie met glasvezels voor buizen, vaten, boten en carrosserieën.

Epoxyhars [EP] wordt met een tweede component gemengd om tot uitharding te geraken. De samenstelling kan zo gekozen worden, dat de reactie bij kamertemperatuur verloopt. Epoxy/glasvezel-combinaties vinden soortgelijke toepassingen als polyester/glas, maar worden wegens hun hogere prijs en betere eigenschappen selectiever gebruikt. Daarnaast wordt epoxy gebruikt in lakken, lijmen (twee-componenten-lijmen) en als giethars in elektrotechnische toepassingen.

Polyurethanen [PU] vormen een grote familie van polymeren. De thermohardende varianten van deze familie vinden hoofdzakelijk toepassing als schuim. Een mengsel van prepolymeer en een harder met een blaasmiddel vormt een licht, hard schuim, dat voornamelijk voor thermische isolatie wordt gebruikt.

4.4.3. **Belangrijke elastomeren**

Styreen-butadien rubber [SBR] is de belangrijkste synthetische rubber. Het is een copolymeer van styreen en butadien in een zodanige verhouding dat het rubberkarakter overheerst. Vulcanisatie vindt plaats met zwavel, versterking meestal met roet. SBR wordt op grote schaal gebruikt in banden voor personenauto's wegens de goede combinatie van slijtvastheid en wrijving op de weg. SBR vertoont een hysteresis voor de elastische vervormingen, waardoor warmte in de rubber wordt opgeslagen. Daarom kan voor grote banden natuurrubber niet door SBR vervangen worden.

Butadieenrubber [BR] of polybutadieen munt uit in slijtvastheid en lage demping. Door de lage demping is het, onverdund, te 'springerig' voor toepassing in banden. Door menging met styreen of natuurrubber kan een goed compromis van eigenschappen verkregen worden.

Isopreenrubber [IR] of *polyisopreen* is de synthetische kopie van natuurrubber [NR] en komt in eigenschappen dicht in de buurt van NR. Behalve voor banden is IR door zijn goede vloeï-eigenschappen ook geschikt voor spuitgiertartikelen.

Butylrubber [IIR] is afgeleid van polyisobuteen dat een rubberachtig karakter heeft, maar wegens zijn chemische verzadigdheid niet op de gebruikelijke wijze ge vulcaniseerd kan worden. Copolymerisatie met enkele procenten isopreen heft dit bezwaar op. Butylrubber heeft een zeer gering terugverend vermogen (hoge demping), maar overtreft alle andere rubbers in gasdichtheid en is daarom de ideale rubber voor binnenbanden.

Chloropreenrubber [CR] heeft een bijzonder hoge chemische resistentie. Deze wordt daarom veel toegepast bij afsluitingen van olievaten, voor slangen voor transport van olie en voor bescherming van kabels.

Nitrilrubber [NBR] is een copolymeer van butadieen en acrylonitril en wordt gekenmerkt door een zeer goede resistentie tegen licht en zuurstof en dus tegen veroudering. NBR is ook bestand tegen olie en diverse organische oplosmiddelen.

Etheen-propreen rubber [EPR] is een copolymeer van etheen en propreen. Door de ongeordende aaneenschakeling van de monomeren etheen en propreen kunnen de ketens niet kristalliseren en is deze stof een rubber. Door het ontbreken van dubbele bindingen in de polymeerketen is vulcanisatie met zwavel niet mogelijk. Meestal wordt daarom, evenals bij BR, een kleine hoeveelheid van een ander monomeer zoals isopreen mee gepolymeriseerd. EPR heeft een hoge weerstand tegen veroudering en tegen chemische aantasting en is in vergelijking met de andere speciale rubbers zoals CR en NR, betrekkelijk goedkoop.

Siliconenrubbers hebben in tegenstelling tot verreweg de meeste polymeren, een anorganische hoofdketen van silicium- en zuurstofatomen. Ze zijn te gebruiken tot hoge temperaturen, circa 250 °C, en ze zijn weinig gevoelig voor veroudering.

Thermoplastische rubbers of thermoplastische elastomeren [TPE's] worden gekenmerkt door de voor rubbers bijzondere eigenschap dat ze zich zonder vulcanisatie toch als vernette rubbers gedragen. Het zijn blokkopolymere van harde, thermoplastische ketendelen en zachte, rubberachtige stukken. De harde delen van de verschillende ketens zoeken elkaar op en vormen harde domeinen die als bruggen tussen de rubberdelen fungeren. Bij verwarming boven het verwekingspunt van de harde domeinen verliezen deze hun samenhang, zodat vloeï mogelijk wordt en het

geheel als thermoplast te verwerken is. Naast de oudste representant van deze klasse, SBS= Styreen-Butadieen-Styreen, zijn diverse andere TPE's ontwikkeld, onder andere op basis van polyesters, polyurethanen en polyolefinen. In hun eigenschappen variëren deze stoffen van conventionele rubbers tot zachte thermoplasten.

Polyurethaanrubber [PUR] is de rubbervariant van de polyurethanen en wel de zachte variant. Ook de rubbers worden opgebouwd uit twee componenten en met een blaasmiddel vaak tot schuim verwerkt. Polyether matrassen vallen in deze categorie, maar ook de schuimen toegepast in de hoofd- en armsteunen in auto's en in autobumpers.

4.5. Eigenschappen van kunststoffen

4.5.1. Algemeen gedragspatroon

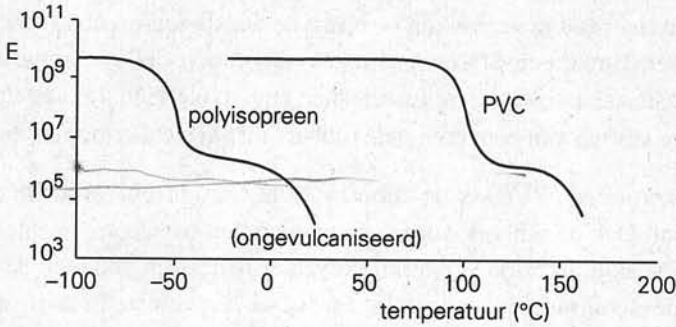
4.5.1.1. Fasen en fase-overgangen

In §2.4 zagen we dat polymeren in twee vaste toestanden, amorf en semi-kristallijn, kunnen verkeren.

Amorfe toestand

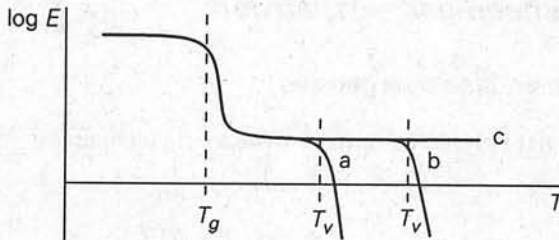
Beneden de glastemperatuur T_g is een kunststof glasachtig, dat wil zeggen hard en meestal transparant. Boven T_g wordt de kunststof rubberachtig. De E-modulus – die in vergelijking met die in de glastoestand vrij laag is – blijft dan nagenoeg constant bij temperatuurverhoging tot de vloeitemperatuur T_v bereikt wordt. Bij T_v gaat de kunststof over in vloeistof. Of een kunststof onder gebruiksomstandigheden – bijvoorbeeld bij kamertemperatuur – zich als een glasachtig polymeer of als een rubber gedraagt, wordt bepaald door de ligging van T_g . Ligt deze boven de gebruikstemperatuur, dan is de kunststof bij gebruik een glasachtige polymeer. Is T_g lager dan de gebruikstemperatuur, dan is de kunststof bij gebruik een rubber. Dit is duidelijk te zien in Figuur 4.63 waar PVC en IR met elkaar vergeleken worden. Beide zijn amorf, de E-T-diagrammen zijn identiek, alleen verschoven langs de temperatuur: PVC heeft als T_g 90 °C en IR als T_g -70 °C.

De lengte van het rubbergebied is sterk afhankelijk van de ketenlengte of molecuulmassa van het polymeer, zie Figuur 4.64: hoe groter de ketenlengte, des te langer is het rubbergebied en des te hoger ligt T_v . Het is begrijpelijk, dat de waarde van T_v hoger ligt, naarmate de ketens langer zijn: de polymeerkluwens worden uitgestrekerd en het aantal warpunten, dat zijn de punten waar de ketens met elkaar verstrengeld zijn, stijgt, waardoor de vloeit wordt belemmerd. In de praktijk wordt de vloeit van rubbers geheel onderdrukt door te vulcaniseren: door dwarsbruggen worden de ketens permanent met elkaar verbonden. In dit geval blijft de E-modulus dezelfde



Figuur 4.63. Vergelijking van twee amorphe polymeren.

waarde houden bij temperatuurverhoging (zie curve c in Figuur 4.64), totdat degradatie door thermische afbraak optreedt.



Figuur 4.64. Relatie tussen E-modulus en temperatuur voor: a. amorf polymeer; b. idem met hoger molecuulgewicht; c. ge vulcaniseerde rubber.

In de vloeibare toestand blijft het ontwarren en langs elkaar schuiven van de ketenkluwens moeilijk. De viscositeit η van vloeibare polymeren is zeer hoog en neemt toe met de molecuulmassa M :

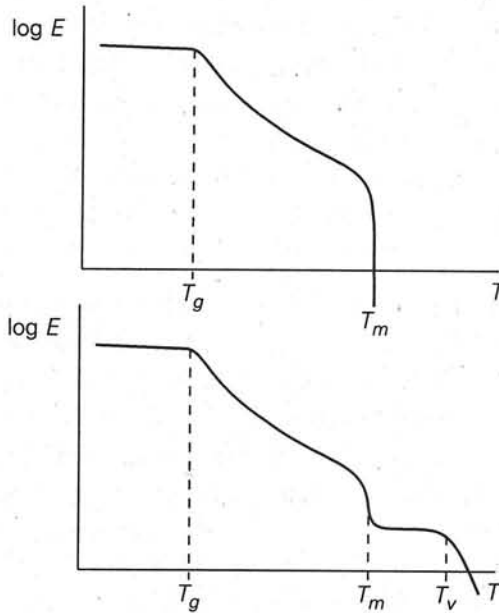
$$\eta \sim M^{3,4}.$$

Waarden van 10^4 Pa·s zijn normaal, maar ook hogere waarden komen voor (de viscositeit van water bedraagt 10^{-3} Pa·s). Verder wijken deze vloeistoffen in hun vloeigedrag sterk af van de gewone vloeistoffen: de viscositeit is sterk afhankelijk van de afschuifsnelheid en kan met een factor 100 tot 1000 dalen bij stijging van de afschuifsnelheid.

Semi-kristallijne toestand

Bij de semi-kristallijne polymeren heeft de kristalliniteit tot gevolg dat de waarde van de E-modulus boven T_g niet direkt terugvalt op die van de rubbertoestand, maar een waarde heeft die tussen die van de glasachtige toestand en die van de rubbertoestand ligt, de kunststof gedraagt zich 'leerachtig'. De E-modulus hangt voor een semi-kristallijne kunststof sterk af van de temperatuur (zie Figuur 4.65). Deze daalt

boven T_g geleidelijk doordat steeds meer kristallen smelten. Bij het smeltpunt T_m van de meest perfecte kristallen daalt de E-modulus met een sprong tot die van de amorfe kunststof. Alleen bij zeer hoog-moleculaire polymeren blijft een deel van het rubbergebied behouden (Figuur 4.65b, $T_m < T_v$), meestal gaat het polymeer bij smelten direct over in de vloeistoffase (Figuur 4.65a, $T_m > T_v$). Enkele consequenties van kristallisatie voor het gedrag van polymeren zijn:



Figuur 4.65. Relaties tussen E-modulus en temperatuur voor semi-kristallijne polymeren. a. normale molmassa; b. zeer hoog-moleculair.

- De kunststof is bruikbaar tot even onder T_m , omdat het behoud van de E-modulus nog vormvastheid waarborgt. Over het algemeen zal een kunststof die bij de gebruikstemperatuur glasachtig is, een hogere E-modulus hebben dan een semi-kristallijne kunststof die zich bij dezelfde gebruikstemperatuur onder T_m , maar wel boven T_g bevindt. Bovendien zal deze waarde veel sterker temperatuurafhankelijk zijn (vergelijk, bij kamertemperatuur, PP: E-modulus van circa 1400 MPa en HDPE: E-modulus van circa 1000 MPa met PVC: E-modulus van circa 3200 MPa).
- Het niveau van de E-modulus is tussen T_g en T_m sterk afhankelijk van de kristallisatiegraad. Dit wordt het duidelijkst geïllustreerd door PE, waarvoor de relatieve dichtheid tussen LDPE en HDPE varieert tussen 0,91 en 0,97 en de kristallisatiegraad tussen 40 en 85 %, terwijl de E-modulus varieert tussen 100 en 1200 MPa, dit alles bij 20 °C.

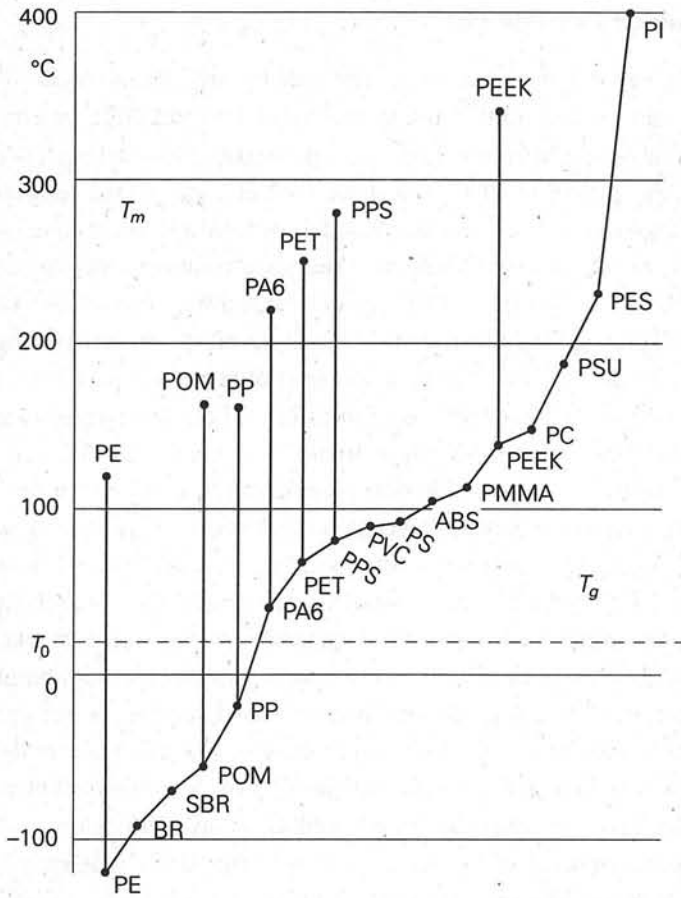
- Het rubberplateau is geheel of grotendeels gemaskeerd door de kristalliniteit, de smelt is dus nauwelijks elastisch.
- Parallel aan de sterkere temperatuurafhankelijkheid van de E-modulus voor semi-kristallijne ten opzichte van amorf polymeren, geldt ook een sterkere tijdsafhankelijkheid. Semi-kristallijne polymeren kruipen meer dan amorf, glasachtige polymeren, althans bij temperaturen niet te ver beneden T_g (zie ook §4.5.2.3).
- Een semi-kristallijn polymeer is een tweefasensysteem. Voor $T < T_g$ bestaat een semi-kristallijn polymeer uit een glasfase en een kristallijne fase, met een over het algemeen lage slagsterkte, voor $T > T_g$ uit een rubberachtige fase en een kristallijne fase, met een hoge slagsterkte.
- Wegens deze toestand met twee fasen zijn semi-kristallijne polymeren vrijwel nooit transparant. Het verschil in brekingsindex tussen de fasen zorgt voor sterke lichtverstrooiing (zie ook §4.5.6).

Belangrijk voor de verbetering van de mechanische eigenschappen is de kristallisatie als gevolg van oriëntatie. Bijvoorbeeld, stereospecifieke rubbers als poly-1,4-butadieen kunnen onder rek kristalliseren. Door het uitrekken komen de vezels netter naast elkaar te liggen, zodat kristallisatie mogelijk is. De gevormde kristallieten dragen in hoge mate bij tot de sterkte. Zo heeft een natuurrubber een treksterkte van 40 MPa, terwijl een SBR, die niet kan kristalliseren, een treksterkte heeft die niet hoger komt dan 3 MPa. SBR kan de treksterkte van natuurrubber alleen bereiken door versterking met aanzienlijke hoeveelheden roet.

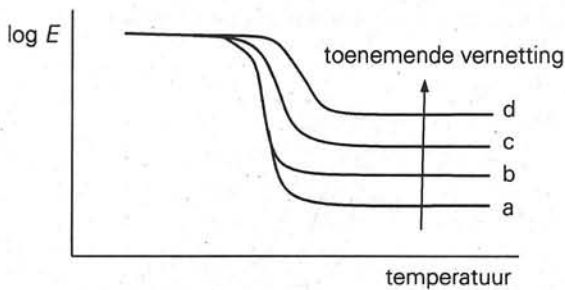
Een ander voorbeeld van oriëntatie en kristallisatie vinden we bij vezels. De kristallisatie van georiënteerde vezels bewerkstelligt een E-modulus en sterkte die een veelvoud zijn van die in ongeoriënteerde toestand, uiteraard wel in één richting: de lengterichting van de vezel.

Figuur 4.66 geeft een overzicht van enkele polymeren, gerangschikt naar opklimmende waarde van T_g . De semi-kristallijne polymeren hebben een verticale verbindinglijn naar hun smelttemperatuur. Uit dit overzicht wordt het karakter van de verschillende polymeren duidelijk: voor rubbers ligt T_g ver beneden kamertemperatuur, voor amorf thermoplasten ligt T_g ruim boven kamertemperatuur. Bij semi-kristallijne thermoplasten kan T_g zowel onder als boven kamertemperatuur liggen; in het laatste geval zijn de kunststoffen bestand tegen hoge temperaturen.

Het verloop van de E-modulus als functie van de temperatuur voor een amorf polymeer verandert door de vorming van dwarsbruggen ('cross-linking'). We zagen al, dat het aanbrengen van een gering aantal dwarsbruggen (vulcanisatie) het rubbergebied onbepaald verlengt. Verdere vernetting, zoals bij thermoharders het geval is, doet de E-modulus in het rubbergebied toenemen en ook het glaspunt stijgen, zie Figuur 4.67.



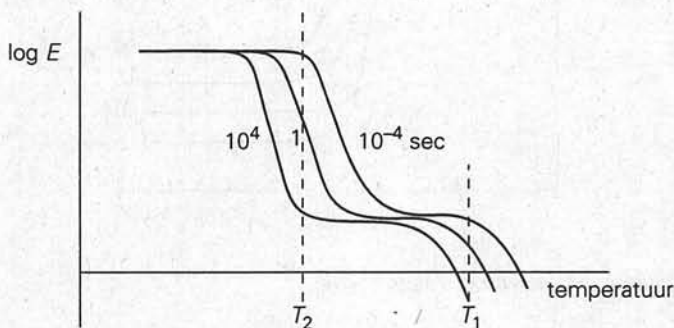
Figuur 4.66. Overzicht van glas- en smeltpunten (Ref. 6).



Figuur 4.67. Invloed van netwerkvorming.

4.5.1.2. Invloed van de tijd

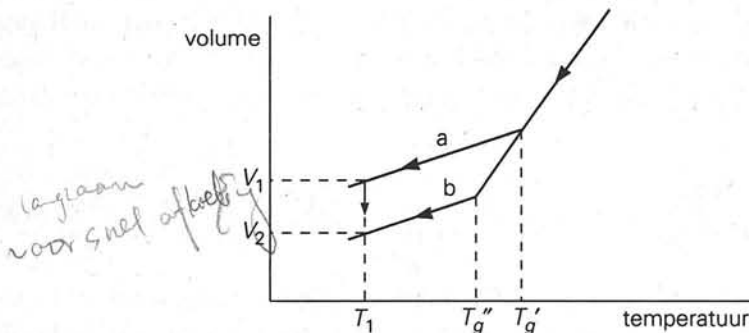
Bij het gedrag van polymeren is de tijd een zeer belangrijke factor. Zo blijkt het bij het bepalen van de E-modulus uit te maken of er een snelle of een langzame deformatie plaatsvindt. In Figuur 4.68 wordt het verband tussen E en T weergegeven voor deformaties gedurende 0,1 msec, 1 sec en 3 uur. De curven verschuiven langs de T-as. Beschouwen we het karakter van de kunststof bij een temperatuur T_1 , dan gedraagt deze zich bij een kort durende proef als een rubber, doch bij de lange tijd als een vloeistof, de kunststof heeft een tweeslachtig, visco-elastisch karakter. Behalve ludieke mogelijkheden (zoals 'bouncing putty' en terugspringen bij het doorknippen van de bij het uitschenken van een polymere vloeistof gevormde straal) heeft de visco-elasticiteit van vloeibare polymeren enkele belangrijke technologische consequenties. Wanneer, zoals bij extrusie (zie hoofdstuk 5), het gesmolten polymeer door een convergerend kanaal geperst wordt, vertoont het naast visceuze vloeit ook een reversibele elastische vervorming. Deze veert bij het verlaten van de spuitmond terug, zodat de diameter van de uittredende stroom veel groter kan zijn dan die van de spuitmond. Dit verschijnsel heet *die swell*. De elastische deformaties kunnen zelfs zo groot worden, dat de vloeistofstroom plaatselijk breekt, waardoor het gevormde produkt een ruw, vervormd oppervlakte heeft ('smeltbreuk' of 'melt fracture'). Een derde gevolg van het visco-elastisch gedrag is het optreden van ketenoriëntaties. Als de vloeistof een visco-elastische vervorming ondergaat, gaat deze gepaard met een gedeeltelijke uitlijning van de molecuulketens. Als het terugveren van de deformatie belemmerd wordt door snelle afkoeling tot beneden T_g (voor amorfe polymeren) of beneden T_m (voor semi-kristallijne polymeren), dan worden deze ketenoriëntaties ingevroren. Soms gebeurt dit opzettelijk (bij vezels en folies), omdat E-modulus en treksterkte in de oriëntatierichting aanzienlijk toenemen. In veel gevallen echter leiden ingevroren oriëntaties tot ongewenste verschijnselen, zoals anisotropie in eigenschappen en gebrek aan vormvastheid (bij verhoogde temperaturen veert de deformatie weer terug!).



Figuur 4.68. Invloed van de tijdschaal.

Beschouwen we in Figuur 4.68 het gedrag bij temperatuur T_2 , dan zien we een dualiteit zoals bij T_1 . De uitersten zijn: glastoestand bij snelle vervorming en rubbergedrag bij langzame vervorming. Op overdreven wijze demonstreert dit voorbeeld, dat de E-modulus van een vast polymeer sterk afhangt van de belastingstijd: bij het aanbrengen van een spanning vertoont het polymeer na korte tijd slechts een kleine vervorming, maar de vervorming blijft toenemen tot een veelvoud van de beginwaarde, met andere woorden: er treedt een aanzienlijke kruip op. Deze kruip kan overigens geheel reversibel zijn als gevolg van het visco-elastische karakter van de deformatie. Het terugveren naar de oorspronkelijke toestand vindt uiteraard ook plaats op dezelfde lange tijdschaal. Meestal treedt daarnaast een permanente deformatie op. Spanningsrelaxatie vertoont analogie met kruip. Een snel aangebrachte deformatie veroorzaakt een hoge spanning, die samenhangt met de hoge korte-duur E-modulus. Bij constant gehouden deformatie neemt de spanning geleidelijk af. De verschijnselen kruip en spanningsrelaxatie spelen een overheersende rol bij alle mechanische eigenschappen van kunststoffen; deze worden in §4.5.2 behandeld.

Het feit dat de glas-rubber-overgangstemperatuur afhangt van de tijdschaal, uit zich ook op een andere wijze: volumerelaxatie. In §2.4.3 (Figuur 2.28) is besproken hoe voor een amorf polymeer het volume verandert met de temperatuur. Deze verandering hangt af van de afkoelsnelheid, zie Figuur 4.69. Lijn a geldt als een polymeer vanuit het rubbergebied zeer snel wordt afgekoeld, lijn b geldt voor een zeer langzame afkoeling. Snelle afkoeling zorgt niet alleen voor een hoger glaspoint, maar ook voor een groter volume (lagere dichtheid) in de glasfase. In een snel afgekoeld polymeer treedt volumerelaxatie op: het polymeer krimpt bij gebruikstemperatuur T_1 heel langzaam van V_1 naar V_2 . Dit verschijnsel heeft gevolgen voor de dimensie-stabiliteit van gevormde kunststofartikelen die tijdens de fabricage snel zijn afgekoeld. Dunne wanden koelen sneller af dan dikke en zijn daardoor meer onderhevig aan volumerelaxatie. Andere gevolgen zijn de met de volumerelaxatie samenhangende veranderingen in sommige eigenschappen: de slagsterkte neemt meestal



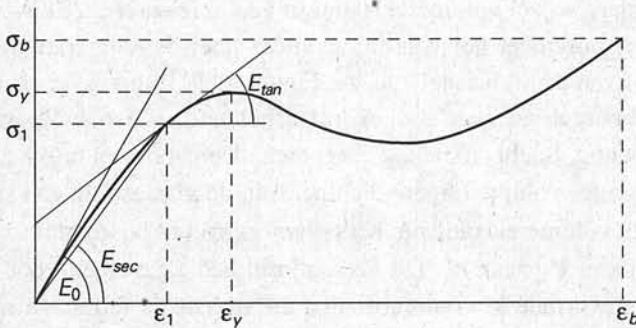
Figuur 4.69. Invloed van de afkoelsnelheid op het volume.

af, de weerstand tegen kruip neemt toe bij toeneming van de dichtheid. Volume-relaxatie heet ook wel fysische veroudering.

4.5.2. Mechanische eigenschappen

4.5.2.1. Het spanning-rek diagram

Enkele mechanische eigenschappen zijn af te leiden uit het spanning-rek diagram. Een dergelijk diagram verkrijgt men door een trekproef waarbij de kracht gedeeld door het oorspronkelijke oppervlak van de dwarsdoorsnede van de proefstaaf de spanning op de dwarsdoorsnede geeft, en de verlenging gedeeld door de oorspronkelijke lengte van de proefstaaf de relatieve verlenging of de rek (vaak uitgedrukt in %) geeft. Zo ontstaat een spanning-rek (σ - ϵ)-curve, in eerste benadering onafhankelijk van de proefstaafafmetingen. Een schematische (σ - ϵ)-curve toont Figuur 4.70. Uit deze σ - ϵ curve zijn af te leiden: de E-modulus, de vloeigrens (symbool σ_y ; Engels: 'yield stress') en de treksterkte (symbool σ_b of σ_{UTS} , Engels: 'ultimate tensile stress').



Figuur 4.70. Spanning-rek-diagram (ref. 6).

Bij kunststoffen kan men de E-modulus op verschillende manieren definiëren. Indien voor het gedeelte van de curve bij lage spanningen en lage rekken de wet van Hooke geldt, is de E-modulus voor het eerste, bij benadering rechte deel van de curve gegeven door $E_0 = \sigma/\epsilon$. Is de curve van af het begin gekromd, dan wordt de E-modulus gegeven door:

$$E_0 = \left(\frac{d\sigma}{d\epsilon} \right)_{\epsilon=0} \quad (4.8)$$

Onder de E-modulus van een kunststof wordt meestal deze beginmodulus of kortduur-modulus verstaan. Kruip is bij kunststoffen belangrijker dan bij metalen. De E-

modulus zal hierdoor afnemen met de tijd. Daarom wordt bij kunststoffen ook een E-modulus bij grotere rek gebruikt. Deze kan op twee manieren gedefinieerd worden:

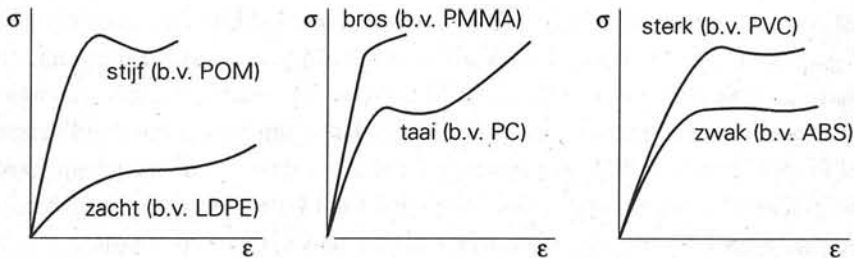
1. als de secantmodulus

$$E_{sec} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \quad (4.9)$$

2. als de tangensmodulus

$$E_{tan} = \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=\varepsilon_1} \quad (4.10)$$

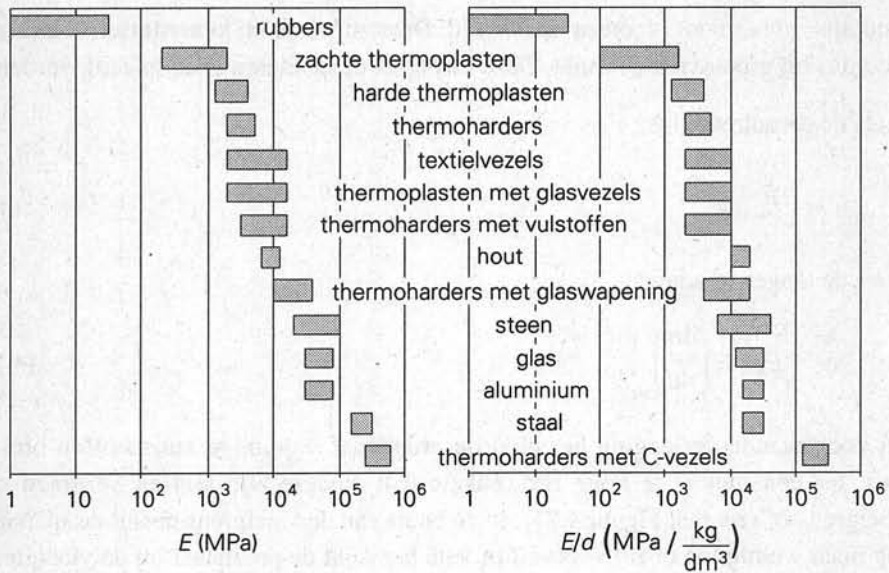
Bij voortgaande verlenging bezwijkt de proefstaaf. Sommige kunststoffen breken bros, bij een niet al te hoge rek (enkele %). Andere zijn taai en vertonen een vloeigrens σ_y (zie ook Figuur 4.71). In de buurt van de vloeigrens neemt de spanning nog maar weinig toe of zelfs iets af. In feite bezwijkt de proefstaaf bij de vloeigrens, werkelijke breuk treedt pas op bij een wat hogere spanning σ_b en een aanzienlijk hogere breukrek ε_b . Het totale oppervlak onder de curve is de per volume-eenheid benodigde energie om de proefstaaf te breken, deze energie is een maat voor de taaigheid van het beproefde materiaal.



Figur 4.71. Diverse typen spanning-rek-diagrammen (Ref. 6).

Vraag 4.37 Laat zien dat het oppervlak onder de (σ - ε)-curve een energie per volume-eenheid is.

Op basis van de ligging van de (σ - ε)-curve kan het onderzochte materiaal gekarakteriseerd worden. Er zijn stijve of zachte, taaie of brossen, sterke of zwakke kunststoffen. De te bereiken vloe- en trekspanningen liggen in de orde van MPa, terwijl de E-moduli in de orde van GPa liggen (zie Figuur 4.72).



Figuur 4.72. Een overzicht van E-moduli en gereduceerde E-moduli.

4.5.2.2. De elasticiteitsmodulus

Kunststoffen hebben in het algemeen een lagere E-modulus dan metalen. Figuur 4.72 geeft een overzicht van E-moduli. Rubbers liggen uiteraard het laagst, hun toepassingsgebied vraagt juist een lage E-modulus. De thermoplasten vertonen een breed spectrum van E-moduli, van de zachtere (vaak semi-kristallijne) variëteiten als PE, PP, polyamiden, fluorpolymeren en celluloseplastics tot de groep hardere (amorfe) thermoplasten met een modulus van 2 tot 4 GPa. De thermoharders hebben in het algemeen E-moduli die wat hoger zijn dan die van de thermoplasten.

Bij kunststoffen hangt de E-modulus af van de oriëntatie van de keten ten opzichte van de meetrichting. Zijn de ketens georiënteerd in de vezelrichting en wordt in de vezelrichting gemeten, dan blijken de vezels hoge waarden voor de E-moduli te vertonen. Vezels, waaronder de textielvezels, danken hun hogere E-modulus aan de ketenoriëntatie in de vezelrichting, die bij de productie wordt ingebouwd. Vulstoffen en korte glasvezels verhogen de E-modulus. Dit effect treedt in nog versterkte mate op met lange glasvezels en glasweefsels. Deze laatste worden vooral ingebouwd in thermoharders. Een uitzonderlijk hoge E-modulus kan worden bereikt door inbedding van georiënteerde koolstofvezels in thermoharders.

Vraag 4.38 *Waarom is het lastig lange glasvezels in thermoplasten in te bouwen?*

Voor een juiste vergelijking van materialen is het vaak wenselijk de waarde van de E-modulus te delen door die van de relatieve dichtheid, d . Figuur 4.72 geeft ook

waarden voor E/d . De grootte E/d wordt de specifieke of gereduceerde E-modulus genoemd. Merk op, dat de waarden van E/d voor thermoharders met koolstofvezels hoger zijn dan die voor staal.

Uit Figuur 4.72 valt af te leiden, dat de amorf thermoplasten in de glastoestand vrijwel altijd een E-modulus van 3 à 3,2 GPa hebben. Voorbeelden zijn PVC, PS en PMMA. Vertonen de thermoplasten een uitgesproken secundaire overgang in het glasgebied beneden kamertemperatuur, dan ligt de waarde voor de E-modulus lager. Een voorbeeld hiervan is PC met een E-modulus gelijk aan 2,1 GPa. Semi-kristallijne polymeren beneden de glastemperatuur T_g hebben een hogere waarde voor de E-modulus dan de amorf polymeren: de kristallijne fase heeft namelijk een hogere E-modulus dan de amorf fase. Een voorbeeld is PEEK met een E-modulus van circa 4 GPa. Boven T_g liggen de E-moduli van semi-kristallijne polymeren lager, zoals blijkt uit de waarde voor de E-modulus van PE ($E = 0,15$ tot $1,4$ GPa) en PP ($E = 1,3$ GPa) bij kamertemperatuur. De waarde van de E-modulus is dan sterk afhankelijk van de kristalliniteit en van het verschil tussen T_g en kamertemperatuur. Soms wordt beneden T_g het positief effect van kristallisatie op de E-modulus te niet gedaan door het effect van een of meer secundaire overgangen. Dit is in sterke mate het geval bij PTFE ($E =$ circa $0,6$ GPa).

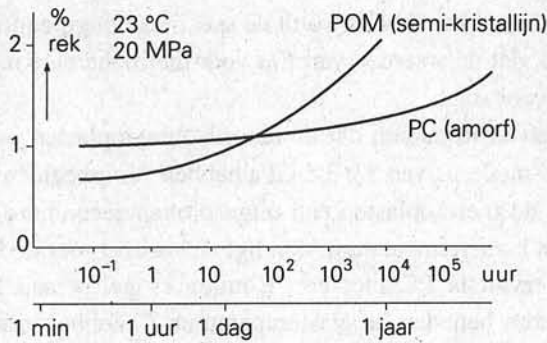
Er zijn ook enkele factoren waar de E-modulus *niet* van afhangt. De E-modulus is niet afhankelijk van ketenlengte en ketendistributie, tenzij een grotere ketenlengte leidt tot een lagere kristalliniteit, zoals bij ultrahoog-moleculair PE. In dat geval neemt de E-modulus iets af met toenemende ketenlengte. De E-modulus is ook onafhankelijk van de ketenstijfheid en van de keteninteracties. Deze spelen alleen een rol in de hoogte van de glas-rubber-overgangstemperatuur en/of in de hoogte van het smeltpunt. Het is dus niet zo, dat een stijvere keten leidt tot een polymeer met een hogere E-modulus.

4.5.2.3. Kruip

Kruip is het verschijnsel dat een doorgaande vervorming van een materiaal optreedt als gevolg van een aanwezige spanning. Metalen en thermoplasten kunnen kruip vertonen. Thermoharders en rubbers nauwelijks.

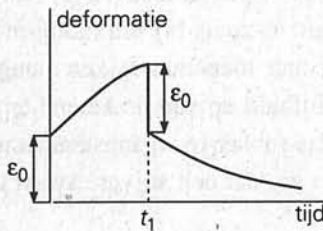
Vraag 4.39 *Waarom kruipen thermoplasten en metalen wel en rubbers en thermoharders veel minder?* *cross links*

Thermoplasten zijn erg onderhevig aan kruip, zodat de korte-duur E-modulus niet geschikt is om het gedrag van thermoplasten bij een belasting van langere duur te karakteriseren. Dit blijkt duidelijk uit het voorbeeld van POM en PC, waarvan de eerste bij een bepaalde belasting gedurende een korte tijd een kleinere, maar voor een lange tijd een grotere rek vertoont dan de tweede, zie Figuur 4.73.



Figuur 4.73. Kruip van een amorf en een semi-kristallijn polymeer.

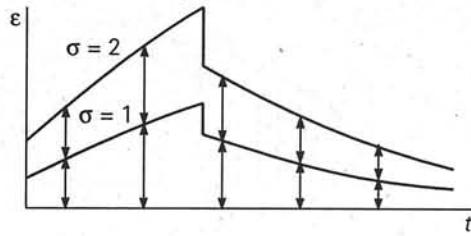
Het kruipgedrag van een polymeer wordt schematisch aangegeven in Figuur 4.74. De belasting, σ , aangebracht op het tijdstip $t = 0$, veroorzaakt een onmiddellijke rek ϵ_0 , die met de korte-duur E-modulus samenhangt volgens $\epsilon_0 = \sigma/E_0$. Bij voortschrijdende belastingsduur neemt ϵ toe. Als op het tijdstip t_1 de belasting wordt opgeheven, vindt spontane terugvering plaats ter grootte van ϵ_0 , waarna de rek geleidelijk verder afneemt, soms tot nul, soms tot een eindwaarde, de blijvende plastische rek.



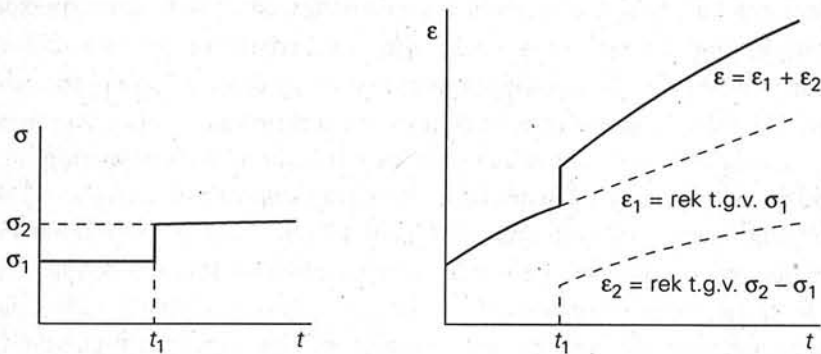
Figuur 4.74. Schematische weergave van kruip.

Als bij een verdubbeling van de aangelegde spanning niet alleen de beginrek ϵ_0 , maar ook de rek op elk tijdstip verdubbeld wordt, dan noemen we de kunststof lineair visco-elastisch, zie Figuur 4.75. In dat geval geldt het zogenaamde superpositiebeginsel, dat voor kruip op het volgende neerkomt, geïllustreerd in Figuur 4.76.

Stel, dat gedurende een tijd t_1 een spanning σ_1 op de kunststof werkt. De kunststof reageert daarop met een rek $\epsilon_1(t)$. Wordt op het tijdstip t_1 de spanning sprongsgewijs verhoogd van σ_1 naar σ_2 , dan zal de respons van de kunststof voor $t > t_1$ uit twee delen bestaan: het eerste deel is het vervolg van de eerdere respons op σ_1 , dus $\epsilon_1 = \epsilon_1(\sigma_1, t)$; het tweede deel is de respons op een extra spanning $\sigma_2 - \sigma_1$ met als begintijd $t = t_1$, dus $\epsilon_2 = \epsilon_2(\sigma_2 - \sigma_1, t - t_1)$. De totale deformatie voor $t > t_1$ is dan $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$.

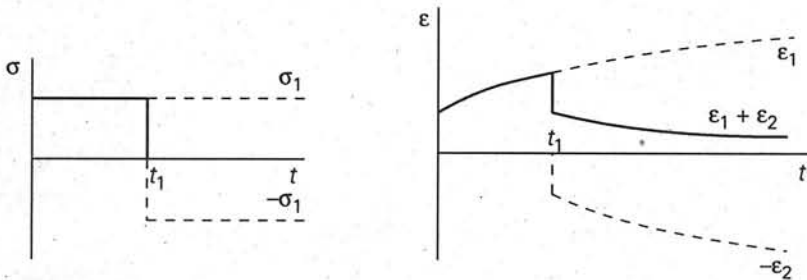


Figuur 4.75. Lineair visco-elastisch gedrag.



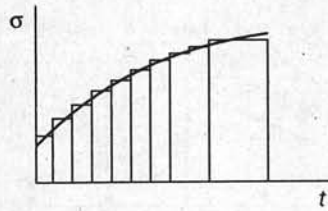
Figuur 4.76. Superpositiebeginsel.

Uiteraard kan men de extra aangelegde spanning ook van teken laten omdraaien. Dit is geïllustreerd in Figuur 4.77. De rek ten gevolge van de extra aangelegde spanning, $-\sigma_1$, is dan negatief. Het superpositiebeginsel kan dan gebruikt worden om het vormherstel, de totale spanning is nu immers nul, te beschrijven.



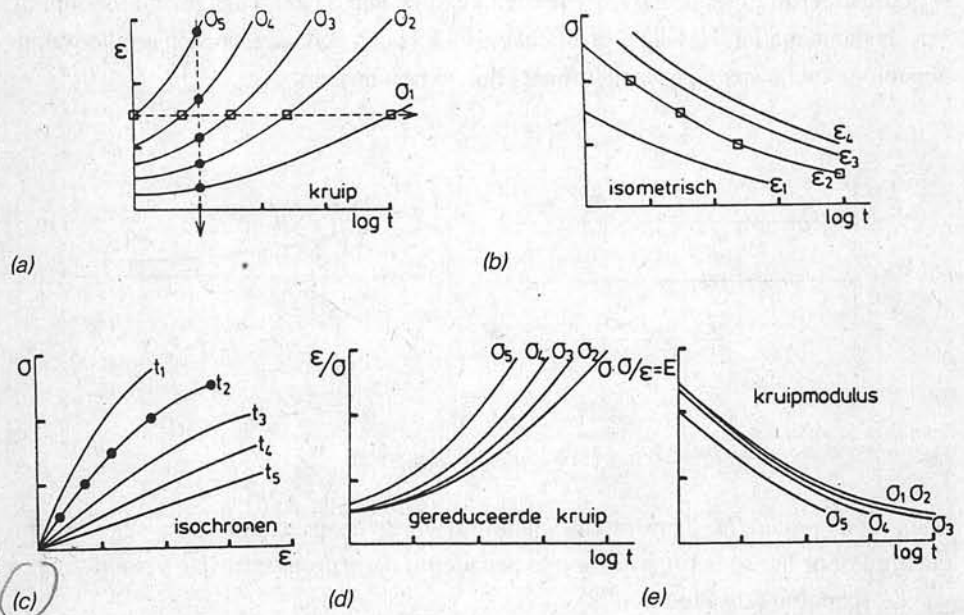
Figuur 4.77. Vormherstel volgens het superpositiebeginsel.

Voor een geleidelijk variërende spanning wordt de procedure van superpositie gevolgd door het spanningsverloop te benaderen met sprongsgewijze veranderingen van de spanning (zie Figuur 4.78).



Figuur 4.78. Trapsgewijze benadering variërende spanning.

Om voor een kunststof het lange-duur vervormingsgedrag te kunnen voorspellen, zijn dus kruipgegevens nodig (deze zijn beschikbaar in de literatuur en in fabrikantenbrochures). Deze kruipgegevens kunnen op diverse wijzen gepresenteerd worden. De eenvoudigste manier is de rek ϵ als functie van de tijd t voor verschillende spanningsniveaus weer te geven, zoals in Figuur 4.75. Om de kruip op sterk verschillende tijdschalen te kunnen beoordelen (van seconden tot jaren) wordt de tijd vrijwel altijd logaritmisches uitgezet (zie Figuur 4.79a). Uit deze kruipcurven kunnen twee andere voorstellingswijzen worden afgeleid; doorsnijden voor constante tijden geeft de relatie tussen de spanning en de rek, de *isochronen* (Figuur 4.79c), die niet verward mogen worden met de met een trekbank opgenomen σ - ϵ curven. Doorsnijding voor constante waarden van de rek geeft de *isometrische kruipcurven* (Figuur 4.79b), die aangeven hoe lang het duurt eer bij een gegeven spanning een bepaald rekniveau bereikt wordt.

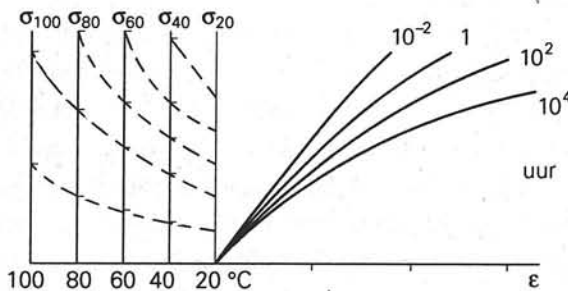


Figuur 4.79. Diverse voorstellingen van kruipgedrag, $\sigma_5 > \sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$.

Vaak wordt de gereduceerde kruip uitgezet in plaats van de kruip zelf. De gereduceerde kruip is de rek gedeeld door de spanning, ϵ/σ . Afwijkingen van lineaire visco-elastischeiteit worden dan zichtbaar doordat een curve zich losmaakt van de gemeenschappelijke curve, zoals in Figuur 4.79d het geval is voor $\sigma = \sigma_3$ na een bepaalde kruiptijd. De grootte ϵ/σ heeft de dimensie van een reciproke modulus. Men kan dan σ/ϵ opvatten als een schijnbare modulus, een secantmodulus, die meestal als 'kruipmodulus' wordt aangeduid. Deze kruipmodulus als functie van de tijd is gegeven in Figuur 4.79e.

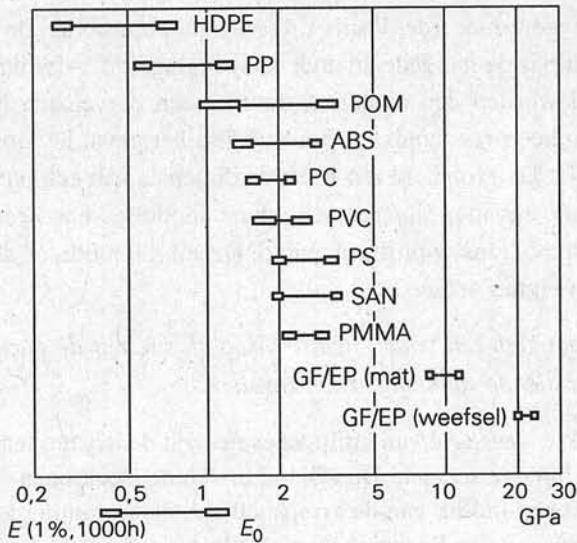
Vraag 4.40 *Laat zien dat voor lineaire visco-elastischeiteit de curven voor de verschillende spanningen samenvallen.*

De meest gebruikte weergave van kruipgegevens zijn de isochronen, gemakkelijk af te lezen door de lineaire schalen. De afstand tussen de isochronen voor de verschillende tijden geeft een indruk van de kruipsnelheid, de kromming is een aanwijzing voor de afwijking van het lineaire visco-elastische gedrag. Het is soms mogelijk kruipgegevens bij verschillende temperaturen in vrij goede benadering weer te geven met één isochronenbundel. Voor elke temperatuur geldt dan een andere schaal voor de spanning, een voorbeeld geeft Figuur 4.80.



Figuur 4.80. Isochronen voor verschillende temperaturen (Ref. 6).

Kruipgedrag wordt zowel in grafieken als in numerieke waarden gegeven. Soms worden deze laatste aangegeven als $\sigma(1\%, 1000h)$, dat wil zeggen de spanning die na 1000 uur belasting een rek van 1% te weeg brengt. Soms geeft men de informatie in de vorm van kruipmoduli bij lange tijden voor een of meer niveaus van spanning of rek. Als voorbeeld geeft Figuur 4.81 de $E(1000h)$ en de E_0 bij lage spanningen. De afstand tussen de blokjes in deze Figuur is een maat voor de kruip; het blijkt dat deze voor de semi-kristallijne polymeren (PE, PP, POM) het grootst is. Hieruit blijkt dat tijd en temperatuur hetzelfde effect hebben op het vervormingsgedrag: de E-modulus van kristallijne polymeren daalt immers bij toenemende temperatuur ook sneller dan bij amorfe polymeren. Uit het schema in de Figuur is ook duidelijk af te lezen dat de afhankelijkheid van de tijd voor glasvezel-versterkte harsen gering is, vooral als de



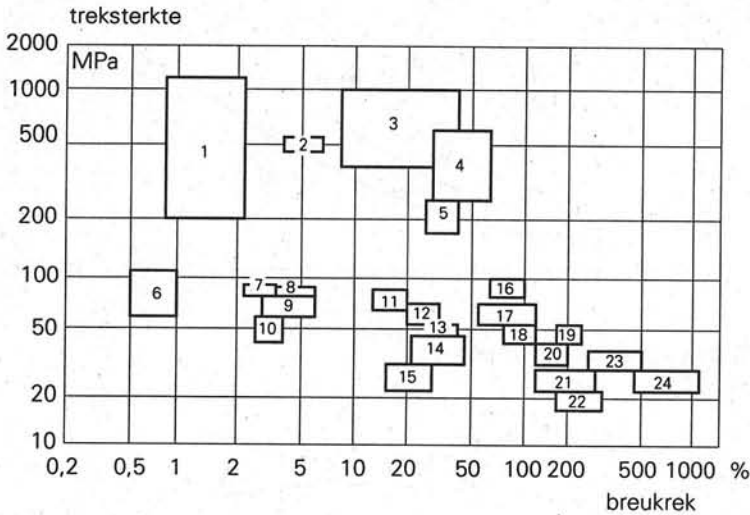
Figuur 4.81. Instantane en 1000-uur E -moduli voor verschillende stoffen.

wapening uit weefsel bestaat. De spanningen worden in dit geval voornamelijk door het glasweefsel opgenomen.

Een verschijnsel dat nauw met kruip samenhangt, is *spanningsrelaxatie*, dat is de geleidelijke daling van de spanning bij een constante rek. Ook spanningsrelaxatie kan op verschillende wijzen worden weergegeven, bijvoorbeeld de spanning σ als functie van $\log t$, $E = \sigma/\epsilon$ als functie van $\log t$, of σ - ϵ isochronen. Deze relaties zijn niet gelijk aan die voor kruip voor een bepaalde kunststof bij een bepaalde temperatuur, maar voor praktische doeleinden zijn de verschillen te verwaarlozen. Uit kruipisochronen kan dus ook, in verticale richting, de spanningsrelaxatie worden afgelezen. Voorwaarde is dat het materiaalgedrag niet al te zeer afwijkt van lineair visco-elastisch gedrag.

4.5.2.4. Treksterkte

Treksterkte is een voor de praktijk tamelijk belangrijke eigenschap. De treksterkte σ_b wordt hier gedefinieerd als de spanning waarbij de kunststof bezwijkt. Daarnaast is de breukrek van belang, als kenschetsing van de kunststof als bros of taai. In Figuur 4.82 is een schematisch overzicht gegeven van de treksterkte en breukrek van kunststoffen in vergelijking met andere stoffen. De treksterktes van kunststoffen lopen minder uiteen dan de E -moduli. Rubbers en zachte kunststoffen hebben treksterkten variërend van circa 15 tot 30 MPa. De harde kunststoffen hebben waarden tussen 30 en 80 MPa. Voor de vezelversterkte thermoharders ligt de treksterkte in dezelfde orde als die van metalen en van vezels. Figuur 4.82 laat ook zien, dat de thermoharders en ook PS, PVC en PMMA tot de brosse polymeren behoren, terwijl



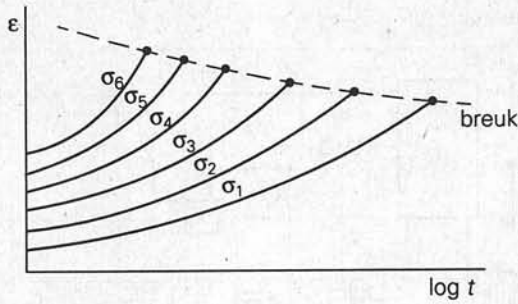
- | | | |
|----------------------------|---------|-------------|
| 1. gewapende thermoharders | 9. PMMA | 17. PPO, PC |
| 2. katoen | 10. PS | 18. PETP |
| 3. constructie metalen | 11. PVC | 19. PA |
| 4. synthetische vezels | 12. POM | 20. PP |
| 5. wol | 13. CA | 21. HDPE |
| 6. thermoharders | 14. TPS | 22. LDPE |
| 7. PPS | 15. ABS | 23. PTFE |
| 8. SAN | 16. PSU | 24. rubber |

Figuur 4.82. Overzicht treksterkte en breukrek (Ref. 6).

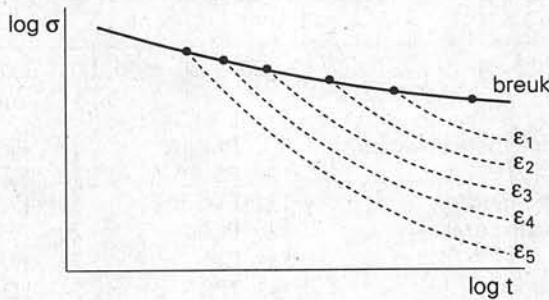
PA, PP, PE en PTFE zeer taai zijn. Bedenk dat Figuur 4.82 geldig is bij kamertemperatuur. Een kleine verandering van de temperatuur, en ook een verschuiving in de tijdschaal, kan het beeld aanzienlijk wijzigen. Zo is PP bij 0 °C bros, maar heeft het onder standaardcondities een zeer hoge breukrek.

Evenals de E-modulus is de treksterkte van polymeren sterk afhankelijk van de tijdschaal van de belasting. Dit is eenvoudig in te zien voor het gebied van taaie breuk. Worden kunststoffen op kruip belast bij verschillende spanningsniveaus, dan eindigen deze kruipproeven voor hoge belastingen in breuk (zie Figuur 4.83). Uit de spanningen en tijden tot breuk kan nu Figuur 4.84 worden afgeleid, waarin tevens de tijden tot een bepaalde deformatie worden aangegeven (vergelijk de isometrische kruipcurven uit Figuur 4.79b). De breuklijn geeft weer hoe de treksterkte afhangt van de belastingstijd voor taaie breuk.

Behalve taaie breuk kan brossse breuk optreden. Brossse breuk is niet een gevolg van de voortschrijdende deformatie en vloeien van de kunststof, maar van het initiëren en groeien van haarscheuren. Scheurinitiatie en scheurgroei vragen ook tijd. De tijd tot brossse breuk kan ook worden weergegeven door een soortgelijke breuklijn als voor taaie breuk. Omdat het breukmechanisme nu heel anders is dan bij taaie breuk, worden ligging en vorm van de curve door heel andere factoren bepaald. De lijn voor



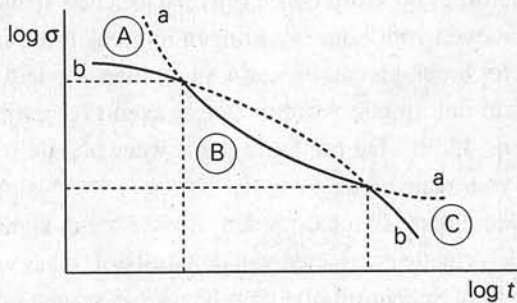
Figuur 4.83. Kruipcurven tot breuk (Ref. 6).



Figuur 4.84. Isometrische kruipcurven met breuklijn.

brosse breuk (b) in Figuur 4.85 snijdt de lijn voor taaie breuk (a) op twee plaatsen. Voor een kunststof die dit beeld vertoont kan men drie gebieden onderscheiden:

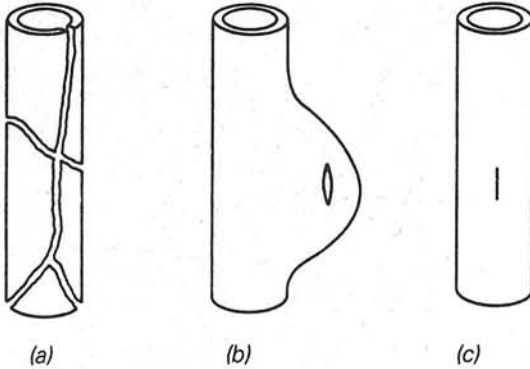
- A = het gebied met hoge spanningen: de aangelegde spanning geeft een brossre breuk na zeer korte tijd
- B = het gebied met matige spanningen: de tijd tot taaie breuk is korter dan die tot brossre breuk, zodat de kunststof taai breekt



Figuur 4.85. Twee mogelijke breukmechanismen: a. taaie breuk; b. brossre breuk (Ref. 6).

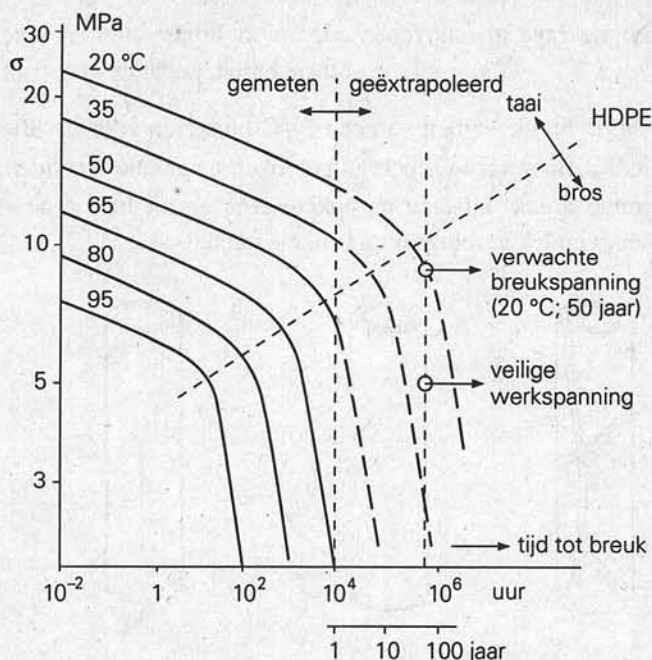
C = het gebied met lage spanningen: de tijd tot brosse breuk is korter dan die tot taaie breuk, zodat de kunststof bros breekt

Figuur 4.86 laat de breukbeelden van een PVC-buis zien voor de drie aangegeven spanningsgebieden. Buis a is in scherven gebroken na enkele seconden, bij buis b is een ballonvormige breuk ontstaan na enkele uren en bij buis c heeft een kleine, brosse haarscheur een lek veroorzaakt na enkele jaren.



Figuur 4.86. Breuktypen: a. brosse breuk (korte duur); b. taaie breuk (lange duur); c. brosse haarscheur (zeer lange duur).

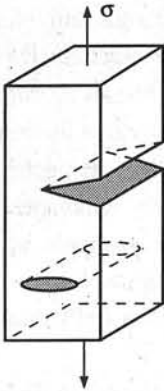
Bij een dergelijk gecompliceerd breukgedrag is het moeilijk de toelaatbare spanning in een produkt aan te geven. Hier wordt bedoeld de spanning waarbij geen breuk op zal treden gedurende de gewenste levensduur van het produkt. De gebruikelijke methode voor deze schatting bestaat uit het uitvoeren van een groot aantal langeduur breukproeven bij een constante spanning. De gemeten tijden tot breuk worden uitgezet tegen de aangelegde spanning en de zo verkregen regressiecurve wordt geëxtrapoléerd van de waargenomen langste breuktijd (bijvoorbeeld een jaar) naar de vereiste levensduur, bijvoorbeeld 50 jaar. De gemeten breuktijden vertonen meestal een aanzienlijke spreiding, een factor 10 tussen de uitersten is niet ongewoon. Men moet daarom minstens 5 à 10 monsters per spanningsniveau meten om een enigszins betrouwbaar gemiddelde te krijgen. De hellingsverandering van taai (B) naar bros (C) kan de extrapolatie van een aldus verkregen curve ongeldig maken. Een oplossing voor dit probleem berust op het volgende: temperatuurverhoging versnelt zowel de brosse als de taaie breukmechanismen; de overgang van B naar C komt bij meer praktische tijden te liggen. Figuur 4.87 geeft een voorbeeld van een extrapolatie naar lagere temperaturen en langere tijden. De metingen strekken zich uit over een jaar, de extrapolatie naar 50 jaar heeft nu een aanzienlijk hogere betrouwbaarheid dan de extrapolatie van de lijn voor 20 °C.



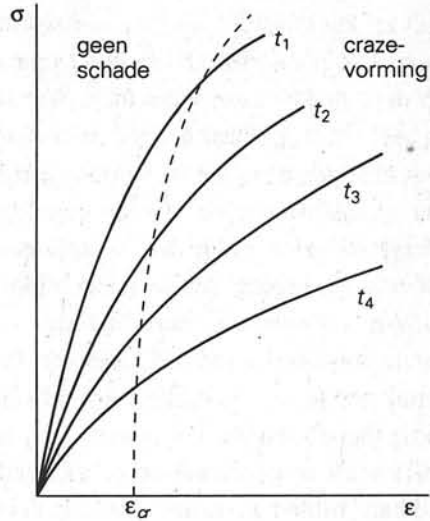
Figuur 4.87. Extrapolatieprocedure voor HDPE-buizen (Ref. 6).

Deze procedure is zeer belangrijk voor de beproeving van kunststofbuizen. Hiervoor geldt de eis, dat geen breuk, ook niet na zeer lange tijd, onder permanente inwendige druk optreedt. Bij veel andere constructieve toepassingen speelt de sterkte een kleinere rol, doordat dan de kruip de kritische grootte is en de levensduur bepaalt. Toch kan het ook in die gevallen nodig zijn rekening te houden met breukverschijnselen, en wel met het allereerste stadium van vorming van brosse haarscheuren. Lang voordat de kunststof werkelijk breekt kunnen zich microscopisch kleine haarscheuren vormen die de irreversibele beschadiging van het materiaal inleiden. Dit wordt aangeduid met de term 'crazing'. Een 'craze' is niet een echte opening in de kunststof, maar slechts een lokale verdunning. Figuur 4.88 laat zien dat de craze nog gedeeltelijk gevuld is met materiaal in de vorm van dunne vezels die de breukvlakken als bruggen met elkaar verbinden.

Detectie van crazes is uiterst moeilijk en de vorming ervan in bijvoorbeeld gasbuizen dient vermeden te worden. Om dit te bereiken gebruikt men het begrip 'kritische rek'. Het is namelijk gebleken dat, zolang een bepaalde deformatiegraad niet overschreden wordt, de vorming van deze crazes vermeden wordt. Het zou prettig zijn als deze kritische rek onafhankelijk zou zijn van de aangelegde spanning. Dit is helaas niet zo, zie Figuur 4.89. Voor praktische doeleinden is het echter verstandig om de ondergrens van de kritische rek als criterium te gebruiken. De kritische rek is niet erg afhankelijk van de temperatuur en van de aanwezigheid van versterkende



Figuur 4.88. Schematische weergave van crazes.



Figuur 4.89. Beschadigingsgrens in isochronen-diagram (Ref. 6).

stoffen zoals glasvezels. Deze zorgen echter wel voor een grotere E-modulus en een lagere kruip, waardoor de kritische rek pas bij een hogere spanning bereikt wordt. Tabel 4.40 geeft de kritische rek voor enkele polymeren.

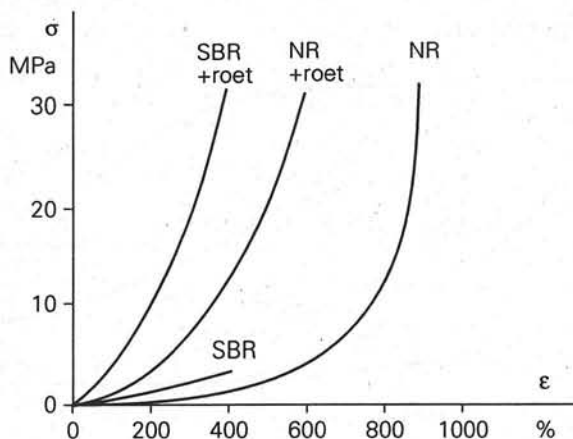
Tabel 4.40. Kritische rek voor verschillende polymeren.

| polymeer | kritische rek (%) |
|----------|-------------------|
| PS | 0,2-0,4 |
| PMMA | 0,8 |
| PVC | 0,9 |
| PC | 0,8-0,9 |
| ABS | 0,8 |
| POM | 1,5-2,0 |
| PP | 2,0-2,5 |
| SAN | 0,7 |

Voor de, veelal met vezels versterkte, thermoharders is de breukspanning aanzienlijk minder afhankelijk van de belastingstijd dan voor de thermoplasten. In de eerste plaats hangt dit samen met de veel lagere kruip van thermoharders door de sterke vernetting, met nauwe mazen, van de moleculen. In de tweede plaats wordt in de met glasvezels versterkte thermoharders de spanning hoofdzakelijk opgenomen door de glasvezels, vooral als die glasvezels lang zijn. Toch moet ook voor deze thermoharders rekening gehouden worden met tijdseffecten. De uitwendige spanning wordt via de kunststof overgedragen op de glasvezels, waardoor het grensvlak tussen glas-

vezel en kunststof op afschuiving wordt belast. Op de lange duur, na een jaar of langer, kan plaatselijk onthechting optreden, waardoor haarscheurtjes ontstaan die zich door de kunststof uitbreiden. Weliswaar is het tijdstip van de echte breuk dan nog zeer ver weg, maar de scheurtjes hebben een slechte invloed op de mechanische eigenschappen en op de ondoorlaatbaarheid, impermeabiliteit. Bij gebruik in buizen waar vloeistoffen door worden gepompt, veroorzaken de scheurtjes een geringe lekkage die zich uit in het verschijnen van zeer fijne druppels op het buitenoppervlak, 'weeping' (hullen). Het blijkt dat ook dit verschijnsel optreedt boven een bepaalde kritische rek, deze bedraagt voor de epoxyharsen (EP) ongeveer 1% en voor de polyesterharsen (UP) ongeveer 0,5 %.

De treksterkte van de rubbers ligt volgens Figuur 4.82 meestal in de buurt van die van de thermoplasten. Dit is niet altijd zo. De meest gebruikte synthetische rubber (SBR) heeft in ge vulcaniseerde toestand een zeer lage treksterkte, < 3 MPa. Een bruikbare rubber verkrijgt men pas door toevoeging van roet, wat een zeer aanzienlijke versterking teweeg brengt: de treksterkte wordt verhoogd tot 25 MPa. De uiterst fijne roetdeeltjes kunnen de molecuulketens aan hun oppervlak adsorberen en zorgen daardoor voor een gelijkmatige spanningsverdeling over de ketensegmenten in het netwerk. Zonder deze werking van roet zouden de zwaarst belaste knooppunten al gauw bezwijken. Niet alle rubbers hebben een dergelijk versterkingsmechanisme door vulstoffen nodig. Er zijn rubbers die in principe te kristalliseren zijn, maar in ongerekte toestand wordt de kristallisatie te zeer gehinderd en gaat veel te langzaam om enig effect te hebben op het rubberkarakter (anders zou het immers een semi-kristallijne thermoplast zijn!). In sterk gerekte toestand zijn de ketens echter zo sterk georiënteerd dat ze plaatselijk parallel komen te liggen over grote afstanden, waardoor lokaal spontane kristallisatie optreedt. De aldus gevormde kristallijne gebiedjes fungeren als knooppunten en verhogen de treksterkte tot waarden die gelden voor thermoplasten en met roet gevuld SBR. Overigens verdwijnen de kristallijne gebiedjes weer bij het wegnemen van de spanning. Voorwaarde voor dit versterkingsmechanisme is een ketenregelmaat die kristallisatie mogelijk maakt. Natuurrubber (NR) voldoet bij uitstek aan deze voorwaarde, maar ook butadiëenrubber (BR), butylrubber (IIR) en synthetische isopreenrubber (IR) voldoen aan deze voorwaarde. SBR is volstrekt onregelmatig van ketenopbouw en heeft dus altijd versterkende vulstoffen nodig. NR wordt met roet beter bestand tegen slijtage en krijgt een hogere E-modulus, maar wint weinig aan treksterkte (zie Figuur 4.90).



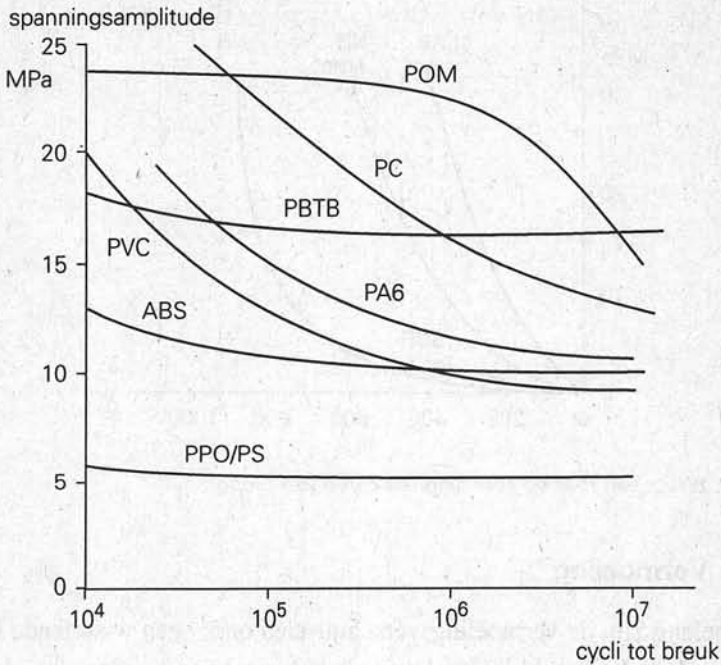
Figuur 4.90. Effect van roet op spanning-rek curve van rubber.

4.5.2.5. Vermoeiing

Van veel belang zijn de vermoeiingsverschijnselen onder een wisselende belasting. Bij wisselende belasting blijkt de levensduur bepaald te worden door het *aantal* belastingswisselingen en vrijwel onafhankelijk te zijn van de snelheid waarmee deze optreden. Dit geldt alleen zolang de frequentie niet zo hoog is, dat tijdens de wisselende belasting door mechanische verliezen opwarming optreedt. Als de rek tijdens de wisselende belasting kleiner is dan een kritische rek, dan kan men verwachten dat geen breuk optreedt. Wordt echter warmte ontwikkeld en blijft de spanningsamplitude gelijk, dan zal door de daling van de E-modulus met stijgende temperatuur, de rekamplitude in de loop van de tijd toenemen tot hogere dan toelaatbare waarden. De bestendigheid van een materiaal tegen wisselende belastingen met een gemiddelde spanning 0 MPa wordt meestal weergegeven in een Wöhler-diagram, dat het verband geeft tussen de spanningsamplitude en het aantal belastingswisselingen tot breuk, zie Figuur 4.91.

4.5.2.6. Slagsterkte

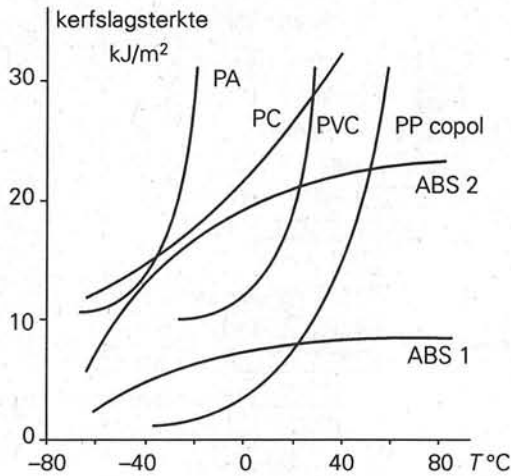
Voor kunststoffen en keramische materialen heet de weerstand tegen schokbelasting slagsterkte. Voor de slagsterkte is zowel de sterkte als de breukrek van belang. De slagsterkte is in feite de energie nodig voor een breuk bij snelle deformatie. De eenheid is meestal kJ/m^2 , dus de energie per eenheid van oppervlakte van het breukvlak. De slagsterkte is te vergelijken met de kerfslagwaarde voor metalen.



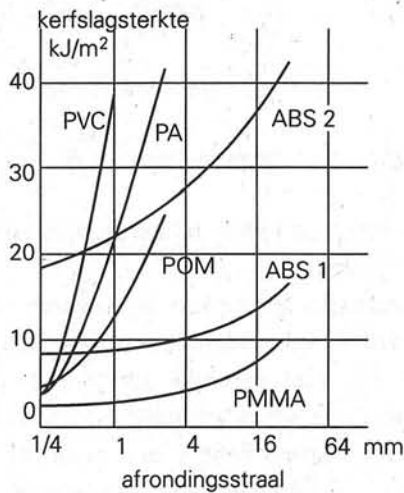
Figuur 4.91. Vermoeïngscurven (Wöhler-krommen) voor een gemiddelde spanning gelijk aan nul.

Het is uiterst moeilijk de slagsterkte nauwkeurig en éénduidig te bepalen. Meestal vindt de bepaling plaats met een standaard slagproef: een valhamer treft de proefstaaf, waarna de resterende kinetische energie van de hamer gemeten wordt. De proefstaaf wordt meestal voorzien van een kerf. De spanningsconcentratie rond de kerf zorgt voor een breuk op een goed gedefinieerde plek, niet beïnvloed door een toevallige randbeschadiging of door inhomogeniteiten.

Figuur 4.92 toont de slagsterkte voor enkele polymeren als functie van de temperatuur. Bij hogere temperaturen, boven die van de overgang van bros naar taai, heeft een materiaal een hoge slagsterkte, vaak zo hoog dat de proefstaaf niet breekt, maar alleen sterk deformeert. Brosse kunststoffen hebben een lage slagsterkte. De overgang van bros naar taai is eigenlijk een overgangsgebied waarvan de ligging afhankelijk is van de aan- of afwezigheid van een kerf. De vorm van de kerf, en in het algemeen de vorm van de beschadiging, heeft een behoorlijke invloed op de waarde van de slagsterkte. Figuur 4.93 toont het effect van de afrondingsstraal van de kerf voor enkele kunststoffen. Nylon en PVC zijn aanzienlijk kerfgevoeliger dan andere polymeren. Figuur 4.92 en Figuur 4.93 laten zien dat de invloeden van de kerfafronding en van de temperatuur globaal vergelijkbaar zijn: polymeren waarvan de slagsterkte sterk afhankelijk is van de temperatuur zijn over het algemeen ook meer kerfgevoelig en omgekeerd.

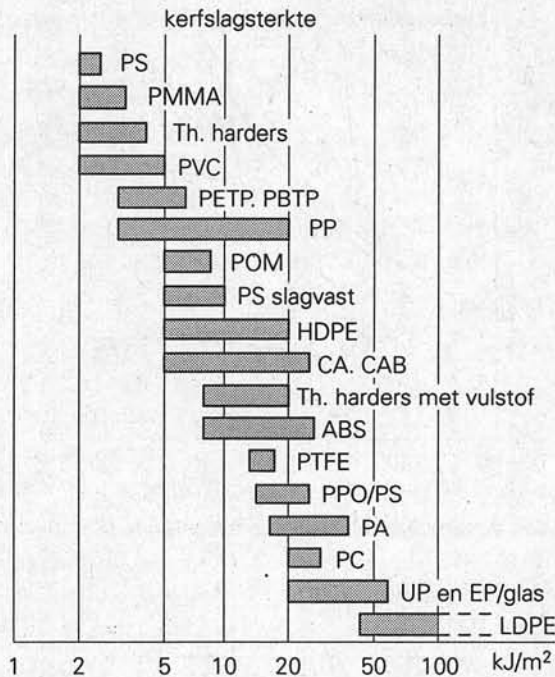


Figuur 4.92. Invloed van de temperatuur op de kerfslagsterkte (Ref. 6).



Figuur 4.93. Invloed van de afrondingsstraal op kerfslagsterkte (Ref. 6).

Figuur 4.94 geeft een overzicht van de slagsterkte van kunststoffen, beproefd onder standaard-condities. Amorfe polymeren zijn meestal bros (bijvoorbeeld PS), tenzij beneden kamertemperatuur een secundaire overgang in de glastoestand optreedt. Hiervan is PC een sterk voorbeeld, dat een zeer hoge slagsterkte bezit. Semi-kristallijne polymeren zijn taai boven de glastemperatuur T_g , zoals PE en PP. Bij PP ligt de overgang van bros naar taai echter bij kamertemperatuur, terwijl de glastemperatuur bij $-15\text{ }^\circ\text{C}$ ligt. Beneden de glastemperatuur hebben de semi-kristallijne polymeren een lage slagsterkte, tenzij ook hier secundaire overgangen in het glasgebied aanwezig zijn. De slagsterkte van brossen polymeren wordt dikwijls



Figuur 4.94. Kerfslagsterkte van enkele kunststoffen (Ref. 6).

verbeterd door het inbrengen van kleine rubberdeeltjes (slagvast PS), hetzij door mengen, hetzij door copolymerisatie.

Onder andere dan de standaardcondities kan de volgorde van de waarden voor de slagsterkte veranderen. De waarden moeten dan ook met grote voorzichtigheid gehanteerd worden. Ze zijn niet geschikt om te voorspellen of een bepaald eindproduct onder een bepaalde schokbelasting zal bezwijken of niet. Inwendige spanningen door afkoelen en krimp hebben een grote invloed op de slagsterkte. Ketenoriëntatie verhoogt de slagsterkte in de oriëntatierichting, maar verlaagt deze in de richting loodrecht daarop. Vulstoffen verlagen in het algemeen de slagsterkte, maar korte glasvezels kunnen bij lage temperaturen de slagsterkte ook wel verhogen. De vorm van het product heeft een niet te voorspellen invloed op de slagsterkte. Daarom worden gereede producten vaak in praktijksimulaties onderzocht: valproeven bij kratten en botsproeven bij auto-onderdelen.

4.5.2.7. Hardheid

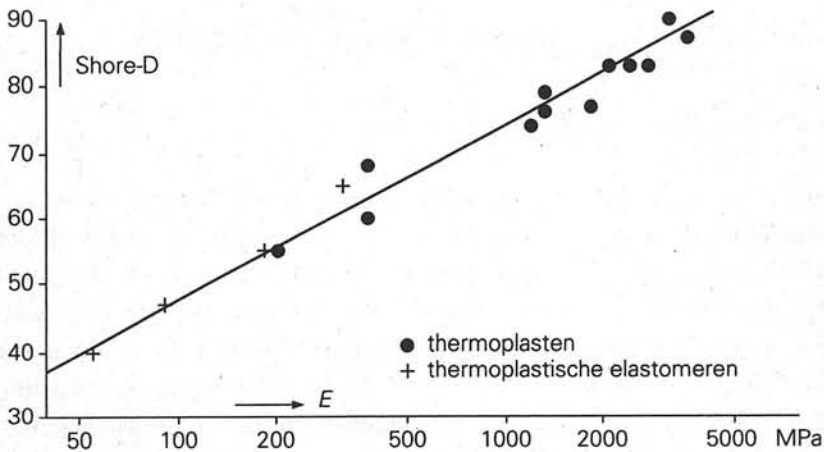
Voor kunststoffen is hardheid de weerstand van een materiaal tegen indringing van een harder lichaam, voor metalen is de hardheid de weerstand tegen blijvende vervorming. Er bestaan vele methoden om de hardheid te meten. Voor kunststoffen zijn twee categorieën te onderscheiden:

1. Een hard voorwerp wordt in het oppervlak gedrukt, hetzij met een bepaalde kracht, hetzij tot een bepaalde indringdiepte; men meet respectievelijk de indringdiepte of de indringkracht.
2. Een hard voorwerp wordt met een bepaalde kracht in het oppervlak gedrukt en men meet de indringdiepte na het opheffen van deze kracht.

De hardheidsmetingen volgens α -Rockwell en volgens Shore-D behoren tot categorie 1. De hardheidsmetingen volgens Vickers en Rockwell behoren tot categorie 2. Voor harde kunststoffen wordt meestal Shore-D gebruikt. Hierbij is het indruklichaam een kegel, aan de top afgerond met een kromtestraal van 0,1 mm.

Bij de meetmethoden van categorie 1 wordt het resultaat voornamelijk bepaald door de E-modulus. Hoewel de spanningsverdeling rond de gevormde punt zeer ingewikkeld is, wordt in feite de spanning gemeten die bij een bepaalde deformatie hoort (of omgekeerd). Deze hardheidswaarden vertonen dan ook een duidelijke correlatie met de waarden van de momentane E-modulus (zie Figuur 4.95).

Bij de meetmethoden van categorie 2 speelt de E-modulus nauwelijks een rol. De gemeten hardheid is hier een indicatie voor de mate waarin de onderzochte stof zich na een plaatselijk vrij grote deformatie herstelt, terugveert. De volgens deze meetmethoden bepaalde hardheid is in de praktijk belangrijk voor de weerstand tegen blijvende krasen.



Figuur 4.95. Relatie tussen hardheid en E-modulus (Ref. 6).

4.5.3. *Oppervlakte-eigenschappen*

4.5.3.1. *Wrijving*

De wrijving tussen twee oppervlakken wordt gekarakteriseerd met een wrijvingscoëfficiënt μ die geschreven kan worden als de verhouding tussen de afschuifsterkte τ_b (de kracht die nodig is voor afschuiving) en de vloeigrens σ_y :

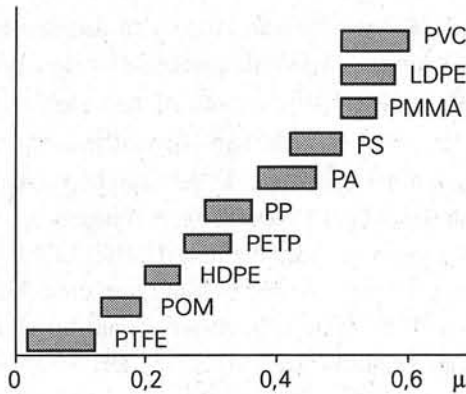
$$\mu = \frac{\tau_b}{\sigma_y} \quad (4.11)$$

De oppervlaktestructuur van een kunststof heeft een grote invloed op de wrijving. Zo hebben twee spuitgietstukken van PP ten opzichte van elkaar een wrijvingscoëfficiënt van 0,7 terwijl voor twee gezandstraalde oppervlakken PP de wrijvingscoëfficiënt 0,3 bedraagt. Nylon spuitgietstukken hebben een wrijvingscoëfficiënt van 0,65 en machinaal bewerkte nylon oppervlakken hebben een wrijvingscoëfficiënt van 0,47; door watersmering wordt deze laatste waarde teruggebracht tot 0,19 en door oliesmering tot 0,08. Op microschaal zijn alle oppervlakken ruw, zodat het echte contactoppervlak slechts klein is, hoewel het door de wrijving enigzins wordt afgevlakt (zie Figuur 4.96).



Figuur 4.96. Contact tussen twee oppervlakken (Ref. 6).

Bij wrijving tussen verschillende materialen, bijvoorbeeld tussen kunststof en staal, is het beeld anders. Bij kunststof tegen staal zullen de stalen onregelmatigheden niet afgevlakt kunnen worden: de stalen pieken ploegen in de kunststof. Ook hier blijkt de wrijvingscoëfficiënt door de hierboven vermelde formule weergegeven te kunnen worden, waarbij voor de vloeigrens en de afschuifsterkte de waarden voor de kunststof genomen moeten worden. Een globaal overzicht van de wrijvingscoëfficiënten ten opzichte van staal voor verschillende kunststoffen wordt gegeven door Figuur 4.97. In het algemeen treedt bij kunststoffen onderling en ten opzichte van staal minder wrijving op dan tussen metalen. Vooral HDPE, POM en PTFE vertonen lage waarden voor de wrijvingscoëfficiënt. Deze lage waarden zijn belangrijk voor de toepassing in lagers.



Figuur 4.97. Wrijvingscoëfficiënt van enkele polymeren ten opzichte van staal (Ref. 6).

Voordelen van kunststoffen lagers

1. geen aantasting door corrosie
2. geen of weinig smering nodig
3. mogelijkheid tot opname van slijtdeeltjes
4. elastische vervormingen van de lagers mogelijk
5. geluidsarm

Nadelen van kunststoffen lagers

1. slechte afvoer van de wrijvingswarmte
2. grote thermische uitzetting bij temperatuurstijging, zodat extra speling tussen as en lager nodig is
3. lage mechanische sterkte

Kunststoffen lagers zijn alleen te gebruiken bij betrekkelijk lage belastingen en lage snelheden. In lagers wordt nylon het meest toegepast. PTFE heeft een veel hogere slijtage, maar is tot hogere temperatuur te gebruiken. Met vulstoffen zoals molybdeensulfide, glas of grafiet kan de slijtvastheid van PTFE verbeterd worden.

Bij rubbers is de wrijving vooral van belang in de loopvlakken van fiets- en autobanden. De wrijving blijkt voornamelijk bepaald te worden door trillingen met hoge frequentie. Een rubber met zeer lage verliezen (weinig demping, grote terugvering) zoals BR heeft een te lage wrijving voor een goede grip op de weg en kan daarom niet ongemengd in loopvlakken worden toegepast. Door mengen met andere rubbers (NR, SBR) wordt voor elke toepassing het optimum gezocht tussen slijtage, warmteverliezen en wrijving.

4.5.3.2. Slijtage

Slijtage is een ingewikkeld verschijnsel, niet of nauwelijks te voorspellen op basis van de structuur en de fysische eigenschappen. Slijtage wordt uitsluitend empirisch bepaald met een grote verscheidenheid aan beproevingsmethoden. Onderscheid wordt gemaakt tussen aantasting waarbij zonder massavermindering van het product in het oppervlak krassen en deuken ontstaan, en die waarbij juist wel massa-

vermindering optreedt. Het optreden van krassen en deuken is duidelijk verbonden met het begrip hardheid volgens de tweede categorie meetmethoden (zie §4.5.2.7). De resultaten van talloze typen slijtproeven dienen slechts ter vergelijking van verschillende materialen. De volgorde van slijtvastheid, die men voor een reeks materialen vindt, is vaak afhankelijk van de gekozen beproevingsmethode. Daarom volgen hier slechts globale uitspraken. De hoogste slijtageweerstand wordt gevonden voor de polyamiden of nylons, de polyolefinen (HDPE, LDPE, PP) en de polyesters (PETP, PBTP). In het bijzonder wordt hier genoemd HDPE met een hoge molecuulmassa (tot 5.000.000). De slijtage-weerstand blijkt aanzienlijk te stijgen door de toevoeging van versterkende vulstoffen. Dit geldt in het bijzonder voor rubbers: mengen met roet (40 delen roet op 100 delen rubber) geeft het loopvlak van een autoband een zoveel hogere slijtageweerstand dat de levensduur van 8000 naar 50.000 à 100.000 km stijgt.

4.5.4. Thermische eigenschappen

4.5.4.1. Brosheidstemperatuur

De mechanische eigenschappen van polymeren gaan er meestal niet op achteruit bij verlaging van de temperatuur, behalve de slagsterkte, die daalt bij lagere temperatuur. Semi-kristallijne polymeren zijn meestal bros beneden T_g . Zo wordt PP bros bij $T_g \approx -10$ °C, PE met een $T_g \approx -120$ °C behoudt zijn zeer taai karakter tot zeer lage temperaturen. Andere semi-kristallijne polymeren, zoals polyamiden en thermoplastische polyesters, bijvoorbeeld PETP, hebben een T_g van enkele tientallen graden boven kamertemperatuur. Toch zijn deze polymeren bij kamertemperatuur niet bros, doordat diverse andere factoren dan de glas-rubberovergang kunnen zorgen voor een redelijke slagsterkte. Bij polyamiden is dat de wateradsorptie, bij andere polymeren spelen secundaire overgangen in het glasgebied een rol.

Amorfe polymeren gebruikt beneden T_g zijn bros, tenzij andere factoren in het spel zijn. PC heeft in het glasgebied een secundaire overgang, die bepalend is voor de brosheidstemperatuur (de temperatuur waarbij het gedrag overgaat van bros naar taai). Polystyreen, ABS en PVC kunnen slagvast gemaakt worden door toevoegen van een rubberfase. De brosheidstemperatuur is gerelateerd aan de waarde van T_g van de toegevoegde rubber. De brosheidstemperatuur is moeilijk te definiëren; hij hangt sterk af van de proefcondities, zoals tijdschaal van de proef en de kerfwerking. Men karakteriseert de brosheidstemperatuur wel door een serie standaard slagproeven te doen bij steeds lagere temperatuur; als 50% van de proefstukken breekt, is de brosheidstemperatuur bereikt.

4.5.4.2. Verwekingstemperatuur

Alle thermoplastische polymeren verweken bij hogere temperaturen. In Hoofdstuk 2 zijn de karakteristieke overgangstemperaturen behandeld. Voor praktische toepassingen van kunststoffen is het van belang temperatuurgrenzen aan te geven. Deze temperatuurgrenzen heten de ISO Heat Deflection Temperature (HDT) en de Vicat Softening Temperature (VST of Vicat).

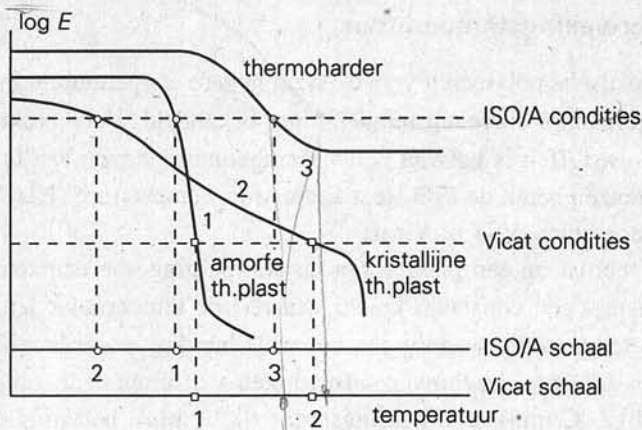
De ISO-HDT berust op een meting van de doorbuiging van een standaard proefstaafje, belast met een constante kracht, waarbij de temperatuur langzaam wordt verhoogd. De temperatuur waarbij een bepaalde buiging wordt bereikt, heet HDT. Alle condities zijn voorgeschreven: afmetingen van proefstaaf, oplegglengte, opwarmingssnelheid (2 °C/min), doorbuigingsgrens (0,32 mm), belasting (ISO-A: 1,81 MPa en ISO-B: 0,45 MPa). Bij deze proef ligt op het moment van aflezen dus de spanning vast, evenals de deformatie en dus ook de E-modulus. Met deze proef bepaalt men dus in feite de temperatuur waarbij de E-modulus tot een tevoren bepaald niveau gezakt is, respectievelijk circa 1000 en 250 MPa voor ISO-A en ISO-B.

Bij de Vicat-methode wordt een stalen pin met een vlak uiteinde (oppervlak 1 mm²) met een voorgeschreven kracht (1 kgf = 9,81 N voor Vicat A, 5 kgf = 49,05 N voor Vicat B) in een blokje van de te onderzoeken kunststof gedrukt. De temperatuur wordt verhoogd met 50 °C/uur totdat de pin 1 mm in de kunststof is gedrongen. Het Vicat-verwekingspunt is dan bereikt. Dit indringproces wordt in feite ook door de E-modulus bepaald, zij het dat het verband tussen E-modulus en Vicat-verwekingspunt ingewikkeld is. Globaal kan ook aan het resultaat van de Vicat-verwekingsproef een karakteristieke E-modulus worden toegekend. Deze ligt lager dan bij de ISO-buigproeven: ongeveer 200 MPa voor Vicat B en 40 MPa voor Vicat A.

De verwekingstemperaturen kunnen daarom worden aangegeven in log E-T curven. In Figuur 4.98 is schematisch het verloop gegeven voor drie zeer verschillende polymeren:

1. amorfe thermoplast, waarvan de E-modulus bij de overgang glas-rubber zeer snel daalt,
2. semi-kristallijne thermoplast, waarvan de E-modulus tussen T_g en T_m geleidelijk daalt,
3. thermoharder, waarvan de E-modulus ook boven T_g niet ver genoeg daalt om een Vicat-meting mogelijk te maken.

Het is duidelijk, dat de verwekingstemperatuur geen eenduidige informatie geeft over de temperatuurbestendigheid, bijvoorbeeld voor PMMA en POM zijn de volgorde van Vicat en ISO-HDT omgekeerd, zie Tabel 4.41. Vicat is te beschouwen als de temperatuur waarbij de kunststof zonder noemenswaardige belasting zijn vastestof-karakter verliest. ISO-HDT geeft de uiterste temperatuurgrens aan onder



Figuur 4.98. Verband tussen verwekingstemperatuur en E-modulus: 1. amofre thermoplast; 2. semi-kristallijne thermoplast; 3. thermoharder (Ref. 6).

Tabel 4.41. Temperatuurgrenzen volgens Vicat en ISO-HDT.

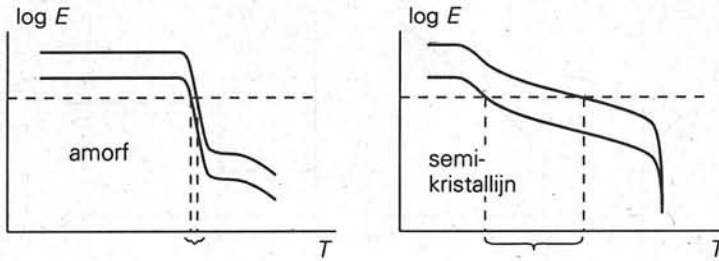
| kunststof | Vicat (°C) | ISO-HDT (°C) |
|-----------|------------|--------------|
| PMMA | 100 | 95 |
| PA-6 | 210 | 85 |

mechanische belasting. De $\log E$ -T curven geven veel betrouwbaarder informatie dan de getabelleerde verwekingstemperaturen. Toch zijn ook deze curven wegens de tijdsafhankelijkheid van de mechanische eigenschappen niet voldoende om constructies op te baseren. Vooral bij wat verhoogde gebruikstemperaturen zijn ook kruipgegevens noodzakelijk!

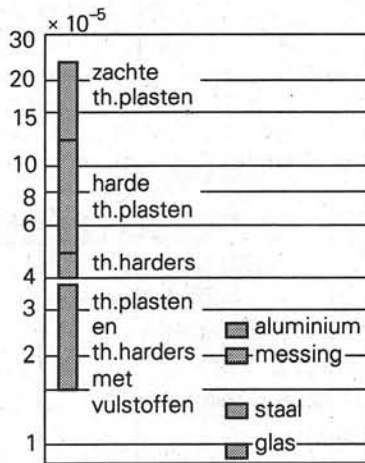
Verwekingstemperaturen stijgen bij toevoeging van versterkende vulstoffen. De waarden van T_g en T_m blijven uiteraard onveranderd, maar de verhoging van de E-modulus doet de gehele $\log E$ -T curve naar boven verschuiven. Voor poeders (kwarts, talk en dergelijke) wordt de E-modulus al gauw een factor 2 groter, met korte glasvezels is een factor 3 tot 4 mogelijk. Het effect van versterking op de waarden van ISO-HDT en Vicat is voor semi-kristallijne polymeren aanzienlijk groter dan voor amofre polymeren. Dit blijkt uit Figuur 4.99. Het is weer de verschillende temperatuurafhankelijkheid van $\log E$ die deze verschillen veroorzaakt.

4.5.4.3. Thermische uitzetting en warmtegeleiding

De thermische uitzetting van kunststoffen is over het algemeen aanzienlijk groter dan die van alle andere stoffen, metalen en metaallegeringen inbegrepen. Hiermee moet men rekening houden als kunststoffen en andere stoffen gezamenlijk worden toegepast of indien nauwe maattoleranties gelden. Een overzicht van de thermische uitzettingscoëfficiënten geeft Figuur 4.100. De uitzettingscoëfficiënt hangt af van de



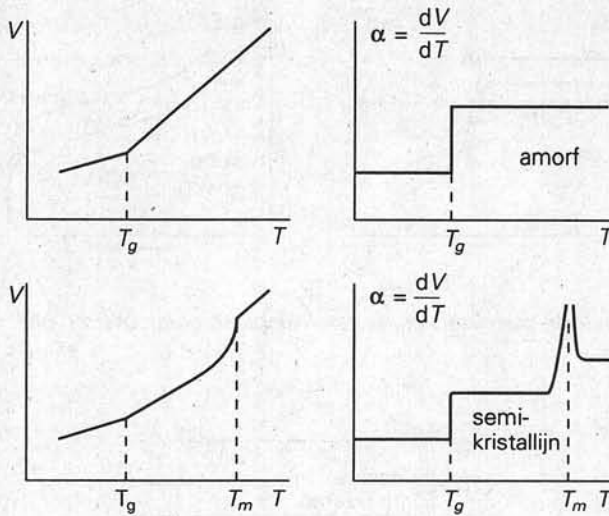
Figuur 4.99. Effect van glasvezels op de verwerkingstemperatuur (Ref. 6).



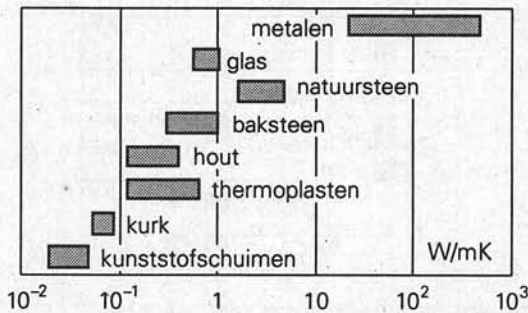
Figuur 4.100. Overzicht van lineaire uitzettingscoëfficiënten (Ref. 6).

temperatuur. Bij de overgang glas-rubber vertoont de uitzettingscoëfficiënt een sprong, bij semi-kristallijne polymeren stijgt de uitzettingscoëfficiënt sterk bij nadering van het smeltpunt (zie Figuur 4.101). Vulstoffen hebben een grote invloed op de uitzettingscoëfficiënt, ze kunnen deze met een factor 2 tot 3 verkleinen. Ketenoriëntatie veroorzaakt anisotropie in de uitzetting, in de oriëntatierichting is deze veel kleiner dan in de dwarsrichting. Bovendien moet men rekening houden met een bij temperatuurverhoging toenemende neiging tot (irreversibele) krimp in de oriëntatierichting.

Kunststoffen zijn slechte warmtegeleiders, vergeleken met metalen en metaallegeringen is hun warmtegeleidingscoëfficiënt 100 tot 1000 keer zo klein (zie Figuur 4.102). Bij de toepassing van kunststoffen als isolatie is hun kleine warmtegeleiding uiteraard gunstig. Voor de verschillende verwerkingstechnieken, waarbij de kunststof plastisch of vloeibaar moet zijn en dus verwarmd moet worden, is de slechte warmtegeleiding ongunstig: opwarming met uitwendige warmtebronnen en



Figuur 4.101. $V(T)$ en $\alpha(T)$ relaties (Ref. 6).



Figuur 4.102. Warmtegeleiding van enkele stoffen (Ref. 6).

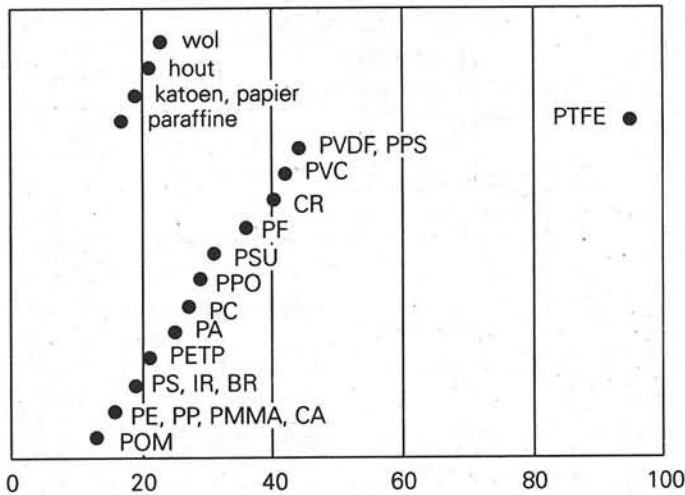
afkoeling verlopen zeer langzaam, vooral bij dikke wanden. Vulstoffen kunnen de warmtegeleiding met een factor 3 tot 4 verhogen.

4.5.4.4. Maximale gebruikstemperatuur en brandgedrag

Het verwekingsgedrag is de meest voor de hand liggende beperking voor de maximale gebruikstemperatuur (zie §4.5.4.2). Daarnaast kan ook de degradatie bij verhoogde temperatuur een rol spelen. De maximale gebruikstemperaturen zijn vaak verzameld in tabellen, dikwijls gespecificeerd naar lange of korte tijden op de verhoogde temperatuur, bijvoorbeeld PC heeft qua verweking een maximale gebruikstemperatuur (ISO-HDT) van 135 °C, qua degradatie geldt echter voor enkele uren gebruik 140 °C en voor enkele jaren 100 °C. Stabilisatoren verhogen de resistentie tegen degradatie bij verhoogde temperatuur. Door de toevoeging van een reeks stabilisatoren kunnen fabrikanten van een bepaald polymeer varianten leveren met

stijgende resistentie. De meest gebruikte maatstaf voor de maximale gebruikstemperatuur is de 'Temperature Index', ingevoerd door de Amerikaanse Underwriters' Laboratories Inc.: de UL-index. Aangezien het effect van degradatie zich voor verschillende toepassingen op verschillende wijzen kan uiten, kan eenzelfde polymeer meer dan één waarde voor de UL-index hebben, bijvoorbeeld één voor elektrische isolatie en één voor slagsterkte.

Alle kunststoffen branden in aanraking met een vlam. Er bestaan tussen kunststoffen grote verschillen in gedrag na verwijdering van de vlam. Sommige branden door, andere doven. De mate van zelfdoving wordt uitgedrukt in de 'zuurstofindex', dat is de zuurstofconcentratie in de omringende lucht waarbij de kunststof nog juist uitdooft. Een zuurstofindex lager dan 20 % betekent, dat de kunststof in de gewone aardatmosfeer blijft branden, daarboven dooft de kunststof. Enkele waarden zijn gegeven in Figuur 4.103. Teflon (PTFE) is in hoge mate zelfdovend, ook de andere fluor- en chloorhoudende polymeren zijn zelfdovend. Vaak kan de zelfdovendheid van kunststoffen verbeterd worden door toevoeging van hulpstoffen, zoals broom- en antimoonverbindingen. Dit gaat gewoonlijk ten koste van andere, mechanische en elektrische eigenschappen.



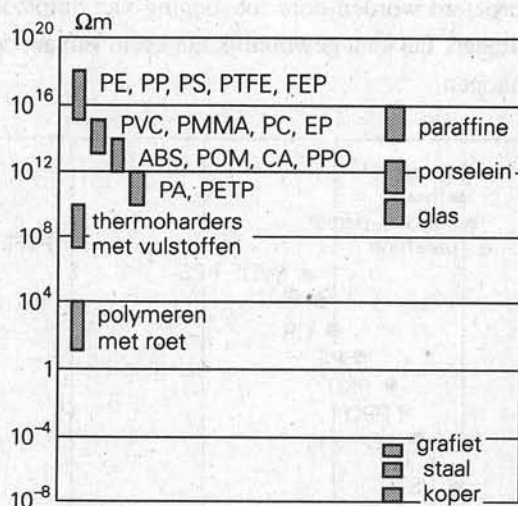
Figuur 4.103. Zuurstofindex van enkele kunststoffen (Ref. 6).

Het inzicht wint geleidelijk veld, dat de zeer dichte rookontwikkeling die kunststoffen bij brand soms veroorzaken, ernstiger is dan de brandbaarheid zelf. Keuringsmethoden en gebruikscriteria worden ontwikkeld om de risico's van rookontwikkeling, zowel qua zicht als qua toxiciteit, te onderkennen en te voorkomen.

4.5.5. Elektrische eigenschappen

4.5.5.1. Elektrische weerstand

Kunststoffen zijn goede tot zeer goede elektrische isolatoren, hun soortelijke weerstand ligt boven die van glas en porselein (zie Figuur 4.104). Echter, een algemeen geldende waarde van de elektrische weerstand is niet te geven. De elektrische weerstand hangt sterk af van de aangelegde elektrische spanning (de wet van Ohm gaat niet op) en van de tijdsduur van die spanning. Bovendien hangt de weerstand sterk af van de temperatuur: bij een stijging van temperatuur kan de weerstand met een factor 10 of meer dalen per 50 °C. Vaak speelt de luchtvochtigheid een rol, vooral als er vulstoffen aanwezig zijn of bij verontreinigde oppervlakken. In deze gevallen wordt de gemeten weerstand vaak bepaald door de geleiding langs het oppervlak in plaats van door de kunststof zelf.



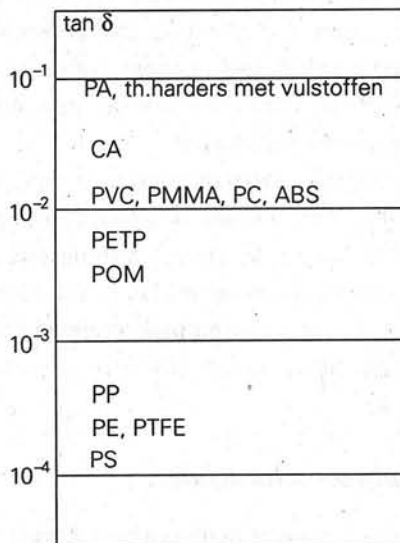
Figuur 4.104. Soortelijke weerstand van enkele stoffen (Ref. 6).

De elektrische weerstand is belangrijk voor toepassingen in de elektrotechniek, maar deze is ook voor elektrische oplading van belang. Bij alle stoffen vindt bij wrijving of contact ladingsoverdracht plaats. Een lage elektrische weerstand zorgt voor onmiddellijk afvloeien van de overgedragen lading, maar bij goede isolatoren blijft de lading aanwezig na verbreken van het contact. De zeer hoge elektrische spanningen die met deze lading gepaard gaan, trekken stofdeeltjes aan, doen folies klevan en zorgen voor vonken. Vermindering van de elektrostatische oplading kan door het polymeer meer geleidend te maken. Toevoegen van roet geeft een sterke verhoging van de geleiding. Ook antistatische hulpstoffen verhogen de geleiding. Deze hebben

de neiging naar het oppervlak te migreren en daar een dun huidje te vormen met een lagere oppervlakteweerstand.

4.5.5.2. Diëlektrische eigenschappen

Polymeerketens bevatten vaak polaire zijgroepen. Deze groepen zullen in een elektrisch veld gericht worden. Deze polarisatie bepaalt de diëlektrische eigenschappen die vooral van belang zijn bij belasting met wisselspanning. Belangrijke diëlektrische eigenschappen voor de praktijk zijn de *diëlektrische constante* ϵ , die aangeeft hoe sterk een stof polariseert en dus hoe groot de wisselstroom is die wordt doorgelaten, en de *diëlektrische verliesfactor* $\tan \delta$, die aangeeft welk gedeelte van de doorgelaten wisselstroom wordt omgezet in warmte. Verschillende polymeren kunnen zeer verschillende waarden voor de verliesfactor vertonen. Het blijkt, dat polymeren met een hoge soortelijke weerstand lage diëlektrische verliezen hebben (zie Figuur 4.105). Opgemerkt wordt, dat de hier gegeven waarden globaal zijn, de feitelijke verliezen zijn onder meer afhankelijk van de toegepaste wisselstroomfrequentie en de temperatuur. Uiteraard zijn de diëlektrische eigenschappen zeer belangrijk bij elektrotechnische toepassingen, vooral bij zeer hoge frequenties (de verliezen zijn evenredig met het produkt van verliesfactor en frequentie). De extreem lage verliesfactor van polyetheen heeft in de jaren 40 de ontwikkeling van radar mogelijk gemaakt.



Figuur 4.105. Diëlektrische verliesfactor voor enkele kunststoffen (Ref. 6).

Ook in de verwerking is de verliesfactor van belang. Een niet te lage waarde maakt het mogelijk een kunststofmassa op te warmen met een hoogfrequent elektrisch

wisselveld. De verwarming gebeurt dan door de gehele stof, zodat de slechte warmtegeleiding niet meer van belang is. Polymeren met een lage verliesfactor zijn voor dit proces ongeschikt, PE- en PP-folies kunnen bijvoorbeeld niet hoogfrequent gelast worden. Hiervoor brengt men een extra laagje van een ander polymeer op de PE- en PP-folie aan. Dit laagje heeft een hogere waarde voor de verliesfactor zodat hoogfrequent lassen toch mogelijk is.

4.5.5.3. Elektrische sterkte

Voor ontwerpers van elektrische apparaten is vaak een belangrijke vraag: welke elektrische spanning kan een materiaal verdragen zonder elektrische doorslag? Evenals de mechanische sterkte is ook de elektrische sterkte of doorslagspanning sterk van de tijd afhankelijk. De vraag is dus: wat is de toelaatbare elektrische spanning opdat binnen een bepaalde tijd geen doorslag optreedt?

Er zijn twee doorslagmechanismen. Bij hoge elektrische spanning wordt de doorslag veroorzaakt door geleidbaarheid of diëlektrische verliezen, de ontwikkelde warmte geeft een stijging van temperatuur gepaard gaand met een stijging van de verliesfactor. Dit gaat door totdat de kunststof smelt of ontleedt met als gevolg elektrische doorslag. Bij zeer lage spanning groeit na lange tijd een fijn kanaal in de kunststof, dikwijls grillig vertakt. Uiteindelijk leidt dit zonder warmte-ontwikkeling tot lokale doorslag, te vergelijken met de brosse haarscheurvorming uit §4.5.2.4.

De temperatuur is voor beide doorslagmechanismen belangrijk: de elektrische sterkte daalt met stijgende temperatuur. Opvallend is dat de doorslagspanning (die uitgedrukt wordt in volts per meter dikte) sterk afhangt van de dikte. Dunne folies hebben een aanzienlijk grotere doorslagsterkte dan uit de literatuur volgt. De opgegeven waarden zijn gemeten aan dikke proefstroken.

Oppervlakte-effecten kunnen bij elektrische sterkte, evenals bij de elektrische weerstand, een belangrijke rol spelen. Verontreinigingen kunnen aanleiding geven tot kruipstromen langs het oppervlak, die zoveel warmte kunnen ontwikkelen dat de kunststof verkoolt. Zelfs elektrische boegontladingen (brandrisico's!) kunnen optreden. Fenolharsen en PVC hebben een geringe kruipstroomvastheid, evenals met houtmeel gevulde thermoharders. Goed kruipstroomvast zijn bijvoorbeeld PE, PMMA, PA en PS.

4.5.6. Optische eigenschappen

Kunststoffen zijn over het algemeen lichtdoorlatend, vaak beter dan glas. Transparant zijn alleen de uit één fase bestaande polymeren, de uit verschillende fasen bestaande gewoonlijk niet. De verschillende fasen hebben vrijwel altijd een verschillende brekingsindex, waardoor lichtverstrooiing optreedt, die de doorzichtigheid te niet doet. Voorbeelden zijn de met rubber gemodificeerde polymeren (zoals slagvast PS en ABS) en polymeren met vulstoffen. Bij semi-kristallijne polymeren zijn naast

en door elkaar kristallijne en amorfie gebieden aanwezig, waarvoor de brekingsindex verschilt. Alleen als de kristallijne gebieden zeer klein zijn ten opzichte van de golflengte van het licht, zijn semi-kristallijne polymeren transparant. Dit kan bereikt worden door snel koelen of door toevoegen van kristalkiemvormers. Ook kan bij uitzondering de brekingsindex van de amorfie fase nagenoeg gelijk zijn aan die van de kristallijne fase, zoals bij transparant PMP. Geheel amorfie polymeren, zoals PC, PMMA en PS, zijn transparant en worden in de optische industrie gebruikt (brillen en fotolenzen). Nadeel is hun geringe krasvastheid. De hoge lichtdoorlaatbaarheid van sommige polymeren heeft vezeloptiek mogelijk gemaakt. De flexibele lichtgeleider bestaat uit een bundel vezels van PMMA, waarbij elke draad omgeven is door een laagje polymeer met een lagere brekingsindex, bijvoorbeeld PE. Licht kan door de totale lichtreflectie aan de wand vrijwel zonder intensiteitsverlies getransporteerd worden, waardoor ook beeldtransport mogelijk wordt.

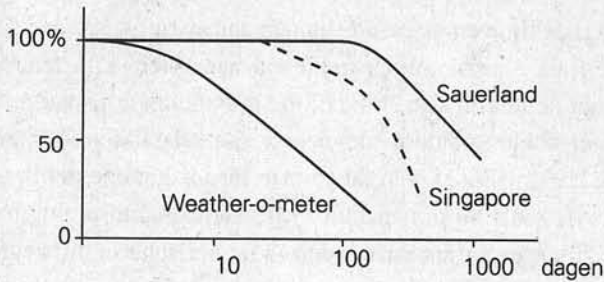
Een amorfie thermoplast kan geheel transparant zijn, maar optisch anisotroop: in verschillende richtingen heersen verschillende brekingsindices. De kunststof is dan optisch dubbelbrekend. De optische anisotropie kan veroorzaakt worden door spanningen (uitwendig door belasting of ingevroren) of door ketenoriëntaties. In kritische toepassingen, zoals cd's, is dubbelbreking uiterst ongewenst.

4.5.7. Milieu-invloeden

Factoren die de milieu-resistentie van kunststoffen bepalen zijn zuurstof uit de lucht, licht, water, temperatuur, chemicaliën, bacteriën. Luchtzuurstof veroorzaakt bij kamertemperatuur slechts een uiterst langzame afbraak. Bij verhoogde temperatuur verloopt de aantasting sneller. Ter vermindering worden aan kunststoffen anti-oxydanten toegevoegd.

Licht, voornamelijk het ultraviolette gedeelte, kan ook tot chemische afbraak leiden. Aan kunststoffen worden UV-stabilisatoren toegevoegd. Soms wordt het zonlicht uitgesloten door roet in te mengen. De zonlichtbestendigheid wordt geschat op basis van laboratoriumproeven. Een sterke lamp met ongeveer het zonlichtspectrum bestraalt de te onderzoeken kunststof. Weersimulatie bestaat uit beregenen en temperatuurwisselingen. Dit soort laboratorium-proeven kan echter niet de klimaat-expositie vervangen (zie Figuur 4.106).

De gevolgen van oxydatieve en thermische afbraak van een kunststof zijn: verkleuring, oppervlakteruwheid en verbrossing, kleverigheid bij rubbers gevolgd door verdroging en verbrossing. Voor elektrische toepassingen is funest dat de oxydatie gepaard gaat met een sterke stijging van de diëlektrische verliezen en met een daling van de isolatieweerstand en van de doorslagspanning. Wateropname door kunststoffen (mogelijk tussen nul en enkele procenten) heeft weinig invloed op de meeste eigenschappen, behalve uiteraard op de elektrische. Wat de mechanische eigenschappen betreft is nylon het sterkst gevoelig voor het opnemen van water.



Figuur 4.106. Afname van de slagsterkte van PVC door lichtveroudering (Ref. 6).

PA-6 neemt tot 6 gew% water op, water is dan een weekmaker en verlaagt T_g met enige tientallen graden.

Polymeren zijn in het algemeen niet gevoelig voor corrosie. Aanwezige estergroepen zijn soms gevoelig voor basen en zuren. Enige globale indicaties voor de corrosie-vastheid van polymeren worden hierna gegeven. Uitstekend bestand tegen zuren en basen zijn PTFE en PVC. Ook PS, PE en PP vertonen een goede algemene resistentie, maar kunnen door sommige sterke (oxyderende) zuren bij langdurig contact enigszins aangetast worden, vooral bij hogere temperaturen. Polyamiden, acrylaten en celluloseplastics kunnen minder goed tegen een aantal zuren. Gevoelig voor aantasting door sterke basen zijn celluloseplastics, polyamiden, PC en sommige formaldehyde-harsen.

Organische vloeistoffen kunnen voor polymeren werken als zwelmiddelen. PVC verweekt en zwellt in aceton en in aromatische koolwaterstoffen als benzeen. De meeste rubbers zwellen in aromaten. Celluloseplastics zijn gevoelig voor alcohol en aceton. PS lost op in koolwaterstoffen, vrijwel alle thermoplasten zijn gevoelig voor gechloreerde koolwaterstoffen. Goede resistentie tegen de meeste organische oplosmiddelen hebben PTFE, PA's, POM, PP en PE. Ook de meeste thermoharders worden niet aangetast door organische vloeistoffen. Bacteriën en schimmels tasten zuivere polymeren vrijwel niet aan. Hulpstoffen (laagmoleculaire weekmakers en houtmeel) kunnen als voedingsbodem voor bacteriën en schimmels optreden. De milieu-resistentie van polymeren is aantrekkelijk, maar nadelig bij zwerfvuil en bij de afvalverwerking. Voor afvalverwerking van kunststoffen komen alleen hergebruik en verbranden in aanmerking. Storten kan eigenlijk niet als afvalverwerking gelden.

Een speciale vorm van milieu-invloeden op polymeren is spanningscorrosie. De milieu-invloed of de spanning afzonderlijk hebben nauwelijks effect, maar hun combinatie wel. Voorbeelden zijn: scheurvorming in gerekte ge vulcaniseerde rubbers onder invloed van ozon, haarscheuren in PE onder spanning in aanwezigheid van een oppervlakte-actieve stof, scheurvorming in PC onder een geringe spanning in aanwezigheid van tetra.

De oorzaken van spanningscorrosie zijn van geval tot geval verschillend. Bij het genoemde voorbeeld van rubber is de oorzaak een chemische reactie, die door de spanning tot een irreversibele beschadiging leidt. Bij PE gaat het om een fysische versnelling van een op veel langere tijdschaal optredend breukverschijnsel: door verlaagde grensvlakenergie is er minder arbeid nodig om nieuw breukoppervlak te vormen. Niet altijd treedt een chemische reactie op; benamingen als 'environmental stress cracking' of 'milieu-spanningsbroosheid' zijn feitelijk juist. Algemene regels voor het vermijden van spanningscorrosie zijn moeilijk te geven. Restspanningen moeten vermeden worden. Bij toepassingen van kunststoffen die onderhevig zijn aan mechanische spanningen (buizen, kratten, flessen, schroefdooppen) moet men steeds rekening houden met spanningscorrosie onder invloed van vetten, zepen en organische vloeistoffen. Juiste materiaalkeuze en dimensionering kunnen problemen voorkomen.

4.5.8. Diffusie en permeabiliteit

Verschillende laag-moleculaire stoffen zijn in zekere mate oplosbaar in polymeren. Binnen een polymeer diffundeert zo'n stof verder totdat deze weer aan de omgeving wordt afgegeven. Polymeren zijn dus permeabel. De permeabiliteit P wordt bepaald door de oplosbaarheid S van de betreffende laag-moleculaire stof in het polymeer en de diffusiesnelheid V_D :

$$P = SV_D \quad (4.13)$$

De permeabiliteit verschilt sterk van polymeer tot polymeer (voorbeeld: de zuurstof-permeabiliteit van PVDC is duizend keer kleiner dan die van LDPE). De permeabiliteit wordt sterk beïnvloed door de mate waarin het polymeer zwelt als het vloeistof opneemt. Zelfs een geringe zwelling geeft een grote verhoging van V_D . Daardoor is de permeabiliteit voor waterdamp veel hoger dan voor gassen. Een vergelijking tussen stikstof en waterdamp geeft Tabel 4.42. Hieruit volgt, dat rubbers met hun grote vrije volume, een klein molecuul gemakkelijker laten diffunderen dan glasachtige polymeren. Bij semi-kristallijne polymeren boven T_g zoals PE en PP, zorgt de rubberachtige fase voor een hogere diffusiesnelheid dan wanneer de amorfe fase in de glastoestand is, zoals bij PETP en PA-6. Afwijkingen van dit patroon kunnen worden toegeschreven aan verschillen in oplosbaarheid van het gas of de damp.

Tabel 4.42. Orde van grootte van de permeabiliteit voor waterdamp en stikstof bij 1 bar drukverschil over een scheidingswand van 1 cm dik met een oppervlak van 1 cm², bij kamertemperatuur.

| <i>kunststof</i> | <i>stikstof (10⁻¹⁰ cm³/sec)</i> | <i>waterdamp (95 % relatieve vochtigheid) (10⁻¹⁰ cm³/sec)</i> |
|------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| PVDC | 0,01 | 100 |
| PETP | 0,1 | 10.000 |
| PA-6 | 0,1 | 10.000 |
| PVC | 1 | 10.000 |
| HDPE | 10 | 1.000 |
| PS | 10 | |
| PP | 10 | 1.000 |
| IIR | 10 | |
| LDPE | 100 | 1.000 |
| SBR | 100 | |
| IR | 100 | 100.000 |
| PMMA | | 100.000 |
| PVAc | | 100.000 |

Weekmakers, anti-oxydanten en dergelijke hebben soms de neiging naar het oppervlak te diffunderen en op deze wijze het polymeer te verlaten. Dit is uiteraard ongewenst. In andere gevallen berust de werking van hulpstoffen juist op migratie: anti-statische toevoegingen en middelen ter verlaging van de wrijving zijn werkzaam aan het oppervlak en moeten daar dus ook heen. De migratie van laag-moleculaire stoffen in verpakking voor levensmiddelen is een apart probleem. De verpakking mag geen voor de gezondheid schadelijke stoffen aan de verpakte levensmiddelen afgeven of doorlaten. Hiervoor is gericht onderzoek steeds noodzakelijk.

5

Structuur en verwerking van materialen

Na bestudering van dit hoofdstuk kan de student:

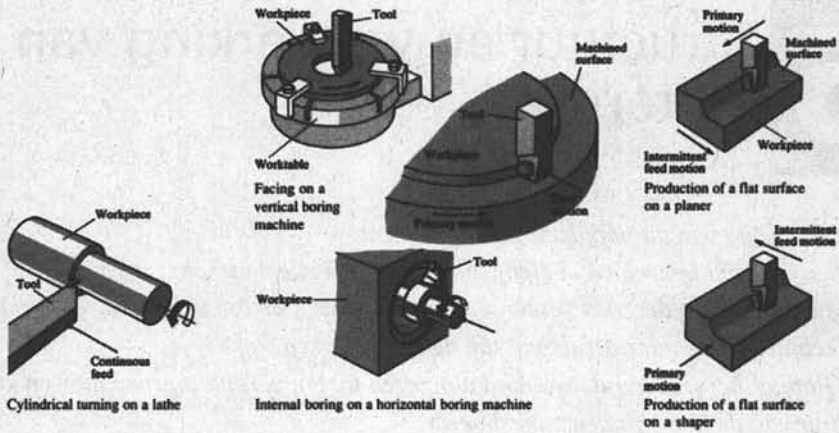
1. *Een overzicht geven van belangrijke verwerkingstechnieken*
2. *Globaal het wederzijds verband aangeven tussen de toe te passen verwerkings-techniek en de microstructuur van de te verwerken stof*
3. *Globaal het wederzijds verband aangeven tussen verbindingstechniek en structuur van de te verbinden materialen*

5.1. Inleiding

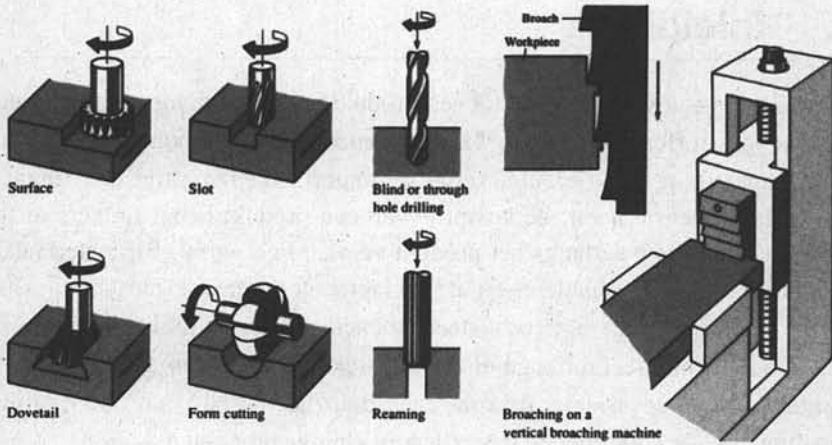
Een materiaal is een stof verwerkt tot een produkt in enigerlei vorm. De verwerking maakt dus van stoffen materialen. Materiaalkeuze is vaak verbonden met de keuze van een bepaalde produktieroute, zodat de materiaalkeuze altijd een financieel-economische dimensie heeft: de kostprijs van een produkt hangt immers in sterke mate af van de route waarlangs het produkt vervaardigd wordt. Bij materiaalkeuze moeten altijd zowel de functie-eisen als de fabricage-eisen in ogenschouw worden genomen. In verband met de terecht steeds toenemende eisen tot het hergebruik van stoffen moet er bij de fabricage-eisen ook rekening worden gehouden met de ontmanteling van het produkt als zijn levensduur beëindigd is en de vrijkomende stoffen opnieuw verwerkt dienen te worden tot zinnige produkten.

De te kiezen produktieroute wordt sterk bepaald door de gewenste aantallen. Massafabricage gaat meestal uit van zeer grote aantallen. Dit betekent, dat een kostprijsvoordeel van centen voor een onderdeel van een massaproduct al zeer snel zeer belangrijk kan worden en bepalend voor de keuze van materiaal en produktieroute. Een heldere administratie kan daarbij helpen.

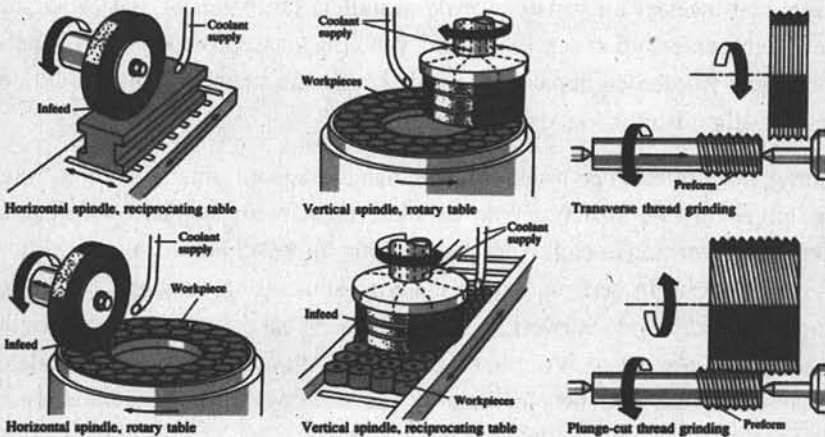
Het gedrag van stoffen in de produktieroute hangt uiteraard samen met hun structuur, terwijl omgekeerd de structuur van de materialen mede bepaald wordt door de toegepaste verwerkingstechnieken. De variatie in beschikbare verwerkingstechnieken is zeer groot. In verband met de materiaalkeuze is het handig een overzicht te hebben van verschillende verwerkingstechnieken. Tabel 5.1 geeft een overzicht (zie ook Figuur 5.1.1 t/m 5.1.6). Voor het hanteren van dit overzicht is het ook handig te beschikken over globale beschrijvingen van deze verwerkingstechnieken, deze globale beschrijvingen zijn ontleend aan Ref. 18.



a. draaien

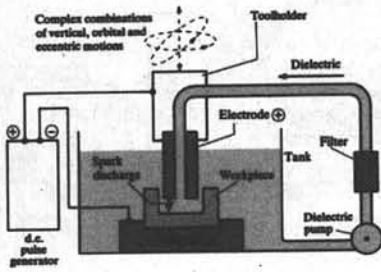


b. frezen/boren



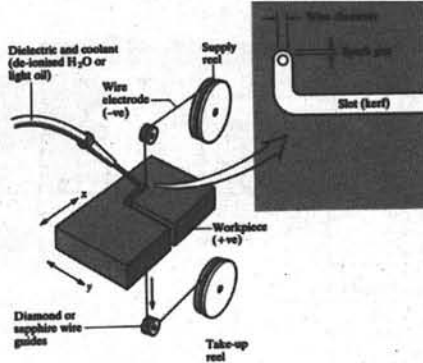
c. slijpen

Figuur 5.1.1. Overzicht van verwerkingstechnieken (Ref. 18).



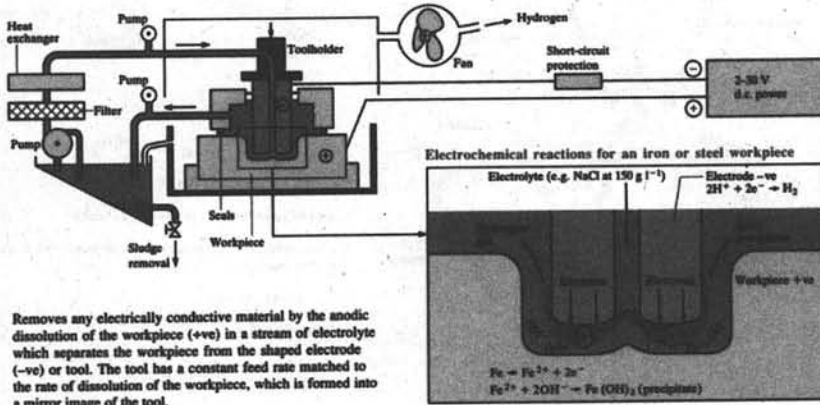
High voltage sparks between workpiece and tool erode the workpiece material. The gap between tool and workpiece kept constant by controlling the position of the tooling. The dielectric fluid cools the vaporized material into 'chips' which are then flushed away and filtered out.

Electrical discharge machining



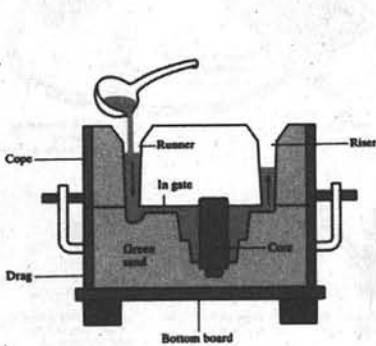
Electrical discharge wire cutting

d. vonkverspaning

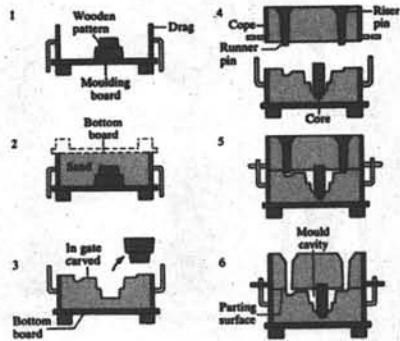


Removes any electrically conductive material by the anodic dissolution of the workpiece (+ve) in a stream of electrolyte which separates the workpiece from the shaped electrode (-ve) or tool. The tool has a constant feed rate matched to the rate of dissolution of the workpiece, which is formed into a mirror image of the tool.

e. elektrochemische verspaning



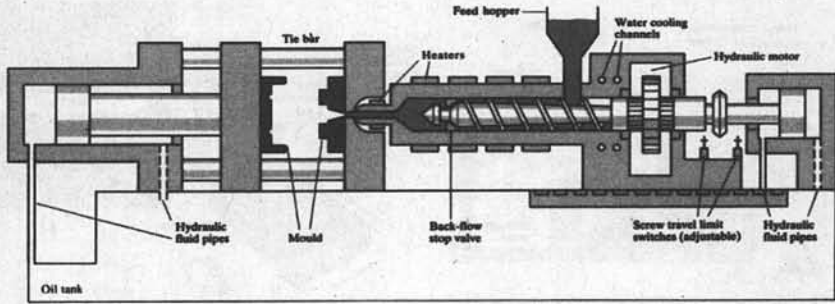
Sectional view of a casting mould



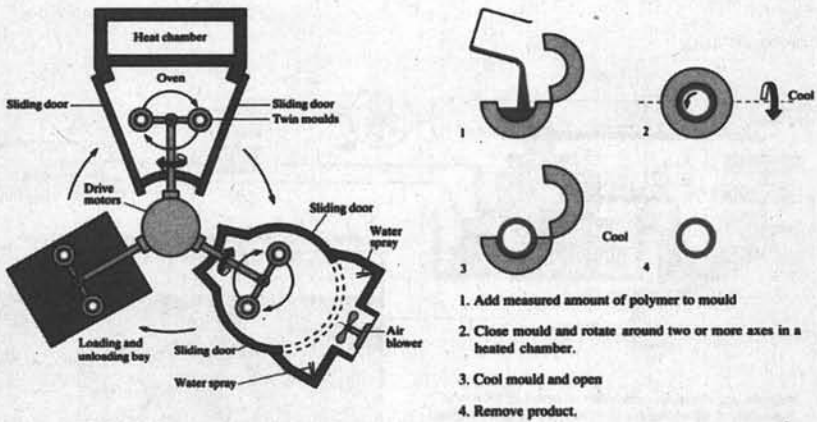
Stages in the production of the mould shown on the left

f. zandgieten

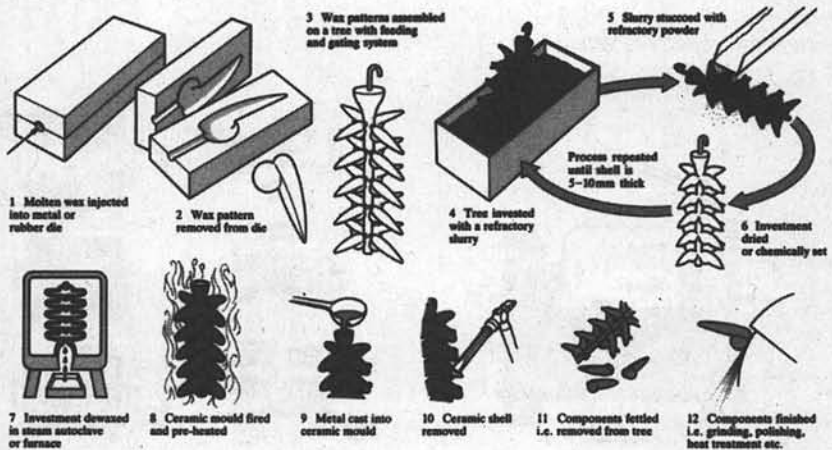
Figuur 5.1.2. Overzicht van verwerkingstechnieken (Ref. 18).



g. spuitgieten

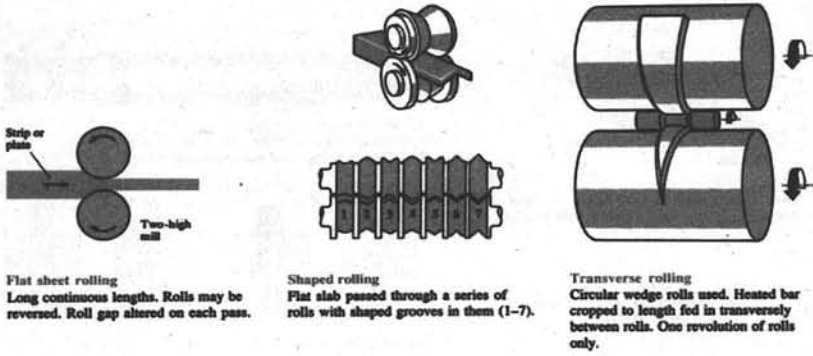


h. rotatiegieten

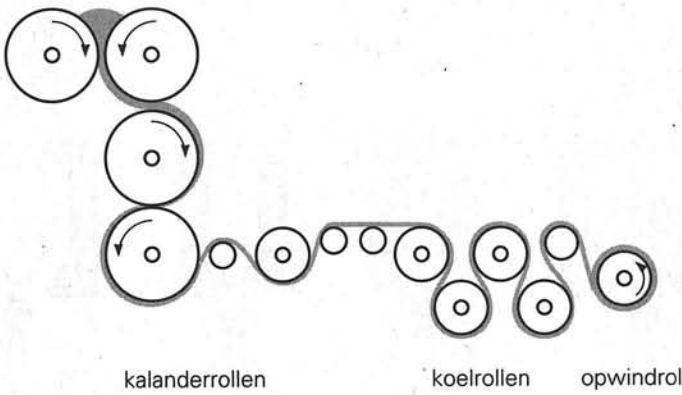


i. verloren-was gieten

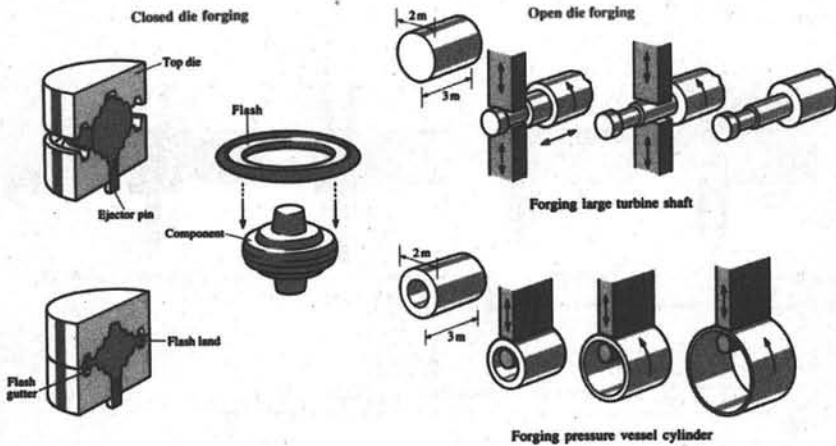
Figuur 5.1.3. Overzicht van verwerkingstechnieken (Ref. 18).



j. walsen

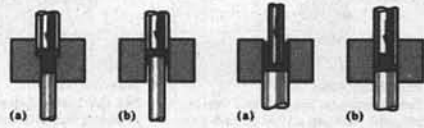
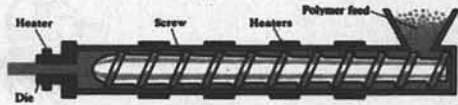
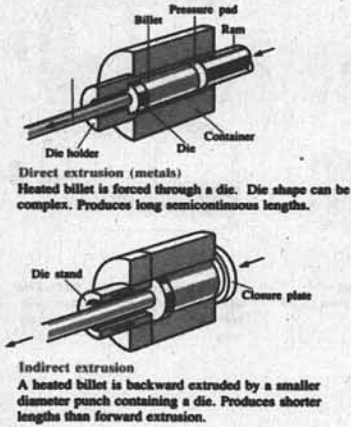


k. kalanderen

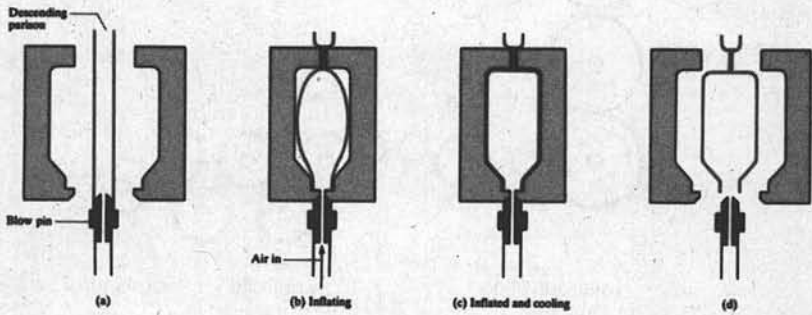


l. smeden

Figuur 5.1.4. Overzicht van verwerkingstechnieken (Ref. 18).

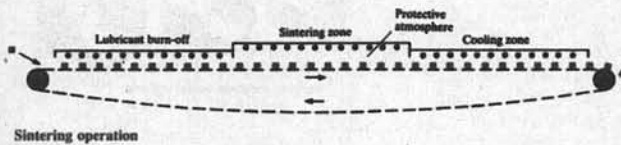
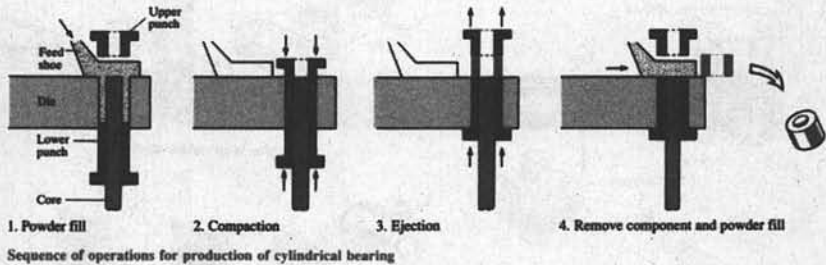


m. extrusie



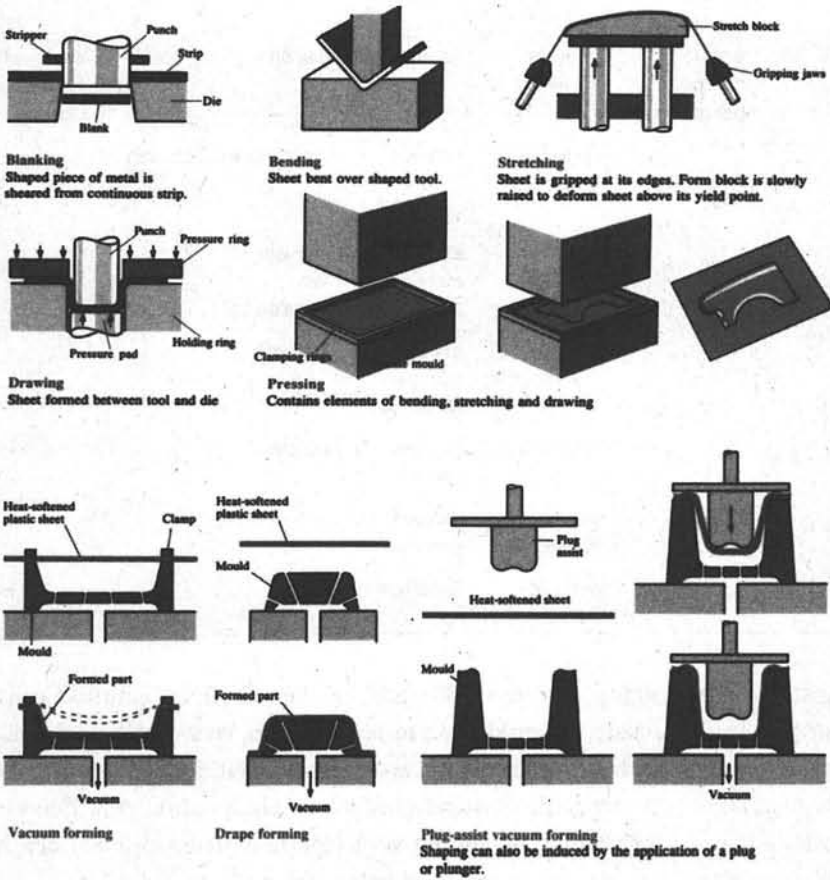
The process of blow moulding containers, showing the sequence of operations in the water-cooled mould.

n. blazen



o. persen/sinteren

Figur 5.1.5. Overzicht van verwerkingstechnieken (Ref. 18).



p. omvormen (stanzen, dieptrekken, vacuümvormen)

Figuur 5.1.6. Overzicht van verwerkingstechnieken (Ref. 18).

Tabel 5.1. *Gangbare verwerkingstechnieken.*

| <i>verspanende technieken</i> | | | <i>niet-verspanende technieken</i> | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------|----------------------------------|
| <i>snijdende bewerkingen</i> | <i>niet-snijdende bewerkingen</i> | <i>via vloeibare fase</i> | <i>via vaste fase</i> | | <i>verbinden</i> | <i>oppervlakte-behandelingen</i> |
| | | | <i>warm</i> | <i>koud</i> | | |
| draaien | vonk-verspaning | zandgieten | walsen | walsen | lassen | oppervlakte veredeling |
| frezen | elektro-chemische bewerkingen | coquille-gieten | kalanderen | stansen | lijmen | chemische oppervlakte-lagen |
| boren | | gieten van polymeren | smeden | dieptrekken | solderen | |
| slijpen | | sputgieten | extrusie van metalen | extrusie van metalen | | |
| | | extrusie van kunststoffen | extrusie- en spuitgiet-blazen | forceren | | |
| | | rotatiegieten | vacuüm-vormen | buigen | | |
| | | verloren-wasgieten | persen/sinteren | | | |
| | | extrusie-persen | folieblazen | | | |

De logische opeenvolging van verwerkingstechnieken die men gebruikt om van grondstoffen in de ruimste zin produkten te maken, heet verwerkingstechnologie. Deze produkten kunnen halffabrikaten zijn, zoals plaat of staf, of eindprodukten. Een halffabrikaat kan onder bepaalde omstandigheden een eindprodukt zijn. Een kunststoffen buis is een eindprodukt als leiding voor elektriciteitsdraad, maar een halfprodukt voor het maken van een hoepel. Een belangrijk onderscheid in verwerkings-technologie is het verschil tussen verspanende en niet-verspanende technologie.

Verspanende technieken

Bij de verspanende technieken wordt altijd in een of andere vorm materiaal verwijderd om de eindvorm te bereiken. Hierbij worden snijdende en niet-snijdende bewerkingen onderscheiden. Bij de snijdende bewerkingen vindt de materieverwijdering plaats door beitels of messen. Deze zijn altijd harder dan het te bewerken materiaal. Bij de niet-snijdende bewerkingen vindt de materieverwijdering plaats met fysische en/of fysisch-chemische middelen.

Draaien

Het snijgereedschap bij draaien is een beitel. Bij het gewone draaien draait het werkstuk rond langs een niet-draaiende beitel die evenwijdig aan de as van het werkstuk voortbewogen wordt. Deze verplaatsing van de beitel per omwenteling van het werkstuk wordt de aanzet genoemd. Het werkstuk is cilinder-symmetrisch. Veel voorkomende vormen zijn cilinders en kegels. In beginsel kunnen alle materialen bewerkt worden.

Frezen/boren

Het snijgereedschap heeft een spiraalvormig afgewikkelde snijkant, zoals bij boren, of heeft verschillende snijkanten, zoals bij frezen. Het snijgereedschap draait en de aanzet van het gereedschap komt tot stand door een verplaatsing van het snijgereedschap zoals bij boren of door een verplaatsing van het werkstuk, zoals vaak bij frezen. In beginsel kunnen alle materialen bewerkt worden

Slijpen

Het snijgereedschap is een verzameling harde keramische deeltjes ingebed in een keramische grondmassa. De slijpsteen draait en de aanzet komt tot stand door een beweging van het werkstuk en van de slijpsteen. Zachte en taaie materialen kunnen moeilijk geslepen worden.

Vonkverspaning/elektrochemische verspaning

Bij vonkverspaning is het snijgereedschap een vonk die tussen een elektrode en het werkstuk over een groot elektrisch spanningsverschil getrokken wordt. Bij elektrochemische verspaning lost het werkstuk lokaal anodisch in een elektrolyt op. De te bewerken stoffen zijn in het algemeen metalen of metaallegeringen, omdat ze elektrisch geleidend moeten zijn. Ook zeer harde materialen kunnen bewerkt worden. Het verwijderde materiaal is ongeschikt voor hergebruik.

Niet-verspanende technieken

Bij de niet-verspanende technieken vindt de vormgeving plaats door een vervorming via een van de drie aggregatietoestanden. Daarnaast kunnen de niet-verspanende technieken ook bestaan uit het verbinden via oppervlakken. De te verbinden oppervlakken zijn steeds vast, maar de verbindingsstoffen zijn tijdens de bewerking vloeibaar: lassen of lijmen.

Zandgieten

Vormen van zand worden volgegoten met vloeibare metaallegeringen. Na stollen wordt de zandvorm bij het lossen in het algemeen vernietigd. Productie van zandvormen kan in hoge mate geautomatiseerd worden, zodat toch behoorlijk grote produktiesnelheden gehaald kunnen worden. Het vormzand kan worden hergebruikt. Ingewikkelde vormen kunnen in één produktiestap vervaardigd worden. In beginsel

kunnen alle metaallegeringen worden gegoten, behalve de zeer reactieve, zoals titaanlegeringen. Voor gietijzer en gietstaal is zandgieten de meest toegepaste gietmethode. De stukmassa varieert van beneden 100 gram tot tonnen.

Coquillegieten

Een permanente metalen vorm wordt vol gegoten met een vloeibare metaallegering. Het te gieten werkstuk heeft veelal simpele vormen en is niet groot. Vooral de lichte metalen worden op deze wijze verwerkt. De afkoelsnelheden bij coquillegieten zijn hoger dan bij zandgieten, waardoor de korrelgrootte na stolling kleiner is. De metalen gietvormen zijn vele keren opnieuw te gebruiken. De stukmassa is meestal beperkt tot enkele tientallen kilo's. Bij polymeren wordt de vorm gevuld met een vloeistof die bij kamertemperatuur een zo lage viscositeit heeft dat hij door zijn eigen gewicht de vorm goed vult. Na het vullen treedt de materiaalvormende chemische reactie op. De methode is zeer geschikt voor thermoharders als polyesters en epoxyharsen. Hier vindt de chemische reactie plaats tussen het prepolymeer en de harder die kort voor het gieten met elkaar gemengd zijn. Er is een aantal thermoplasten dat gevormd kan worden door polymerisatie van bij kamertemperatuur vloeibare stoffen. Deze thermoplasten, bijvoorbeeld PMMA uit methylmetacrylaat en PS uit styreen, kunnen dus gegoten worden. Dit zogenaamde monomeergieten is ook zeer geschikt voor het maken van grote vormstukken (bijvoorbeeld scheepsschroeven) van nylon-6, uitgaande van vloeibaar caprolactam.

Spuitgieten

Bij het spuitgieten van metalen wordt een permanente metalen vorm, die vaak met water gekoeld wordt, onder druk vol gespoten met een vloeibare metaallegering. Het te gieten werkstuk kan ingewikkeld van vorm zijn en dunne wanden hebben. Aan de dunvloeibaarheid van de gesmolten metaallegering worden hoge eisen gesteld. Vooral de lichte metaallegeringen, bij voorkeur met de eutectische samenstelling, en metaallegeringen die smelten bij lage temperaturen (bijvoorbeeld zinklegeringen), worden gebruikt. De metalen gietvormen zijn vele keren opnieuw te gebruiken; voor zinklegeringen tot circa 10^6 en voor Al-legeringen tot circa 10^5 keer. De stukmassa ligt meestal in de orde van kilo's. De hoogste afkoelsnelheden worden bij spuitgieten bereikt. Bij kunststoffen is spuitgieten verreweg de meest toegepaste techniek voor het vervaardigen van voorwerpen direkt vanuit een thermoplastische grondstof. De gesmolten kunststof, meestal aangevoerd door een extruder, wordt in een gekoelde, stalen matrijs gespoten onder drukken tot 1500 bar. De benodigde sluitkracht van de matrijs is dan ook zeer groot. De grootte van een spuitgietmachine wordt dikwijls gekarakteriseerd door zijn sluitkracht. Voor kleinere machines bedraagt deze bijvoorbeeld 200 kN, de grootste hebben een sluitkracht van 100.000 kN. Op deze laatste kunnen produkten met een massa tot 200 kg gespoten worden. Ook bij rubbers en thermoharders wordt, op geringere schaal, het spuitgieten toegepast;

uiteraard is dan de matrix verwarmd om de vulcanisatie- of de uithardingsreactie te starten.

Rotatiegieten

Het gieten van vooral holle plastic voorwerpen is mogelijk door de zwaartekracht te vervangen door een centrifugaalkracht. Rotatie om twee loodrecht op elkaar staande assen maakt het vormen van willekeurig gevormde holle voorwerpen mogelijk. Het uitgangsmateriaal hoeft niet per se vloeibaar te zijn. Ook pasta's van PVC en weekmaker kunnen gebruikt worden en zelfs een 'vloeiend' poeder van bijvoorbeeld PE. Alleen aan de buitenkant is een door rotatiegieten gefabriceerd produkt glad, ook kunnen er fluctuaties in de wanddikte tot 5% voorkomen, maar dit is voor veel toepassingen geen bezwaar. De methode leent zich bij uitstek voor het maken van zeer grote produkten, zoals vaten met een inhoud van enkele kubieke meters en ook niet-gesloten voorwerpen als zitmeubelen en autodashboards.

Verloren-was-gieten

Een wasmodel van het te gieten gietstuk wordt bekleed met een keramische deklaag. Als deze laag een voldoende dikte heeft bereikt, dan wordt de was uit de schil weggesmolten. De keramische schil wordt voorverwarmd en gevuld met vloeibaar metaal. De keramische schillen worden weggebroken en het gietstuk uitgenomen. De verloren was is niet verloren, maar kan opnieuw worden gebruikt. De keramische schillen zijn verloren. Bijna alle metalen kunnen op deze wijze gegoten worden. De stukmassa varieert van 1 gram tot circa 15 kilo. De produktiesnelheid kan verhoogd worden door afzonderlijk stukken te verenigen in druiventrossen of bomen van kleine produkten, zodat in één gieting vele stuks wordt verkregen.

Walsen

Walsen is continue vervorming van grote hoeveelheden metaal of metaallegering tussen ronddraaiende walsrollen. Alle metalen die bij een bepaalde temperatuur taai genoeg zijn, kunnen gewalst worden. Het walsen kan dus koud (beneden de hersteltemperatuur) en warm (boven de hersteltemperatuur) gebeuren. Het walsen van kunststoffen tot platen en folies heet kalanderen. Een kalender is opgebouwd uit een aantal grote rollen: homogenisering, dosering en vormgeving spelen zich af op de verwarmde kalenderwalsen. Afkoeling vindt plaats op een aantal koeltrommels. Alleen polymeren met een uitgesproken rubbertraject kunnen op een kalender verwerkt worden. In aanmerking komen voornamelijk PVC, PS, ABS en, uiteraard, rubbers.

Smeden

Smeden is vervorming van materiaal in open of gesloten vormen, of door hameren. De open vormen worden meestal toegepast voor de grotere produkten. De smid smeedt het ijzer als het heet is, tot driedimensionale vormen zonder instekende, niet-

lossende hoeken. Alle metalen of metaallegeringen die voldoende taai zijn bij een bepaalde temperatuur kunnen gesmeed worden. Ook kunststoffen produkten, zoals tandwielen en pully's, kunnen koud gesmeed worden, uitgaande van een schijf of een plaat.

Extrusie

Hieronder wordt een grote variëteit van processen begrepen, waarbij de te verwerken stof door een opening wordt geperst. Het produkt is veelal lang ten opzichte van de doorsnede. Extrusie is vooral geschikt voor taaië materialen, zoals Al, Mg, Cu en natuurlijk de kunststoffen. Bij de metaallegeringen kan de extrusie zowel koud als warm gebeuren. Kunststoffen, en wel thermoplasten, worden warm, in vloeibare toestand, geëxtrudeerd. Er wordt gebruik gemaakt van schroefextruders waarin de grondstof in de vorm van granulaat (korrels materiaal) wordt toegevoerd. Door de draaiende schroef wordt het polymeer naar de vormopening getransporteerd en op zijn weg daarheen wordt het door warmtetoevoer opgesmolten. De methode is zeer geschikt voor het fabriceren van onder andere buis, profiel en plaat (breedte maximaal 4 m, dikte tot 3 cm).

Extrusie- en spuitgietblazen

Het blazen van holle voorwerpen zoals flessen en containers kan 'on-line' met het extrusieproces worden uitgevoerd. Daarbij wordt een buis van thermoplastisch materiaal die uit de vormopening van de extruder komt in plastische toestand door perslucht opgeblazen tegen de gekoelde binnenwand van een uit twee helften bestaande matrijs. Het is een veel gebruikte methode voor het fabriceren van flessen van ongeveer 2 liter, maar ook grotere containers kunnen op deze wijze gemaakt worden: zelfs vaten tot 10 m³. Bij het spuitgietblazen wordt eerst een voorvormstuk van kleine afmetingen gespuitsgiet. Vervolgens wordt dit, na verwarming boven T_g , in de rubbertoestand langs mechanische weg in de lengterichting verstrekt en onmiddellijk daarop in een holle vorm in de dwarsrichting opgeblazen. Het bekendste spuitgietblaasprodukt is de PET-fles.

Folieblazen

Ook folieblazen is direkt gekoppeld aan een extruder, en wel een met een ringvormige vormopening. Het materiaal komt hieruit als een dunwandige buis die direkt door inwendige overdruk tot een veelvoud van zijn oorspronkelijke diameter wordt opgeblazen. Het is mogelijk folies te vervaardigen die uit meer dan één laag bestaan en uit verschillende polymeren zijn opgebouwd. Voor ieder polymeer is uiteraard een aparte extruder nodig. De materiaalstromen komen samen in een gemeenschappelijke spuitmond. Op deze wijze worden laminaatfolies gemaakt, bijvoorbeeld: een laag zorgt voor de sterkte, een andere voor de weerstand tegen permeatie van gassen en een derde voor de lasbaarheid.

Persen/sinteren

Poeders (bij kunststoffen ook wel granulaat) worden verwerkt tot een gereed produkt door deze te persen en vervolgens al of niet onder druk te verhitten tot hoge temperaturen. Deze techniek wordt het meest gebruikt voor metalen en keramiek. De stukmassa's zijn veelal laag te noemen.

Omvormen: stansen/dieptrekken/vacuümvormen

Bij het stansen worden met een snijstempel platte vormen uit een plaat gedrukt die meestal verder worden vervormd met behulp van dieptrekken. Bij dieptrekken wordt met een stempel een diepte in het materiaal aangebracht. Het uitgangsmateriaal wordt dus loodrecht op de plaat vervormd. De materiaaldikte blijft hierbij vrijwel constant. Bij vacuümvormen wordt het materiaal in een matrijs gezogen door een vacuüm onder de plaat aan te brengen. De koudvervormbaarheid moet voor dieptrekken groot genoeg zijn. Vacuümvormen wordt vooral bij kunststoffen toegepast. Deze technieken zijn speciaal geschikt voor massaproductie van eenvoudige produkten.

Lassen

Lassen is het verbinden van twee stukken materiaal door het smelten en doen stollen van meestal een derde stuk materiaal tussen de twee te verbinden delen, waarbij de oorspronkelijke stukken ook gedeeltelijk smelten. De verbinding komt tot stand door gezamenlijk stollen. Metalen, metaallegeringen en thermoplasten worden gelast.

Solderen

Solderen is het verbinden van twee stukken metaal door het smelten van een derde metaallegering tussen de twee te verbinden delen, waarbij de oorspronkelijke stukken niet smelten. De verbinding komt tot stand door absorptie en diffusie. Alleen sommige metaallegeringen kunnen worden gesoldeerd. Solderen is namelijk alleen mogelijk bij goede bevochtiging van de oppervlakken. Tussen de te verbinden delen moet een capillaire werking bestaan zodat het soldeer tussen de delen kan vloeien. Bovendien moeten de oppervlakken schoon zijn.

Lijmen

Metalen, metaallegeringen en allerlei kunststoffen kunnen worden gelijmd met kunststoflijmen. Voorwaarde is dat het oppervlak van de te verbinden delen schoon is en de kunststoflijm deze oppervlakken goed bevochtigt. De verbinding komt tot stand door absorptie en chemische binding.

De in dit overzicht genoemde verwerkingstechnieken vertonen een grote diversiteit. Voor een onderlinge vergelijking is het handig te beschikken over criteria die toepasbaar zijn op elke afzonderlijke techniek. Deze zijn:

i. Cyclustijd

Hieronder wordt verstaan de tijd nodig voor de vervaardiging van een produkt, als de parameters van een bepaalde verwerkingstechniek ingesteld zijn.

ii. Kwaliteit

De kwaliteit van een produkt is eenvoudig het voldoen aan de functie-eisen. Voor de verwerkingstechniek is dan belangrijk dat elk produkt hieraan reproduceerbaar voldoet, ook als inmiddels al miljoenen van deze produkten vervaardigd zijn. Reproduceerbaarheid en betrouwbaarheid zijn dus belangrijke aspecten van kwaliteit.

iii. Flexibiliteit

Een verwerkingstechniek is flexibel, als er een grote variëteit van produkten van een grote variëteit aan stoffen mee gemaakt kan worden.

iv. Materiaalbenutting

Bij de vervaardiging van produkten is een beperking van de hoeveelheid afval vereist op grond van de eis tot zo laag mogelijke kostprijs. De materiaalbenutting kan men uitdrukken als het percentage dat het gerede produkt uitmaakt van de verwerkte hoeveelheid stof. Dit percentage dient zo dicht mogelijk bij 100 te liggen.

v. Bewerkingskosten

De bewerkingskosten omvatten kapitaalkosten, arbeidskosten en gereedschapskosten. Het streven is uiteraard de som van deze drie zo laag mogelijk te houden.

De genoemde criteria zijn door L. Edwards en M. Endean (Ref.18) gewaardeerd met cijfers op een schaal van 1 (= slecht) tot en met 5 (= uitstekend) Deze waardering is gegeven in Tabel 5.2. De keuze voor een bepaalde verwerkingstechniek kan in eerste benadering gebeuren met deze waardering. Echter, vaak is in een bedrijf een bepaalde uitrusting aanwezig en is het voor de vervaardiging van een bepaald produkt niet doenlijk een geheel nieuwe verwerkingstechniek te introduceren. De best mogelijke verwerkingstechniek is dan beter dan de beste verwerkingstechniek.

5.2 Structuur en de verwerking via de vloeibare toestand

5.2.1. Metaallegeringen

Alle metaallegeringen zijn ooit vloeibaar geweest. Een metaal wordt namelijk aan het eind van de ertsverwerking gegoten tot een gietblok. Dit blok wordt daarna verder verwerkt tot produkt. Deze verdere verwerking kan wederom via gieten gebeuren of door omvormingen, waarbij de legering niet vloeibaar meer wordt. Op

Tabel 5.2. Karakteristieken van verwerkingstechnieken.

| techniek | waardering van de criteria | | | | |
|------------------------------------------------------|----------------------------|-----------|---------------|-------------------------|-----------------------|
| | cyclustijd | kwaliteit | flexibiliteit | materiaal- benutting | bewerkings- kosten |
| I. Verspanende technieken | | | | | |
| draaien | 2 | 5 | 5 | 1 | 5 |
| frezen | 3 | 5 | 5 | 1 | 4 |
| boren | 3 | 5 | 5 | 1 | 4 |
| slijpen | 2 | 5 | 5 | 1 | 4 |
| vonkverspaning | 1 | 5 | 4 | 1 | 1 |
| elektrochemische verspaning | 1 | 5 | 4 | 1 | 1 |
| II. Niet-verspanende technieken: gieten | | | | | |
| zandgieten | 2 | 1 | 5 | 2 | 5 |
| coquilliegieten | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| spuitgieten | 5 | 2 | 1 | 4 | 1 |
| verloren-was-gieten | 2 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| gieten van polymeren | 1 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| rotatiegieten | 2 | 2 | 4 | 5 | 4 |
| III. Niet-verspanende technieken: omvormen | | | | | |
| walsen | 5 | 3 | 3 | 4 | 2 |
| smeden | 2-4 | 2-4 | 4-1 | 3-5 | 2 |
| extrusie | 5 | 3 | 3 | 4 | 2 |
| extrusie- en spuitgietblazen | 4 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| persen/sinteren | 2 | 2 | 2 | 5 | 2 |
| persen van kunststoffen | 3 | 2 | 4 | 4 | 3 |
| stansen/dieptrekken | 3 | 4 | 1 | 3 | 1 |
| vacuümvormen | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| IV. Niet-verspanende technieken: verbindingen | | | | | |
| lassen | 2 | 2 | 5 | 5 | 4 |
| solderen | 2 | 3 | 5 | 5 | 4 |
| lijmen | 2 | 3 | 5 | 5 | 5 |

grond van die verdere verwerking spreekt men van giet-, respectievelijk kneedlegeringen. Bij de kneedlegeringen is gieten dus het beginstadium van het gehele productieproces, terwijl bij de gietlegeringen het gieten bijna het eindstadium is. Bij de kneedlegeringen geeft gieten dus altijd een halfprodukt, dat meestal snel wordt afgekoeld in metalen vormen of gegoten wordt in een continu-gietinstallatie. De gietlegeringen worden gegoten in gietvormen gefabriceerd uit een grote reeks van materialen, zodat de afkoelsnelheden zeer uiteen kunnen lopen (zeer langzaam voor dikwandig gietwerk in zandvormen tot zeer snel voor dunwandig gietwerk in metalen spuitgietvormen). De verschijningsvorm van de metaallegering na het gieten

bekeken onder de microscoop noemt men de gietstructuur. De gietstructuur kan grote invloed hebben op de materiaaleigenschappen. De gietstructuur wordt vooral beïnvloed door de afkoelsnelheid en de samenstelling van de gietlegering.

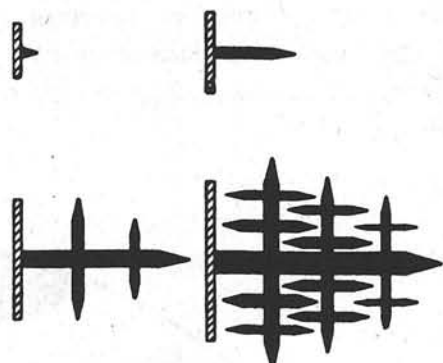
Stollen van een metaal of een metaallegering verloopt via kiemvorming en kiemgroei. Een kiem is te beschrijven als een verzameling van atomen van het zuivere metaal of van de metaallegering die door een toevallige samenloop van omstandigheden de kristallijne ordening vertoont. Bij een steeds grotere onderkoeling, dan is de temperatuur van de smelt lager dan de thermodynamisch bepaalde temperatuur waarbij de metaallegering vast zou zijn, neemt de kans op het vormen van een dergelijke verzameling toe. Een onderkoelde smelt is uiteraard thermodynamisch niet stabiel. Voor stolling is onderkoeling een noodzakelijke voorwaarde. Kiemvorming wordt veelal bevorderd door de aanwezigheid van kleine vaste deeltjes. Kiemvorming door uitsluitend onderkoeling wordt homogene kiemvorming genoemd en kiemvorming via kleine vaste deeltjes die als enten werken, heet heterogene kiemvorming. Hoe groter de afkoelsnelheid, hoe groter de onderkoeling en hoe groter het aantal kiemen. De korrelgrootte na stolling zal dus kleiner zijn naarmate de afkoelsnelheid tijdens het stollen groter was. De snelheid waarmee de kiemen uitgroeien, wordt vooral bepaald door de snelheid waarmee de stolwarmte kan worden afgevoerd. Deze is dus het grootst in de richting van de grootste temperatuurgradiënt en is dus ook afhankelijk van de gietvorm waarin de stolling van de smelt plaatsvindt. Daarnaast wordt de groeisnelheid beïnvloed door de kristaloriëntatie van de kiem: kleiner op de dichtst gepakte vlakken dan op de minder dicht gepakte vlakken.

Vraag 5.1 *Waarom zullen gespuitsgiete gietstukken in het algemeen een kleinere korrelgrootte hebben dan gietstukken in zand gegoten?*

Voor kubische metalen betekent het voorgaande, dat de groeisnelheid in de kubusrichtingen groter is dan in de richting van de lichaamsdiagonaal van het kristalrooster van de stollende kiem. Stolling kan ook optreden langs kubusrichtingen die onderling loodrecht op elkaar staan: er ontstaan dendrieten (zie Figuur 5.2). Dendrietvorming kan dus optreden bij zowel zuivere metalen als bij legeringen. Uit het voorgaande wordt duidelijk dat het materiaal van de gietvorm, waarin de stolling plaatsvindt, een grote invloed heeft op het stolgedrag van het in die vorm gegoten metaal of metaallegering. Gietvormen van metaal maken grotere afkoelsnelheden mogelijk dan vormen van zand door het verschil in warmte-overdracht en warmtegeleiding.

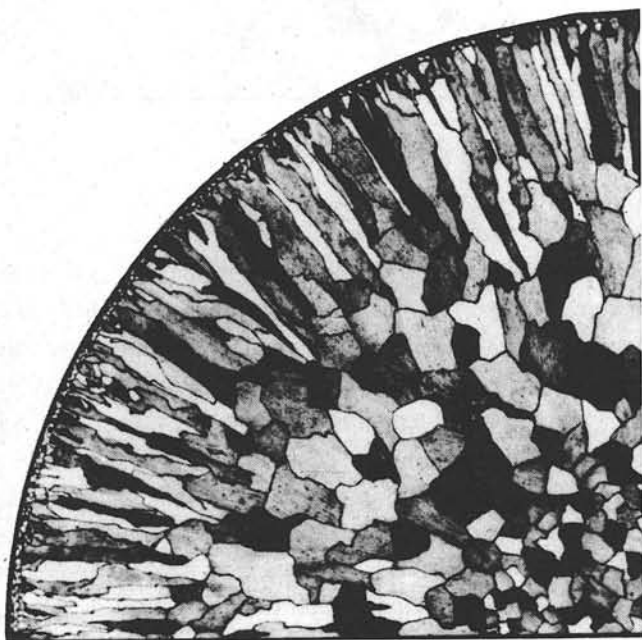
De gietstructuur van een zuiver metaal

Bij een snelle afkoeling van een metaal in een metalen gietvorm ontstaat aan de rand een sterke onderkoeling; een vaste fijnkorrelige buitenlaag is het resultaat. Hierna kan verdere kristalgroei alleen maar in de richting van de smelt optreden. Toevallig



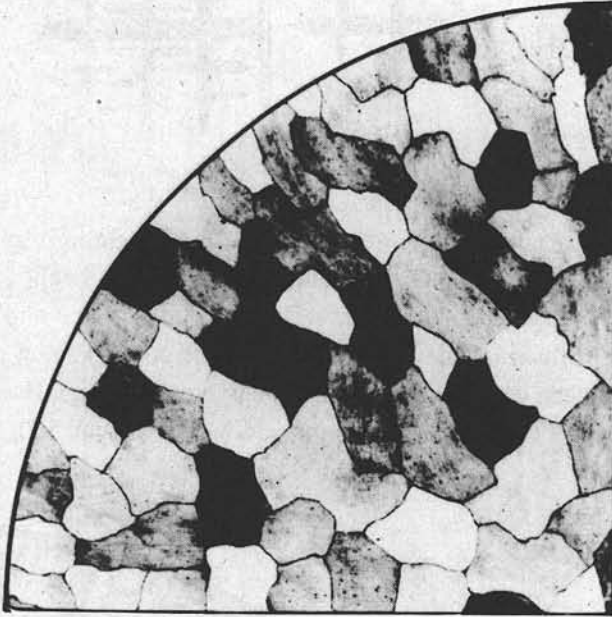
Figuur 5.2. Schematische voorstelling van dendrietvorming.

zullen enkele kristallen zo georiënteerd zijn dat de richting van de snelste groei samenvalt met de grootste temperatuurgradiënt, dus loodrecht op de rand. Deze kristalieten zullen zeer snel uitgroeien. Door deze uitgroeï zal onder invloed van de vrijkomende stolwarmte de temperatuurgradiënt afvlakken, waardoor de overblijvende smelt een gelijkmatigere temperatuurverdeling krijgt. Het centrale gedeelte van de smelt stolt dan zonder voorkeursrichting (zie Figuur 5.3). In een zandvorm



Figuur 5.3. Gietstructuur van snel gekoeld koper (3 zones).

vindt er een zodanig langzame afkoeling plaats dat het gesmolten metaal de gelegenheid krijgt de vormwand op te warmen; een temperatuurgradiënt is praktisch afwezig. De stolling vindt gelijkmatig plaats: er worden equi-axiale kristallieten gevormd die door de zeer kleine onderkoeling veel groter zijn dan in het hiervoor aangegeven geval (zie Figuur 5.4).



Figuur 5.4. Gietstructuur van langzaam gekoeld koper.

De gietstructuur van metaallegeringen

In een toestandsdiagram is te zien, dat bij een bepaalde temperatuur en samenstelling vast en vloeibaar met elkaar in evenwicht zijn. Bij de bespreking van het verschijnsel kristalsegregatie (zie §3.3.2) bleek al, dat er samenstellingsverschillen kunnen zijn tussen de zojuist gestolde smelt en de overblijvende smelt. Kiemvorming voor metaallegeringen is niet alleen het toevallig samenkomen van atomen volgens het juiste kristalrooster, maar het geheel van de samenkomende atomen moet ook een geschikte samenstelling hebben. Daarom is kiemvorming van metaallegeringen ingewikkelder dan van zuivere metalen. Dendrietvorming treedt in legeringen frequenter op dan in enkelvoudige metalen. Het dendrietskelet kan snel over grote afstanden in de smelt groeien. Door de segregatie heeft de later tussen de dendrieten stollende smelt een andere samenstelling dan verwacht op grond van het toestandsdiagram. Deze samenstellingsvariëaties maken de dendrieten na aanetsen zichtbaar onder de microscoop. Een legering met een eutectische samenstelling heeft niet een tempera-

tuurgebied waar vast en vloeibaar met elkaar in evenwicht zijn, maar een smeltpunt. Bij de eutectische stolling ontstaan twee vaste fasen gelijktijdig. Hierbij is er een wederzijdse beïnvloeding: kristallen van de ene fase fungeren als kiem voor de stolling van de andere fase en vice versa. Vaak levert de eutectische samenstelling de hoogste dunvloeibaarheid bij de laagste temperatuur op. Het is dus niet verwonderlijk, dat binaire legeringen met een eutectische samenstelling vaak de basis vormen voor technisch belangrijke gietlegeringen. Voorbeelden zijn gietijzer en silumin: aluminium met een eutectisch gehalte aan silicium.

Slink

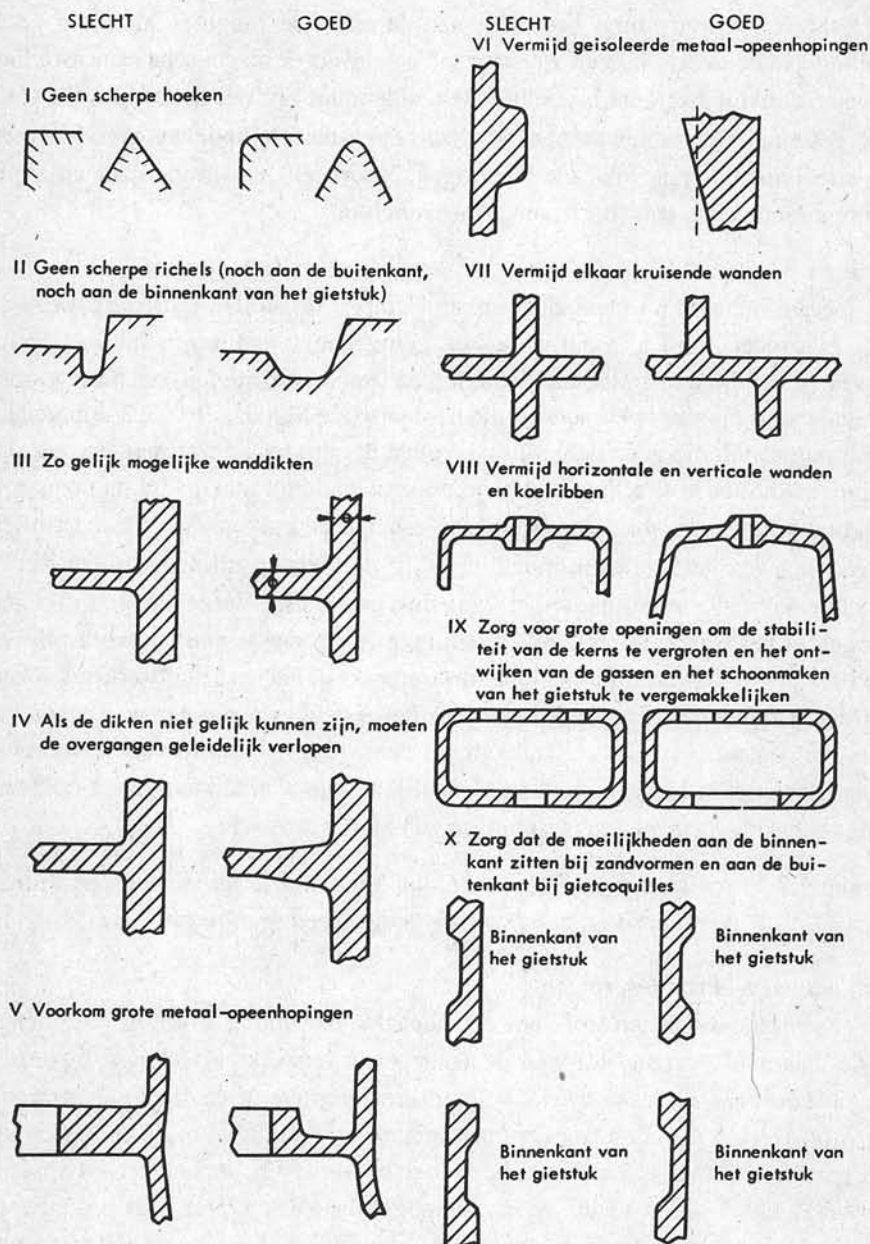
Schrinke

De meeste metalen en metaallegeringen krimpen bij stollen (*slinken*). Deze slink mag niet plaats vinden in het werkstuk. Een gedeelte van deze slink kan optreden tussen de dendrieten, zodat microslinkholten (microporositeiten) ontstaan. Door een gerichte stolling met opkomers en giettrechters (zie Figuur 5.1.f), dat zijn gedeelten van het gietstuk die geen deel uit maken van het produkt, zorgt men ervoor, dat de microslinkholten zoveel mogelijk worden verzameld tot macroslink in de opkomer, dus buiten het werkstuk. Voorwaarde is dus, dat de opkomers het laatst stollen en navoeding van het werkstuk mogelijk blijft: de gietaansluitingen op het werkstuk moeten ook pas stollen nadat het werkstuk gestold is. Verder mogen dikte-overgangen in het werkstuk niet zodanig zijn dat een gedeelte van het werkstuk eerder stolt dan de rest. Hierbij moet bij het ontwerpen van het te gieten werkstuk rekening worden gehouden. In Figuur 5.5 wordt een overzicht gegeven van de Tien Geboden voor het ontwerpen van gietstukken. In een vroeg stadium overleg voeren met gietertechnici is hier een vereiste. Ongelijkmatige wanddikten geven ook aanleiding tot het ontstaan van gietspanningen, zie Figuur 5.6.

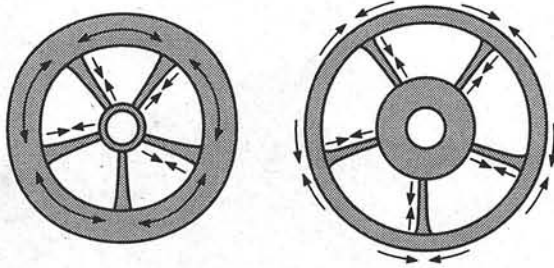
Vraag 5.2 Na stolling zijn de in Figuur 5.6 aangegeven spanningen aanwezig; verklaar de richting van de aangegeven spanningen.

De gietbaarheid van legeringen

De geschiktheid van een stof voor een bepaalde bewerking wordt vaak samengevat in de 'baarheid' van die stof voor de aangegeven verwerkingstechniek, bijvoorbeeld de gietbaarheid, de lasbaarheid, de extrudeerbaarheid of de dieptrekbaarheid van die stof. Helaas zijn al deze begrippen niet exact te definiëren. Zij omvatten veelal het gemak waarmee een stof met bestaande of aanwezige technieken en apparatuur verwerkt kan worden tegen de laagst mogelijke kosten. Het begrip gietbaarheid omvat dus meer dan alleen de dunvloeibaarheid bij zo laag mogelijke temperatuur, maar ook de grootte van de optredende slink of het optreden van reacties met het vormmateriaal. Bij gietlegeringen met een klein stoltraject moet de slink als macroslink verzameld worden in opkomers. Is die slink groot, dan zijn dus grote opkomers nodig en is de gietbaarheid dienovereenkomstig beperkt. Bij gietlegeringen met een groot stoltraject (de kans op dendrietvorming is dan groter dan



Figuur 5.5. Tien geboden voor het gieten (Ref. 19).



Figuur 5.6. Illustratie van het ontstaan van gietspanningen.

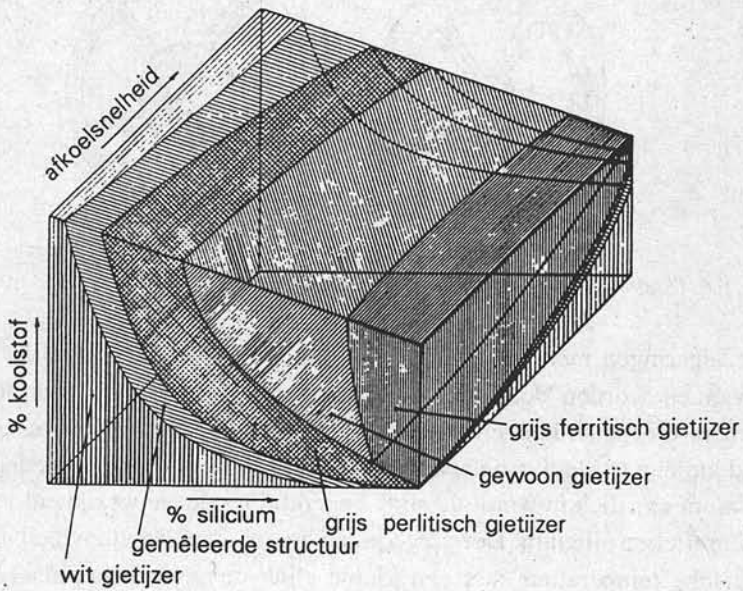
bij de legeringen met een klein of afwezig stoltraject) kan de slink gedeeltelijk opgevangen worden door microslink tussen de dendrieten, waardoor kleinere opkomers toegepast kunnen worden. Overigens kan bij dergelijke legeringen de wanddikte niet te klein genomen kan worden. Bij gietijzer en de gietlegeringen van aluminium en silicium wordt de slink beperkt door de aanwezigheid van respectievelijk grafiet en silicium. Deze legeringen combineren dus dunvloeibaarheid bij de eutectische temperatuur met een kleine slink en gelden dus als goed gietbare legeringen.

5.2.2. De structuur van gietijzer, gegoten aluminiumlegeringen, gegoten koperlegeringen en gegoten magnesiumlegeringen

5.2.2.1. Gietijzer

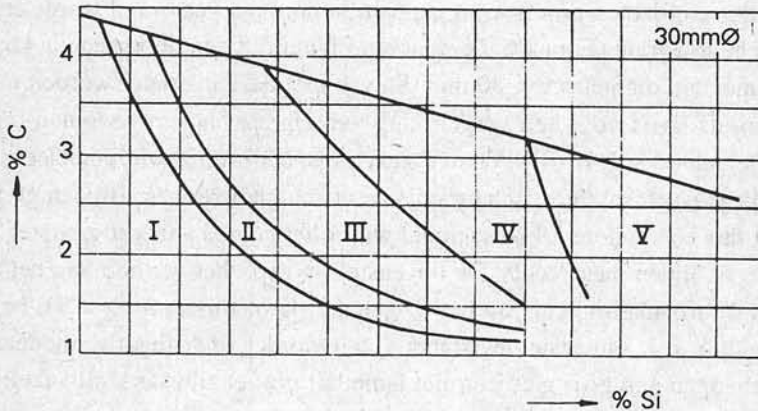
De afkoelsnelheid en de samenstelling hebben een belangrijke invloed op de structuur van gietijzer (zie Ref. 3). De samenhang tussen samenstelling, afkoelsnelheid en structuur voor gietijzeren proefstaven gegoten in normaal vormzand wordt gegeven in het Weicheltdiagram (Figuur 5.7), waarvan Figuur 5.8 een doorsnede is voor een proefstaaf met een diameter van 30 mm. Staven met deze diameter worden meestal als norm en als basis voor een vergelijking van eigenschappen genomen bij grijs gietijzer. De gebieden I, II, III, IV en V geven respectievelijk wit, gemêleerd, grijs perlitisch, grijs perlitisch/ferritisch en grijs ferritisch gietijzer aan. Bij een geringere wanddikte, dus een hogere afkoelsnelheid wordt het gebied van wit gietijzer groter en schuiven de lijnen naar rechts. De bovenste lijn geeft het verloop van het eutectische punt in afhankelijkheid van het Si-gehalte (koolstoffactor $S_c = 1$), beneden deze lijn geldt $S_c < 1$; samenstellingen met $S_c > 1$ worden in de regel vermeden.

De eigenschappen van grijs gietijzer met lamellair grafiet zijn sterk afhankelijk van de afkoelsnelheid en dus van de wanddikte. In feite kan men alleen over de eigenschappen van grijs gietijzer spreken bij een bepaalde wanddikte. De treksterkte van de normgevende proefstaaf van 30 mm in zand gegoten varieert men door de samen-



Figuur 5.7. Ruimtelijk Weichelt-diagram.

stelling (gehalte aan koolstof, silicium en fosfor zijn hier erg belangrijk) te variëren, waardoor de grondmassa van het gietijzer verandert, of door de verschijningsvorm van de grafiet te beïnvloeden: van lamelvormig naar bolvormig. De verandering van de grondmassa houdt dan in de vervanging van ferriet door perliet onder invloed van een verandering van de samenstelling (zie ook Figuur 5.8). De verandering van de treksterkte als functie van de wanddikte wordt gegeven in Tabel 5.3.



Figuur 5.8. Weichelt-diagram voor een proefstaaf met diameter 30 mm.

Tabel 5.3. De wanddiktegevoeligheid van enkele genormaliseerde soorten grijs gietijzer.

| materiaalaanduiding volgens Nederlandse Norm NEN-EN 1561 | | σ_b voor afzonder- lijke proefstaaf | richtwaarden voor σ_b in gietstuk | |
|----------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------|
| symbool | nummer | (MPa) | wanddikte (mm) | σ_b (MPa) |
| EN-GJL-100 | EN-JL1010 | 100-200 | | |
| EN-GJL-150 | EN-JL1020 | 150-250 | 2,5-5 | 180 |
| | | | 5-10 | 155 |
| | | | 10-20 | 130 |
| | | | 20-40 | 110 |
| | | | 40-80 | 95 |
| | | | 80-150 | 80 |
| EN-GJL-200 | EN-JL1030 | 200-300 | 2,5-5 | 230 |
| | | | 5-10 | 205 |
| | | | 10-20 | 180 |
| | | | 20-40 | 155 |
| | | | 40-80 | 130 |
| | | | 80-150 | 115 |
| EN-GJL-250 | EN-JL1040 | 250-350 | 5-10 | 250 |
| | | | 10-20 | 225 |
| | | | 20-40 | 195 |
| | | | 40-80 | 170 |
| | | | 80-150 | 155 |
| EN-GJL-300 | EN-JL1050 | 300-400 | 10-20 | 270 |
| | | | 20-40 | 240 |
| | | | 40-80 | 210 |
| | | | 80-150 | 195 |
| EN-GJL-350 | EN-JL1060 | 350-450 | 10-20 | 315 |
| | | | 20-40 | 280 |
| | | | 40-80 | 250 |
| | | | 80-150 | 225 |

Noot: Genormaliseerd zijn de te bereiken mechanische eigenschappen. De chemische samenstelling dient door de gieterij zodanig gekozen te worden dat het geproduceerde gietijzer voldoet aan de genoemde richtwaarden. De gietijzersoorten bovenaan zullen overwegend ferritisch zijn, die onderaan overwegend perlitisch.

Bij een zeer grote afkoelsnelheid en een geschikte samenstelling kan alle grafiet gebonden worden tot cementiet: men verkrijgt wit gietijzer. Wit gietijzer kan men ontkolend gloeien in een oxyderende atmosfeer bij temperaturen van 950 tot 1000 °C. De koolstof wordt aan het oppervlak van het gietstuk geoxydeerd totdat praktisch zuiver staal overblijft: men spreekt van wit smeedbaar gietijzer of frisijzer. Voor deze behandeling mogen de wanddikten niet groter zijn dan 5 mm, omdat koolstof door diffusie naar het oppervlak dient te gaan en bij grotere wanddikten de diffusietijden onaanvaardbaar lang worden. Wordt de gloeiing uitgevoerd in een

neutrale atmosfeer, dan ontleedt de cementiet in ijzer en grafiet dat in nesten wordt afgezet: het zogenaamde temperijzer.

Vraag 5.3 *Waarom is gietijzer in het algemeen niet lasbaar?*

Vraag 5.4 *Schat op grond van het bovenstaande de samenstelling van frisijzer.*

Frisijzer is lasbaar, maar kan alleen worden gebruikt in kleine dunwandige producten. De verbindingslugs van buizen voor fietsframes zijn gemaakt van frisijzer, dat dus bijna in zijn geheel uit ferriet bestaat. Temperijzer werd in de automobiel-industrie veel toegepast voor kleine onderdelen in de stuurinrichting, pedalen, nokkenassen en tandwielen. Recentelijk is het in veel toepassingen verdrongen door nodulair gietijzer (zie §4.2.4).

Het vormmateriaal waarin gietijzer gegoten wordt, moet tegen de hoge temperaturen van het vloeibare gietijzer bestand zijn. Metalen vormen komen daarom meestal niet in aanmerking voor het gieten van gietijzer. Het vormmateriaal voor gietijzer is meestal vormzand. Ook keramische vormen (het laatste bijvoorbeeld bij het verloren-was-gieten) worden gebruikt. Bij massafabricage moet dus aan de productie van de zandvormen grote aandacht worden besteed. Bij de voorbereiding van deze massafabricage moet de ontwerper in zo vroeg mogelijk stadium in overleg treden met de gieterijtechnici. Dit laatste geldt niet uitsluitend bij de voorbereiding van massafabricage van *gietijzeren* producten, maar bij de voorbereiding van elk in grote aantallen te gieten produkt van *n'importe* welke gietlegering.

5.2.2.2. Gegoten aluminiumlegeringen

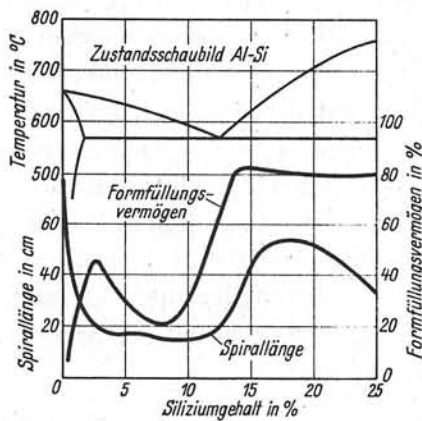
Gietstukken van aluminiumgietlegeringen worden gegoten in zand, coquilles of spuitgietvormen. Gietlegeringen werden oorspronkelijk vaak alleen gekozen op grond van hun goede gietbaarheid. Door de verbeterde giettechnieken tellen de eigenschappen van het materiaal in het gerede produkt nu meer mee bij de materiaalkeuze (Ref.10).

Voor gietlegeringen is vaak een klein stoltraject gewenst om kristalsegregatie te beperken. Daarom zijn de Al-gietlegeringen primair afgeleid van de eutectische AlSi-legeringen (zie Figuur 4.40), of blijft men qua samenstelling dicht bij zuiver aluminium (de meeste GAlMg-legeringen bevatten niet meer dan 5 gew% Mg, zie Figuur 4.38). Toevoeging van silicium beperkt ook de optredende slink (zie Tabel 5.4). Ter beheersing van de korrelgrootte na stolling worden kleine toevoegingen gebruikt (het veredelen met Na in GAlSi-legeringen, zie §4.3.2.2, en toevoeging van Ti of Zr in andere Al-legeringen).

Tabel 5.4. Slink in GAlSi-legeringen.

| Si-gehalte (gew%) | slink (vol%) |
|-------------------|--------------|
| 0 | 6,5 |
| 12 | 3 |
| 25 | 0 |

De stollingswijze van een legering hangt samen met de afkoelsnelheid en de samenstelling (zie §5.2.1). De grootte van het stoltraject hangt uiteraard samen met de samenstelling en kan voor binaire legeringen worden afgelezen in het toestandsdiagram. Uit veel toestandsdiagrammen van binaire legeringen blijkt, dat het stoltraject bij de samenstelling van de maximale oplosbaarheid een maximum bereikt (zie bijvoorbeeld Figuur 4.38 en 4.40). Het is te verwachten, dat het vormvullend vermogen, dat is de kleinste wanddikte die nog homogeen te vullen is, bij de samenstelling van de maximale oplosbaarheid een minimum zal bereiken. Daarom hebben gietlegeringen bij voorkeur *niet* deze samenstelling (zie Figuur 5.9). Wanneer de stolling van een legering of van een zuiver metaal vooral bepaald wordt door een grote afkoelsnelheid (grote onderkoeling, veel kiemvorming en weinig dendrietten), dan wordt de slink voor het grootste deel verzameld tot macroslink. Hiervoor zijn vaak grote opkomers nodig (zie ook §5.2.2.3). Indien de stolling van een legering vooral bepaald wordt door de groeisnelheid van de kiemen (dit zal veelal leiden tot dendrietvorming), dan treedt tussen de dendrietten microslink op, die kan leiden tot microporositeit. De legeringen met een groot aandeel dendrietten in de gestolde kristallieten, en dat zijn in het algemeen de legeringen met een groot stoltraject, kunnen dus ook veel microporositeit vertonen.



Figuur 5.9. Vloeivermogen van AlSi-legeringen als functie van het siliciumgehalte (Ref. 14).

Uit het voorgaande volgt, dat in een gietstuk met uiteenlopende wanddikten (dit komt overeen met verschillen in afkoelsnelheid en dus in stollingswijze) de resulterende eigenschappen van plaats tot plaats verschillen. Nog tijdens de stolling kunnen warmscheuren optreden. Warmscheuren ontstaan doordat als gevolg van de krimp van het reeds gestolde gedeelte van het gietstuk in de nog gedeeltelijk vloeibare delen van het gietstuk de spanningen zo hoog oplopen, dat scheuren ontstaan. De gevoeligheid voor warmscheuren neemt daardoor toe met de grootte van het stoltraject en wordt in binaire legeringen dus kleiner voor samenstellingen dichter bij de eutectische samenstelling of dichter bij het basismetaal.

Op grond van het voorgaande kunnen de verschillen in gietbaarheid, zoals vermeld voor de genoemde GAl-legeringen in Tabel 4.30, goeddeels verklaard worden. De gietbaarheid van de GAlCu-legeringen is veel slechter dan de gietbaarheid van de GAlSi-legeringen. De GAl-legeringen met een goede gietbaarheid worden vooral gebruikt als spuitgietlegeringen en die met een verminderde gietbaarheid voor het gieten in klei-gebonden vormzand.

Vraag 5.5 *Een gietstuk heeft een dikke en een dunne wand; is in de dikke wand de korrelgrootte na stolling groter of kleiner dan in de dunne wand?*

Vraag 5.6 *Heeft de dikke wand een hogere of een lagere waarde voor de 0,2%-rekgrens dan de dunne wand?*

Vraag 5.7 *Waarom is gieten in nat zand gunstiger voor de mechanische eigenschappen dan gieten in droog zand?* *afkoelsnelheid v.*

De wanddikte bij gieten in zandvormen moet minstens 3 mm bedragen, maar bij voorkeur 5 mm. In metalen coquilles verkrijgt men hoge afkoelsnelheden, zodat de stolling vooral door kiemvorming bepaald is. De korrelgrootte is klein en het oppervlak na stolling is glad. Bij spuitgieten (zie Figuur 5.1) wordt de vloeibare legering onder druk in de vorm gespoten. Bij coquillegieten stroomt de vloeibare legering door de zwaartekracht in de vorm. Bij spuitgieten zijn de afkoelsnelheden het grootst. De coquilles zijn vaak van gietijzer en de matrijzen voor spuitgieten zijn veelal vervaardigd uit staal. De massa bij coquillegieten bedraagt maximaal circa 50 kg en bij spuitgieten circa 250 kg. Spuitgieten is meestal rendabel bij een seriegrootte van minimaal 5000 stuks. Een overzicht van de verschillende GAl-legeringen geeft Tabel 4.29. De GAlMg-legeringen kenmerken zich door een mooi blank uiterlijk en, mits homogeen, door een uitstekende corrosievastheid. Zij kunnen bovendien goed gepolijst worden.

Vraag 5.8 *Waarom zijn bij spuitgieten opkomers overbodig?*

5.2.2.3. Gegoten koperlegeringen

Koperlegeringen worden gegoten in zand, coquilles of spuitgietmatrijzen. De levensduur van die spuitgietmatrijzen hangt uiteraard af van de smelttemperatuur van de verwerkte legeringen (zie Tabel 5.5).

Tabel 5.5. Smelttemperatuur en levensduur van spuitgietmatrijzen.

| <i>gietlegeringen van</i> | <i>smeltpunt (circa; °C)</i> | <i>levensduur (aantal gietingen)</i> | <i>indicatie van de maximale massa (kg)</i> |
|---------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| zink | 400 | 10^6 | 150 |
| aluminium | 650 | $8 \cdot 10^4 - 10 \cdot 10^4$ | 250 |
| magnesium | 650 | $1 \cdot 10^4 - 10 \cdot 10^4$ | 80 |
| koper | 900 | $0,5 \cdot 10^4 - 10 \cdot 10^4$ | 50 |

De gietmessingsoorten bevatten circa 36 tot 40 gew% Zn en bestrijken een gebied in het toestandsdiagram Cu-Zn waar het stoltraject erg klein is. Wegens de harde en brose β' -fase past men gewoonlijk geen hoger Zn-gehalte toe dan 40 gew%.

De gietbronzen bevatten 10 tot 20 gew% Sn. Zoals reeds vermeld is (zie §4.3.3.4) bevatten de gietbronzen de harde δ -fase, en wel meer naarmate het tingehalte hoger is. De goede weerstand tegen slijtage is een belangrijk argument voor de toepassing van brons als lagermateriaal (zie §4.3.3.4). Deze weerstand berust op de aanwezigheid van de δ -fase. De gietbronzen hebben een samenstelling in het gebied van het toestandsdiagram Cu-Sn waar het stoltraject groot is. Kristalsegregatie is dan ook onvermijdelijk bij het gieten van brons. Deze kristalsegregatie bevordert de aanwezigheid van δ -fase ook bij lage gehalten aan Sn.

De kopergietlegeringen kunnen in twee groepen verdeeld worden. Een groep met korte tot zeer korte stoltrajecten (bijvoorbeeld zuiver koper en de al genoemde gietmessingsoorten), en een groep met grote stoltrajecten (bijvoorbeeld de genoemde gietbronzen). De legeringen uit de eerste groep vereisen in het algemeen grote opkomers omdat de slink voor koperlegeringen vrij groot is (varieert tussen 4,5 en 6 %; gietijzer vertoont < 1% slink). Daarom is de materiaalbenutting per eenheid gegoten legering vrij laag. Voor gietstukken met ingewikkelde vormen moeten speciale maatregelen getroffen worden om de slink inderdaad in de opkomers te verzamelen. De giettechnieken voor deze groep zijn daardoor duur in vergelijking met die uit de tweede groep. Anderzijds is het vaak mogelijk om met de legeringen uit de eerste groep gietstukken te vervaardigen, praktisch vrij van porositeit en in hoge mate uniform van eigenschappen.

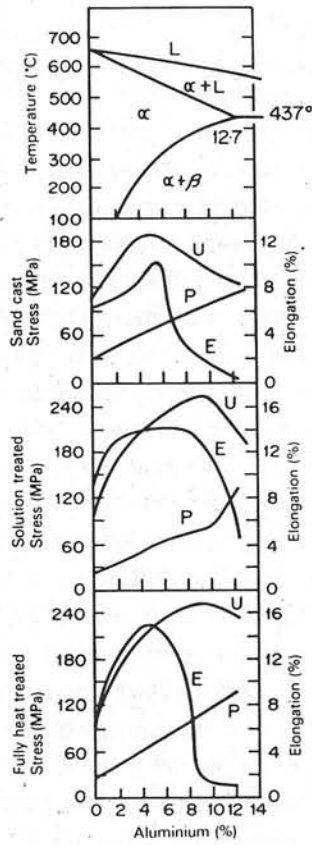
De gietstukken van legeringen uit de tweede groep bevatten meestal verdeelde microporositeiten. Het is heel moeilijk hiermee gietstukken te verkrijgen compleet vrij van slinkholten in enigerlei vorm. De ervaring wijst echter uit, dat deze porositeiten bij voldoende wanddikte niet desastreus hoeven te zijn, waardoor in het

algemeen kleinere opkomers toegepast kunnen worden, zodat de materiaalbenutting toeneemt. Op grond hiervan wordt de gietbaarheid van gietbrons toch als gunstig beoordeeld en hoeft de aanwezigheid van porositeiten de toepassing in hydraulische en pneumatische componenten niet in de weg te staan. Controle op lekken is echter dan altijd vereist!

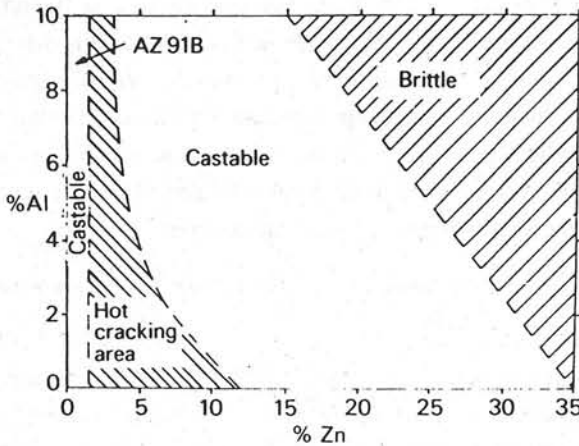
5.2.2.4. Gegoten magnesiumlegeringen

Magnesiumgietlegeringen worden vooral gegoten in zand, maar ook wel in coquilles en in spuitgietmatrijzen. De gekozen giettechniek hangt vooral af van het aantal te vervaardigen produkten. Bij het gieten in zand voegt men aan het zand inhibitoren toe om reacties tussen de vloeibare magnesiumlegeringen en het zand tegen te gaan. Wegens de grote kubieke uitzettingscoëfficiënt van magnesiumlegeringen heeft men grote opkomers en aansnijdingen nodig. De volumeverhouding tussen de gegoten magnesiumlegering en het eigenlijke produkt is circa 4 : 1. Bij het spuitgieten is de geringe warmtecapaciteit eerder een voordeel dan een nadeel. De relatief geringe hoeveelheid warmte vrijkomend bij stollen en afkoelen van deze legeringen wordt snel afgevoerd, zodat spuitgieten van Mg-gietlegeringen sneller gaat dan van aluminium- en zinklegeringen, ongeveer in de verhouding 1,9 : 1,6 : 1 respectievelijk voor magnesium-, aluminium- en zinklegeringen.

Het toestandsdiagram Mg-Al (Figuur 4.58) is de basis voor de meest toegepaste magnesiumlegeringen. Figuur 5.10 geeft de eigenschappen van GMgAl-legeringen in samenhang met dit toestandsdiagram. Merk op dat in Figuur 5.10 α overeenkomt met δ uit Figuur 4.58 en β overeenkomt met γ uit Figuur 4.58. Voor $Mg_{17}Al_{12}$ wordt ook wel geschreven Mg_3Al_2 . In de gegoten toestand kan de β -fase ($Mg_{17}Al_{12}$) voorkomen vanaf een gehalte aan aluminium van 2 gew%. Gloeien rond 420 °C leidt tot oplosharding en een verbetering van de mechanische eigenschappen, terwijl verouderen bij 150 tot 250 °C een additionele verbetering van de mechanische eigenschappen geeft. De maximale gebruikstemperatuur van GMg-legeringen bedraagt in het algemeen 175 °C. GMgAl-legeringen zijn vatbaar voor microporositeit. De toevoeging van zink aan de GMgAl-legeringen leidt tot een verbetering van de sterkte, maar de vatbaarheid voor warmescheuren, speciaal bij spuitgieten, neemt toe. Bovendien kunnen de GMgAlZn-legeringen microslink vertonen. Een recente ontwikkeling is het toevoegen van zink in relatief grote gehalten (zie Figuur 5.11). Deze legeringen zijn vrij goed te spuitgieten. Een voorbeeld is GMgAl8Zn8. De korrelgrootte van GMgAl-legeringen wordt beheerst door het toevoegen van kleine hoeveelheden hexachloorethaan aan de smelt.



Figuur 5.10. Eigenschappen van MgAl-legeringen in relatie tot het toestandsdiagram (Ref. 12). U = breukspanning; E = rek; P = 0,2%-rekgrens.



Figuur 5.11. Mogelijke samenstellingen van MgAlZn-legeringen voor spuitgieten (Ref. 12).

Vraag 5.9 *Verklaar het optreden van de β -fase in een gegoten MgAl2-legering.*

5.2.3. Kunststoffen

Voor kunststoffen verloopt de route van grondstof naar eindproduct in verscheidene stappen, waarvan minstens één de vloeibare toestand is. Kunststoffen worden meestal in vaste vorm geleverd: thermoplasten in korrels (granules) of poeders, thermoharders als perspoeders of persmassa's en rubbers als grote brokken. Soms worden de uitgangsstoffen voor kunststoffen in vloeibare vorm geleverd: thermoplasten bij wijze van uitzondering als vloeibaar monomeer, thermoharders als giet- of impregneerhars. De vormgeving is dan betrekkelijk eenvoudig; het betreft laag-visceuze vloeistoffen die voor transport en vormgeving geen grote krachten vereisen.

De vaste kunststoffen moeten door verwarming vloeibaar gemaakt worden. Vloeibaar wordt de kunststof in de vorm gebracht, waarna vormfixatie plaatsvindt door afkoeling (bij thermoplasten) of door chemische reactie (uitharden van thermoharders of het vulcaniseren van rubbers). Het schema 'vast-vloeibaar-vast' is minder eenvoudig dan op het eerste gezicht lijkt. Allereerst speelt de lage warmtegeleiding van polymeren een rol, waardoor zowel het verwarmen als het afkoelen langzame processen zijn. Bovendien ontstaan gemakkelijk temperatuurverschillen in het produkt, resulterend in krimpverschillen. Deze krimpverschillen kunnen aanleiding geven tot dichtheidsverschillen en inwendige spanningen. Verder vormen de stromingseigenschappen van polymeren een probleem. Ze hebben een hoge viscositeit (circa 1.000.000 keer die van water), waardoor hoge drukken nodig zijn om in een verwerkingsmachine de plastische massa met een aanvaardbare snelheid door de transportkanalen en in de matrijzen te laten stromen. Drukniveau's van 50 tot 150 MPa (500 tot 1500 bar) zijn normaal, zodat de machines zwaar moeten worden uitgevoerd, wat kostenverhogend is. Vloeibare polymeren zijn bovendien niet puur visceus, maar visco-elastisch: tijdens de stroming worden elastische spanningen opgewekt. Deze spanningen verdwijnen niet altijd bij (meestal snel) afkoelen, ze worden ingevroren en beïnvloeden de structuur en eigenschappen van het eindproduct. De elastische spanningen zijn meestal een gevolg van oriëntatie van de polymeerketens in de stromingsrichting. Snel afkoelen heeft dus ingevroren oriëntaties tot gevolg met als resultaat een anisotroop produkt.

Vraag 5.10 *Geef twee structureffecten als gevolg van temperatuurverschillen tijdens de afkoeling.*

Het gevormde produkt kan direkt het eindproduct zijn, maar ook een halffabriekaat. Een voorbeeld van het eerste is het spuitgieten of het extruderen en 'on-line' blazen van flessen. Een voorbeeld van het tweede is de warmvervorming van een geëxtrudeerde plaat tot een lichtkoepel of een tandwiel gefreesd uit een geperst blok.

Een kunststof is vaak een 'compound': het polymeer wordt gemengd met een aantal niet-polymere stoffen. Voorbeelden van toevoegingen zijn: vulmiddelen, stabilisatoren, weekmakers, kleurstoffen, versterkende vezels en brandwerende stoffen. Het innemen kan in eerste instantie droog in het polymeerpoeder of -granulaat. Als de grondstoffen te grofkorrelig zijn, dan worden de toevoegingen niet gelijkmatig verdeeld. De deeltjes moeten dan eerst verkleind worden. Een homogene verdeling wordt het best bereikt door te mengen in de vloeibare toestand. Hiervoor gebruikt men drie typen machines: de mengwals, de gesloten menger (kneeder) en de mengextruder.

Veel fabrikanten van kunststofartikelen maken niet zelf een compound, maar kopen kant-en-klare compounds van de chemische industrie. De grote verwerkers maken in het algemeen wel zelf hun compounds. Behalve een economisch voordeel geeft dit de mogelijkheid om aan de kunststof juist die eigenschappen te geven, die een optimum vormen tussen verwerkbaarheid en gewenste eigenschappen van het eindproduct.

5.2.3.1. De structuur van vloeibaar verwerkte thermoplasten

Belangrijke processen om thermoplasten vloeibaar te verwerken zijn kalanderen, extruderen en sputgieten. De stromende polymeersmelt is hoog-visceus en visco-elastisch. In de stroming worden de lange ketenmoleculen gericht in de stromingsrichting. Na de vormgeving, bijvoorbeeld in de matrijs van een spuitgietmachine, komt de stroming tot stilstand. De polymeerketens hebben dan de neiging naar de min of meer bolvormige kluwentoestand terug te keren, omdat deze uit entropie-oogpunt gunstiger is. Daar is echter tijd voor nodig (de relaxatietijd), die snel langer wordt als de temperatuur daalt. Daarom wordt bij de hier besproken verwerkingsprocessen de oriëntatie meestal ingevroren.

Kalanderen

De oriëntatie van de ketens wordt hier ingevroren door de hoge afkoelsnelheid op de koelrollen. Deze oriëntatie is uiteraard gericht in de lengte van de gekalanderde plaat of folie. Hierdoor ontstaat een anisotropie in de eigenschappen: het kalandereffect. Bovendien leidt de ingevroren oriëntatie bij verwarming tot krimp in de lengterichting. Dit is hinderlijk, bijvoorbeeld bij lassen en vacuümvormen. Men kan de anisotropie grotendeels opheffen door de plaat na de laatste rol weer te verwarmen (bijvoorbeeld met infraroodstraling) en met een aantal klemmen aan de zijkant van de plaat deze in de breedterichting te rekken. Men spreekt dan van bi-axiaal verstrekte plaat.

Extruderen

Ook hierbij worden de polymeerketens georiënteerd in de lengte van het product. Oriëntatie is ook te vertalen in een elastische spanning: de neiging tot terugveren

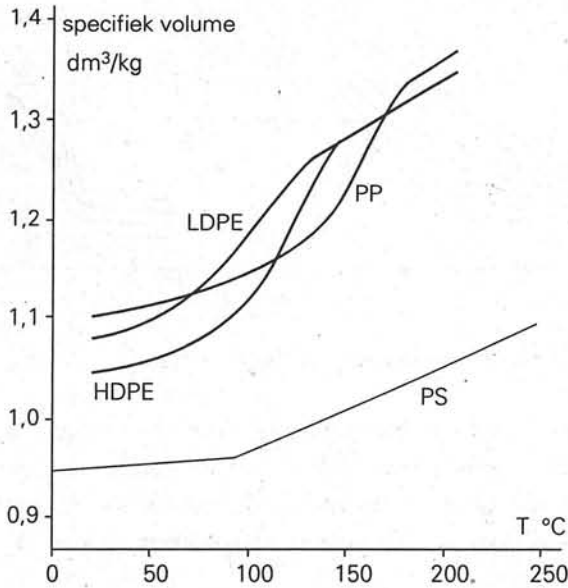
naar de kluwentoestand vertegenwoordigt een hoeveelheid elasticiteit. Door de elastische spanning treedt bij het verlaten van de vormopening opzwellen van het extrudaat op, meestal 'die swell' genoemd. Het extrudaat, komend uit van de extrusiematrijs, gaat over in een spanningsloze toestand door contractie in de lengte en uitzetting in de dikte. Met 'die swell' moet men rekening houden bij de dimensionering van de spuitmond, omdat na het verlaten van de spuitmond de doorsnede verandert: een ronde doorsnede wordt groter en een niet-ronde doorsnede wordt vervormd.

'Die swell'-problemen worden vaak omzeild door achter de spuitmond een calibratiebuis te plaatsen. Hierin wordt het extrudaat tegen een met water gekoelde wand gedrukt. De buis is zo lang, dat bij het verlaten ervan de temperatuur van het extrudaat beneden de verwekingstemperatuur ligt. Hierdoor kunnen de elastische spanningen zich niet ontspannen en treedt geen 'die swell' op. Deze methode heeft natuurlijk als nadeel, dat een gedeelte van de door de stroming geïntroduceerde oriëntatie wordt ingevroren. Smeltbreuk is een ander gevolg van het elastisch gedrag van de smelt. Bij hoge extrusiesnelheden kunnen de elastische vervormingen zo groot worden, dat ze plaatselijk tot breuk leiden en aanleiding geven tot een vervormd produkt of minstens tot een ruw oppervlak.

Spuitgieten

Hierbij bereikt de polymeersmelt hoge snelheden, die zorgen voor een sterke oriëntatie van de ketens. In de afgesloten, gekoelde matrijs is het niet mogelijk de elastische spanningen te ontlaten: een spuitgietprodukt is dus nooit vrij van spanningen en van oriëntaties. Bovendien is de mate van oriëntatie over de doorsnede van het produkt niet constant. Aan het oppervlak zijn de ketens het sterkst georiënteerd, omdat de smelt aan de koude matrijswand snel wordt ingevroren. Door de lage warmtegeleiding van polymeren koelt het meer naar het midden gelegen gedeelte van het produkt veel langzamer af: het blijft nog enige tijd vloeibaar. De spanningen hebben daar de tijd om te relaxeren en in dit gedeelte zijn de ketens veel minder georiënteerd

De afkoeling in de afgesloten matrijs geeft nog een ander probleem: krimp, want kunststoffen hebben van alle materialen de grootste uitzettingscoëfficiënt. De grootte van de krimp is af te leiden uit de relatie tussen temperatuur en volume voor de betreffende kunststof (zie Figuur 5.12). Voor amorfe polymeren treedt gemiddeld een verschil van 10% op tussen het volume bij de verwerkingstemperatuur en dat bij kamertemperatuur. Voor semi-kristallijne polymeren, met een volumesprong bij het smeltpunt, kan dit verschil zelfs 20 tot 25% bedragen. Ter compensatie van de krimp laat men het afkoelen onder druk plaatsvinden: 'nadrukken'. De stollende smelt wordt gecompriëerd, er is dus meer materiaal per volume-eenheid. Daardoor kan de bij temperatuurverlaging optredende krimp grotendeels opgevangen worden. De competitie tussen thermische krimp en compressibiliteit is af te lezen in p, V, T -

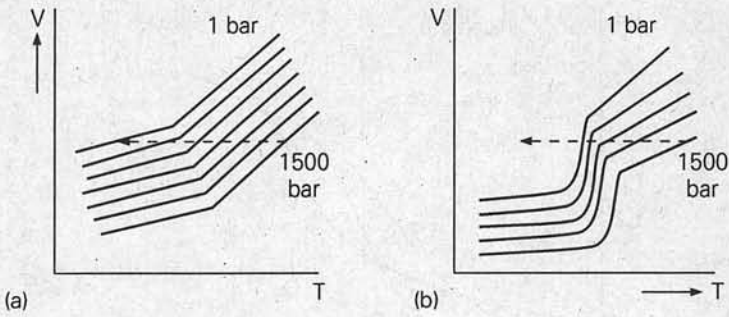


Figuur 5.12. Relatie tussen volume en temperatuur (Ref. 6).

diagrammen voor het verband tussen volume en temperatuur met de druk als parameter. Figuur 5.13 geeft de schematische verbanden voor een amorf en een semi-kristallijn polymeer. Bij amorphe polymeren is het vaak wel mogelijk de thermische krimp door drukverhoging op te vangen: komend van hoge temperatuur en druk (1500 bar) kan men het volume constant houden tot lage temperatuur en druk (1 bar). Dit wordt aangegeven in Figuur 5.13a door de horizontale stippellijn. Bij semi-kristallijne polymeren (Figuur 5.13b) is dat niet mogelijk: bij het passeren van het smeltpunt treedt een te grote volumeverkleining op. Het gevolg is, dat nog een hoeveelheid smelt in de matrijs wordt geperst; omdat de smelt in de matrijs al een stuk is afgekoeld, zal de nieuw aangevoerde smelt zich hieraan slecht hechten en ontstaat een zwakke plek. Het spuitgieten van semi-kristallijne polymeren levert dus in het algemeen een produkt van mindere kwaliteit dan spuitgieten van amorphe polymeren.

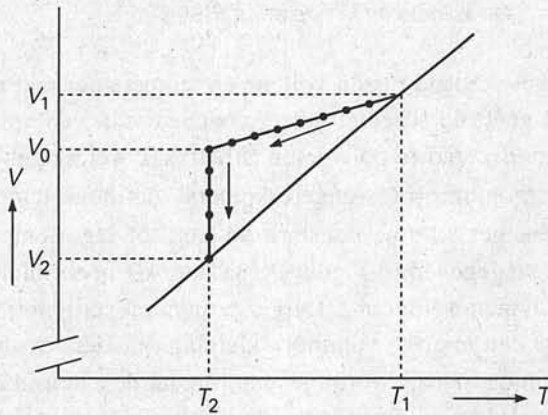
De totale krimp tijdens de productie is niet overal in het produkt gelijk: er zijn krimpverschillen, afhankelijk van de plaats in het produkt. Het eenvoudigst is dit te zien aan een massief blok: aan de buitenkant stolt dit snel door het contact met de matrijswand, de daardoor gevormde harde schaal verhindert de daarbinnen gelegen massa verder te krimpen. De dichtheid neemt van buiten naar binnen af, er ontstaan inwendige spanningen die kunnen leiden tot scheuren en holten.

Naast de krimp bij korte tijden is er ook nog een lange-termijn effect in de glas-toestand, de volumeretardatie (ook wel fysische veroudering genoemd), zie figuur 5.14. Bij snelle afkoeling zal bij T_1 een toestand ingevroren worden met een kleinere



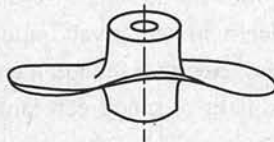
Figuur 5.13. p, V, T -diagrammen voor een amorf (a) en een semi-kristallijn polymeer (b).

dichtheid dan de evenwichtsdichtheid die alleen door zeer langzaam afkoelen bereikt kan worden. Bij de gebruikstemperatuur T_2 zal het volume langzaam afnemen naar de evenwichtstoestand. Dit komt doordat de ketendelen nog een geringe bewegingsvrijheid hebben waardoor ze zich kunnen herschikken. Er passen dan meer ketendelen in hetzelfde volume:



Figuur 5.14. Fysische veroudering.

De krimp kan ook nog anisotroop zijn als een gevolg van ketenoriëntaties. De krimp is in de oriëntatierichting groter dan er loodrecht op, zodat bijvoorbeeld een platte in het midden aangespoten schijf de neiging tot een zadelvlakvormige kromming zal vertonen ('warping', zie Figuur 5.15).



Figuur 5.15. Warping.

5.2.3.2. De structuur van vloeibaar verwerkte thermoharders

Sommige thermohardende polymeren kunnen verwerkt worden door gieten, zoals de polyester- en de epoxy-gietharsen. Gieten is een zeer eenvoudige vormgevingsmethode; de vloeistof (prepolymeer + harder) moet bij kamertemperatuur een zo lage viscositeit hebben dat de zwaartekracht de vorm kan vullen. Na het vullen moet de vernetting optreden. Soms wordt een katalysator toegevoegd om de reactie tussen prepolymeer en harder te initiëren en te versnellen. Altijd wordt bij de 'doorharding' warmte ontwikkeld, die door de slechte warmtegeleiding van polymeren slecht kan worden afgevoerd. Er bestaat gevaar, dat daardoor de temperatuur in het inwendige van het produkt zo hoog wordt, dat het materiaal gaat ontleden. Hierdoor ontstaan holten en treedt verbrossing op in het midden, terwijl de buitenkant nog gaaf is. Men moet hierom grote wanddikten bij voorkeur vermijden. Door keuze van harder en prepolymeer, de hoeveelheid toegevoegde harder en door dosering van de katalysator kan men de ontwikkelde warmte per tijdseenheid beïnvloeden.

Bij het doorharden treedt krimp op. De epoxy-gietharsen vertonen een kleinere krimp (1 - 6 vol%) dan de polyester-gietharsen (5 - 10 vol%). Men kan deze krimp verlagen door vulstoffen, zoals kwartsmeel, toe te voegen. Deze vulstoffen beïnvloeden ook de mechanische eigenschappen. Vooral polyesters bevatten meestal grote hoeveelheden vulstoffen ter verbetering van de mechanische eigenschappen als E-modulus en treksterkte. De vulstoffen zijn met name effectief in de vorm van vezels (glasvezels). De structuur van het uitgeharde polymeer wordt dan sterk bepaald door de vulstof: het polymeer dient eigenlijk slechts als bindmiddel voor de vezels.

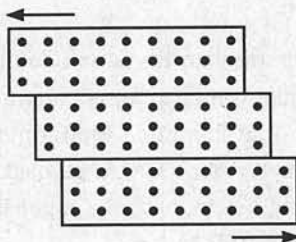
Het voordeel van gieten van thermoharders is, dat de uithardende kunststof nauwelijks stroomt. Hierdoor treedt nauwelijks ketenoriëntatie op, het produkt is nagenoeg isotroop. Dit is ook de reden, dat sommige thermoplasten gemaakt worden door monomeergieten. Platen en lenzen van PMMA, gemaakt door monomeergieten van methacrylaat hebben veel betere optische eigenschappen dan geëxtrudeerde platen en gespuitsgiete lenzen van PMMA.

5.3. Structuur en de verwerking via de vaste toestand

5.3.1. *Plastische vervorming van metalen en metaallegeringen*

5.3.1.1. **Glijrichtingen, glijvlakken, glijsystemen en versteving**

Vervorming via de vaste toestand impliceert het aanbrengen van blijvende en dus plastische vervormingen. Bij metalen en metaallegeringen is plastische deformatie mogelijk zonder dat breuk optreedt. De plastische deformatie treedt pas op, indien de spanning boven de elasticiteitsgrens gestegen is. De plastische deformatie kan zeer groot zijn, bijvoorbeeld bij dieptrekken of bij warmsmeden. Toch blijft de ordening van de atomen, dat is het kristalrooster dat hoort bij de temperatuur waarbij de plastische deformatie wordt uitgevoerd, bestaan. De voor de deformatie noodzakelijke materiaalverplaatsing wordt geëffectueerd door verplaatsing van gedeelten van kristallieten langs roostervakken (zie Figuur 5.16). Zo'n roostervlak wordt *glijvlak* genoemd. De afschuivingsrichting heet *glijrichting*. Voor de belangrijke drie kristalroosters zijn de glijrichtingen steeds *dichtst gepakte* richtingen. Elk glijvlak bevat de glijrichting en is in het algemeen en bij voorkeur een *dichtst gepakt* vlak. Toegepast op de drie belangrijke kristalroosters geeft dit het schema in Tabel 5.6.



Figuur 5.16. Schema van de verschuiving van de roostervlakken bij plastische vervorming.

Op grond van het voorgaande kan al gezegd worden, dat kristallieten met fcc- en bcc-kristalroosters goede mogelijkheden tot afschuiving hebben, terwijl de kristallieten met een hcp-kristalrooster weinig mogelijkheden tot afschuiving hebben. Het aantal werkzame glijsystemen neemt toe met de temperatuur. Temperatuurverhoging heeft dus een gunstig effect op de mogelijkheden tot afschuiving. De aanwezigheid van dislocaties vergemakkelijkt afschuiving. Door de passage van een dislocatie schuift de kristalliet atoomrij voor atoomrij af, wat veel gemakkelijker gaat dan de afschuiving van een geheel gedeelte. De dislocatie is de grens tussen het al en nog

Tabel 5.6. Glijsystemen in drie belangrijke kristalroosters.

| kristalrooster | glijsystemen |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| kvg/fcc | glijrichtingen zijn de drie dichtstgepakte richtingen, ergo de diagonalen van de zijvlakken: 6 stuks door deze richtingen gaan twee dichtstgepakte vlakken er zijn dus $2 \times 6 = 12$ glijsystemen |
| krb/bcc | glijrichtingen zijn de dichtstgepakte richtingen, ergo de kubusdiagonalen: 4 stuks door deze richtingen gaan drie vlakken met hoge pakking die elk als glijvlak kunnen fungeren er zijn dus $3 \times 4 = 12$ glijsystemen |
| hdp/hcp | glijrichtingen zijn de dichtstgepakte richtingen, ergo de drie richtingen in het basisvlak hierdoor gaat slechts een dichtstgepakt vlak er zijn dus $3 \times 1 = 3$ glijsystemen |

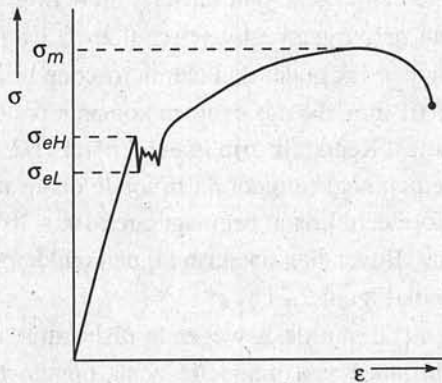
niet afgeschoven gedeelte van de kristalliet (zie Figuur 2.21). Het glijvlak van de randdislocatie is volledig bepaald: dislocatielijn en burgersvector liggen in één vlak. Het glijvlak van de schroefdislocatie is onbepaald: de schroefdislocatie kan zich op verschillende vlakken bewegen. Randdislocaties bewegen in de richting van de aangelegde schuifspanning en schroefdislocaties loodrecht daarop. Een dislocatie kan eindigen aan de rand van het kristal. Ook is het mogelijk dat twee dislocaties samenkomen, waarbij ze elkaars roosterfout opheffen.

Doorkruist een dislocatie een kristal, dan ontstaat op het oppervlak van het kristal een trede ter grootte van de burgersvector (circa 0,2 - 0,3 nm). Een gedeformeerd kristal vertoont op het oppervlak onder de lichtmicroscop glijlijnen, dat zijn treden ter grootte van 0,001 - 0,01 mm, die dus overeen komen met het doorlopen van circa 5000 tot 50.000 dislocaties. Kennelijk zijn in een kristal vele duizenden dislocaties aanwezig. De dislocatiedichtheid (uitgedrukt in totale dislocatielengte per volume-eenheid) in een ongedeformeerd kristal bedraagt circa $10^6 - 10^8 \text{ cm/cm}^3$, ontstaan bij de stolling van het kristal. Bovendien ontstaan bij de kouddeformatie van een kristal nieuwe dislocaties (zie ook Figuur 2.21).

Versteviging is de interactie van de bewegende dislocaties met nieuw gevormde dislocaties en andere bronnen van interactie zoals opgeloste atomen en kristalgrenzen (zie §2.3.3). Bij kouddeformatie treedt versteviging op. De deformatie in een kristal zal beginnen met het lopen van bestaande dislocaties en de creatie van nieuwe dislocaties op de ten opzichte van de aangelegde schuifspanning gunstig georiënteerde glijvlakken. In het begin zijn er weinig barrières voor de dislocatiebeweging. Naarmate de vervorming toeneemt, bereiken steeds minder dislocaties het oppervlak van het kristal en blijven steeds meer dislocaties in het kristal, waar ze stuiten op toevallig aanwezige barrières, zoals andere dislocaties of opgeloste atomen. Deze zich voor een obstakel ophopende dislocaties stoten elkaar af, waar-

door een verdere afschuiving op het betreffende glijvlak verhinderd wordt. Bij een verdere vervorming worden andere minder gunstig gelegen glijsystemen geactiveerd. Uiteindelijk neemt de versterking snel toe en wordt een verdere vervorming steeds moeilijker. Bij een verdere verhoging van de aangelegde schuifspanning worden de schroefdislocaties los gemaakt van hun barrières: zij gaan glijden op andere minder gunstig gelegen glijvlakken.

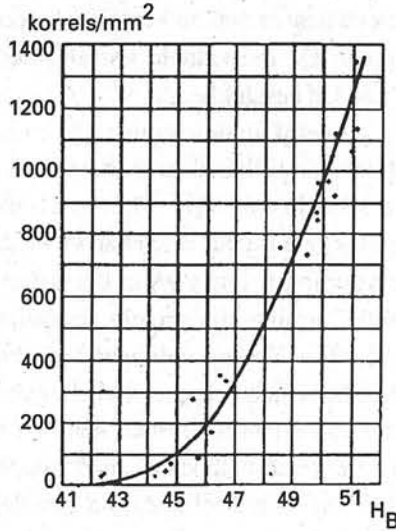
Elke bron van inwendige spanningen is een hindernis voor het lopen van dislocaties. Rond vreemde atomen, interstitieel of substitutioneel, met afmetingen verschillend van die van het atoom van het basismetaleel zijn altijd spanningen aanwezig. Staal bevat als interstitiële atomen koolstof en stikstof. Doordat in de ferriet de ruimten bij de dislocaties plaatselijk groter zijn dan elders in het kristal, zullen de interstitiële atomen naar de dislocaties kunnen diffunderen, waardoor deze dislocaties in hun beweging beperkt worden: de dislocaties worden gepind door de koolstof- en de stikstofatomen. Voor de voortgaande vervorming is een hogere spanning nodig (de bovenste vloeigrens bij het vloeien σ_{eH} van staal, zie Figuur 5.17). Wordt deze vloeigrens bereikt, dan worden de gepinde dislocaties losgetrokken en daalt de vloeispanning totdat door de voortgaande versterking weer voldoende dislocaties gepind worden (onderste vloeigrens σ_{eL}). De in fasen losgerukte dislocaties veroorzaken bij het doorlopen van het kristal glijlijnen (Lüdersbanden) op het staal. Door een aangepaste thermomechanische behandeling kan de vorming van Lüdersbanden op staalplaat voor kouddeformatie voorkomen worden.



Figuur 5.17. Trekkromme voor laaggelegeerd constructiestaal.

Metalen en metaallegeringen zijn opgebouwd uit vele kristallieten; zij zijn *polykristallijn*. De aan elkaar grenzende korrels sluiten niet mooi op elkaar aan en de korrelgrenzen zijn dus hindernissen voor dislocatiebeweging. In een fijnkorrelig metaal zijn dus meer hindernissen dan in een grofkorrelig stuk. Dit verschijnsel wordt geformuleerd in de Hall-Petch relatie (zie §2.3.3). Een voorbeeld van het effect van korrelgrootte geeft Figuur 5.18. Bij kouddeformatie eist men van de

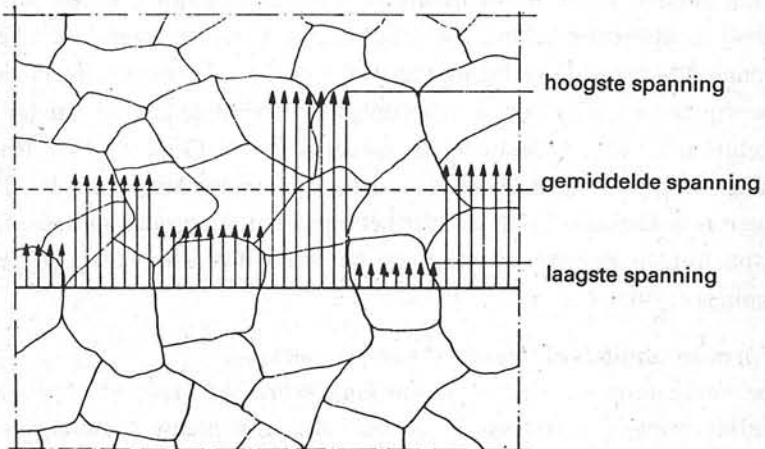
metaallegering een glad oppervlak en een gedrag tijdens de vervorming dat niet van de richting afhankelijk is. Hiervoor is een kleine korrelgrootte gunstig.



Figuur 5.18. Het verband tussen de hardheid en de korrelgrootte van koper.

Vraag 5.11 *Is een kleine korrelgrootte gunstig voor de vervormingskrachten tijdens de deformatie?*

In een polykristallijn metaal verschillen de spanningen van korrel tot korrel. In §2.3.2. is aannemelijk gemaakt dat de E-modulus afhankelijk is van de atomaire afstanden. Deze zijn afhankelijk van de richting waarin men kijkt in het kristalrooster. Bijgevolg is de E-modulus afhankelijk van de richting in het kristalrooster, of van de kristaloriëntatie. Daarom zullen de spanningen per korrel variëren (zie Figuur 5.19). De plastische deformatie begint daar waar de elasticiteitsgrens wordt



Figuur 5.19. Spanningsverdeling in een polykristallijn metaal.

overschreden en dus niet overal gelijktijdig in een polykristallijn metaal. Door de samenhang van de korrels via de korrelgrenzen wordt de vormverandering van een individuele korrel ook opgelegd aan de andere korrels. Hierdoor ontstaat textuur en anisotropie van eigenschappen. De individuele korrel moet natuurlijk over voldoende vervormingsmogelijkheden beschikken.

Plastische deformatie is ook mogelijk door vorming van tweelingen: kristallen die ten opzichte van een kristalvlak spiegelbeeldige atoomposities hebben. Tweelingen kunnen ook ontstaan bij rekristallisatie (zie §2.3.1). Door een schuifspanning evenwijdig aan een tweelingvlak (zie Figuur 2.13) kan de kristalliet omklappen naar een tweelingstand. Deze vervorming is blijvend: er heeft dus plastische deformatie plaatsgevonden. Voor tweelingvorming zijn grotere afschuifspanningen nodig dan voor afschuiving langs glijvlakken. Zolang voldoende afschuivingsmogelijkheden ter beschikking staan treedt in het algemeen geen tweelingvorming op. Bij metalen of metaallegeringen met hcp/hcp-kristalrooster komen dus vaak deformatietweelingen voor. Echter, ook in de krg/bcc-metalen of -metaallegeringen, zoals ongelegerd staal, vindt men wel deformatietweelingen, na een deformatie bij een lage temperatuur of na een zeer snelle deformatie.

5.3.1.2. Herstelgloeien en rekristallisatie na kouddeformatie

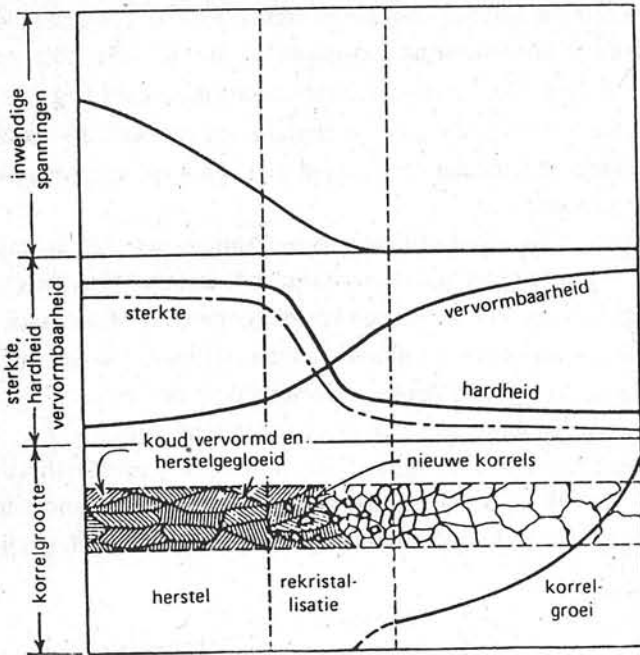
De versterking veroorzaakt uiteindelijk een vermindering van de vervormingsmogelijkheden. Herstelgloeien en rekristallisatie (zie ook §2.3.3) herstellen de mogelijkheden voor deformatie. Als proces wordt dit herstel van de vervormingsmogelijkheden in drie stappen verdeeld; het effect van deze drie stappen op de eigenschappen van koudgedeformeerd metaal of metaallegering is schematisch aangegeven in Figuur 5.20. Deze drie stappen zijn:

1. Herstelgloeien

Bij het herstel treedt voornamelijk een herrangschikking van de dislocaties op, waarbij de dislocatiedichtheid weinig verandert. Het belangrijkste effect van deze herrangschikking is de verlaging van de inwendige spanningen, die na de deformatie aanwezig kunnen zijn. Deze kunnen ontstaan doordat de kristallieten door oriëntatieverschillen in verschillende mate vervormen (zie Figuur 5.19). Macroscopisch ontstaan restspanningen doordat de deformatie nooit homogeen is. Bij walsen of trekken is de deformatie vlak onder het oppervlak groter dan in de kern. Dergelijke restspanningen kunnen de rekgrens bereiken. Ongewenste gevolgen van restspanningen zijn:

1. Vorminstabiliteit of 'trekken' van het werkstuk

Door verspaning of lokale verwarming wordt het spanningsevenwicht na de (koud)deformatie verstoord en er stelt zich een nieuw spanningsevenwicht in: kromtrekken van het werkstuk kan het gevolg zijn.



Figuur 5.20. Invloed van gloeien op de eigenschappen van een koudvervormd metaal.

2. Verlaging van de vermoeingssterkte

Bevat het werkstuk restspanningen in de orde van grootte van de rekgrens, dan neemt de kans op vermoeingscheuren toe. De werkelijke vermoeingssterkte zal lager zijn dan die verwacht wordt zonder rekening te houden met restspanningen. Daartegenover staat, dat restspanningen in de vorm van drukspanningen in het oppervlak van het werkstuk de vermoeingssterkte juist verhogen, doordat de vermoeingscheuren vaak in het oppervlak ontstaan.

3. Spanningscorrosie

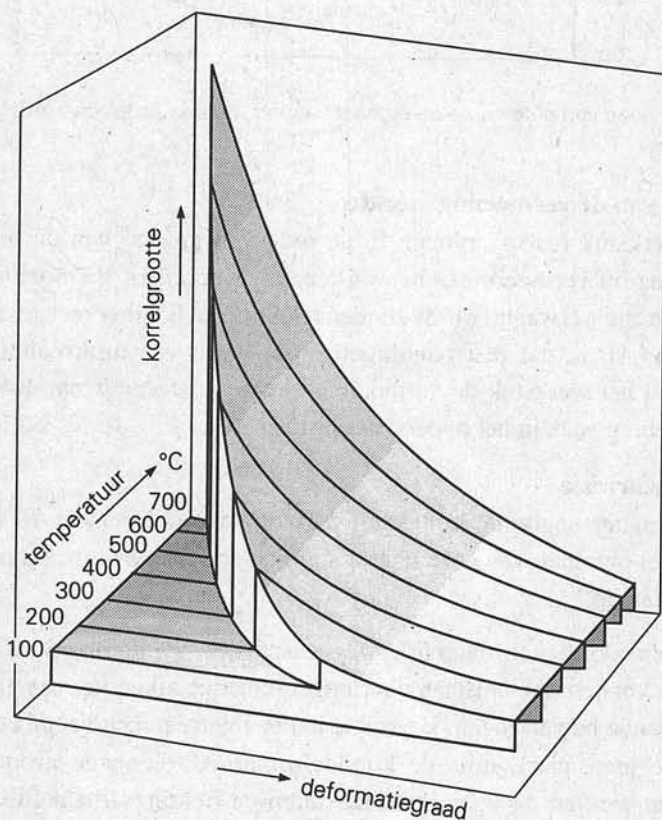
In corrosiesituaties begint de aantasting vaak op de korrelgrenzen. Restspanningen bevorderen het optreden van deze interkristallijne corrosie. Voorbeeld is de seizoenziekte van messing.

Hersteltgloeien wordt voornamelijk toegepast ter vermindering van de restspanningen. Deze kunnen ook ontstaan door ongelijkmatige afkoeling van gietstukken of door verspanende bewerkingen. Herstel is in het algemeen een beginfase van rekristallisatie (zie hieronder), mits de kouddeformaties voldoende groot waren. Bij hersteltgloeien worden de vervormingstexturen en richtingsafhankelijkheid van de eigenschappen *niet* opgeheven.

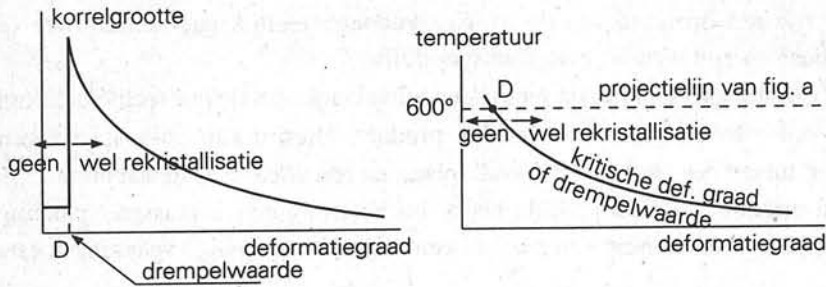
2. Rekristallisatie

Rekristallisatie van een koudgedeformeerd metaal leidt tot eliminatie van de door de (koud)deformatie geïntroduceerde roosterfouten (zie §2.3.3). Nieuwe kristallieten worden gevormd door gloeien op een temperatuur die veelal hoger is dan die voor herstelgloeien. De vorming van nieuwe kristallieten verloopt door kiemvorming en kiemgroei. De kiemen ontstaan op plaatsen met een hoge spanningsenergie en dus een hoge dislocatiedichtheid.

De kristallietgrootte na rekristallisatie hangt samen met het aantal beschikbare kiemen en dat is groter naarmate de voorafgaande kouddeformatie groter was: hoe groter het aantal kiemen, hoe kleiner de korrelgrootte na rekristallisatie. Bij een zeer kleine deformatie kunnen geen stabiele kiemen ontstaan. De deformatie moet dus een bepaalde kritische grootte hebben overschreden: de kritische deformatiegraad. Hoe hoger de temperatuur van het rekristalliserend gloeien, hoe kleiner deze kritische deformatiegraad, zie Figuur 5.21 en 5.22. De rekristallisatietemperatuur hangt behalve van de deformatiegraad ook af van de zuiverheid van het metaal. Onzuiverheden pinnen de kristallietgrenzen. Voor de meeste metalen ligt de herstel-



Figuur 5.21. Het rekristallisatiediagram (vereenvoudigde prinseschetts).



Figuur 5.22. Doorsnede (a) en drempelwaarde (b) van het rekristallisatiediagram.

temperatuur bij $0,3 T_m$ en de rekristallisatietemperatuur bij $0,4$ à $0,5 T_m$, waarin T_m de smelttemperatuur in graden K voorstelt.

Vraag 5.12 *Verhogen of verlagen de onzuiverheden de rekristallisatietemperatuur van een metaallegering?*

3. Korrelgroei

Neemt men de temperatuur van het rekristalliserend gloeien voldoende hoog en de gloeitijd lang genoeg, dan kan per saldo kristallietgroei optreden. Een vermindering van de oppervlakte-energie in de korrelgrenzen treedt op door een vermindering van de lengte der korrelgrenzen en dus door korrelgroei. Korrelgroei moet meestal vermeden worden: bij kouddeformatie als eindbewerking geven grote korrels sinaasappelhuid en anisotropie in eigenschappen.

5.3.1.3. Plastische vormgeving

De vormgeving via plastische vervorming gebeurt in de vaste toestand. De krachten die hiervoor nodig zijn, zijn altijd groter dan die voor de vormgeving in de vloeibare toestand. Plastische vormgeving is daarom vaak slechts economisch verantwoord bij de verwerking van voldoende grote hoeveelheden, met andere woorden: massa-productie in de gewone betekenis van het woord. Indien wij ons beperken tot metalen en metaallegeringen zijn er in het algemeen twee redenen om over te gaan tot plastische vormgeving:

1. beheersing van de microstructuur
2. geometrie van het gewenste produkt

Gieten kan een betrekkelijk grote variëteit aan microstructuren opleveren in één produkt. Plastische vervormingen in combinatie met homogeen gloeien zetten de betrekkelijk heterogene gietstructuren om in homogene microstructuren, waarbij bijvoorbeeld door een combinatie van deformatie en rekristalliserend gloeien de korrelgrootte beheerst kan worden (ad 1). Producten waarvan een of twee afmetingen

klein zijn ten opzichte van de overige kunnen moeilijk gegoten worden (ad 2). Voorbeelden zijn metalen platen en spoorrails.

De vervormingskrachten zijn niet alleen afhankelijk van de hoeveelheid deformatie, maar ook van de geometrie van het produkt. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen een tweedimensionaal (plaat) en een driedimensionaal produkt (staaf). In een driedimensionaal produkt heerst bij belasting een drie-assige spanningstoestand. Bij de vervorming van plaat treden meestal twee-assige spanningstoestanden op.

In een driedimensionaal produkt is de verhouding tussen oppervlak en volume klein ten opzichte van die in een tweedimensionaal produkt. Het produkt wordt onderworpen aan een drie-assige spanningstoestand. Zijn de drukspanningen in de verschillende richtingen ongelijk van grootte, dan treden grote afschuifspanningen op die in samenwerking met de hydrostatische drukspanningen grote plastische vervormingen mogelijk maken zonder scheuren. Typische voorbeelden zijn smeden, walsen en extrusie.

Bij de vervorming van plaat is de verhouding tussen oppervlak en volume groot. De spanningstoestand is twee-assig (loodrecht op de plaat heerst geen spanning). Dieptrekken en buigen zijn voorbeelden van vervormingen met de twee-assige, of bi-axiale, spanningstoestand (Engels: 'plane stress'). Bij de vervorming van een driedimensionaal werkstuk ('bulk-deformatie') wordt er vaak voor gezorgd, dat de vervormingen in één richting praktisch nul blijven door de richting van één van de hoofdspansingen zo te kiezen, dat de rekken alleen evenwijdig aan de andere twee hoofdspansingen optreden en evenwijdig aan de derde hoofdspansing geen rekken op kunnen treden, met andere woorden men zorgt voor 'plane strain' condities. Bij walsen is bijvoorbeeld de deformatie evenwijdig aan de wals praktisch nul in vergelijking met de deformaties loodrecht op de plaat en loodrecht op de wals. Bulk-deformaties benaderen daardoor 'plane strain' (zie Ref.18).

De geschiktheid van een metaal of een metaallegering voor een plastische deformatie wordt vaak beoordeeld aan de hand van de trekkromme. Bij intuïtie volgt, dat metalen of metaallegeringen met een lage waarde van de elasticiteitsgrens (Engels: 'yield stress' = σ_y) en een grote breukrek goede mogelijkheden voor plastische vervorming hebben. De breukrek omvat echter ook de rek na insnoering van de proefstaaf. Aangezien deze rek een niet uniforme deformatie van het materiaal tot gevolg heeft kan dit deel niet gebruikt worden bij de vormgeving van een produkt. Het is dus van belang te weten bij welke spanning de insnoering optreedt. Deze spanning is te bepalen uit de ware trekkromme met behulp van de constructie van Considère (zie Ref. 18 en Appendix Mechanische eigenschappen).

Uit het voorgaande volgt onmiddellijk, dat alle factoren die de waarde van de rek-grens beïnvloeden, invloed hebben op de mogelijkheden voor plastische deformatie. Onder deze factoren is zeer belangrijk de microstructuur, met aspecten als korrel-

grootte, aanwezigheid van precipitaten, verdeling van insluitsels, van het metaal of de metaallegering. Veel metaalkundige behandelingen zijn gericht op een verhoging van de waarde van de rekgrens en deze verkleinen dus de mogelijkheden voor deformatie.

De plastische deformatie grijpt anderszins ook in op de microstructuur: de vervormende kristallieten leggen elkaar oriëntaties op, zodat werkstukken verkregen door deformatie bijna zonder uitzondering in meer of mindere mate textuur en anisotropie vertonen. De vervormingsmogelijkheden kunnen afhankelijk zijn van bijvoorbeeld de walsrichting, zodat een opvolgende kouddeformatie als dieptrekken kan leiden tot orenvorming. Ook de verdeling van de insluitsels verandert, met name bij de warmvervorming: ze worden gericht in de wals- of smeedrichting, zodat de gewalste of gesmede produkten een vezelachtige structuur kunnen vertonen.

De warmvervorming van metalen of metaallegeringen is alleen mogelijk bij betrekkelijk grote afmetingen. Kleine werkstukken koelen te snel af om een effectieve warmvervorming uit te voeren. De plastische vervorming van een gietblok of gietpalen is bijna altijd een warmvervorming, waarbij de gietstructuur verdwijnt. Een warmvervormde kneedstructuur is daardoor principieel anders dan een gietstructuur. Twee aspecten zijn hierbij van belang:

1. Poriën en holten worden bij de warmvervorming dichtgelast.
2. Bij de warmvervorming volgt rekristallisatie direkt op de aangebrachte vervorming, zodat de grofkorrelige gietstructuur overgaat in een fijnkorrelige kneedstructuur.

De begintemperatuur bij de warmvervorming moet zo gekozen worden, dat de gewenste afmetingen van het produkt bereikt worden bij de juiste eindtemperatuur voor de juiste korrelgrootte. De begintemperatuur moet ver onder de smelttemperatuur van de legering liggen, zodat geen smeltverschijnselen kunnen optreden (denk hierbij aan de aanwezigheid van laagsmeltende eutectica en de vervormingswarmte). De eindtemperatuur moet voldoende boven de rekristallisatietemperatuur liggen, zodat de rekristallisatie tijdens de warmvervorming voltooid kan worden, tenzij een bepaalde mate van versteviging gewenst is om aan het produkt bepaalde eigenschappen te geven. Tabel 5.7 geeft een vergelijking van de warmvervorming en de koudvervorming.

Vraag 5.13 *Welke eigenschappen zullen vooral door de versteviging na warmvervorming beïnvloed worden?*

Tabel 5.7. *Vergelijking van warm- en koudvervorming.*

| <i>kenmerk</i> | <i>warmvervorming</i> | <i>koudvervorming</i> |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| rekristallisatie | wel | geen |
| verstevinging | geen | wel |
| textuur | weinig | uitgesproken |
| vervormingsarbeid | klein | groot |
| vervormbaarheid | groot | klein |
| oppervlaktekwaliteit | matig | goed |
| restspanningen | laag | hoog |
| materiaalverliezen | groot | laag |
| werkstukgrootte | naar beneden begrensd | naar boven begrensd |
| <i>kristalroosters:</i> | | |
| kubisch | goed | goed |
| hexagonaal | goed | slecht |

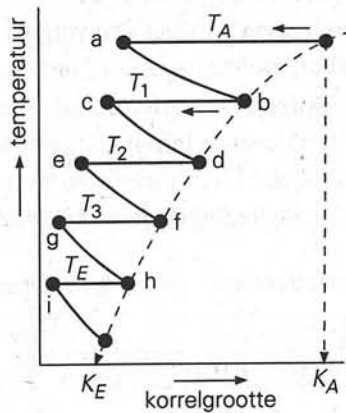
5.3.1.4. **Vervorming van staal**

1. *Warmvervorming*

Het warmwalsen en warmsmeden van ongelegeerd staal gebeurt in het austenietgebied van het toestandsdiagram (zie Figuur 3.11). In de austeniettoestand heeft staal een lage rekgrens en een grote rek, er treedt bij deze warmdeformatie rekristallisatie en dus geen verstevinging op. In de austeniet zijn de carbiden in oplossing gegaan, zodat geen brosse cementiet aanwezig is. De warmvervorming van staal vindt overwegend plaats ter eliminatie van de gietstructuur verkregen bij continu gieten of het gieten in blokvormen. Figuur 5.23 geeft een schematisch verband tussen de korrelgrootte en de temperatuur van de toegepaste vervorming. De begintemperatuur en de korrelgrootte na het gieten worden gegeven door T_A en K_A . Bij elke walsdoorgang of *steek* treedt een sterke plastische vervorming op, die gevolgd wordt door rekristallisatie met korrelverfijning (a,c,e,g,i). Door de hoge temperatuur treedt ook korrelgroei op tussen de verschillende steken (b,d,f,h). Naarmate de vervormingstemperatuur lager wordt, verloopt de korrelgroei trager, waardoor netto een korrelverfijning wordt verkregen. De begintemperatuur bij de warmvervorming moet zo gekozen worden, dat de temperatuur waarbij de eindvorm van het halffabrikaat verkregen wordt, samenvalt met de temperatuur van de gewenste korrelgrootte. Soms zet men de vervorming voort bij een temperatuur beneden de rekristallisatietemperatuur, zodat in de laatste steek verstevinging optreedt. Hierdoor kunnen de gewenste mechanische eigenschappen nauwkeurig worden ingesteld. Uit het voorgaande volgt, dat het temperatuurgebied voor het warmwalsen wordt bepaald door de samenstelling van het staal (koolstofgehalte) en door de vorm van het austenietgebied, zoals dat geldt voor een eventueel gelegeerde staalsoort (zie Tabel 5.8).

Tabel 5.8. Richttemperaturen voor de warmvervorming van staal.

| staalsoort | | temperaturen (°C) |
|-------------------|-------------|-------------------|
| zacht staal | 0,1 gew% C | 1300-950 |
| machinestaal | 0,45 gew% C | 1100-900 |
| gereedschapsstaal | 1,0 gew% C | 1000-800 |
| gelegeerd staal | | 1100-900 |



Figuur 5.23. Schematische voorstelling van het korrelverfijningsmechanisme bij de warmvervorming.

Vraag 5.14 Ga na of de in de Tabel 5.8 gegeven temperaturen in het austenietgebied liggen.

Bij de afkoeling na de vervorming treedt ook de omzetting van austeniet naar ferriet en cementiet op. Ook deze omzetting draagt bij aan de korrelverfijning. Na de warmvervorming zijn de eigenschappen in de richting van de vervorming en loodrecht daarop verschillend. De eventueel aanwezige slakinsluitels, afkomstig uit de staalbereiding, geven aanleiding tot vezelvorming (zie §4.2.3.1).

2. Koudvervorming van staal: dieptrekken

Van de beschikbare verwerkingstechnologieën voor staal is dieptrekken ongetwijfeld een zeer belangrijke. Bierblikjes en sigarendoosjes worden met dieptrekken vervaardigd. Ongelegeerd koolstofstaal met een zeer laag koolstofgehalte is hiervoor een veelvuldig gebruikte metaallegering. Voor de beoordeling van de geschiktheid van een metaallegering voor dieptrekken zijn belangrijk (zie Ref. 21):

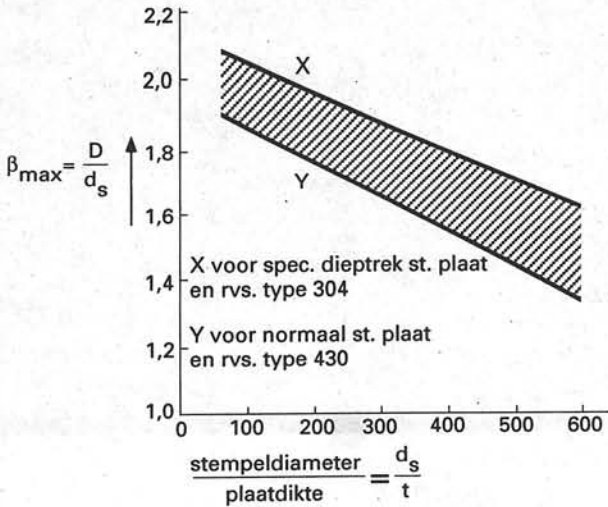
- de mechanische eigenschappen
- de korrelgrootte
- de oppervlaktegesteldheid

De globale samenstelling van dieptrekstaal wordt gegeven in Tabel 5.9. De aanwezige elementen kunnen een grote invloed op de dieptrekbaarheid van het staal hebben. Koolstof vermindert de dieptrekbaarheid. De negatieve invloed van koolstof kan men beperken door globularisatie van de carbiden (zachtgloeien) of een gelijkmatige verdeling van de perliet (normaalgloeien). Zwavel kan aanwezig zijn als mangaansulfide of ijzersulfide. In grote hoeveelheid aanwezig kunnen de sulfiden een bros netwerk vormen rond de ferrietkorrels met een desastreus effect op de dieptrekbaarheid. Door verkleining van het zwavelgehalte zijn de sulfidedeeltjes geïsoleerd en klein in aantal en grootte, waardoor hun invloed beperkt is. Mangaan dient voor de binding van ^{sulfuur}zwavel. De vorming van mangaancarbiden dient voorkomen te worden. Silicium lost op in de ferriet en geeft aan ferriet oplosharding. Bij een gehalte van 1 gew% Si is staal niet meer diep te trekken. Fosfor verlaagt de dieptrekbaarheid en het maximale fosforgehalte is meestal 0,03 gew%.

Tabel 5.9. Samenstelling van dieptrekstaal in gewichtsprocenten.

| C | Mn | P | S | overige | Fe |
|-------|-----------|--------|--------|---------|------|
| < 0,1 | 0,2 - 0,5 | < 0,03 | < 0,03 | < 0,4 | rest |

Enkele saillante microstructurele kenmerken zijn van groot belang bij dieptrekstaal. Het optreden van glijlijnen (Lüdersbanden genaamd) moet tijdens het dieptrekken vermeden worden. Dit wordt bereikt door een aangepaste thermomechanische behandeling, veelal door de fabrikant van de dieptrekplaat. De anisotropie van de dieptrekplaat zorgt er voor, dat de vervormingsmogelijkheden en dus ook de dieptrekbaarheid ten opzichte van de walsrichting kunnen variëren. Dit resulteert in de orenvorming bij het dieptrekken van bekens uit staalplaat. Er kan niet gezegd worden, dat de dieptrekbaarheid van de staalplaat negatief beïnvloed wordt door de anisotropie. Het blijkt zelfs, dat de maximale dieptrekverhouding $\beta = D_o/d_s$, waarin D_o de diameter van de platine (= het plaatje dat diep getrokken wordt) vòòr het dieptrekken en d_s de diameter van het dieptrekstempel, toeneemt naarmate de anisotropie hoger is. Voor een juiste bespreking moet ook de anisotropiefactor R , die de mate van anisotropie beschrijft, in beschouwing worden genomen (zie Ref. 21). Bij dieptrekken wil men dat de dikte van de diepgetrokken plaat niet veel verandert tijdens het dieptrekken, terwijl men de vervorming wil realiseren in de richtingen loodrecht op de dikte. Om dit te bereiken is anisotropie juist gewenst. De maximale dieptrekverhouding zal dalen met de verhouding van de stempeldiameter en de plaatdikte (zie Figuur 5.24). Bij het bepalen van de maximale dieptrekverhouding spelen dus een rol: de diameter van de platine, de stempeldiameter, en de plaatdikte en de waarde van R .

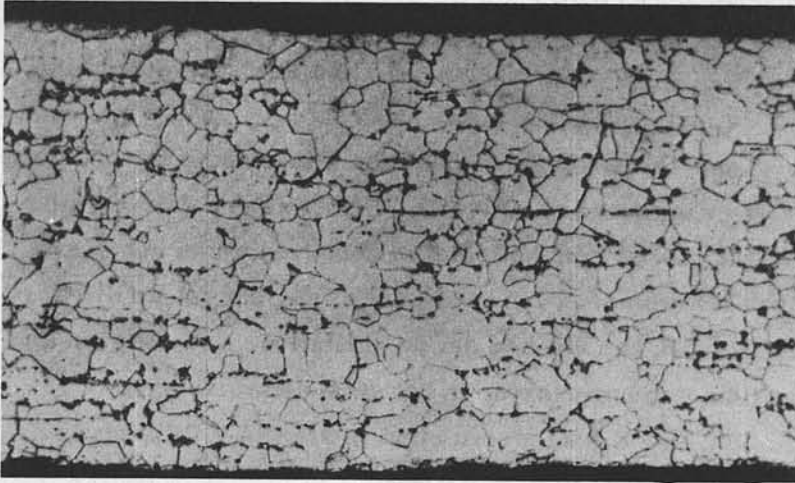


Figuur 5.24. Verband tussen de maximale dieptrekverhouding en de diameter-plaatdikte verhouding.

Dieptrekstaal moet bestaan uit een matrix van ferriet met koolstof als fijn verdeelde carbiden (cementiet). De ferrietkorrels hebben een grootte van circa $30 \mu\text{m}$. De verdeling van cementiet en insluitsels is zo homogeen mogelijk. De korrelgrootte van de ferriet wordt door de staalfabrikanten veelal uitgedrukt in eenheden van de ASTM-schaal (zie Tabel 5.10). Als eis voor dieptrekstaal formuleert men vaak een ASTM-korrelgrootte tussen 6 en 7 en een zo klein mogelijke variatie tussen kern en rand. Ook de insluitsels moeten zo uniform mogelijk verdeeld zijn. Slakkenbanen (zie Figuur 5.25) zijn funest voor de dieptrekbaarheid.

Tabel 5.10. Korrelgrootte volgens ASTM.

| ASTM-schaalwaarde | korrelgrootte (μm) |
|-------------------|---------------------------------|
| 0 | 360 |
| 1 | 250 |
| 2 | 180 |
| 3 | 130 |
| 4 | 90 |
| 5 | 65 |
| 6 | 45 |
| 7 | 30 |
| 8 | 22 |
| 9 | 16 |
| 10 | 11 |



Figuur 5.25. Slakkenbanen (Ref. 21).

5.3.1.5. Verwerking van aluminiumkneedlegeringen

Gietblokken verkregen door continu gieten of door uitgieten in metalen vormen, worden verwerkt door warmwalsen of warmextrusie. De temperaturen van de warmvervorming liggen over het algemeen in de buurt van 450 °C. Deze moeten uiteraard lager zijn dan de smelttemperatuur van het laagstsmeltende bestanddeel van de te verwerken aluminiumlegering. De gegoten legeringen bevatten bijna altijd fouten zoals holten of segregatienetwerken. Door de plastische (warm)vervorming worden de holten gedicht en de netwerken verbroken. Hiervoor is een bepaalde minimumdeformatie nodig. De vervormingstemperaturen liggen uiteraard boven de rekristallisatietemperatuur van de legering. Sterke kristalsegregaties worden opgeheven door homogengloeien. Hiervoor neemt men als richtsnoer de temperatuur van de maximale oplosbaarheid in het binaire toestandsdiagram

Vraag 5.15 *Blijft men bij het homogengloeien beneden of juist boven de temperatuur van maximale oplosbaarheid?*

De productie van halffabrikaat, dat is de productie van staf of plaat via warmdeformatie, van een aluminiumlegering bestaat achtereenvolgens uit: gieten, homogengloeien, warmdeformatie: bijvoorbeeld warmextrusie. Voor aluminiumlegeringen is extrusie een zeer belangrijke verwerkingstechnologie. De extrusie wordt uitgevoerd in grote hydraulische persen met drukken variërend tussen 350 en 1000 MPa. Extrusie is nooit een homogeen deformatieproces: de deformatiegraad in het midden van het produkt verschilt van die aan de rand, doordat de verplaatsingssnelheid in het midden veel groter is dan aan de rand.

Vraag 5.16 *Is de korrelgrootte in het midden van een geëxtrudeerde staaf in het algemeen groter dan, kleiner dan of gelijk aan die van de rand?*

Warmsmeden is ook voor aluminiumlegeringen een veel toegepaste verwerkings-techniek: cranks (pedaalarmen) voor fietsen worden via warmsmeden vervaardigd uit aluminiumlegeringen. Warmsmeden van aluminiumlegeringen geeft produkten met een goede oppervlaktekwaliteit en goede maatnauwkeurigheid.

De koudvervorming, goed mogelijk door het kvg/fcc-kristalrooster van aluminium en zijn homogene legeringen, gebeurt veelal door dieptrekken, koudwalsen of slag-extrusie. Zilverpapier is zeer dun uitgewalste aluminiumfolie met een dikte tussen 5 en 100 μm .

Bij dieptrekken is de neiging tot orenvorming bij aluminium vrij groot en neemt deze neiging toe met toenemende zuiverheid; bij AlMn- en AlMg-legeringen met lage gehalten aan Mn en Mg is deze neiging minder. Orenvorming hangt samen met anisotropie en anisotropie neemt toe met een grotere textuur, die uitgesprokener wordt bij een grotere korrelgrootte. De orenvorming is dus afhankelijk van de samenstelling van de legering: de aanwezigheid van korrelverfijners en de verhouding van Si en Fe, die onopgelost de korrelgroei tegengaan. Verder kunnen een rol spelen de gietomstandigheden, de warmtebehandeling voor en tijdens het walsen en de walscondities. Door een onderlinge afstemming van de genoemde factoren kunnen de aluminiumwalserijen dieptrekplaat leveren, waarvoor de orenvorming sterk beperkt of zelfs afwezig is. De korrelgrootte speelt dus bij orenvorming een grote rol, evenals bij de vorming van sinaasappelhuid.

Een kleine korrelgrootte is voor dieptrekken belangrijk, maar deze mag niet te klein zijn, omdat dan de vervormingskrachten te groot worden. Aanvaarde normen hiervoor bestaan niet. De korrelgrootte voor het dieptrekken wordt mede beoordeeld aan de hand van de resultaten van dieptrekproeven volgens Erichsen (zie Ref. 14 en 21). Zeer zuiver en zuiver aluminium zijn minder geschikt voor dieptrekken dan Al98 of Al99.

korrelgroei

Vraag 5.17 *Waarom is Al99 beter diep te trekken dan Al99,99?*

5.3.1.6. Verwerking van koperkneedlegeringen

Na continu gieten of gieten in metalen vormen worden de koperkneedlegeringen warm gewalst of warm geëxtrudeerd. Zuiver koper wordt vervormd bij circa 850 °C en CuZn40 bij circa 700 °C. De α -messingsoorten zijn alleen in een bepaald temperatuurgebied goed warm te vervormen. Tussen 300 en 700 °C zijn deze legeringen relatief bros, zodat zij gemakkelijk scheurvorming vertonen. De $(\alpha+\beta)$ -messingsoorten kunnen bij hoge temperaturen met zeer grote snelheid geëxtrudeerd of gewalst worden. De $(\alpha+\beta)$ -messingsoorten worden in het algemeen niet koud vervormd wegens de aanwezigheid van de brosse β' -fase, zie ook §4.3.3.2.

De α -messingsoorten zijn in het algemeen zeer goed koud vervormbaar. Hierbij is de beheersing van de korrelgrootte zeer belangrijk. Een te grove korrel geeft ook bij de α -messingsoorten sinaasappelheid na de kouddeformatie. De beheersing van de korrelgrootte bereikt men door balanceren van de kouddeformatie en rekristallisatie bij de productie van bijvoorbeeld dieptrekplaat. De geschikte korrelgrootte stijgt met de toe te passen kouddeformatie (zie Tabel 5.11). Een te kleine korrelgrootte geeft te grote deformatiekrachten.

Tabel 5.11. *Geschikte korrelgrootte voor α -messingsoorten.*

| <i>deformatie karakteristiek</i> | <i>deformatie (%)</i> | <i>korrelgrootte (μm)</i> |
|----------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|
| licht | ± 20 | 15 |
| middelmatig | ± 50 | 25 |
| zwaar | > 80 | 50 - 100 |

Na grote deformaties kan herstelgloeien nodig zijn. De temperaturen hiervan liggen tussen 400 en 700 °C. Hierbij moet men rekening houden met ontzinking: zink verdampst uit het messing aan het oppervlak. Door de aanwezigheid van de harde β' -deeltjes waarop de spaan goed afbreekt, zijn de ($\alpha+\beta$)-messingsoorten goed te verspanen. Een vergelijking van de verspaanbaarheid geeft Tabel 5.12.

Tabel 5.12. *Verspaanbaarheidsindex van enige metaallegeringen.*

| <i>metaallegering</i> | <i>index</i> |
|--------------------------------|--------------|
| standaard automaatstaal | 100 |
| machinestaal | 60 |
| perlietisch gietijzer | 50 |
| 18-8-staal (automaatkwaliteit) | 45 |
| koper (kwart hard) | 60 |
| messing CuZn33 | 80 |
| messing CuZn40Pb2 | 200 - 400 |
| Al-legeringen | 300 - 1500 |
| Mg-legeringen | 500 - 2000 |

5.3.1.7. Verwerking van magnesiumkneedlegeringen

De warmvervorming van magnesiumlegeringen vindt in het algemeen plaats door extrusie, walsen of smeden. De werkmethode is dezelfde als voor Al-legeringen; de temperaturen liggen tussen 220 en 400 °C. Er kunnen enige algemene opmerkingen over de effecten van richtingsafhankelijkheid – magnesium heeft een hcp/hcp-kristalrooster – worden gemaakt (zie Ref. 12):

1. De E-modulus is niet erg afhankelijk van de kristallografische oriëntatie; textuur heeft een relatief klein effect op de E-modulus van warmvervormd magnesium en zijn legeringen.
2. Omdat tweelingvorming onder drukspanning gemakkelijk optreedt, evenwijdig aan het basisvlak van het kristalrooster, zijn de waarden van de sterkte onder druk veel lager dan onder trek; de druksterkte kan 30 tot 40 % lager zijn dan de treksterkte. Als de korrelgrootte kleiner wordt, wordt ook het verschil tussen trek- en druksterkte kleiner, doordat de bijdrage van de korrelgrenzen aan de sterkte groter wordt.
3. De tweelingvorming kan een nadelig effect op de waarde van de treksterkte hebben, bijvoorbeeld bij koud afrollen van een haspel gewalste plaat treden afwisselend vervormingen onder druk en trek op; dit kan dus leiden tot een vermindering van de treksterkte.

Mg-legeringen zonder zirkoon vertonen een sterke neiging tot korrelgroei. Mg-legeringen oxyderen aan lucht bij verhitting en vormen geen afsluitende oxydehuid. Daarom mogen de temperaturen voor warmvervorming niet te hoog worden genomen. De warmvervormingssnelheid is sterk afhankelijk van het gehalte legerings-elementen (zie Tabel 5.13).

Tabel 5.13. Extrusiesnelheid van magnesiumlegeringen.

| legering | temperatuur (°C) | extrusiesnelheid (m/min) |
|------------|------------------|--------------------------|
| zuiver Mg | 400 | ±300 |
| MgMn1,5 | 400 | ±300 |
| MgAl3Zn1 | 400 - 415 | ±7,5 |
| MgAl8 | 385 | ±1,5 |
| MgZn6Zr0,7 | 385 | ±1,5 |

Smeden is vooral bij de Zr-houdende Mg-legeringen goed mogelijk. De smeedmatrijzen moeten voorverwarmd worden tot boven 220 °C, waarbij de overgang tussen de goede en slechte vervormbaarheid ligt.

Verspanen van Mg en Mg-legeringen kan met zeer grote snelheid gebeuren, zie Tabel 5.12. De hierbij ontwikkelde warmte is zeer gering door de kleine snijkrachten. In vergelijking met Al-legeringen zijn de verspaningskosten van Mg-legeringen laag.

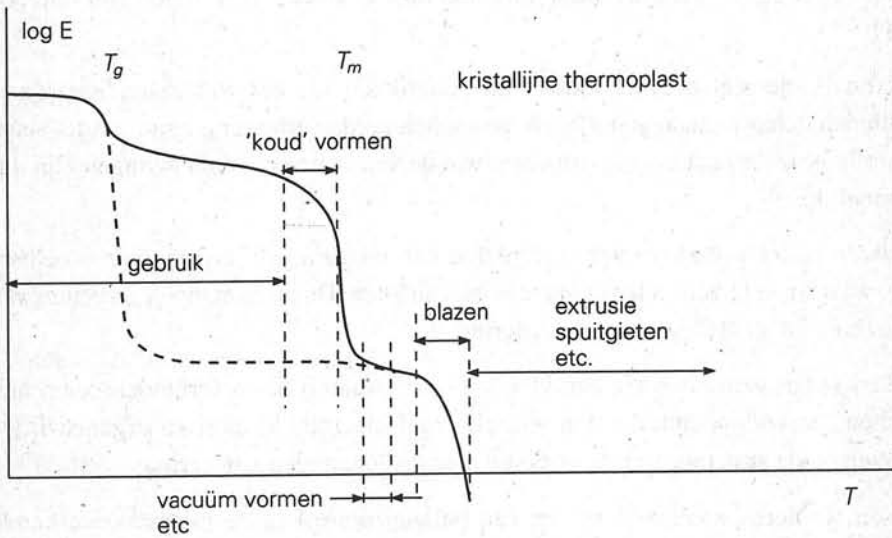
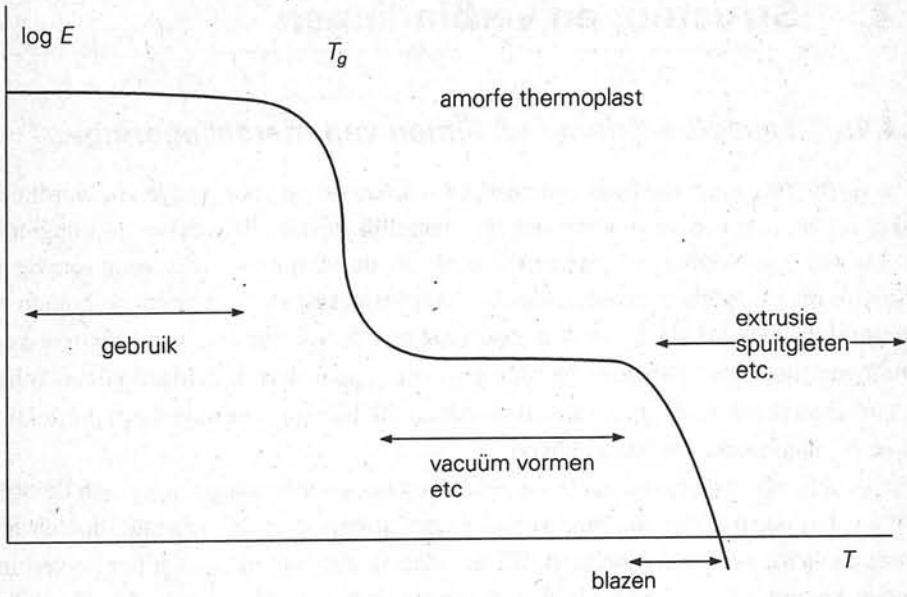
Vraag 5.18 *Waarvoor kunnen gietstukken van Mg-legeringen goedkoper zijn dan gietstukken van Al-legeringen ?*

5.3.2. **Plastische vervorming en verspaning van kunststoffen**

Voor de *plastische vervorming* is het een voordeel als het polymeer een uitgesproken rubbergebied heeft, de krachten nodig voor de vervorming zijn dan klein en de temperatuurinstelling is niet kritisch. Amorfe polymeren zijn daarom in het algemeen meer geschikt dan semi-kristallijne voor processen als extrusieblazen, folieblazen en vacuümvormen (zie Figuur 5.26). De plastische vervorming van kunststoffen in de min of meer vaste toestand heeft twee belangrijke nadelen. In de eerste plaats leidt het vervormingspatroon vaak tot zeer ongelijkmatige wanddikten: een bekertje gemaakt door vacuümvormen kan een onderrand hebben die twee keer zo dun is als het midden van de bodem of de bovenrand. Het tweede nadeel is, dat door de veelal aanzienlijke vervormingen een sterke ketenoriëntatie wordt geïntroduceerd, die door de snelle afkoeling aan het einde van het proces wordt ingevroren. Bij opnieuw verwarmen tot een temperatuur boven T_g kan het artikel terugveren tot de oorspronkelijke vorm (plaat in het geval van vacuümvormen), maar ook bij temperaturen ruim beneden T_g is er een duidelijke neiging tot terugvering.

Verspanende bewerkingen kunnen op kunststoffen worden toegepast, echter met inachtneming van enkele beperkingen ten opzichte van soortgelijke bewerkingen van metaallegeringen:

- Kunststofproducten buigen gemakkelijk door (denk aan de lage E-modulus!); dit maakt een goede ondersteuning en inklemming noodzakelijk.
- Brosse kunststoffen kunnen moeilijkheden geven bij stans- en snijbewerkingen.
- Door de lage verwekingstemperatuur, gecombineerd met het lage warmtegeleidingsvermogen is een zeer goede koeling noodzakelijk en daarom kan de aanzet maar klein zijn.
- Absorptie van water, olie en andere hulpstoffen bij de bewerking kan door zwellling de maattoleranties beïnvloeden, bovendien kunnen sommige oliën en vetten spanningscorrosie veroorzaken.
- Sommige kunststoffen kunnen bij verhitting irriterende of giftige dampen ontwikkelen (PVC en, in het bijzonder, fluorhoudende polymeren).
- Terugvering van de kunststof door het visco-elastisch karakter kan de maatvoering nadelig beïnvloeden, bij boren is bijvoorbeeld een overmaat tot enkele tienden van millimeters wenselijk.



Figuur 5.26. Temperatuurgebieden voor gebruik en vervorming van kunststoffen.

5.4. Structuur en verbindingen

5.4.1. Lassen, solderen en lijmen van metaallegeringen

Elke verbinding is zo sterk als zijn zwakste schakel. In de voorgaande zin wordt een enkel aspect van een verbinding belicht, namelijk sterkte. Bij veel verbindingen is sterkte niet een voordeel, maar een nadeel: als de verbinding niet voor eeuwig is bedoeld, maar slechts voor het tijdelijke. Het losmaken van vastgeroeste bouten of moeren lukt meestal slechts destructief. Juist aan de vormgeving van tijdelijke verbindingen moet veel aandacht worden gegeven, opdat deze inderdaad gemakkelijk en niet-destructief verbroken kunnen worden. Ook hier gaan vormgeving, produktiewijze en materiaalkeuze hand in hand.

Hier zullen echter de permanente verbindingen tussen metaallegeringen aan de orde komen. Bij het maken van deze verbindingen streeft men de volgende doelen na: duurzaamheid, sterkte en snelheid. Bij de behandeling van de verschillende verbindingen komen alleen die verbindingen aan de orde waarbij de te verbinden delen over het gehele contactoppervlak met elkaar verbonden worden: lassen, solderen en lijmen. Niet geheel sluitende definities van lassen, solderen en lijmen zijn (zie ook §5.1):

Lassen is meestal het verbinden van onderdelen via een vloeibare fase: de te verbinden delen worden gedeeltelijk gesmolten en de verbinding komt pas tot stand na stolling. De effecten op de structuur van de verbonden metaallegeringen zijn dus aanzienlijk.

Solderen is het verbinden van onderdelen van metaallegeringen via een vloeibare fase, waarbij de te verbinden delen juist niet smelten. De effecten op de structuur van de verbonden metaallegeringen zijn gering.

Lijmen is het verbinden via een vloeibare fase waarbij de te verbinden delen niet smelten; de verbindende stoffen zijn als regel macromoleculair en organisch. De effecten op de structuur van de verbonden metaallegeringen zijn gering.

Lassen, solderen en lijmen spelen een belangrijke rol in de metaalverwerkende industrie. Lassen wordt het meest toegepast. Lijmen is vooral van belang bij het verbinden van kunststoffen of van aluminiumlegeringen (vliegtuigen). Solderen komt het meest voor in de elektronische industrie.

Lasverbindingen

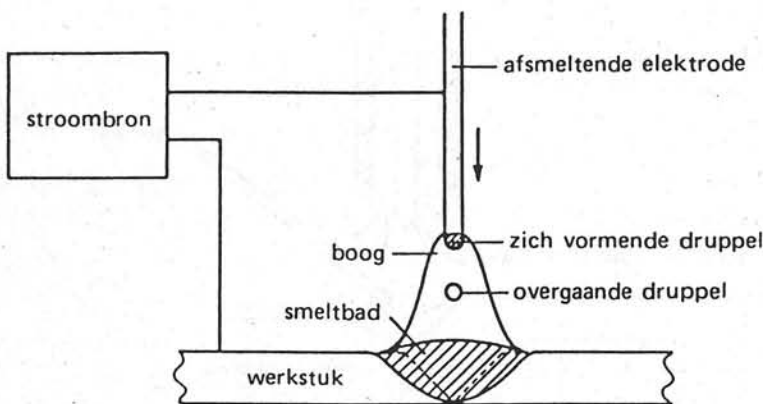
Essentieel voor een lasverbinding is de volledige continuïteit tussen de verbonden delen. Bij lijmen en solderen is er altijd sprake van een discontinuïteit. Bij lassen heeft de verbinding altijd ongeveer dezelfde eigenschappen als de verbonden metaal-

legeringen. Voor het lassen is een warmtebron nodig. Het lassen wordt gewoonlijk ingedeeld naar de toegepaste warmtebron, zie Tabel 5.14. Van de genoemde processen zal hier slechts ingegaan worden op het elektrisch booglassen; in Ref. 22 worden de beginselen van lastechnologie nader uiteengezet.

Tabel 5.14. Indeling van lasprocessen.

| warmtebron | lasproces |
|-----------------|------------------------|
| elektrisch | booglassen |
| | weerstandslas |
| | hoog-frequent las |
| | elektroslak las |
| thermo-chemisch | autogeen las |
| | thermiet las |
| mechanisch | wrijvingslas |
| | ultrasoonlas |
| | explosielas |
| straling | laserslas |
| | elektronenstralingslas |

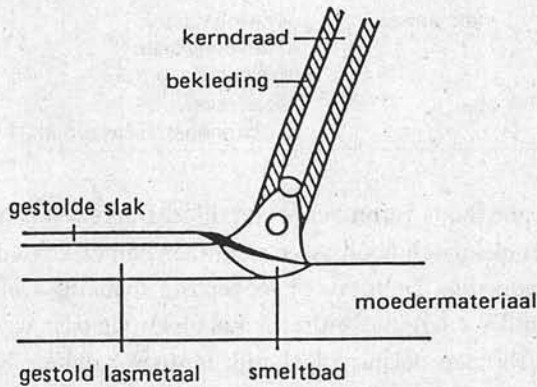
Het elektrisch booglassen is veruit het belangrijkste. Daarnaast is het autogeen las van belang. Bij het elektrisch booglassen trekt men een elektrische boog tussen een elektrode en het werkstuk. De hiervoor toegepaste spanning kan zowel wissel- als gelijkspanning zijn. De energie-overdracht van elektrode naar werkstuk is voldoende groot om de te verbinden delen gedeeltelijk te doen smelten. Schematisch is het booglassen weergegeven in Figuur 5.27. Bij gebruik van een afsmeltende elektrode druppelt de gesmolten elektrode in het gesmolten gedeelte van het werkstuk, *smeltbad* of *lasbad* genoemd. Na stolling heet dit de *lasnaad* en heeft men de gewenste verbinding. Enkele belangrijke varianten van het booglassen zijn:



Figuur 5.27. Principe van het booglassen (Ref. 22).

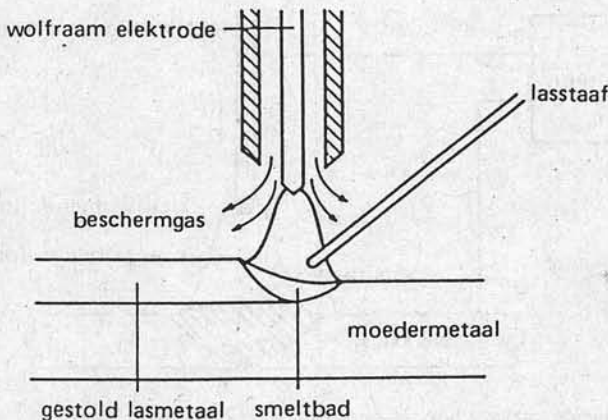
1. handlassen met beklede elektrode
2. TIG-lassen
3. MIG/MAG-lassen.

De beklede elektrode bij het handlassen is circa 40 cm lang, zie Figuur 5.28. De bekleding zorgt voor het richten, stabiliseren en beschermen van de lasboog en de gesmolten metaallegering. Een probleem bij het lassen met beklede elektroden is de waterstofopname van het lasbad, afkomstig van water geadsorbeerd door de hygroscopische bekleding. Het materiaal wordt hierdoor bros (waterstofbrosheid). Lassen met beklede elektroden wordt vooral toegepast voor staal en voor koper- en nikkellegeringen. Automatiseren van lassen met beklede elektroden is nauwelijks mogelijk.



Figuur 5.28. Handlassen met beklede elektrode (Ref. 22).

Bij TIG (Tungsten Inert Gas)-lassen wordt een wolfram-elektrode als niet-afsmeltende elektrode gebruikt (zie Figuur 5.29). De lasboog wordt omspoeld door een



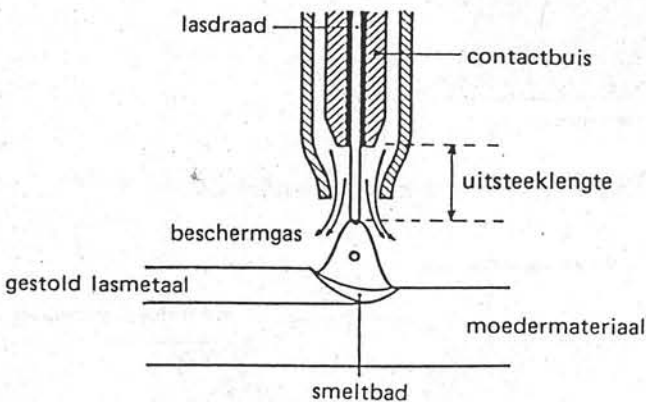
Figuur 5.29. TIG-lassen (Ref. 22).

inert gas, meestal argon. TIG-lassen is in beginsel mogelijk voor alle metalen en metaallegeringen. Het is vooral geschikt voor dunne plaat en onderdelen van kleine afmetingen (precisiewerk).

Bij MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas)-lassen wordt een afsmeltende elektrode gebruikt in de vorm van een continu toegevoerde draad, zie Figuur 5.30. Dit kan een gevulde draad zijn: het lasmetaal in combinatie met poeder om de samenstelling van het lasbad te beïnvloeden of uitsluitend lasmetaal. Het verschil tussen MIG- en MAG-lassen is, dat het actieve gas van MAG-lassen verkregen wordt door aan een inert gas CO_2 en/of zuurstof toe te voegen, of zelfs het inerte gas te vervangen door CO_2 . CO_2 stabiliseert de boog. Het MIG-lassen wordt vooral toegepast voor het lassen van non-ferro legeringen (zie ook Ref. 23) en het MAG-lassen voor het lassen van staal (zie Tabel 5.15). TIG- en MIG/MAG-lassen zijn geschikt voor verregaande automatisering.

Tabel 5.15. Gassamenstelling en de te lassen metaallegeringen bij het MIG/MAG-lassen.

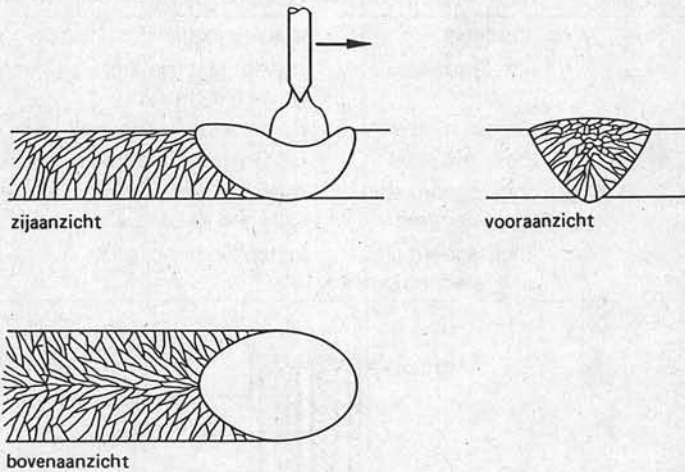
| beschermgas | metaallegeringen | opmerkingen |
|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Ar | non-ferro | stabiele boog |
| He | non-ferro | minder stabiele, hetere boog, grotere dikten |
| Ar + 1 à 2 % O_2 | roestvast staal | dun vloeibaar smeltbad |
| Ar + 2 à 3 % CO_2 | roestvast staal | dik vloeibaar smeltbad |
| Ar + 5-20 % CO_2 | ongelegeerd en laaggelegeerd staal | relatief stabiele boog, hoe meer CO_2 hoe dieper de inbranding |
| CO_2 | ongelegeerd en laaggelegeerd staal | instabiele boog, spatten |



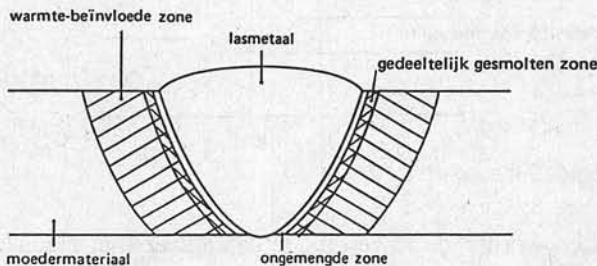
Figuur 5.30. MIG/MAG-lassen (Ref. 22).

Tijdens het lassen worden de te verbinden delen zeer snel opgewarmd, de betreffende metaallegering smelt en stolt weer en koelt vervolgens in veel gevallen vrij snel af. De globale structuur rond de lasnaad zal deze temperatuurcyclus weer-

spiegelen. De structuur van de *lasnaad* is een gietstructuur, die voor een enkelvoudige lasverbinding in drie verschillende aanzichten gegeven wordt in Figuur 5.31. Doordat in de lasnaad warmte wordt ontwikkeld, zal ook het omliggende materiaal beïnvloed worden. Er ontstaan temperatuurzones zoals aangegeven in Figuur 5.32. De *ongemengde zone* is te beschouwen als de buitenste laag van het lasmetaal, grenzend aan de ongesmolten metaallegering. De typische dikte van een dergelijke laag is enkele millimeters. Er was hier wel smelt, maar geen menging met de rest van het lasbad. De ongemengde zone heeft de structuur van de gestolde lasnaad, maar de samenstelling van de oorspronkelijke metaallegering. De ongemengde zone is vooral goed te zien, als de samenstelling van de toegevoegde lasdraad sterk afwijkt van de oorspronkelijke metaallegering. De *gedeeltelijk gesmolten zone* vertoont zowel gietstructuur als de structuur van de oorspronkelijke metaallegering. De hiernaast gelegen *warmte-beïnvloede zone* is dat gedeelte van de oorspronkelijke metaallegering waarin onder invloed van de gedissipeerde warmte vanuit het lasbad de metaalkundige structuur veranderd is. Mogelijke veranderingen zijn:



Figuur 5.31. Primaire structuur in drie aanzichten (Ref. 22).



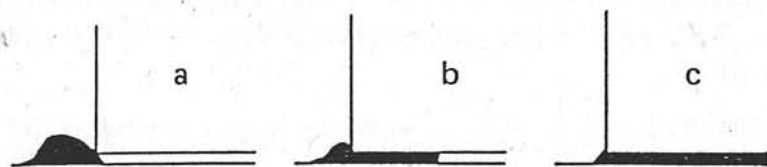
Figuur 5.32. Temperatuurzones in een lasbad (Ref. 22).

1. korrelgroei
2. precipitatie
3. oververoudering
4. opheffing van versteviging
5. martensitische reacties.

Variatie van met name mechanische eigenschappen is onvermijdelijk verbonden met structuurvariaties. Lassen betekent dus de introductie van bepaalde variaties in eigenschappen, waarmee men als ontwerper goed rekening dient te houden.

Soldeerverbindingen

Voor een soldeerverbinding wordt toevoegmateriaal (soldeer) gesmolten, dat vervolgens onder invloed van capillaire werking in de soldeernaad vloeit (zie Ref. 22). De metaallegering van de te verbinden delen wordt niet gesmolten. De opeenvolgende stadia worden weergegeven in Figuur 5.33. De reinheid van het oppervlak en de bevochtiging zijn erg belangrijk voor een goed soldeerresultaat, terwijl de viscositeit van het soldeer ook een belangrijke rol speelt. Soldeermetalen zijn in het algemeen legeringen. Soldeermetalen met een groot stoltraject zijn dikvloeibaar bij een soldeertemperatuur tussen de solidus en liquidus. Deze brij-achtige soldeermetalen kunnen vrij grote spleten overbruggen (0,3 mm), maar de kans op scheuren bij deze soldeermetalen is groter dan bij die met een smeltpunt, die uiteraard dunvloeibaar zijn.



Figuur 5.33. Opeenvolgende stadia bij het solderen (Ref. 22).

Men onderscheidt hardsolderen (verwerkingstemperatuur $> 450\text{ }^{\circ}\text{C}$) en zachtsolderen (verwerkingstemperatuur $< 450\text{ }^{\circ}\text{C}$). De meest toegepaste typen zachtsoldeer berusten op het toestandsdiagram Pb-Sn (zie Figuur 3.8) en worden toegepast in de elektrotechniek en door loodgieters.

Vraag 5.19 Kies op grond van het voorgaande en het PbSn-toestandsdiagram een samenstelling van zachtsoldeer (Pb-Sn) voor loodgieters en voor het soldeerwerk in een elektrisch scheerapparaat.

De meest toegepaste typen hardsoldeer berusten op het systeem Ag-Cu. Zij kunnen worden toegepast voor de meeste staallegeringen en op non-ferro metalen, met uitzondering van aluminium en aluminiumlegeringen en van magnesium en magnesiumlegeringen.

Lijmverbindingen

Een lijmverbinding wordt gevormd door een lijmlaag die zich hecht aan de contactoppervlakken van de te verbinden delen. De sterkte van de lijmverbinding wordt gegeven door de sterkte van de lijmlaag zelf en door de adhesie aan de contactoppervlakken. Deze adhesiekrachten worden bepaald door de intermoleculaire krachten aan het contactoppervlak, die een reikwijdte hebben van circa 3 nm. De oneffenheden van een contactoppervlak van de hoogst bereikbare kwaliteit ('gladheid') liggen in de orde van 25 nm (zie Ref. 24). Doordringen in de oneffenheden is dus vereist om te kunnen profiteren van de adhesiekrachten.

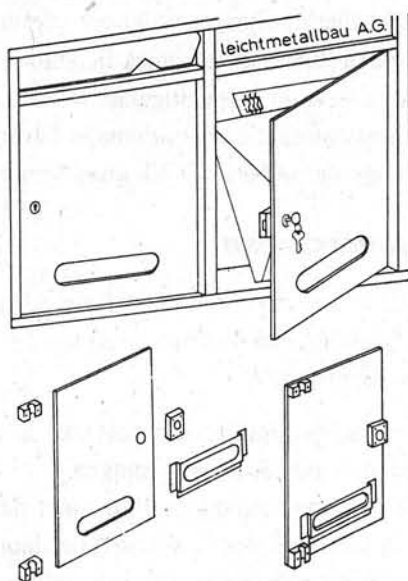
De hechting tussen twee optisch gepolijste oppervlakken is zeer gering. In aanwezigheid van een klein beetje water neemt de kracht om deze oppervlakken in loodrechte richting te verplaatsen spectaculair toe. Evenwijdige verplaatsing gaat uiteraard zeer gemakkelijk. Goede lijmen hebben evenals water een lage oppervlaktespanning (bevochtigen de contactoppervlakken zeer gemakkelijk) en hebben een lage viscositeit om ook een dunne lijmlaag te vormen. De invloed van de dikte wordt aangegeven door de volgende getallen (zie Ref. 24): een laag paraffinewas van 57 μm dikte levert een scheidingsspanning van 0,025 MPa en een laag paraffinewas van 540 μm dikte levert een scheidingsspanning van 0,015 MPa, terwijl de sterkte van de paraffine slechts 0,0075 MPa bedraagt. Lijmlagen mogen dus niet te dik zijn.

Met name in de vliegtuigbouw worden veel verbindingen door lijmen tot stand gebracht. Buiten de vliegtuigbouw, waar een glad uiterlijk gewenst is, kunnen lijmverbindingen zorgen voor een verantwoord uiterlijk (zie Figuur 5.34). Lijmverbindingen zijn in het algemeen goed bestand tegen corrosie en veel gladder dan klinkverbindingen.

Vraag 5.20 *Waarom is het gladde oppervlak bij vliegtuigen zo belangrijk?*

5.4.2. Lassen van kunststoffen

Het lassen van kunststoffen is alleen mogelijk als de te verbinden delen en de verbinding zelf uit hetzelfde polymeer bestaan. De oorzaak is dat de meeste kunststoffen volledig onmengbaar zijn, zodat bij gebruik van verschillende polymeren geen goede verbinding tot stand kan komen. Dan nog zijn alleen thermoplasten te lassen, bij deze kunststoffen is de beweeglijkheid van de ketens groot genoeg om door diffusie een verstrengeling tussen de twee te lassen delen te geven. Thermoharders bestaan uit één groot netwerk met een zeer geringe beweeglijkheid van de ketendelen, zij zijn dan ook niet lasbaar.



Figuur 5.34. Huidplaat van brievenbusdeur en in te lijmen onderdelen voor scharnierbevestiging, slotbeslag en briefensleuf (links onder); onderdelen met voorgetapte gaten gelijmd op de deurhuidplaat (rechts onder) (Ref. 24).

Omdat de vloeitemperatuur van kunststoffen vrij laag is, wordt bij het lassen met hetelucht-laspistolen gewerkt. De viscositeit van de plastisch gemaakte thermoplast blijft altijd hoog, daarom vindt geen spontaan samenvloeien van de gesmolten massa's plaats; tijdens het lassen moet altijd druk worden uitgeoefend. Hierdoor is de lastechniek voor kunststoffen sterk verschillend van die van metaallegeringen. Een ander belangrijk verschil met metaallegeringen is het lage warmtegeleidingsvermogen van kunststoffen. Daardoor stroomt de warmte slecht weg en blijft de kunststof op de niet direct verwarmde plekken vrijwel koud. Door de grote thermische uitzettingscoëfficiënt van kunststoffen moet men, meer nog dan bij metaallegeringen, rekening houden met het ontstaan van krimpspanningen tijdens het afkoelen. Deze spanningen kunnen bij kunststoffen die daar gevoelig voor zijn, crazing (zie §4.5.2.4) veroorzaken in en bij de lasnaad. Crazing kan ook optreden als gevolg van spanningen die hun oorsprong vinden in kristalliniteits- en textuurverschillen door de lokale warmtebehandeling.

Het lassen van folies, onder andere zeer belangrijk in de verpakkingindustrie, vereist een speciale aanpak in verband met de geringe dikte. Bij uitwendig verwarmen van twee overlappende randen wordt de warmte juist aan de verkeerde kant (de buitenkant) aan het folie toegevoerd, zodat er gevaar voor wegsmelten bestaat. Met zeer kortstondige, elektrisch teweeggebrachte warmtestoten kunnen nog goede lassen gemaakt worden (warmte-impulsslassen), echter alleen bij geringe foliedikte

(tot 0,2 mm). Veel aantrekkelijker is het de folies inwendig te verwarmen met een hoogfrequent elektrisch veld. Alleen polymeren met een niet te lage diëlektrische verliesfactor (zie §4.5.5.2) komen voor deze techniek in aanmerking, zoals PVC en PMMA. PE, PP en PS kunnen niet hoogfrequent gelast worden. Voorzichtigheid is geboden bij het lassen van kunststoffen die veel oriëntatie bevatten, het verwarmen boven het verwekingspunt brengt hier onherroepelijk grote krimp teweeg.

5.4.3. *Lijmen van kunststoffen*

Bij het lijmen van kunststoffen (we bespreken hier alleen de lijmen voor productionele toepassingen) kan de hechting van de lijm aan de te verbinden oppervlakken op drie verschillende principes berusten:

1. Mechanische verankering van de lijm in het oppervlak; dit moet ruw of poreus zijn en de lijm moet goed in de poriën kunnen dringen.
2. Absorptie van de lijm in het oppervlak; de lijm moet dan een oplosmiddel bevatten, dat de te lijmen kunststof doet zwellen. Hierdoor kan de lijm in het oppervlak dringen en na verdamping van het oplosmiddel hecht de lijmlaag goed aan het oppervlak. Men gebruikt als lijm hier wel een oplossing van het te lijmen polymeer.
3. Adsorptie van de lijm aan het oppervlak kan, ook bij gladde en niet-zwelbare kunststoffen, tot een goede verbinding leiden. Er moet dan wel een goede adhesie, dus moleculaire attractie tussen de lijmmoleculen en de moleculen van de te lijmen kunststof bestaan.

Er zijn polymeren die niet zwellen of oplossen en die geen adhesie vertonen met enige lijmsort. Hiertoe behoren onder andere PE en PP, die dus niet zonder meer te lijmen zijn. Men kan echter een uiterst dunne oppervlaktelaag van deze polymeren modifieren met een elektrische ontladingsboog of met sterk etsende chemicaliën, zodat adhesie op kan treden en lijmen mogelijk wordt. Soortgelijke oppervlaktebehandelingen worden ook toegepast om deze polymeren te kunnen bedrukken met verf of inkt.

Polymeren spelen een grote rol bij het *vervaardigen van lijmen*. Er zijn drie groepen te onderscheiden: *thermoplastische lijmen*, *thermohardende lijmen* en *op rubbers gebaseerde lijmen*. Thermoplastische lijmen worden meestal verwerkt in de vorm van oplossingen of waterige dispersies. Het zijn in het algemeen één-component systemen. De aanwezigheid van het oplosmiddel of dispersiemiddel is een nadeel, omdat het verdampen hiervan tijd kost en bovendien leidt tot een aanzienlijke volumevermindering. Een bekende thermoplastische lijm is polyvinylacetaat, dat in de vorm van oplossing of dispersie gebruikt wordt. Een ander type, polyvinylether, is in feite een hoogvisceuze vloeistof die door zijn hoge viscositeit een zekere hechting geeft, maar wel kleverig blijft.

Thermohardende lijmen zijn meestal twee-component systemen, ze kunnen zowel koud- als warmhardend zijn. De componenten moeten kort voor het lijmen gemengd worden en hebben daarna een beperkte verwerkingstijd. Gebruikelijke systemen zijn: fenol-formaldehyde, polyesterharsen en epoxyharsen. De laatste hebben een zeer hoge hechtkracht aan vrijwel alle materialen.

Lijmen op rubberbasis worden gebruikt in de vorm van waterige dispersies, oplossingen of oplosmiddelvrije vloeibare systemen. Soms vindt na het lijmen vulcanisatie plaats, soms blijft de rubber onvernet. Toegepast worden systemen op basis van butylrubber, polyisobuteen en polychloropreen. Een recente ontwikkeling is het gebruik van thermoplastische rubber (blokcopolymeer van butadien en styreen), die als 'hot melt adhesive' in vloeibare toestand wordt aangebracht en na afkoelen een sterke, elastische hechtlaag vormt.

Vraag 5.21 *Wordt het woord systeem in het bovenstaande in thermodynamische zin gebruikt?*

Vraag 5.22 *Tot welke lijmsort behoort solutie, te gebruiken voor het plakken van fietsbanden?*

6 Ontwerpen en produceren

Na bestudering van dit hoofdstuk kan de student de problemen onderkennen tussen het ontwerpen en de daadwerkelijke fabricage van een produkt.

6.1. Inleiding

Een ontwerp is geslaagd als het geleid heeft tot een produkt dat zijn waarde in de toepassing heeft gevonden. In het ideale geval heeft de ontwerper ervoor gezorgd dat het ontwerp is afgestemd op de functie-eisen, de fabricage-eisen en het hergebruik van het produkt en het materiaal van dat produkt. Dan gaan fabricage, gebruik en hergebruik vloeiend in elkaar over en wordt na hergebruik de kringloop gesloten. Idealen worden gekoesterd maar zijn zelden haalbaar, al het aardse is onvolkomen, en dus treden in de overgangen van ontwerp naar fabricage en van gebruik naar hergebruik allerlei fricties, vooroordelen en misverstanden op. Daarom worden in dit hoofdstuk enkele voorbeelden van ontwerp en fabricage van produkten gegeven. Bij deze voorbeelden uit de praktijk komen dan ook mensen uit de praktijk aan het woord, want *zij* zijn bij uitstek deskundig.

6.2. Van stuiver tot vijf gulden

Munten hebben zich ontwikkeld van stukken met een intrinsieke waarde naar stukken met louter vertrouwenswaarde. Juist om de functie vertrouwen goed te vervullen dient een munt vervaardigd te zijn uit een metaallegering die duurzaamheid als belangrijk kenmerk heeft. Dit is voor een groot deel synoniem met corrosievastheid. Daarnaast mogen munten bij het overgrote deel van de gebruikers geen allergiereacties veroorzaken. Voor munten worden dan ook in het algemeen betrekkelijk hoogwaardige metaallegeringen toegepast. Bij de vormgeving van munten spelen tradities een grote rol. De traditie en de wet willen, dat de voorzijde van de Nederlandse munten het portret van het staatshoofd vertoont. Die traditie wil verder, dat als er een nieuw Staatshoofd aantreedt, de kijkrichting van het portret op de munt wisselt: Juliana (koningin tot 1980) kijkt naar rechts en Beatrix (koningin na 1980) kijkt naar links. Overigens is van deze tradities wel afgeweken. Gewoonlijk is het ook zo, dat als de munt naar boven omgekeerd wordt, de keerzijde van de munt leesbaar is. De munten met Juliana voldoen hieraan, maar de munten met Beatrix

niet. De munten van Nederland moeten passen in een muntreeks, die aan drie basisvoorwaarden voldoet:

1. het land van uitgifte moet duidelijk worden aangegeven
2. de muntreeks moet goede betalingsmogelijkheden hebben (de verdeling over de verschillende muntsoorten, de denominaties)
3. de verschillende denominaties moeten duidelijk herkenbaar zijn.

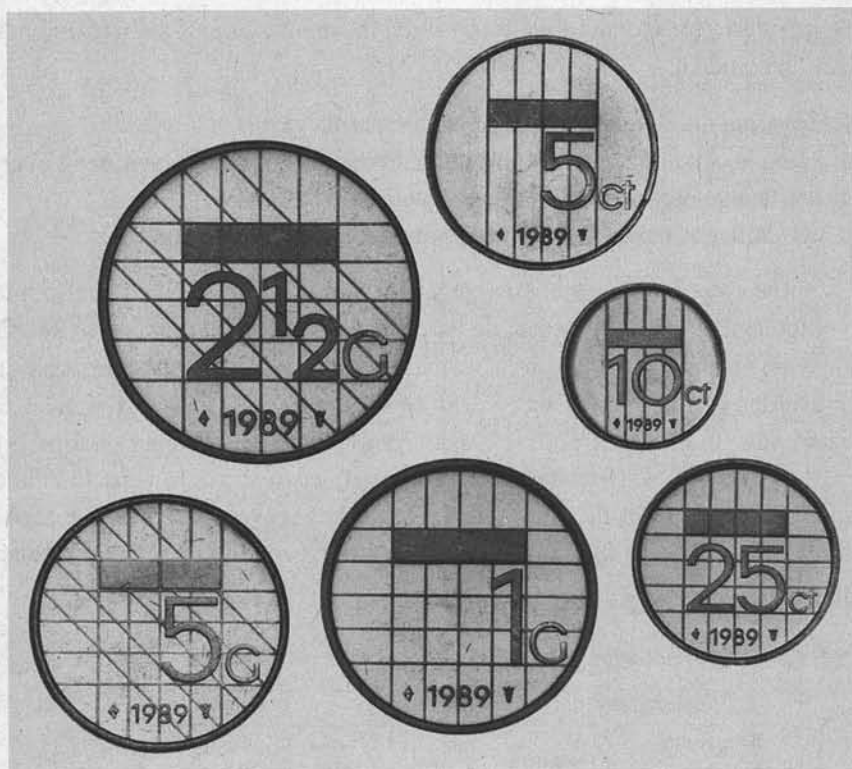
In de Muntwet van 1948 zijn al veel gegevens van de huidige Nederlandse muntreeks vastgelegd, zoals de waarden, de metaallegeringen en de diameters (Ref. 25). De gangbare munten in 1994 zijn in vermeld in tabel 6.1. De keerzijden van deze munten worden getoond in figuur 6.1. Uit de Muntwet volgt, dat de voorzijden van de Nederlandse munten het portret dragen van het staatshoofd met als opschrift: Beatrix Koningin der Nederlanden. Voor de keerzijde wordt alleen bepaald dat deze de waarde vermeldt. Met de in tabel 6.1 vermelde gegevens is het kader bepaald voor de muntreeks die in het begin van de regeringsperiode van Koningin Beatrix ontworpen werd.

Tabel 6.1. Gangbare munten in Nederland.

| <i>denominatie</i> | | <i>metaallegering</i> | <i>diameter (mm)</i> |
|--------------------|--------|-----------------------|----------------------|
| vijf gulden | f 5,- | nikkel en brons | 23,5 |
| rijksdaalder | f 2,50 | nikkel | 29 |
| gulden | f 1,- | nikkel | 25 |
| kwartje | f 0,25 | nikkel | 19 |
| dubbeltje | f 0,10 | nikkel | 15 |
| stuiver | f 0,05 | brons | 21 |

6.2.1. De ontwerper: Bruno Ninaber van Eyben

Het portret van de Koningin is een van de in het oog springende kenmerken van de muntreeks van 1980. De ontwerper had de vrijheid om de Koningin ook anders dan in profiel af te beelden. Een muntreeks moet een samenhangend geheel vormen. Op de muntzijde van de munten moeten staan: de waarde-aanduiding, het jaartal van slaan, het muntteken en het muntmeesterteken. Bij het ontwerpen moest verder rekening worden gehouden met de technische eisen voortkomend uit de vervaardiging van de stempels, waarmee de munten in massafabricage geslagen worden. De ontwerper had vrijheid voor de bepaling van de voorstellingen op de keerzijde. Toen in 1948 het ontwerp voor de muntreeks met Juliana gemaakt werd (Juliana werd in 1948 koningin) was het oordeel van de ontwerper, prof. Wenckebach, dat de symbolen van herrezen Nederland, Kroon en Rijkswapen, zo kort na de Tweede Wereldoorlog niet gemist konden worden. De ontwerper van de Beatrix-munten,



Figuur 6.1. Keerzijden van de in 1989 in Nederland courante munten (foto: Hans Kokx).

Bruno Ninaber van Eyben (Ref.26), wilde munten ontwerpen voor Nederland als een modern geordend, goed georganiseerd, geïndustrialiseerd land. De strenge vlakverdeling van de keerzijde is daarvan het symbool. Uit deze vlakverdeling volgde de opbouw van het portret aan de voorzijde uit verschillende vlakken op verschillende hoogten. Voor de plaatsing van de tekst 'BEATRIX KONINGIN DER NEDERLANDEN' is belangrijk geweest het blikveld van de Koningin vrij te houden. Aanvankelijk had het ontwerp van de keerzijde het lijnenpatroon als groeven, de inwaartse versie. Hiervoor was het moeilijk een goed stempel te maken. Uit een vergelijking met een uitvoering met richels, de uitwaartse versie, die veel eenvoudiger bleek te realiseren, is een voorkeur voor de uitwaartse versie voortgekomen. Deze voorkeur was hoofdzakelijk gebaseerd op esthetische en technische gronden. Bij de proefslag bleek, dat de traditionele plaatsing van de keerzijde (leesbaar na draaiing naar boven van de munt) tot gevolg had, dat bij de door de 's Rijks Munt toegepaste stempeldrukken de keerzijde sporen gaf op de portretzijde. Dit bleek te vermijden door de stempels ten opzichte van elkaar een kwartslag te draaien. Voor Bruno Ninaber van Eyben is praten over het ontwerp van de Beatrixmuntserie eigenlijk een stap terug in de historie. Maar sommige inzichten die hij

vooral tijdens de realisatie van zijn ontwerp heeft verkregen, kon hij later bij geheel andere opdrachten opnieuw gebruiken.

“Nog voor het ontwerpen is de materiaalkeuze al heel erg belangrijk: lood om oud ijzer, daar ben ik het totaal niet mee eens. Lood heeft een totaal andere uitstraling dan oud ijzer, of liever gerooft staal; lood is zacht, zwaar en plastisch, terwijl staal hard en veerkrachtig is. Oud staal heeft een totaal ander uiterlijk dan oud lood. Elke metaallegering krijgt in het gebruik een eigen patine, een eigen gebruikt uiterlijk. Als je ontwerpt, dan moet je denken: hoe ziet een produkt er uit na jaren gebruik. Je kunt zeggen: het materiaal voor je produkt, of dat nu kunststof, brons, nikkel of roestvast staal is, is de metafoor van je produkt. Daarom moet je eigenlijk bij het begin van ontwerpen direct al denken in termen van het gekozen materiaal.”

“Nu was bij die muntserie het materiaal al gekozen; het was immers vooral nikkel. De oude munten hadden ronde vormen, die eigenlijk pasten bij de edele metalen als zilver, goud en brons, die als uitstraling zachtheid en plasticiteit hebben. Maar nikkel, dat dan ook gebruikt werd voor het oude ontwerp, heeft een totaal andere uitstraling: hard, scherp precies, vormvast en duurzaam. In tegenstelling tot brons, dat sterk verkleurt in het gebruik, is nikkel praktisch onveranderlijk in kleur. En toen vroeg ik mij af, wat de functie van munten eigenlijk was in het geldverkeer, maar ik wist zeker dat het ontwerp van de Julianamunt niet paste bij nikkel. De nieuwe munt moest Nederland ook plaatsen als land tussen de grote buurlanden Engeland, Frankrijk en Duitsland. Nederland is een scherp, sterk georganiseerd land. De vorm moest dus zuiver zijn en toch elegantie hebben. En internationaal moesten Nederlandse munten zich onderscheiden en zich presenteren als *Nederlandse* munten. Kijk, de serie bestaat uit ontwerpen voor alle munten, waarbij het lijnenpatroon op de keerzijde past bij elke waarde, de staande richels bij dubbeltje en stuiver en de vierkanten bij de kwadraten daarvan: kwartje en gulden.”

“Om de munten sprekend te krijgen, hebben de richels een hellingshoek (van 18°), daardoor reflecteren de zijanten van de richels zo mooi het licht. Daardoor krijg je een scherp beeld. Dat is eigenlijk het best gelukt bij het dubbeltje. De stuiver geeft alleen maar een scherpe impressie als die nieuw is. Het brons verkleurt heel snel, en dan wordt het beeld zo afgerond. Bij het ontwerpen ben ik eigenlijk steeds uitgegaan van nikkel. En toen kwam later het vijfguldenstuk, en dan zijn we eigenlijk weer terug in de tijd. Het brons is eigenlijk te zacht om die indruk van scherp te en ordening te geven, de richels ronden te veel af, en nog belangrijker, het reflecteert niet het licht. Ik ben niet over de kleur gevraagd. Je kunt wel de samenstelling van de bronslaag op het in de kern nikkel vijfguldenstuk zo kiezen, dat als dat stuk nieuw is, het zo veel mogelijk op goud lijkt, maar je moet er rekening mee houden hoe zo'n stuk er dan na jaren gebruik uitziet. Brons ontwikkelt nu eenmaal een kleur, en lijkt die na jarenlang gebruik nog steeds op die van goud? Waarom niet gewoon nikkel, de verschillen met de andere munten zijn toch groot genoeg?”

“De strakheid, de reflectie en de elegantie, ik vond dat dat bij nikkel alleen kon in een ontwerp in vlakken. Door die vlakken zie je inderdaad meer krassen, maar de meeste krassen ontstaan tijdens de produktie. Ik geloof niet, dat de Beatrix-munt in het eigenlijke gebruik krasgevoeliger is dan de Juliana-munt. Ik moet zeggen, dat ik me niet gerealiseerd had, dat het metaal tijdens het slaan eigenlijk zo plastisch was: het metaal vloeit in de gravure, en ik wilde een vlak ontwerp. De Juliana-munt is een rond ontwerp en in een rond ontwerp vloeit het metaal beter dan in een vlak, scherp ontwerp. Ik heb in die periode van ontwerpen natuurlijk veel te maken gehad met de mensen van 's Rijks Munt, zij waren zo gewend aan het ronde ontwerp, nu moest alles anders. De hele afbeelding van een munt zit in de uiterste buitenlaag, daar vindt de kouddeformatie plaats, de kern van de munt is nauwelijks gedeformeerd. Toch zagen we het vlak van de keerzijde in de wang van het portret van de Koningin, het deformatiepatroon werd dus doorgegeven dwars door de munt heen! Toen hebben we inderdaad de keerzijde een kwartslag gedraaid. Door de bolling van het stempel vloeit het metaal vanuit het midden, en de richels en vlakken van het stempel kunnen dus obstakels zijn. Je stempel moet dus bijzonder sterk en scherp zijn om de gravure gevuld te krijgen, anders wordt de standtijd van het gereedschap snel minder. Ik vind wel dat je daar als ontwerper rekening mee moet houden. Er was eerst nog het ontwerp met inwaartse lijnen, en dus uitwaartse richels op het stempel, en die moeten onvoorstelbare krachten opvangen tijdens het slaan. Dat ging, maar de kwaliteit was niet te handhaven voor grote aantallen, en muntproduktie is massaproductie, en daarom heb ik gekozen voor de munt met uitwaartse richels. De bolling van het stempel zorgt voor de vulling van de gravure en is ongeveer 0,08 mm. In die 0,08 mm moet de voorstelling gevormd worden, ja misschien is een rationeel ontwerp wel een ontwerp waarbij het metaal langs radiële lijnen vloeit. Wat is eigenlijk het gereedschap van de ontwerper? Dat is toch het gereedschap van de maker, het materiaal en het ontwerp, want daar ligt de *kern* van het vak van industrieel ontwerper: *van de gereedschappen materiaal, fabricage en produkt-ontwerp een produkt maken met een symbolische meerwaarde*”.

6.2.2. De producent: 's Rijks Munt

HET GELD HIER UIT METAAL VERKREGEN, ZIJ NOOIT TEN VLOEK DOCH STEEDS TEN ZEGEN, siert het uit 1911 stammende gebouw van 's Rijks Munt in Utrecht. De heren H. van de Hoef, plaatsvervangend Muntmeester, A.M. Mooij, hoofd van de Kwaliteitsdienst en A. van Lunteren, hoofd van de afdeling Vormgeving, werken hier met circa 100 collega's aan de produktie van munten en penningen (zowel voor Nederland als voor de export) en de ere- en ordeteken (medailles en kruizen) voor De Kanselarij der Nederlandse Orden (Ref.27). De produktie van circulatiemunten is inderdaad massafabricage, zoals blijkt uit tabel 6.2 (Ref.28). De samenstelling van de gebruikte metaallegeringen is gegeven in tabel 6.3.

Tabel 6.2. Productie van Nederlandse munten in miljoenen stuks.

| jaar | denominatie | | | | | |
|------|-------------|------|------|------|------|------|
| | 0,05 | 0,10 | 0,25 | 1,00 | 2,50 | 5,00 |
| 1982 | 47,1 | 10,3 | 18,3 | 31,3 | 14,3 | |
| 1983 | 60,2 | 38,2 | 18,2 | 5,2 | 3,8 | |
| 1984 | 70,7 | 42,2 | 19,2 | 4,2 | 5,2 | |
| 1985 | 36,1 | 29,1 | 29,1 | 3,1 | 3,1 | |
| 1986 | 7,7 | 23,1 | 20,3 | 12,1 | 5,8 | |
| 1987 | 33,3 | 21,7 | 36,1 | 20,1 | 2,5 | |
| 1988 | 22,6 | 2,2 | 17,4 | 13,6 | 6,2 | 73,7 |
| 1989 | 27,1 | 5,3 | 30,5 | 1,1 | 4,1 | 69,1 |
| 1990 | 39,3 | 13,3 | 23,1 | 1,1 | 1,1 | 47,3 |
| 1991 | 73,1 | 41,1 | 25,1 | 0,5 | 0,5 | 17,1 |
| 1992 | 52,7 | 41,3 | 41,6 | 10,1 | 0,5 | 0,5 |

Tabel 6.3. Kenmerken van enige Nederlandse munten.

| denominatie | metaallegering | gehalte (gew%) | diameter (mm) |
|--------------|----------------|---------------------|---------------|
| vijfje | rand: brons | Cu + 12 Sn | 23,5 |
| | kern: nikkel | Ni 99,5 | |
| rijksdaalder | nikkel | Ni 99,5 | 29 |
| gulden | nikkel | Ni 99,5 | 25 |
| kwartje | nikkel | Ni 99,5 | 19 |
| dubbeltje | nikkel | Ni 99,5 | 15 |
| stuiver | brons | Cu 95 + Sn 4 + Zn 1 | 21 |

“Nikkel is dus voor ons een belangrijk metaal”, zegt Mooij, “het wordt gebruikt omdat het een goede corrosiebestendigheid heeft. Het heeft een kubisch vlakken gecentreerd kristalrooster, met de mogelijkheden voor kouddeformatie zal het dus wel goed zitten. Wij keuren de aangekochte *rondellen*, zo worden de door ons aangekochte muntplaatjes genoemd, aan de hand van vooraf door 's Rijks Munt opgestelde specificaties. De muntplaatjes kopen we bij de metaalleverancier.”

“Het vijfje”, zo zegt Van de Hoef, “wordt door de toeleverancier uit nikkelstrip geponst, voorzien van een opzetrand en vervolgens elektrochemisch van een bronslaag voorzien. De laagdikte behoort volgens de specificaties circa 40 micron te zijn.”

“Alle nikkelen rondellen voor de guldens, de kwartjes, de dubbeltjes en de rijksdaalders”, zegt Mooij, “moeten bij binnenkomst een maximale hardheid van ongeveer 95 HV hebben. Een hogere hardheid leidt namelijk tot een hoger stempelverbruik bij de koudvervorming (muntslag), omdat een hogere perskracht aangebracht moet worden. Bovendien is een hogere hardheid lastig omdat het metaal de gravure van het stempel zo mooi mogelijk moet vullen. Het persproces lijkt eenvoudiger dan het in werkelijkheid is. Het goed vullen van de gravure is niet alleen afhankelijk van de hardheid, maar heeft ook te maken met de vorm van de stempel,

de oppervlaktegesteldheid van de rondel, de randvorm en de dikte van de rondel. De rondellen zijn voorzien van speciaal gevormde randen (opzetrand). De vijfgulden rondellen worden voordat zij gemunt worden eerst voorzien van het randschrift “*God*Zij*Met*Ons”. Hierdoor wordt de opgezette rand een cilindrische ring (muntring) waarin zij met een bepaalde spleetruimte liggen opgesloten. De genoemde muntring is voorzien van kartels. Onder- en bovenstempel persen vervolgens de gravure in, waardoor de rondel uitzet en in de gekartelde ring wordt gedrukt. Het resultaat is een gemunt vijfje voorzien van randschrift in kartel.”

“Ondanks de perskracht van circa 120 ton verandert de middendikte en de hardheid van de rondel niet veel. De kouddeformatie zit voornamelijk in de gravurediepte van de munt (circa 0,1 mm). Gezien het feit dat de bronslaagdikte van het vijfje circa 40 micron bedraagt, zal het duidelijk zijn dat de ingeperste gravure ook nog duidelijk zichtbaar zal zijn als de bronslaag verwijderd zou worden. Zelfs bleek de ingeperste gravure, voor het gevoelige menselijke oog, aan de tegenzijde zichtbaar. Daarom zijn de voor- en tegenzijde een kwartslag ten opzichte van elkaar gedraaid.”

“De samenstelling van de bronslaag is voornamelijk bepaald door de kleur: alleen met circa 12 gew% tin kreeg je een kleur die dicht tegen die van goud aanligt. Daar de bronslaag elektrochemisch is aangebracht, is de kans op segregatie gering.”

“Er is een groot verschil tussen de Juliana-munten en de Beatrix-munten”, legt Van Lunteren uit, “de Julianamunt is in wezen een driedimensionaal ontwerp, dat betekent dat de hoogteverschillen bereikt worden door vloeiende kromme lijnen. De Beatrix-munt is een tweedimensionaal ontwerp, dat betekent dat de hoogteverschillen alleen maar bereikt worden door rechte scherpe hoeken en rechte lijnen die in beginsel loodrecht op het vlak van de munt staan. Natuurlijk vult de gravure bij een tweedimensionaal ontwerp veel slechter. We hebben natuurlijk wel wat afrondingen toegepast en we hebben veel geëxperimenteerd. Het begin van de productie is het overbrengen van het ontwerp naar een zinkplaat. Daarna gaat de graveur aan de slag. In de volgende fase wordt een matrijs gemaakt door verkleining met een pantograaf, dat is een apparaat om de omtrek van een figuur op gelijke grootte of verkleind over te brengen. Van de matrijs wordt een moederstempel gemaakt die gekopieerd wordt in een fabrieksstempel. Het fabrieksstempel bevat dus het negatief van de afbeelding. Je hebt een bovenstempel en een onderstempel nodig. Bij het slaan wordt het bovenstempel altijd wat geholpen door de zwaartekracht. In zo'n driedimensionaal ontwerp kan het metaal veel mooier uitvloeien dan in een tweedimensionaal ontwerp en doordat een driedimensionaal ontwerp geen vlakken op de munt geeft, is de Juliana-munt veel meer krasvast dan de Beatrix-munt, vergelijk een Juliana-gulden van voor 1980 maar eens met een Beatrix-gulden (het metaal is hetzelfde!) van na 1980. Bij de Beatrix-munt moesten we dus vlakken leveren en omdat het fabrieksstempel tijdens de slag wat inveert moest het stempel natuurlijk een bolling hebben. Proefondervindelijk hebben we gevonden, dat de

stempelbolling 0,08 mm moet zijn. Bedenk daarbij dat het haar van Koningin Beatrix op 0,09 mm ligt, haar wangen op 0,06 mm en de rest van haar gezicht op 0,03 mm. De stempels hebben trouwens een hardheid van ongeveer 65 HRc en toen we de goede bolling gevonden hadden werd de standtijd van de stempels voor de Beatrix-munten weer aanvaardbaar, daarvoor was die gewoon veel te laag. Toch is de standtijd van de stempels voor de Beatrix-munten lager gebleven dan voor de Juliana-munten.”

6.3. Sigaren passen in doosjes

Een echte sigarenroker weet, dat er maar één geschikt materiaal is om sigaren in te bewaren: cederhout. In een cederhouten kistje blijft de geur van een sigaar het best behouden. Helaas is deze vorm van verpakken betrekkelijk duur. Voor niet al te dure sigaren moet dus een ander materiaal gevonden worden. Een oplossing is karton. Karton is goedkoop en houdt de geur redelijk vast. Vaak wordt een reepje cederhout toegevoegd voor het geurbewoud (en niet speciaal voor het aansteken van de sigaren). Een belangrijk nadeel is echter dat de stevigheid van een kartonnen doosje te wensen over laat. Daarom wordt, vooral voor de export, een toevlucht gezocht in staal. De sigarenblikjes (zie figuur 2.22) worden gemaakt bij Thomassen & Drijver-Verblifa in Doesburg, waar wij een gesprek hadden met ing. M. Bokslag (Ref. 29).

“In deze fabriek worden sigarenblikjes, tabaksbussen en ‘twist-off’ deksels (voor jampotjes e.d.) gemaakt. Er werken 230 mensen in 3- en 5- ploegendiensten. Per jaar worden 50 miljoen sigarenblikjes gemaakt in 27 verschillende maten. Het plaatmateriaal, Temper 52 (staal met een hardheid van 48-56 HRb 30 T, zie Euronorm 109-80) met een dikte van 0,18 mm wordt aangeleverd door Hoogovens, voorzien van 2,8 g/m² tin. Het tin wordt elektrochemisch aangebracht voor het visuele aspect. In onze drukkerij in Oss worden eerst de opdrukken op de platen gedrukt, waarna ze in deze fabriek tot produkten omgevormd worden. Dit betekent dat de lak zeer sterk en krasvast moet zijn, omdat er natuurlijk tijdens het omvormen grote krachten op werken. De lak wordt in drie lagen opgebracht. Eerst wordt een grondlak aangebracht, deze wordt gevolgd door de bedrukking en ten slotte wordt nog een aflaklaag aangebracht. Stof en droge lakdeeltjes vormen tijdens het bedrukken deukjes in het blik, wat visueel onaanvaardbaar is voor onze klanten. Met hardere staalsoorten is de kans op dit soort beschadigingen kleiner. Daarom willen we overgaan op een staal met een hardheid van 57 HRb 30 T (zie Euronorm 109-80), Temper 57. Bij deze hardheid is het staal nog goed vervormbaar.”

“Een ander voordeel van het overgaan op Temper 57 is dat dit materiaal continu gegloeid kan worden. Temper 52 kan slechts ‘batch’-gewijs gegloeid worden (dat wil zeggen dat steeds aparte ladingen gegloeid worden). Hoogovens wil van het ‘batch’-gloeiproces af, omdat het economisch veel beter is om continu te gloeien.

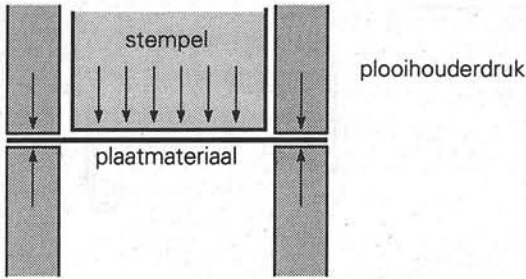
Temper 52 wordt 'batch'-gewijs gegloeid omdat met het continue proces de hardheid niet lager kan worden dan 61 HR. Pas sinds kort kan men bij Hoogovens continu Temper 57 maken. Overigens vindt er binnen ons bedrijf geen ingangscntrole van het materiaal plaats. Hoogovens garandeert ons dat we de juiste kwaliteit krijgen. Mocht er toch iets fout gaan dan is Hoogovens aansprakelijk te stellen."

"Regelmatig krijgen we het verzoek van sigarenproducenten om het formaat van een blikje aan te passen. Meestal gaat het hierbij om kleine veranderingen. Door kleine verschillen tussen de sigaren proberen de producenten zich te onderscheiden van anderen. Een gevolg is echter dat de blikjes ook net een ander formaat moeten hebben. Vanuit een puur economisch oogpunt zeggen we hier wel eens dat het toch echt een stuk voordeliger is om de sigaren een halve centimeter korter of langer te maken, maar dat schijnt niet te kunnen. Voor onszelf levert het maken van de verschillende maten weinig problemen op. Het enige is dat er een extra uitval is, omdat de machines steeds opnieuw ingesteld moeten worden. Ten opzichte van de totale uitval is deze bijdrage vrij klein. Bij de drukker is er een uitval van ongeveer 10 %. Het criterium voor ons voor het wel of niet ingaan op een verzoek is de seriegrootte. Deze moet minimaal 1 miljoen stuks zijn om het aanschaffen van nieuw gereedschap (stempels natuurlijk) rendabel te maken. De gereedschapskosten voor een nieuwe maat bedragen drie ton. Vanwege deze hoge kosten wordt een bestaand ontwerp bijna nooit gewijzigd. De prijs van een blikje varieert tussen 20 en 70 cent, afhankelijk van de afmetingen en de seriegrootte."

"De fabricage van de blikjes kan onderverdeeld worden in vier stappen:

1. Stansen en dieptrekken
2. Kralen of omzetten van de rand
3. Aanbrengen van sluiting, ziel en scharnier
4. Aan elkaar maken van blikje en deksel

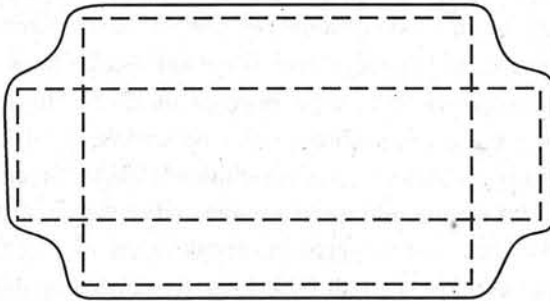
Allereerst worden de bedrukte platen staal in stroken gesneden. Deze kunnen stuk voor stuk toegevoerd worden aan een gecombineerde stans/dieptrekmachine. Hiermee worden in een stap de plaatjes gestanst en vervolgens diepgetrokken. De druk op de plooihouder wordt zo ingesteld, dat het dieptrekken zonder plooiën verloopt. Het is niet zo, dat de hoogte van het dieptrekken van veel invloed is op de plooihouderdruk, zie figuur 6.2. Meestal is de plooihouderdruk gelijk voor een 'hoge' (hoogte circa 20 mm) of 'lage' (hoogte circa 10 mm) doos. Het bijregelen van de plooihouderdruk heeft meer te maken met de gladheid van de lak en de conditie van het stempel, dan met de hoogte van de doos. Bij de plooivorming wordt de druk verhoogd en als de 'oren' te groot zijn of het materiaal trekt kapot, dan wordt de plooihouderdruk verlaagd. Ook wordt bij de blikjes het begin van de ziel aangebracht. In de vorm van het gestanste plaatje is in de hoeken wat minder materiaal aanwezig omdat de randen als het ware opgezet worden. In de hoeken is dus het



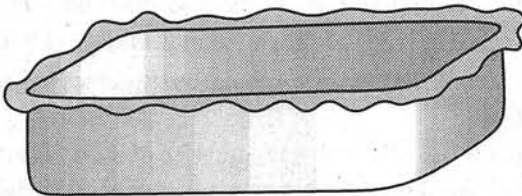
Figuur 6.2. Plooihouderdruk.

minste materiaal nodig (zie figuur 6.3). Na het dieptrekken (zie figuur 6.4) worden de randjes van het blikje afgesneden en wordt het randje gekraald (Schimmelpenninck-blikje) of omgezet (Dannemann-blikje). Bij kralen wordt het randje rond omgevouwen (zie figuur 6.5) en bij omzetten wordt het randje plat omgevouwen (zie figuur 6.6). Het voordeel van kralen is dat de rand een bijdrage levert aan de stevigheid van het blikje terwijl dat bij het omzetten niet het geval is. Een nadeel is dat een gekraald randje meer ruimte inneemt.”

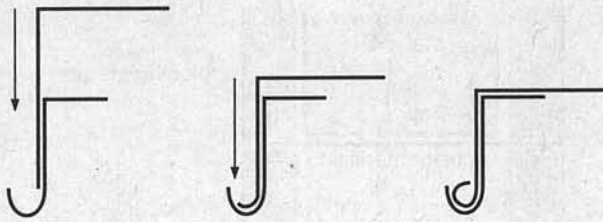
“Het laatste stadium is het in elkaar zetten van de doosjes. De sluiting wordt in deksel en blikje gedrukt en in het blikje worden een ziel en een scharnier gemaakt. Daarna wordt de deksel om de scharnieruiteinden in het blikje gevormd en is het doosje klaar.”



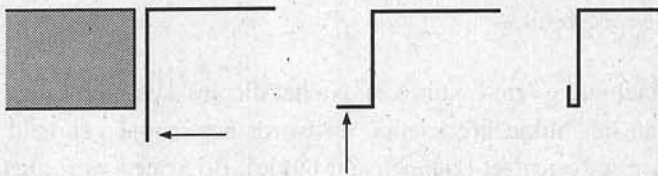
Figuur 6.3. Uitsparing bij de hoeken.



Figuur 6.4. Dieptrekken.



Figuur 6.5. Kralen: rond omvouden.



Figuur 6.6. Omzetten: plat omvouden.

6.4. Geavanceerde eenvoud

Bij het ontwerpen in kunststoffen valt al snel op dat betrekkelijk eenvoudige ontwerpen vaak zeer geavanceerd zijn door slim gebruik van materiaaleigenschappen. Zowel eigenschappen als toepassingen zijn zeer divers. Kunststoffen zijn goed verwerkbaar, hebben een mooi uiterlijk en ook de mechanische eigenschappen worden steeds beter. Daarbij gevoegd het feit dat kunststoffen ook nog vele handige functionele eigenschappen hebben, is het begrijpelijk dat de kunststoffen een steeds belangrijker groep materialen worden. Het behandelen van kunststoffen naar toepassing is vrij lastig omdat ze zich in verschillende toepassingen zeer verschillend kunnen gedragen. Om een indruk te krijgen van wat er wel en niet mogelijk is met kunststoffen hebben we een vraaggesprek gehouden met dhr. R. Lahaye die werkzaam is bij ontwerpbureau Van Dijk Eger Associates in Zeist (Ref.30). Van Dijk Eger Associates is het grootste ontwerpbureau in Nederland. Er werken 35 mensen en bovendien is er sinds een paar jaar ook een bureau in Münster waar 5 mensen werken. De activiteiten zijn verdeeld in drie 'business units': Industrial Design & Engineering, Graphics en Architectural Design. Er wordt ontworpen in kunststoffen en metalen. R. Lahaye is specialist op de gebieden produktietechnologie en materiaaltechnologie.

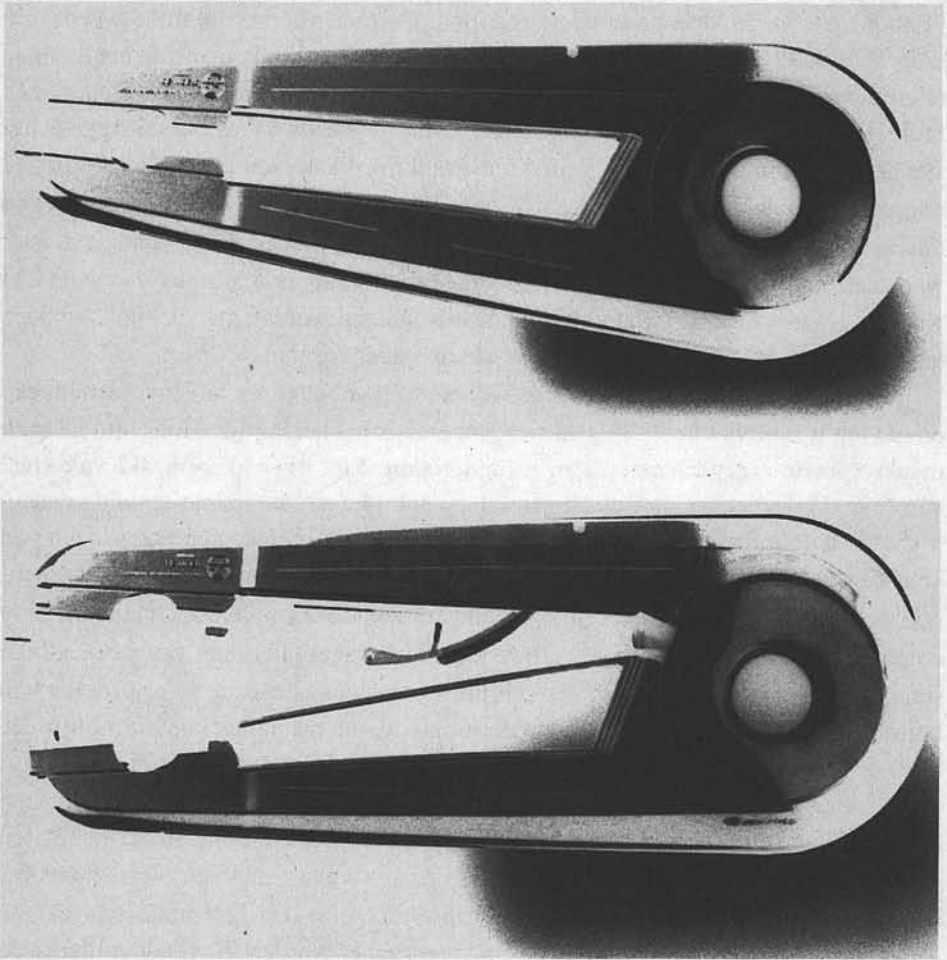
"Zodra een ontwerper in kunststoffen gaat ontwerpen moet hij erop bedacht zijn dat hij niet een willekeurige kunststof uit een tabelletje prikt met de juiste eigenschappen", waarschuwt Dhr. Lahaye, "maar dat hij ook kijkt naar waar en voor hoe lang een produkt gebruikt wordt."

“Een goed voorbeeld is de mobiele telefoon. De moderne huistelefoon wordt ontworpen in ABS (acrylonitril-butadien-styreen), dus bij het opkomen van het mobiele telefoneren was niets eenvoudiger dan gewoon weer ABS te gebruiken. Helaas, een mobiele telefoon neem je mee naar buiten, laat je steeds vaker buiten liggen, ligt steeds vaker bij je buitenhuisje in Zuid-Frankrijk in de zon en tenslotte krijg je degradatie van je ABS doordat het ABS niet UV-gestabiliseerd is. Het probleem kon dus verholpen worden door een UV-stabilisator toe te voegen. In ziekenhuizen is er weer een andere voorwaarde voor het materiaal waar de telefoons van gemaakt worden. Daar is het van belang dat ze ontsmet kunnen worden met alcohol. Als je je telefoons dan uit PC (polycarbonaat) maakt, treedt er spanningscorrosie op.”

“Uit deze voorbeelden blijkt duidelijk dat het materiaal gekozen moet worden bij een omgeving waarin het gebruikt gaat worden. Ook is het belangrijk dat je slim gebruik maakt van de eigenschappen van je materialen. Een oven is gemaakt van staal vanwege de goede mechanische eigenschappen bij hogere temperaturen. Een nadeel is dat de hele oven heet wordt zodat je je gemakkelijk brandt. Een eigenschap van vele kunststoffen is dat ze de warmte slecht geleiden. De mechanische eigenschappen worden echter snel minder bij oventemperaturen. Door nu metaal en kunststof te combineren is een optimaal ontwerp te maken. Je maakt het huis van de oven van staal, zodat de oven sterk blijft bij gebruik. Vervolgens bevestig je er panelen van kunststof omheen zodat de warmte in de ruimte tussen metaal en kunststof blijft. Zo blijft de binnenkant warm en de buitenkant koud.”

“Een ander zeer alledaags ontwerp is de kettingkast van een fiets. De kettingkast bestond in eerste instantie uit twee gelakte stukken doek die bij elkaar gehouden werden door een staaldraad. Daarna volgde de kettingkast met een metalen bovenkant en nu worden ze standaard van kunststof gemaakt. Een nadeel is dat de kettingkast nog steeds met schroefjes vastgezet moet worden. Bovendien breekt de kast vaak af bij de bevestigingspunten. Een ander probleem is dat de ketting vaak na verloop van tijd slap gaat hangen. Daarom worden kettingspanners gebruikt die het achterwiel naar achteren trekken zodat de ketting strak komt te staan. Het geheel rond de ketting bestaat dus uit losse onderdelen. Niets is onhandiger dan een uit losse onderdelen bestaand produkt. Daarom is door ons een nieuwe kettingkast ontworpen (zie figuur 6.7). Deze is geheel van kunststof en bevat een geïntegreerde kettingspanner. De bevestiging gaat bovendien heel eenvoudig met een kliksysteem.”

“Voor het materiaal van de kettingkast is ABS gekozen. PP (polypropreen) was wat mechanische eigenschappen betreft ook bruikbaar geweest, maar dat is slecht te lakken. Het voordeel van ABS is, dat het gelakt kan worden met dezelfde lak die voor het metalen frame gebruikt wordt, waardoor het uiterlijk hetzelfde is. Bovendien is de krimp van ABS kleiner dan van PP zodat de maatnauwkeurigheid groter is. Het ABS is tenslotte ook nog slagvast en blijft dit ook bij lage temperaturen zodat zelfs in strenge winters de kettingkast niet zomaar zal breken.”



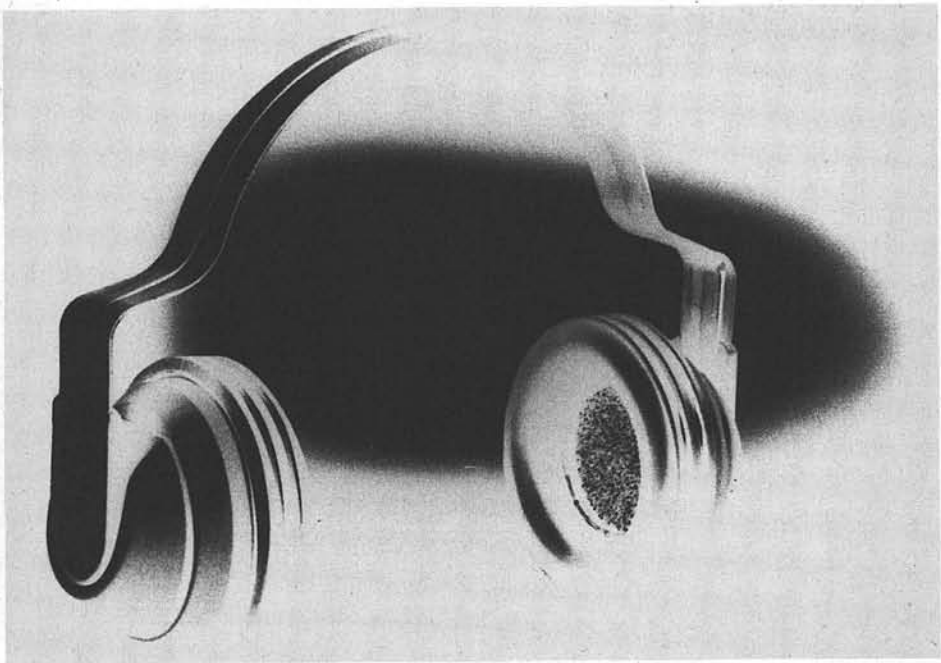
Figuur 6.7. Nieuwe kettingkast.

“Het sluitingskapje van de kettingkast is gemaakt van POM (polyoxymethyleen). POM is stabiel, is ook sterk bij lage temperaturen, vertoont nauwelijks kruip en is bedrijfszeker (geen breuk tijdens het gebruik). In plaats van POM zou ook nylon gebruikt kunnen worden. Het nadeel van nylon is dat de glansstructuur niet optimaal is als het gevuld wordt met glasvezels. De glasvezels zijn noodzakelijk voor een voldoende hoge sterkte. Bovendien is nylon direct na het spuitgieten te bros. Nylon bereikt de noodzakelijke taaierheid door opname van enkele procenten water. Het water fungeert als weekmaker. De wateropname is echter een langzaam proces en men zou dus een van nylon gemaakt kapje na het spuitgieten moeten ‘wateren’ door het geruime tijd (circa 24 uur) in water te leggen.”

“De geïntegreerde kettingspanner is een verhaal apart. Er is in de kettingkast een boogje opgenomen dat aan één zijde vast zit. Dit boogje zit tegen de ketting aan-

gedrukt zodat de ketting op spanning blijft. Het boogje is gemaakt van POM vanwege de lage kruip en de goede elastische eigenschappen. Bij het testen is tevens nagegaan of de ketting bij het over de spanner slepen niet teveel lawaai maakte. Dit leek in eerste instantie niet het geval te zijn. Ten opzichte van het geluid dat de rest van de fiets maakte, leek het geluid van de ketting te verwaarlozen te zijn. Bij het testen was men echter uitgegaan van het fietsen in de binnenstad van Amsterdam. Toen er ook mensen op stille bospaadjes bleken te fietsen was het geluid echter niet meer te verwaarlozen. Daarom moest er een materiaal gevonden worden dat de geluidsgolven dempte. Er werd besloten een laagje thermoplastisch PU (polyurethaan) op het POM aan te brengen. Dit dempt de trillingen afdoende.”

“Een ander op het oog eenvoudig, maar bij nadere beschouwing geavanceerd product is de gehoorbeschermer (zie figuur 6.8). Van buiten zie je alleen ‘een thermoplast’, ‘een thermoplastische rubber’ en ‘een thermoplastisch schuim’. Zo eenvoudig ligt het echter niet. Er zijn bij het ontwerp van de gehoorbeschermer zes verschillende kunststoffen gebruikt met alle hun eigen specifieke eigenschappen. De beugel is gemaakt van ABS vanwege de goede elastische eigenschappen. De oorschelp is een complex geheel van materialen die alle een dempende functie hebben. De buitenkant is gemaakt van PP met daarop een laagje PS (polystyreen). Om de geluidsgolven extra te dempen is de binnenkant in stukken verdeeld door een ribstructuur aan te brengen. Optimaal bleek een ring met ribben radiaal naar buiten



Figuur 6.8. Gehoorbeschermer.

te zijn. Op de ribstructuur ligt een laagje geluiddempende bitumen met kunststofvezels erin (een afvalprodukt). Naar dit materiaal is lang gezocht, allerlei soorten schuim, keramische wol, etc. zijn uitgeprobeerd. Op het idee van de bitumen/vezelcombinatie zijn we gekomen via de vloerbedekking van auto's, omdat ook daar een demping van de trillingen noodzakelijk is. Na het bitumenlaagje volgt weer een laagje PP, dat trillingsvrij opgehangen is aan de buitenste laag PP. Daarna volgt een laag PU-schuim en om een luchtdichte verbinding tussen beschermer en hoofd te krijgen is dit schuim omgeven met een thermoplastisch rubber."

"Uit het gebruik van de autovloerbedekking als geluiddempend materiaal blijkt maar weer eens dat het gebruiken van je gezonde verstand erg nuttig is. Je kunt wel afgaan op materiaalkeuze-programma's of tabellenboeken met karakteristieke eigenschappen, maar daarin zul je nooit eigenschappen in toepassingen vinden. De gegevens moeten dan ook altijd met grote voorzichtigheid gebruikt worden."

Appendix Nomenclatuur

De benamingen voor de verschillende materialen is nog maar gedeeltelijk genormaliseerd. Daarom zijn nog veel traditionele benamingen in gebruik. Toch heeft het streven naar codering en normering alweer een lange geschiedenis. Codering en normering loopt echter per definitie achter op de ontwikkeling van de materialen. Daarom is er in dit bestek van af gezien uitgebreid op de kwesties aangaande normering en codering in te gaan. Waardevolle gegevens kunnen worden verkregen uit "Materiaalkeuze in de werktuigbouw", Stiomak/THT, Educaboek/Stam, Culemborg NL, 1978. Voor ijzer en staal en voor aluminiumlegeringen worden hieronder enige bronnen van normering en codering gegeven die voor de praktijk belangrijk zijn.

Ferrolegeringen

De NEN-bundel 3, uitgegeven door het Nederlands Normalisatie Instituut te Delft in het jaar 1983, bevat 84 normen voor staal en staalprodukten met een mededeling uit 1992 gevend de vervangen en de nog geldende normen. De Euronormen 1 tot en met 188 en de EGKS-normen 1 tot met 8 gaan alle over ferro-metalen. Nauwkeurige benamingen zijn vastgelegd in NEN-EN 10027. Een overzicht van staalkwaliteiten wordt ook gegeven door "Staal kwaliteiten", G. Foekema, Staalcentrum Nederland, Rotterdam NL, 4de druk, 1983.

De DIN-norm 17007 biedt een geüniformeerd systeem voor *alle* constructiematerialen. Dit systeem van "Werkstoffnummern" wordt ook in de al genoemde Stahlschlüssel (Ref.8) toegepast, te samen met andere, vaak in de praktijk meer voorkomende coderingssystemen. De Stahlschlüssel bevat ook een vergelijking voor staalsoorten met andere internationale coderingen, zodat een vertaling mogelijk is. Voor de roestvaste staalsoorten wordt in de praktijk vaak de AISI codering gebruikt. Tabel A1 geeft enkele gangbare roestvaste staalsoorten volgens deze codering.

Tabel A7. *ISI-codering van roestvaste staalsoorten.*

| codering | samenstelling | | | | | |
|----------|-----------------|------------------|------------------|--------------|--------------|------------------|
| | max C (gew%) | max Mn (gew%) | max Si (gew%) | Cr (gew%) | Ni (gew%) | andere (gew%) |
| 301 | 0,15 | 2,0 | 1,0 | 17 | 7 | |
| 304 | 0,07 | 2,0 | 1,0 | 18 | 10 | |
| 304L | 0,03 | 2,0 | 1,0 | 18 | 10 | |
| 347 | 0,08 | 2,0 | 1,0 | 18 | 10 | Nb:10x%C |
| 316L | 0,03 | 2,0 | 1,0 | 17 | 12 | Mo:2,2 |
| 410 | 0,12 | 1,0 | 1,0 | 13 | | |
| 430 | 0,10 | 1,0 | 1,0 | 17 | | |

Aluminiumlegeringen

Aluminiumlegeringen zijn uiteraard ook ondergebracht in het systeem van "Werkstoffnummern" volgens DIN 17007. Daarnaast wordt in de praktijk de zogenaamde AA-codering gebruikt, die thans in veel landen in de nationale normen is opgenomen. Een overzicht van de meest gangbare aluminiumlegeringen met de daarbij behorende aanduidingen wordt gegeven door de "Aluminiumschlüssel", door W. Hufnagel, 4. Auflage (Engels/Duits), AluminiumVerlag Düsseldorf BRD, 1991.

De AA-codering voor aluminiumgietlegeringen is gegeven in tabel A2. De AA-codering voor aluminiumkneedlegeringen is in tabel A3 samengevat.

Tabel A8. *AA-codering voor Al-gietlegeringen.*

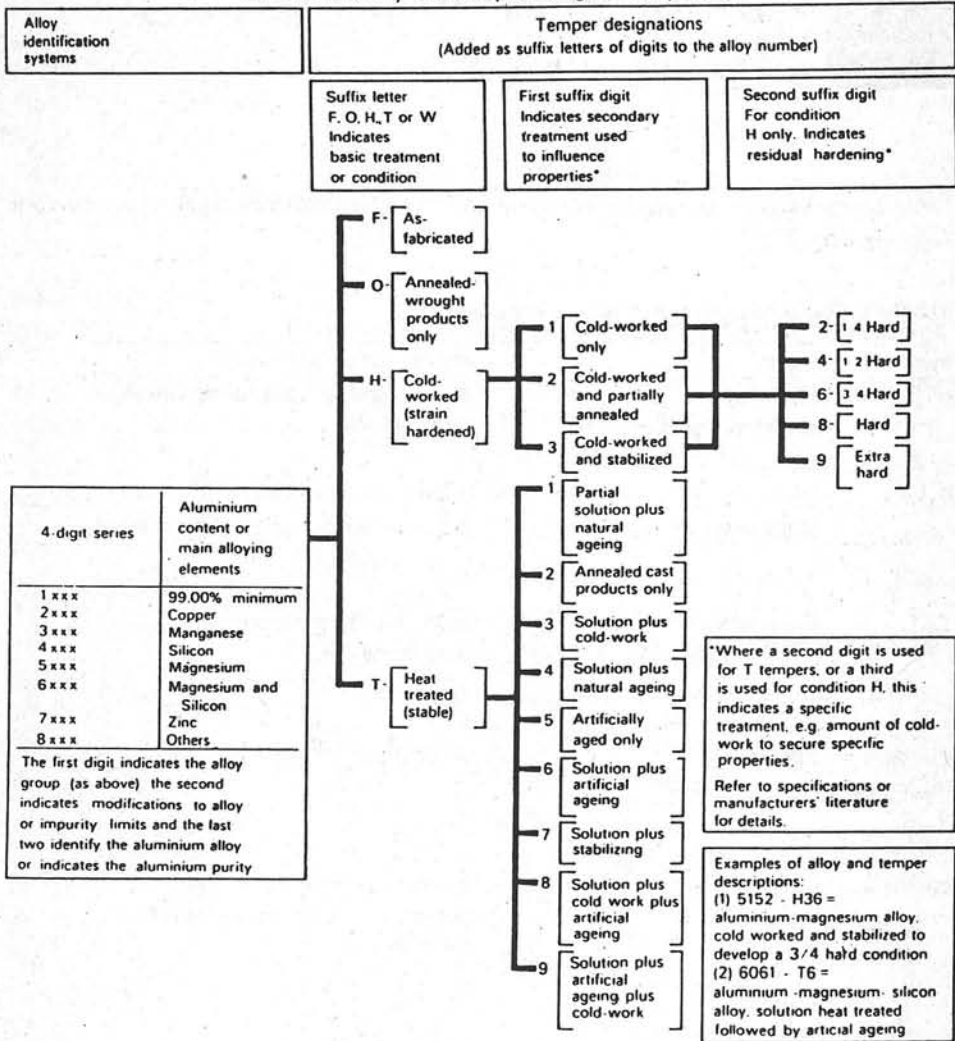
| soort/belangrijkste legeringselement | codering |
|--------------------------------------|----------|
| zuiver Al (> 99,0 gew%) | 1xx.x |
| koper | 2xx.x |
| silicium met koper en/of magnesium | 3xx.x |
| silicium | 4xx.x |
| magnesium | 5xx.x |
| zink | 7xx.x |
| tin | 8xx.x |
| niet-gebruikt reeksnummer | 6xx.x |
| andere legeringselementen | 9xx.x |

cijfer na de punt is 0:
gietwerk, of 1: ingot

De aanduidingen voor de warmtebehandelingstoestand zijn hetzelfde als voor de kneedlegeringen; zie het hierna volgende overzicht in tabel A3..

Tabel A9. AA-coderingen voor Al-kneedlegeringen.

Aluminium alloy and temper designation systems



Appendix Mechanische eigenschappen

Samengesteld door A. Speijer

Deze appendix geeft een definiërend overzicht van mechanische eigenschappen voor isotrope materialen.

Tabel A1. Statische belasting: trek en afschuiving.

| symbool | naam | definitie en omschrijving |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| σ | spanning (engineering) stress | kracht F gedeeld door oorspronkelijke oppervlak A_0 |
| ϵ | rek (engineering) strain | lengteverandering Δl gedeeld door oorspronkelijke lengte l_0 |
| E_0 | elasticiteitsmodulus Young's modulus | helling van de trekkromme in de oorsprong |
| σ_m, σ_b (R_m, σ_{UTS}) | treksterkte tensile strength | maximale spanning |
| $\sigma_{p0,2}$ ($R_{p0,2}$) | 0,2% rekgrens | spanning waarbij 0,2% niet-proportionele blijven-de rek optreedt |
| σ_y | vloeigrens yield stress | taai kunststoffen: σ_m wordt σ_y metalen: $\sigma_{p0,2} = \sigma_y$ |

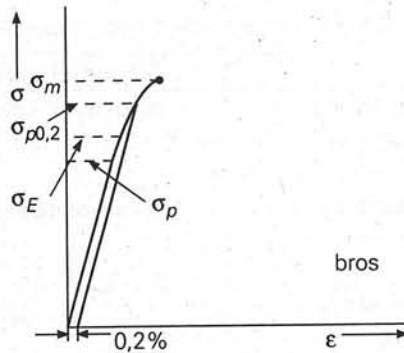
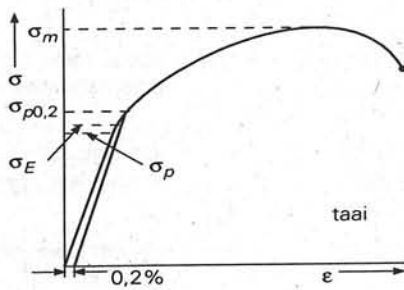
wiskundige vergelijking

illustratie

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_i - l_0}{l_0}$$

$$E_0 = \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=0}$$



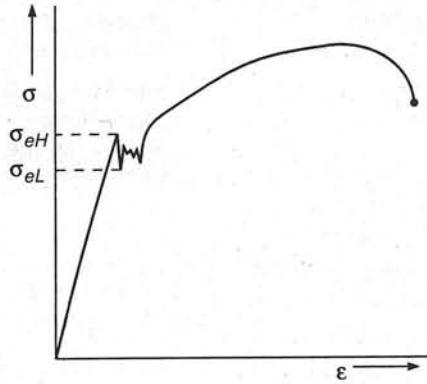
| <i>symbool</i> | <i>naam</i> | <i>definitie en omschrijving</i> |
|-------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| σ_E | elasticiteitsgrens elastic limit | spanning waarbij plastische vervorming voor het eerst optreedt |
| σ_p | proportionaliteitsgrens proportional limit | spanning waarbij de rek niet meer evenredig is met de spanning |
| σ_{eH} (R_{eH}) | bovenste vloeigrens upper yield point | maximum spanning bij vloeï (staal) |
| σ_{eL} (R_{eL}) | onderste vloeigrens lower yield point | minimum spanning bij vloeï (staal) |
| ν | dwarscontractiecoëfficiënt Poisson's ratio | de verhouding tussen de rek loodrecht op de belastingsrichting en de rek parallel aan de belastingsrichting |
| τ | schuifspanning shear stress | schuifkracht F gedeeld door het oorspronkelijke oppervlak A_0 |
| G | glijdingsmodulus shear modulus | schuifspanning gedeeld door de afschuiving γ ($\gamma = \tan \delta$) |
| ϵ_s | kruipsnelheid | rek per tijdseenheid onder constante belasting |

Tabel A2. *Dynamische belasting: vermoeïing en visco-elasticiteit.*

| <i>symbool</i> | <i>naam</i> | <i>definitie en omschrijving</i> |
|----------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| σ_{max} | maximale spanning maximum stress | hoogste optredende spanning |
| σ_{min} | minimale spanning minimum stress | laagste optredende spanning |
| σ_m | gemiddelde spanning mean stress | |
| σ_a | spanningsamplitude stress amplitude | |
| R | spanningsverhouding stress ratio | verhouding tussen minimaal en maximaal optredende spanning |

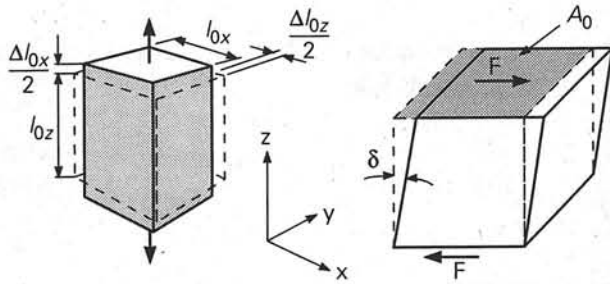
wiskundige vergelijking illustratie

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$



$$\tau = \frac{F}{A_0}$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$



$$\epsilon_s = K\sigma^n$$

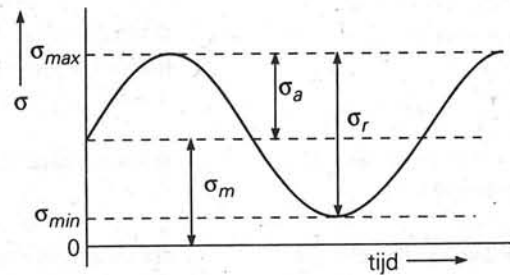
empirische relatie tussen ϵ
en σ met materiaal-
constanten K en n

wiskundige vergelijking illustratie

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$



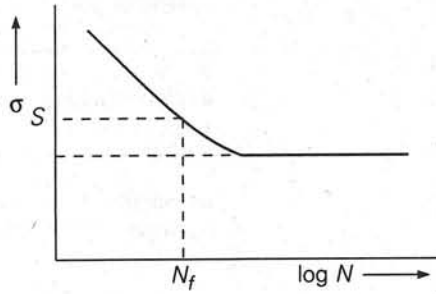
| <i>symbol</i> | <i>naam</i> | <i>definitie en omschrijving</i> |
|---------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S | vermoeiingssterkte fatigue strength | spanningsamplitude waarop bij een gegeven aantal wisselingen het monster bezwijkt |
| N_f | levensduur fatigue life | aantal wisselingen tot falen bij een gegeven spanningsniveau; indien $N_f \rightarrow \infty$ dan heet S de vermoeiingsgrens |
| E^* | complexe E-modulus complex E-modulus (voornamelijk polymeren) | |
| G^* | complexe G-modulus complex G-modulus (voornamelijk polymeren) | |
| E', G' | opslagmodulus storage modulus | reële component van de complexe modulus (in-fase deel) |
| E'', G'' | verliesmodulus loss modulus | imaginaire component van de complexe modulus (uit-fase deel) |

Tabel A3. Breukmechanica.

| <i>symbol</i> | <i>naam</i> | <i>definitie en omschrijving</i> |
|---------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| K_t | spanningsconcentratiefactor stress concentration factor | maximaal optredende spanning gedeeld door de nominale spanning |
| K_c | breuktaaiheid fracture toughness | grens waarboven het materiaal bros breekt |
| Y | vormfactor | oneindige plaat: $Y=1,0$ half-oneindige plaat met randscheur: $Y= 1,1$ |
| σ_c | kritische spanning critical stress | spanning waarboven breuk optreedt |
| a_c | kritische scheurlengte maximum allowable flaw size | scheurlengte waarboven breuk optreedt. |

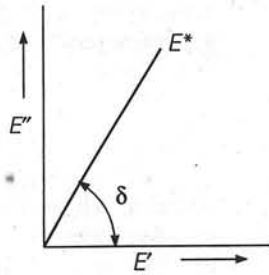
wiskundige vergelijking

illustratie



$$E^* = E' + iE''$$

$$G^* = G' + iG''$$



wiskundige vergelijking

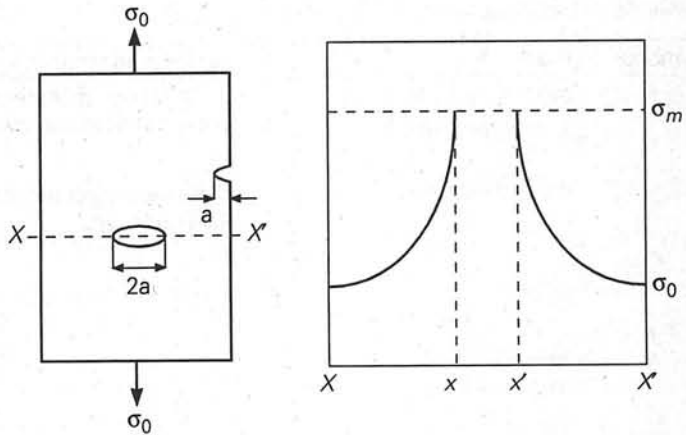
illustratie

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0}$$

$$K_c = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

$$\sigma_c \leq \frac{K_c}{Y\sqrt{\pi a}}$$

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{\sigma Y} \right)^2$$



Tabel A4. *Hardheid.*

| <i>symbool</i> | <i>naam</i> | <i>indruklichaam</i> | <i>toepassing</i> |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| HB | Brinell | stalen of wolframcarbide kogel ($D = 10$ mm) | metalen meting na indrukking |
| HV | Vickers | diamanten piramide | metalen en polymeren meting na indrukking |
| | Shore D | stalen kegel met afgeronde punt ($d = 0,1$ mm) | polymeren meting tijdens indrukking |
| HRx | Rockwell (x hangt af van het indruklichaam en van de opgelegde belasting, zie Ref. 32) | diamanten kegel of stalen bollen met diverse diameters | vrijwel alle metalen en polymeren meting meestal na indrukking |

Tabel A5. *Weibull-statistiek.*

| <i>symbool</i> | <i>naam</i> | <i>definitie en omschrijving</i> |
|----------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| P | overlevingskans survival probability | kans dat een monster bij een bepaalde spanning σ niet bezwijkt |
| m | Weibull-modulus | statistische grootheid die de spreiding karakteriseert |
| V | volume | |
| V_0 | eenheidsvolume unit volume | |
| σ_r | drempelwaarde spanning threshold stress | waarde van de spanning waaronder het monster nooit bezwijkt |

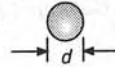
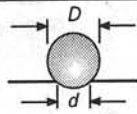
wiskundige vergelijking

illustratie

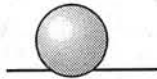
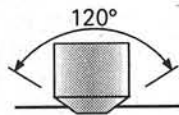
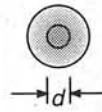
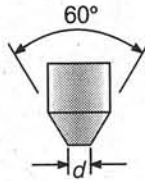
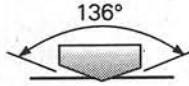
zij-aanzicht

bovenaanzicht

$$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$$

 (P in kg, D en d in mm)


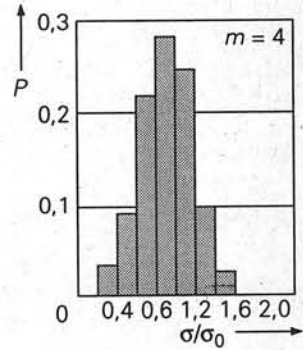
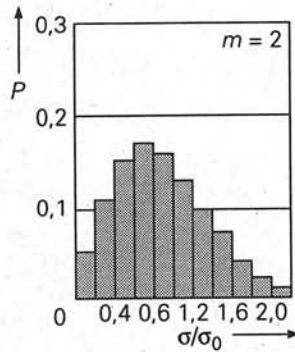
$$HV = \frac{1,854P}{d_1^2}$$

 (P in kg, d in mm)


wiskundige vergelijking

illustratie

$$P = \exp \left[\left(\frac{-V}{V_0} \right) \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0} \right)^m \right]$$



Tabel A6. De constructie van Considère.

| <i>symbool</i> | <i>naam</i> | <i>definitie en omschrijving</i> |
|----------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|
| σ_w | ware spanning true stress | kracht F gedeeld door het eigenlijke oppervlak A |
| ϵ_w | ware rek true strain | |
| ϵ_u | uniforme rek uniform strain | rek die optreedt tot insnoering |

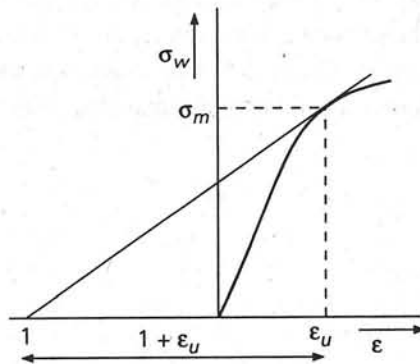
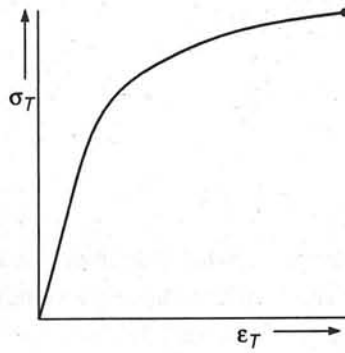
wiskundige vergelijking

illustratie

$$\sigma_w = \frac{F}{A}$$

$$\varepsilon_w = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon)$$

rek bij het raakpunt van de σ_w - ε lijn met de raaklijn hieraan vanuit $\varepsilon = -1$





Appendix Prijsverhoudingen

Bij de keuze tussen verschillende materialen kan de kostprijs van doorslaggevende betekenis zijn. Het is daarom handig een indicatie te hebben van de prijzen van veel gebruikte materialen. Daarom zijn hieronder in tabel A4 richtprijzen, exclusief btw, gebaseerd op het prijspeil van het eerste kwartaal van 1994, vermeld. De vermelde prijzen zijn dagprijzen, afhankelijk van de af te nemen hoeveelheden. Aanvullende gegevens zijn te vinden in het prijzenboekje van de DACE (Dutch Association of Cost Engineers), 17e editie, Leidschendam, 1994.

Tabel A10. Materiaalprijsen, genormeerd op plaatstaal.

| <i>behandeling</i> | <i>karakteristieke afmeting</i> | <i>ordergrootte (kg)</i> | <i>prijs per 100 kg (f)</i> | <i>prijsindex</i> |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|
| ongelegeerd plaatstaal, relatieve dichtheid 7,85 | | | | |
| warmgewalst | (1,5-2,75 mm) | 250-500 | 175 | 100 |
| | | > 1000 | 115 | 65 |
| koudgewalst | (0,5-2,95 mm) | 250-500 | 195 | 110 |
| | | > 1000 | 135 | 75 |
| | (3-10 mm) | 250-500 | 120 | 60 |
| | (10-80 mm) | 250-500 | 125 | 70 |
| elektrochemisch verzinkt | (0,5-2,95 mm) | 250-500 | 210 | 120 |
| | | > 1000 | 150 | 85 |
| thermisch verzinkt | (0,75-3 mm) | 250-500 | 200 | 115 |
| | | > 1000 | 140 | 80 |
| ongelegeerd profielstaal | | | | |
| plat-, vierkant-, rond-, hoek-, T-, en klein U-profielstaal | | > 250 | 80 | 45 |
| laaggelegeerd staal voor plaat, strip of band, relatieve dichtheid 7,95 | | | | |
| 15Mo3 | | | 125 | 70 |
| 13CrMo44 | | | 175 | 100 |
| 10CrMo9.10 | | | 325 | 185 |
| roestvast staal, relatieve dichtheid 8 | | | | |
| AISI 304 | | | 430 | 245 |
| AISI 310 | | | 850 | 485 |
| automatenstaal | | | | |
| 9S Mn28K | staf 25-28mm | | 275 | 160 |
| non-ferro metaal voor plaat, folie of staf | | | | |
| <i>metaal</i> | <i>vorm</i> | <i>relatieve dichtheid</i> | <i>prijs per 100 kg (f)</i> | <i>prijsindex</i> |
| Al 99,5% 2S | plaat (> 1 mm) | 2,7 | 800 | 460 |
| | staf | | 2000 | 1145 |
| AlMgSi57S | plaat (> 1 mm) | 2,7 | 700 | 400 |
| | staf | | 2000 | 1145 |
| Hastelloy B2 | plaat | 8,9/9,2 | 10000 | 1030 |
| koper gedyoxideerd | plaat | 8,9 | 1800 | 1030 |
| messing | plaat | 8,6 | 1500 | 860 |
| nikkel (200) | plaat | 8,6 | 3510 | 2005 |
| titaan (grade 2) | plaat | 4,5 | 5000 | 2860 |
| zink | plaat | 7,3 | 5000 | 2860 |

kunststoffen

| <i>naam</i> | <i>vorm</i> | <i>relatieve dichtheid</i> | <i>prijs per m² oppervlak per mm plaatdikte (f)</i> | <i>prijs per m staf (f)</i> | <i>prijs per 100 kg (f)</i> | <i>prijsindex</i> |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| polyamide (nylon) | plaat | 1,13 | 41 | | 3600 | 2100 |
| | staf (50 mm) | | | 63 | 2840 | 1600 |
| | staf (200 mm) | | | 1052 | 2960 | 1700 |
| polyester (glasvezelwapening) | golfplaat (1,6 mm) | 2 | 14 | | 440 | 250 |
| polyetheen (hard, geëxtrudeerd) | plaat (1-30 mm) | 0,95 | 27 | | 95-2800 | 55-1600 |
| | staf (50 mm) | | | 63 | 3380 | 1900 |
| | staf (120 mm) | | | 400 | 3720 | 2100 |
| polymethylmetacrylaat (glashelder perspex, gegoten) | plaat (2-6 mm) | 1,18 | 25 | | 500-1100 | 290-630 |
| | staf (50 mm) | | | 215 | 930 | 5300 |
| | staf (120 mm) | | | 1718 | 12900 | 7400 |
| polypropeen (hard, geëxtrudeerd) | plaat (1-30 mm) | 0,91 | 18 | | 70-2000 | 40-1100 |
| | staf (50 mm) | | | 54 | 3000 | 1700 |
| | staf (200 mm) | | | 854 | 3000 | 1700 |
| polytetrafluoretheen (teflon) | plaat (1-30 mm) | 2,2 | 324 | | 490-14700 | 280-8400 |
| | staf (50 mm) | | | 497 | 11500 | 6600 |
| | staf (200 mm) | | | 3416 | 4940 | 2800 |
| polyvinylchloride (hard, geperst) | plaat (2-10 mm) | 1,4 | 33 | | 2360 | 1350 |
| | staf (10 mm) | | | 2 | 1820 | 1040 |
| | staf (100 mm) | | | 170 | 1550 | 880 |
| rubber (zonder toe- voeging, shore 40) | plaat (5 mm) | 1,05 | 25 | | 480 | 270 |
| rubber (met 2 toe- voegingen, shore 65) | plaat (5 mm) | 1,45 | 12 | | 170 | 100 |

Antwoorden op studievragen

- 1.1. Stel de gemiddelde grootte van een huishouden op 2,5 personen, de penetratiegraad van deze apparaten op 200% en hun gemiddelde levensduur op 7 jaar. Het aantal verkochte koffiezetapparaten kan nu geschat worden.
- 2.3. Zie figuur 2.14.
- 3.1. Koolstof is primair een legeringselement in ijzer, aangezien het bepalend is voor de sterkte van de ijzer-koolstof legering
- 3.2. Cu is een onzuiverheid als het niet speciaal toegevoegd is. Het is dan aanwezig als element schadelijk voor de corrosieweerstand. Wordt Cu echter speciaal toegevoegd om de sterkte te vergroten, dan is Cu een legeringselement.
- 3.3. De waarde van de E-modulus is nauwelijks afhankelijk van het gehalte aan B-atomen omdat de afstand tussen de atomen nauwelijks verandert.
- 3.4. Bij daling van de temperatuur vanuit het vloeistofgebied kristalliseert eerst de vaste stof B, waardoor de vloeistof rijker wordt aan A (de gemiddelde samenstelling van het mengsel blijft natuurlijk V). Bij de peritectische temperatuur T_p vormt zich uit de vloeibare fase en uit vast B de eerste kleine hoeveelheid V. Dit moet gebeuren door diffusie van A-atomen door vast B. Doordat diffusie in een vaste stof aanmerkelijk trager verloopt dan in een vloeistof, wordt de evenwichtssamenstelling van de gevormde verbinding pas na lange tijd bereikt. Aan het oppervlak van het al aanwezige vast B vormt zich een laag V. Voor de verdere uitscheiding hiervan is het noodzakelijk, dat A-atomen uit de vloeistof door deze laag heen diffunderen om de B-atomen te bereiken. Door de langzame instelling van het evenwicht vormen zich lagen met van de rand naar de kern gaand dalend gehalte aan A-atomen (en dus een toenemend gehalte aan B-atomen). Dit verschijnsel heet kristalsegregatie; systemen met een peritecticum zijn berucht wegens dit verschijnsel.
- 3.5. Kristalsegregatie zal in sterkere mate optreden bij hogere afkoelsnelheden doordat de diffusie die nodig is om de evenwichtssituatie te bereiken minder

tijd krijgt om te verlopen.

- 3.6. Kristalsegregatie maakt homogengloeien vaak noodzakelijk. Om smeltgevaar te vermijden neemt men als temperatuur voor het homogengloeien een temperatuur juist beneden de smelttemperatuur van de laagst smeltende component.
- 3.8. De maximale temperatuur voor homogengloeien voor deze legeringen ligt net onder de eutectische temperatuur.
- 3.10. Als in een binaire legering van A en B het gehalte aan B toeneemt, dan zal relatief de hoeveelheid β -fase toenemen. Er is namelijk relatief meer B aanwezig om een B-rijke β -fase te vormen en er is relatief minder A aanwezig om een A-rijke α -fase te vormen.
- 4.1. De molmassa van Fe is 56 en die van C is 12. Als dus 2 gew% C aanwezig is, dan is er $2 \cdot \frac{56}{12} \approx 9$ at% C aanwezig. Het aantal octaëderholtes is gelijk aan het aantal Fe-atomen dus voor iedere 91 holtes zijn er 9 C-atomen. Dit komt overeen met ongeveer 10%.
- 4.2. Als zachtgloeien in het austenietgebied uitgevoerd zou worden, dan zou door de hoge temperatuur gevaar ontstaan voor extreme korrelgroei. De grove korrels die dan ontstaan zijn nadelig voor de eigenschappen.
- 4.3. De lasbaarheid van een gehard stalen werkstuk is slecht. Door het lassen wordt namelijk de temperatuur rond de las zo hoog dat dit deel van het werkstuk als het ware een ontlaatbehandeling krijgt. De speciale eigenschappen die door het harden verkregen zijn worden hierdoor teniet gedaan.
- 4.4. Ook voor een gehard en ontlaten stalen werkstuk is de lasbaarheid slecht. De ontlaatbehandeling is op een zodanige wijze uitgevoerd dat specifieke eigenschappen verkregen zijn. Door een nieuwe warmtebehandeling zullen deze eigenschappen rond de las weer gewijzigd worden.
- 4.5. In figuur 3.11 is te zien dat 4,3 gew% C praktisch gelijk is aan de eutectische samenstelling van ijzer-grafiet. In het ijzer-grafiet diagram komt nergens anders een samenstelling voor die bij een lagere temperatuur nog vloeibaar is. Het klopt dus.
- 4.6. In het vloeibare gietijzer is de koolstof opgelost. Bij stolling scheidt koolstof uit in de vorm van grafiet. Pas dan gaat de koolstof effectief volume innemen. Hierdoor kan koolstof de slink die in het gietijzer optreedt, teniet doen.

- 4.7. Als slink afwezig is, dan is het niet nodig een ruimere vorm te gebruiken dan die nodig is voor het uiteindelijke produkt. Er kan dus beter op maat ontworpen worden. Dit betekent onder andere dat minder nabewerkingen nodig zullen zijn en dat het materiaal economischer benut wordt.
- 4.8. Gezien het ijzer-koolstofdiagram is de smelttemperatuur van staal, afhankelijk van het percentage koolstof, hoger dan die van gietijzer.
- 4.9. De kerfwerking wordt bij drukspanning geëlimineerd.
- 4.10. Door grote wanddiktevariatie ontstaan grote verschillen in afkoelsnelheid. Hierdoor ontstaat grote variaties in de microstructuur en dus grote variaties in de eigenschappen.
- 4.11. In figuur 4.23. In figuur 4.24 zijn de kerven afgerond.
- 4.12. Voor de scherpte is moet het staal hardbaar zijn, voor de fabricage uit gewalste plaat moet het zo zacht mogelijk zijn. Er wordt dus gekozen voor juist 0,25 gew% C.
- 4.13. In een keukenmachine wil je een mooi blinkend staal dat vooral ook mooi blijft. Roest op een keukenapparaat oogt niet prettig, alhoewel de roest op zich zeker niet schadelijk is. Gezien tabel 4.13 moet gekozen worden voor een martensitisch roestvast staal.
- 4.14. Gebruik een zakmagneet om te kijken of het staal magnetisch is; bepaal door krassen welk staal het hardst is.
- 4.16. Voor precipitatie is verplaatsing van atomen nodig. Deze verplaatsing is thermisch geactiveerd: bij elke temperatuur is er een kans dat atomen juist voldoende energie hebben om zich te verplaatsen, door temperatuurverhoging stijgt deze kans.
- 4.18. Nee, zie vraag 3.3.
- 4.19. Mg is een element dat bijdraagt aan een verhoging van de rekgrens door oplosharding. Door de hogere rekgrens wordt de koudvervormbaarheid lager, want er is een grotere kracht nodig om blijvende vervorming aan te brengen.
- 4.21. De fabricage-eisen zijn inderdaad gedeeltelijk tegenstrijdig. Een minimale anisotropie wordt bereikt met zo klein mogelijke kristallen, wat ook een goede sterkte garandeert. In het algemeen wordt hierdoor de koudvervormbaarheid kleiner omdat een grotere vervormingskracht moet worden uitgeoefend.

- 4.22. De sterkte van de tweede legering zal hoger zijn dan die van de eerste: meer oplosharding.
- 4.23. Aangezien de drinkopening niet te eenvoudig (bijvoorbeeld door stoten) open mag gaan, is een verhoogde sterkte gewenst. Daarom past men de sterkere legering toe.
- 4.24. De bewering is juist omdat er in de nog niet geprecipiteerde legering minder barières zijn voor de beweging van dislocaties. De vervorming zal dus eenvoudiger gaan.
- 4.25. De legeringen zijn lasbaar omdat tijdens het lassen oplossen van legeringselementen optreedt in een gedeelte van de warmte-beïnvloede zone ter weerszijden van de las, van waaruit later op kamertemperatuur weer precipitatie optreedt.
- 4.26. Zie figuur 2.25. Door het lassen zal de harding van het aluminium teniet gedaan worden en zoals blijkt uit de figuur wordt de breuksterkte daardoor lager. De las zal dus zwakker zijn dan de rest van het metaal.
- 4.27. Kristalsegregatie leidt in deze legeringen bijna altijd tot de aanwezigheid van de verbinding Al_8Mg_5 . Deze verbinding heeft een lagere potentiaal dan de vaste oplossing van Mg en Al. Er zullen daardoor lokaalelementen ontstaan waardoor corrosie optreedt.
- 4.28. Zie hieraan voorafgaande tekst.
- 4.29. Verhoging van de rekristallisatietemperatuur door toevoeging van legeringselementen in kleine gehalten, 0,1 gew% Ag of 0,1 gew% Cd.
- 4.30. Precipitatie is principieel mogelijk door de teruglopende oplosbaarheidslijn in het toestandsdiagram Cu-Be.
- 4.31. De kiemvorming wordt vergroot waardoor fijnere precipitaten ontstaan.
- 4.32. $\delta \rightarrow \alpha + \epsilon$.
- 4.33. 400 °C.
- 4.34. Homogene α -fase heeft een goede koudvervormbaarheid wegens het kvg/fcc-rooster.
- 4.35. De krullen kunnen ontbranden aan de lucht. Het is daarom van het grootste belang dat er geen zuurstof bij het Mg in de buurt is. Het bluspoeder op basis van NaCl smelt rond de brandende metaaldelen en sluit deze af van de lucht. Gietijzerspanen voeren snel warmte af. De temperatuur van de magnesiumkrullen wordt hierdoor onder de ontbrandingstemperatuur gebracht.

Blussen met water kan niet omdat het water met het magnesium reageert.
Blussen met zand werkt slecht omdat zand vaak water bevat.

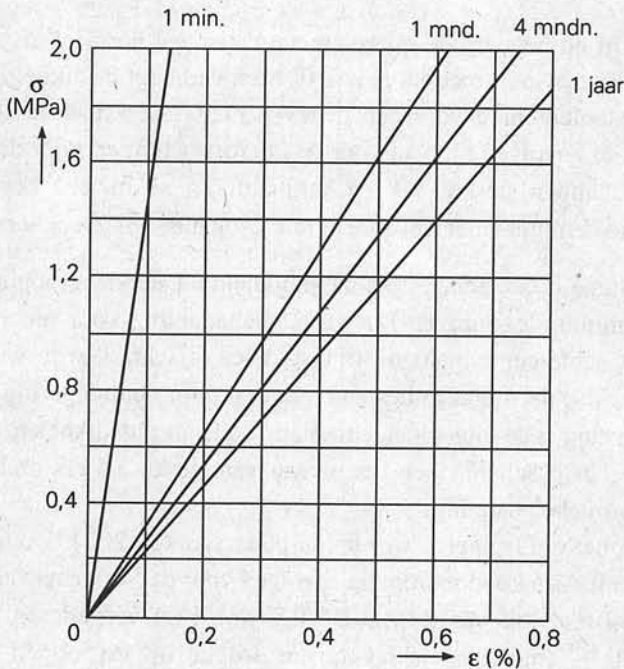
- 4.36. $T_m = 923 \text{ K}$ ($650 + 273$), $220 + 273 = 493 \text{ K}$. $493/923 > 0,4 T_m$ dus is er sprake van warmdeformatie.
- 4.38. De lange glasvezels moeten al ingebouwd zijn vòòr de vormgeving. Tijdens de vormgeving zal het polymeer echter nog dusdanig deformeren dat de lange glasvezels breken tot kleine vezels.
- 4.39. Thermoharders en elastomeren hebben crosslinks, waardoor de macromoleculen vrijwel niet ten opzichte van elkaar kunnen bewegen.
- 5.1. De afkoelsnelheid is veel groter.
- 5.2. De drukspanningen in de spaken voor geval a zullen een gevolg zijn van de relatief grote slink van de dikke buitenkant. Doordat de spaken niet voldoende slinken zal de slink van de buitenkant tegengewerkt worden. Er ontstaan dus trekspanningen.
In geval b zullen de spaken relatief meer slinken dan de buitenring. De slink wordt dus tegengewerkt en daardoor ontstaat er een trekspanning in de spaken. Deze trekspanning is er de oorzaak van dat de buitenring naar binnen getrokken wordt, hetgeen resulteert in drukspanningen in de buitenring. De binnenkant zal niet veel invloed hebben.
- 5.3. Gietijzer bevat veel C; tijdens het lassen verbrandt dit tot CO_2 , dit veroorzaakt bellen in de las.
- 5.4. 2-4,3 gew% C.
- 5.5. De dikke wand zal een grotere korrel hebben.
- 5.6. De 0,2% rekgrens zal met de fijnere korrel hoger zijn.
- 5.7. Door het water kan de warmte sneller afgevoerd worden. Dit resulteert in een grotere afkoelsnelheid.
- 5.8. De gieting vindt plaats onder druk, zodat navulling verzekerd is.
- 5.9. Dit is een gevolg van kristalsegregatie.
- 5.10. Verschillen in kristalliniteit en in dichtheid.
- 5.11. Nee.
- 5.12. Onzuiverheden verhogen de rekristallisatietemperatuur doordat de onzuiverheden korrelgrenzen kunnen pinnen.

- 5.13. De mechanische eigenschappen
- 5.15. Zie vraag 3.6 en 3.8.
- 5.16. In het midden van de staaf zal de korrelgrootte groter zijn omdat de afschuifkrachten in het midden kleiner zijn en dus de deformatie kleiner is.
- 5.17. Al99,99 vertoont een grotere kans op korrelgroei.
- 5.18. De nabewerking is gemakkelijker en dus goedkoper.
- 5.19. Loodgieters zullen vaak een grote spleet moeten overbruggen en hebben dus een brij-achtig soldeer nodig. Voor een scheerapparaat is de dunvloeibaarheid veel meer van belang. Een dunne lus is noodzakelijk. Kies dus respectievelijke samenstellingen van ongeveer 20 en 60 gew% Sn.
- 5.20. Bij een vliegtuig is het van het grootste belang dat de luchtweerstand laag gehouden wordt. Daarom is een gladde buitenkant zeer belangrijk.
- 5.21. Nee.
- 5.22. Tot de lijmsorten op rubberbasis.

Studieopdrachten

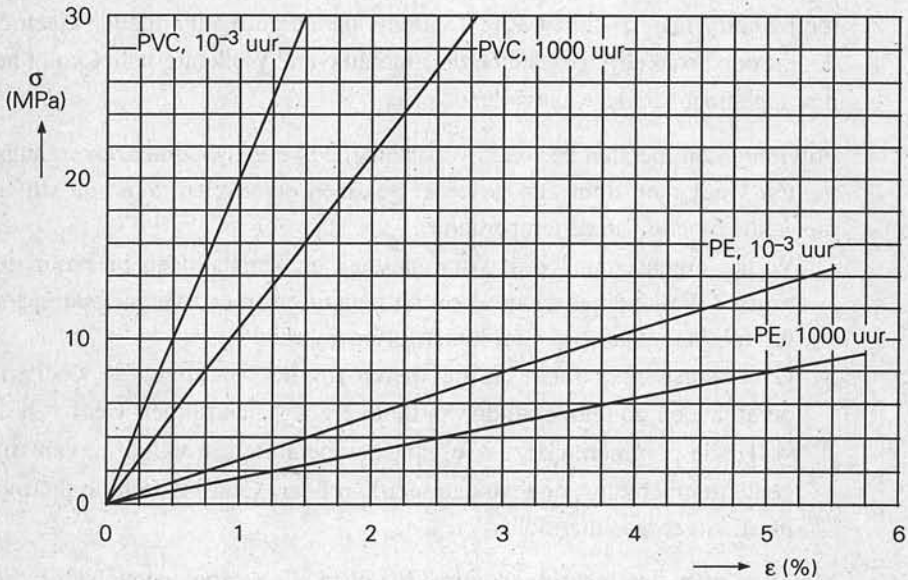
1. Een Nederlandse nikkel munt, geslagen bij 's Rijks Munt, wordt langs een diameter doorgeslepen, geschuurd en gepolijst.
 - i. Schets en verklaar in termen van versterking het verband tussen hardheid en afstand vanaf de portretzijde.
 - ii. Veronderstel dat de deformatie aan de portretzijde en de muntzijde groter is dan de kritische deformatiegraad. Schets het verband tussen korrelgrootte en afstand vanaf de portretzijde na een korte tijd gloeien op een temperatuur van 600 °C. Schets ook dit verband na langdurig gloeien op de zelfde temperatuur.
2. Beschrijf en benoem de microstructuur van een normaal afgekoelde ongelegeerde staalsoort met 0,8 gew% C. Men verhoogt de afkoelsnelheid vanuit het austenietgebied voor een gegeven preparaat van deze staalsoort. Beschrijf de gevolgen hiervan voor de microstructuur en voor de mechanische eigenschappen sterkte, rek en hardheid. Treedt bij een bepaalde afkoelsnelheid een fundamenteel andere microstructuur op? Zo ja, welke?
3. Precipitatie is een belangrijke mogelijkheid tot sterkteverhoging van bepaalde aluminiumlegeringen. De warmtebehandeling voor precipitatieharding bestaat achtereenvolgens uit oplosgloeien, afschrikken in water en verouderen. Stel, de uitgangstoestand van een aluminiumlegering voor precipitatieharding is de uitgegloeide toestand na langzaam afkoelen.
 - i. Beschrijf schematisch het niveau van sterkte na elk onderdeel van de warmtebehandeling.
 - ii. Na het oplosgloeien wordt een plaat van AA 2024 koudgedeformeerd. Heeft deze kouddeformatie gevolgen voor de sterkte na verouderen?
 - iii. Een tentstok van AlMg0,5Si0,5 wordt na verouderen gemoffeld op 120 °C (moffelen is lakken en drogen op verhoogde temperatuur). Verandert de sterkte hierdoor, en zo ja, in welke richting?
4. Aan kookpannen zitten vaak kunststoffen handvatten. Welke kunststoffen komen hiervoor in aanmerking en waarom?

5. Een cilindrische tank voor zeewater kan vervaardigd worden uit verschillende stoffen. Gegeven is, dat de tank een hoogte heeft van $H = 2500$ mm en een diameter van $D = 3000$ mm. De gebruikstemperatuur is 20 ± 10 °C. Uit een eerste verkennende keuze komen de volgende alternatieven: *a.* ongelegeerd constructiestaal; *b.* roestvast staal; *c.* een aluminiumlegering; *d.* een kunststof.
- Geef voor elk van de alternatieven *a, b, c, d* de geschiktste legering of kunststof en een bijpassende vervaardigingsmethode (er hoeft slechts één tank gemaakt te worden).
 - Na afweging van de alternatieven kiest men voor de vervaardiging van deze tank in slagvast polypropreen. De volgende figuur toont enkele kruipisochronen van PP. De tank is vier maanden van het jaar vol en wordt dan in korte tijd geleegd. De spanning σ in de wand wordt gegeven door $\sigma = PD/2W$ met P = de druk in de cilinder en W = de wanddikte. Als direct na het legen de rek in de wand bij de bodem niet meer dan 0,5% mag zijn, hoe groot moet dan de wanddikte van de tank zijn?



6. Men overweegt een drinkwatertank voor de kampeerder op de markt te brengen. De inhoud is vijf liter en de afzet wordt op jaarbasis begroot op 1×10^6 . Bedenk ten minste drie alternatieven voor materiaalkeuze en vervaardigingstechniek. Voor een deelmarkt van deze drinkwatertanks gelden als eisen, dat sterilisatie bij 120 °C mogelijk moet zijn en een gebruikstemperatuur tussen -50 en +50 °C. Beïnvloeden deze aanvullende eisen de door u oorspronkelijk geselecteerde alternatieven? Welk alternatief komt het best tegemoet aan deze aanvullende eisen?
7. Polymeren en metalen vertonen verscheidene overgangspunten; overgangspunten vindt men door een geschikt gekozen eigenschap van een stof te meten als functie van de temperatuur.
- Welke eigenschap wordt voor metalen en kunststoffen hiervoor gebruikt? Welke eigenschap wordt ter bepaling van de overgangstemperaturen bijna uitsluitend voor kunststoffen gebruikt?
 - Overgangstemperaturen bij polymeren zijn het smeltpunt, de vloeitemperatuur, en de temperatuur van de overgang glas-rubber. Geef van de volgende polymeren deze overgangstemperaturen in volgorde van stijgende temperatuur: ongevulcaniseerde rubber, semi-kristallijne thermoplast, uitgeharde thermoharder.
8. Metalen en metaallegeringen zijn kristallijn. Een groot gedeelte van de kunststoffen is semi-kristallijn. De amorfe gebieden liggen volgens het parakristallijne model in kristallijne gebieden, terwijl in het franje-micel model de kristallijne gebieden in een amorfe matrix liggen. Metalen en metaallegeringen bestaan uit korrels of kristallieten. De korrelgrenzen worden wel beschouwd als amorfe gebieden en er bestaat dus een zekere analogie met semi-kristallijne polymeren.
- Waarom gaat uiteindelijk deze analogie niet op?
 - Het aandeel amorf kunststof is erg belangrijk voor de eigenschappen van het betreffende polymeer. Komt de invloed van de korrelgrenzen ook voor metalen in de mechanische eigenschappen tot uiting, en zo ja, bestaat daar ook een wiskundige formulering van?
9. In een tentoonstellingshal wordt een rechthoekig reclamebord van 5 kg opgehangen aan twee kunststoffen draden met een lengte van 5000 mm en een diameter van 2 mm. De draden zijn symmetrisch ten opzichte van het midden van het bord bevestigd. De onderstaande figuur geeft de kruipisochronen voor PVC en PE.
- Welke kunststof kruipt meer, PVC of PE? Waarom?
 - Hoe groot is de E-modulus van de twee draden?

- iii. Hoeveel langer zijn de draden geworden na 1000 uur hangen van het bord: a. als PE-draad is gebruikt; b. als PVC-draad is gebruikt.
- iv. Na 1000 uur hangen wordt het bord verwijderd. Wat is de lengte van de draden (PVC of PE) onmiddellijk na het losmaken?



10. Twee koudgedeformeerde aluminiumplaten (technisch zuiver aluminium) worden MIG/MAG gelast, evenals twee aluminiumplaten die gebruikt worden in de vliegtuigindustrie en bestaan uit een AlCuMg-legering bedekt door zuiver aluminium (alclad). Beschrijf voor deze twee gevallen de sterkte van de verbinding in termen van de sterkte van de oorspronkelijke platen en geef een verklaring.
11. Verhoging van het koolstofgehalte is een voor de hand liggende methode om de sterkte van ongelegeerd lasbaar constructiestaal te verhogen. Waarom kan deze methode niet worden toegepast?
12. Bij gebruiksvoorwerpen is het uiterlijk zeer belangrijk. Een fabrikant wil een complete 'kooklijn' op de markt brengen: van pan tot bestek in dezelfde kleur. Corrosievastheid is in dit verband erg belangrijk.
- Geef een materiaalkeuze voor pannen, keukenmessen en bestek (vork, mes, lepel) en houd rekening met door u gekozen fabricagemethode. Is het mogelijk één soort roestvast staal te kiezen voor elk onderdeel van deze lijn? Geef de sterke en zwakke punten van uw keus.
 - Bij kookpannen lijkt de eis voor handvatten en bodem conflicterend; waarom? Wat is uw oplossing?

13. Een asje, diameter 3 mm, uit een huishoudelijk apparaat wordt vervaardigd uit ongelegeerd staal met een koolstofgehalte van 0,35 gew%. Het asje wordt gegloeid op 900 °C en vervolgens afgeschrikt, het blijft heel en het wordt vervolgens ontlaten op 150 °C en daarna op 550 °C.
- Is het vanzelfsprekend dat het asje heel blijft?
 - Vergelijk kwalitatief de mechanische eigenschappen na elke stap in de hierboven aangegeven warmtebehandeling.
14. Een bankgebouw aan de Oude Gracht in Utrecht vertoont grote lamellair gietijzeren vrouwenfiguren die al meer dan een eeuw de gevel dragen. De restauratiecommissie is van oordeel, dat gietijzer bros en ouderwets is en stelt voor de vrouwenfiguren te vervangen door gelijkvormige steunpilaren van de zelfde dragende afmetingen, vervaardigd uit een modern materiaal, bijvoorbeeld een aluminiumgietlegering of nodulair gietijzer. Wat is uw advies?
15. Ongelegeerde staalsoorten met een koolstofgehalte $< 0,2$ gew% C zijn in de praktijk niet hardbaar omdat het koolstofgehalte te laag is om bij het afschrikken van technische werkstukken de vereiste hoge afkoelsnelheid te halen. Een hoefijzer wordt gemaakt van ongelegeerd staal met een koolstofgehalte van circa 0,15 gew% C. Een smid smeedt het hoefijzer bij een temperatuur van 1300 °C en dompelt het hierna in een bak met koud water. Een andere smid smeedt het ijzer bij 950 °C en laat het aan de lucht afkoelen. Een derde smid smeedt het ook bij 950 °C en houdt het gedurende een half uur bij circa 150 °C. Geef kwalitatief de verschillen in hardheid aan na elke behandeling.
16. Staalplaat voor dieptrekken wordt vaak afgeleverd met een bepaalde hardheid (zie ook hoofdstuk 6) en een bepaalde dikte. Textuur bij dieptrekplaat moet vaak geminimaliseerd worden.
- Is hardheid een geschikte eigenschap ter bepaling van de aanwezige vervormingsmogelijkheden van plaat uit metaal of metaallegeringen?
 - De geschikte uitgangsdikte en korrelgrootte voor kouddeformatie kan worden verkregen door warmdeformatie, door kouddeformatie of door een combinatie van beide. Aan welke geeft u de voorkeur?
17. Definieer de functie-eisen van een reflectiekapje van een huiskamerspot.
- Geef de vervaardigingsmethode en de eventuele eindbehandeling van dit produkt.
 - Kies op grond van functie-eisen en fabricage-eisen een stof (kunststof, metaal of een metaallegering, of een combinatie van beide) waaruit dit produkt vervaardigd kan worden.

Oude toekomst

Door A. de Swaan, NRC Handelsblad 1 oktober 1994

"Iedereen heeft thuis wel ergens in een dode hoek een apparaatje liggen dat het nog heel goed doet, maar dat al in geen tijden meer gebruikt wordt. Het is op een onbewaakt moment uit de gratie geraakt. Nog steeds is het mechaniekje even ingenieus en handig als in het begin, maar de eigenaar heeft er geen zin meer in. Zo'n ding of dingetje verdwijnt uit de hoofdstraten van het huishouden (aanrecht, eettafel, bureau, badkamer) naar een zijweg (keukenkastje, schuiflade) en uiteindelijk komt het in de achterste sloppen terecht (berging, vliering, schuurtje). Daar blijft het liggen voor onbepaalde tijd. Maar weggooien? Nee. Het doet het toch goed, ziet eruit als nieuw. Weggeven dan? Aan een arm iemand die het goed gebruiken kan? Maar wat moet een beursstudent of een uitkeringsgerechtigde, een bijstandstrekker of een gepensioneerde met een appelschilmachientje dat heus nog heel goed werkt, waarin de appel aan een pen op een draaiend plateau geprikt langs een scheermes schuift en huigdun wordt geschild? Daar zitten arme mensen niet echt op te wachten. Antiek is het ook nog niet. Daar moet het nog minstens tien jaar voor liggen. Van tweedehands naar antiek duurt overigens steeds korter: de jongste antikwiteiten dateren nu van 1970.

De machientjes waar ik het over heb zijn begonnen als nieuwigheid, als uitvinding. Maar door de technologische evolutie zijn ze op dood spoor geraakt. Ze zijn verdrongen door andere, efficiëntere soorten, of het bleek na verloop van tijd dat ze toch niet een terugkerende menselijke behoefte bevredigden. En in de evolutie der dingen overleven en verbreiden zich alleen die produkten die de mens tot nut of vermaak zijn. De rest ligt nog een tijdje in het magazijn en sterft uit.

Het appelschilmachientje moest na elk gebruik worden afgewassen en dat was meer werk dan een appel schillen. Dat bezwaar heeft veel mechanische keukenhulpen genekt.

De mechanisering van alles en nog wat was een bevlieging die begon tegen het eind van de vorige eeuw en heeft geduurd tot de jaren vijftig. Het basismodel was altijd weer een molentje, een trommeltje, of vijltjes, dat de mens die aan het zwengeltje draaide het verdere werk uit handen moest nemen. Eigenlijk, aldus de achterliggende gedachte, is de mens voor zwengelen het meest geschikt en alles wat een samengestelde beweging kon reduceren tot een simpele slinger was alleen daarom al vooruitgang. Dit zou het Moulinex-principe kunnen heten, naar de fabriek die elk denkbaar karwei wist in te bouwen in een metalen molentje.

Ook de autobestuurder moest zo veel mogelijk uit handen worden genomen. Daar bereikte het mechanisch tijdperk zijn hoogtepunt met de automatische versnelling. DAF bedacht de Variomatic ('het pientere pöökje') en de Saab 96 was uitgerust met de centrifugaalkoppeling. Die werden terzijde geschoven door soortgelijke maar superieure automaten. De vernieuwingsketen ging ongebroken voort en evolueerde naar de tegenwoordige hydraulische systemen. In de oude modellen Citroën DS waren koplampen aangebracht die meedraiden als de voorwielen zwenkten. Maar die modernistische vondst beklifde niet. Het was een doodlopende weg in de technische evolutie. Dat is oude toekomst.

Na de mechanisatie begon in de jaren vijftig de elektrificatie. Een enkele draai aan een knop was genoeg om een in een plastic huis ingebouwd molentje het werk te laten doen: elektrisch roeren, kloppen, kneden, schaven, schuren, slijpen, knippen, zagen, masseren, masturberen: enkel 'een druk op de knop' was genoeg. Zonder overdrijving kan ik de elektrische manicure-set signaleren, de elektrische niet-machine, en: de elektrische tandenborstel, het eigenlijke onderwerp van deze korte studie (het zou veel langer kunnen, maar de hoofdzaak heeft u nu te pakken).

Sommige van die machientjes werden ingehaald door verbeterde versies of door een alternatief dat hetzelfde kon maar sneller, beter en goedkoper. Ze hadden hun kort moment in de technische evolutie en in de gunst van de gebruiker, maar ze werden afgelost door een volgende schakel in de eindeloze keten van het futurisme. Alla, daar kan men vrede mee hebben.

Maar voor sommige innovaties kwam niets in de plaats, ze stierven vanzelf uit, zonder concurrentie: een verkeerde afslag op de zoektocht naar de vooruitgang. Tragisch is dat niet, maar ook niet echt komisch. Ooit was er een belofte van verbetering, van gemak, van luxe, van veiligheid. Maar die zette niet door.

Ik vrees dat dit het geval is met de elektrische tandenborstel. Heel wat bezitters zijn er nog niet aan toe om dit ronduit te erkennen. De elektrische tandenborstel hangt nog steeds aan zijn plakstrip naast de wastafel, maar wordt de laatste tijd steeds minder gebruikt. De gewone borstel is allang weer terug en de elektrische pendant met diepreinigende waterpik wordt alleen af en toe nog gebruikt omdat die pas nog voor veel geld gekocht is en er regelmatig advertenties verschijnen waarin je kunt zien hoeveel plezier de consument ervan hebben kan. Maar, thuis is de lol er al af. De zin erin is verdwenen. Straks valt het ding van zijn plakker, het wordt voorlopig opgeborgen in de schuifla van het toiletmeubel, maar weggegooid wordt het niet. Dat zou zonde zijn. Bij elke grote opruiming verhuist het een etappe verder naar de vergetelheid. Het is, alweer, oude toekomst: toen het nieuwe er eenmaal af was bleek dat het geen blijvend voordeel verschafte, het ging aan zijn eigen ontoereikendheid ten gronde.

Oude toekomst: van de Concorde en de bemande ruimtevaart weten we het al en van het communisme ook. Doodlopende wegen in de grote evoluite van dingen en denkbeelden. Een heel imperium van voorwerpen en gedachten die uit de gunst zijn, waar niet eens iets voor in de plaats is gekomen. (...)"



Referenties

1. A. Marinissen, T.M. Reijn, *Programma, Inhoud Concept III*, Faculteit van het Industrieel Ontwerpen TU Delft, Delft NL, 1992
2. G. den Ouden, B.M. Korevaar, *Metaalkunde deel 1*, Delftse Universitaire Pers, Delft NL, 1996
3. B.M. Korevaar, G. den Ouden, *Metaalkunde deel 2*, Delftse Universitaire Pers, Delft NL, 1996
4. J.C. Anderson, K.D. Leaver, R.D. Rawlings, J.M. Alexander, *Materials Science*, Fourth Edition, Chapman and Hall, London UK, 1991
5. Ch. Newey, G. Weaver, *Materials Principles and Practice*, Materials in Action Series, The Open University, Materials Department, Milton Keynes, Butterworths, London UK, 1990
6. A.K. van der Vegt, *Polymeren, van keten tot kunststof*, Delftse Universitaire Pers, Delft NL, 1996
7. G. Weidmann, P. Lewis, N. Reid, *Structural Materials*, Materials in Action Series, The Open University, Materials Department, Milton Keynes, Butterworths, London UK, 1990
8. C.W. Wegst, *Stahlschlüssel*, Verlag Stahlschlüssel Wegst 15. Auflage, Marbach BRD, 1989
9. Al Centrum, *Aluminium bouwt duurzaam, Van grondstof tot hergebruik*, Al Centrum, Woerden NL, 1992
10. B.M. Korevaar, *Niet-ijzer metalen m14*, Laboratorium voor Materiaalkunde, TU Delft, Delft NL, 1969
11. D.A. Porter, K.E. Easterling, *Phase Transformations in Metals and Alloys*, Van Nostrand Reinhold (International) Wokingham UK, 1988
12. I.J. Polmear, *Metallurgy of the Light Metals*, Edward Arnold, London UK, 1989
13. M.W. van Dalen, L. Dooijes, *Oppervlaktebehandeling van Al*, Serie IO bijzondere onderwerpen deel 3, Faculteit van het Industrieel Ontwerpen TU Delft, Delft NL, 1991
14. H. Nielsen, W. Hufnagel, G. Ganoulis, *Al-Taschenbuch*, Al-Verlag GmbH, 13. Auflage, Düsseldorf BRD, 1974
15. Degussa, *Edelmetall-Taschenbuch*, Degussa, Frankfurt am Main BRD, 1967

16. E.G. West, *Copper and its alloys*, Ellis Horwood, Chicester UK, John Wiley & Sons, New York USA, 1982
17. K.Dies, *Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik*, Springer-Verlag, Berlin BRD, 1967
18. L. Edwards, M. Endean, *Manufacturing with Materials*, Materials in Action Series, The Open University, Materials Department, Milton Keynes, Butterworths, London UK, 1990
19. A. Namin, J. Lainé, C. Vinkhuizen, *Gieten goed bekeken*, Algemene Vereniging van Nederlandse Gieterijen, 's-Gravenhage NL, 1973
20. E.F. Emley, *Principles of Magnesium Technology*, Pergamon Press, Oxford UK, 1966
21. Metaalinstituut TNO, *Machinale Plaatbewerking, Dieptrekken II, Metaalkundige Achtergronden*, Metaalinstituut TNO, Centrum voor Metaalbewerking, Apeldoorn NL, 1978
22. G. den Ouden, *Lasttechnologie*, Delftse Uitgevers Maatschappij, Delft NL, 3de druk, 1993
23. Al Centrum, *Het lassen van Al I: Algemeen; Het lassen van Al II: TIG-lassen; Het lassen van Al III: MIG-lassen; Het lassen van Al IV: Weerstandlassen*, Al Centrum, Woerden NL, 1994
24. R.J. Schliekelmann, *Gelijmde metalen constructies*, Agon Elsevier, Amsterdam NL, 1970
25. H.W. Jacobi, *De nieuwe munten van Nederland*, Ministerie van Financiën, Den Haag NL, z.j., ISBN 90 346 0040 8
26. Het vraaggesprek met Bruno Ninaber van Eyben vond plaats op 23 maart 1994.
27. Het vraaggesprek met de medewerkers van 's Rijks Munt vond plaats op 7 maart 1994.
28. C. van Draanen, M.C. Bos, *'s Rijks Munt Jaarverslag 1992*, 's Rijks Munt, Utrecht NL, 1993
29. Het vraaggesprek met ing. M. Bokslag vond plaats op 24 maart 1994.
30. Het vraaggesprek met dhr. R. Lahaye vond plaats op 15 april 1994.
31. R.J. Young, P.A. Lovell, *Introduction to Polymers*, Chapman and Hall, 2nd ed., London UK, 1991
32. W.D. Callister Jr., *Materials science and engineering, an introduction*, John Wiley & Sons, 3rd ed., New York USA, 1994

Trefwoorden

0,2% rekgrens 300

5-5-5-brons 158

a

α -ijzer 79

absorptie 270

acrylonitril-butadieen-styreen (ABS) 170

acrylonitril-styreen-acryl-ester (ASA) 170

afschrikken 93, 129

Al-Cu 123

Al-Mg 124

Al-Mg₂Si 126

Al-MgZn₂ 126

Al-Mn 124

Al-Si 124

Alclad 136

alternerende copolymeren 43

aluminium 113

aluminiumgietlegeringen 144, 146, 147

aluminiumkneedlegering 129

aluminiumlegering 76, 129

amorf 23

amorfe toestand 175

anisotropie 86, 128, 259

anisotropie, optische 213

anodiseerdikte 143

anodiseren 142

apolair 21

arrêt 79

atactisch 42

atoom 17

atoommassa 17

atoomnummer 17

austeniet 81

austenietvormer 108

austeniteren 83

austenitisch roestvast staal 111

b

Bain-transformatie 95

basismetalaal 54

BCC 24

beginmodulus 182

belastingswisselingen 137

beschadigingsgrens 195

bierblikje 132

bijmengsel 54

binding, covalent

binding, heteropolair 19

binding, homopolair 19

binding, ion 18

binding, metaal 19

binding, secundair 19, 22

binding, waterstof 22

binding, Van-der-Waals 19, 22

blokkopolymeer 43

boren 225

bouncing putty 180

bovenperlitisch staal 82

bovenste vloeigrens 302

brandgedrag 208

brekingsindex 178, 213

breuk 183

breuk, bros 191

breukrek 183, 191

breuktaaiheid 304

brons 54, 157, 158, 159

brons, kleur 159

bronsheidstemperatuur 204

brosse breuk 191

buitenschil 18

burgersvector 253

butadieenrubber (BR) 174

butylrubber (IIR) 174

c

carbide (ϵ) 98

carrosserie 90

carrosserieplaat 134

cellulose-acetaat (CA) 172

cellulose-acetaat-butyraat (CAB) 172

cementiet 81

chauffage 79

chloropreenrubber (CR) 174

cis-configuratie 43

coherent 119

complexe E-modulus 304

complexe G-modulus 304
 component 58
 composiet 54, 69
 compound 247
 Considère, constructie, 308
 constante, diëlektrisch 211
 constructie van Considère 308
 copolymeer 41
 copolymeren, alternerend 43
 Copper Standard, International Annealed 148
 coquille 240
 coquilligieten 226
 corrosie, spanning 214, 257
 corrosie, weerstand 140
 corrosievastheid 108
 covalente binding 19
 crazing 194
 cross-linking 178
 Cu-Ni 155
 Cu-Sn 153
 Cu-Zn 153
 Curiepunt 79
 cyclustijd 230

d

δ -ferriet 81
 deformatie, koud 131
 demping 46
 dendriet 59, 232
 die swell 180, 248
 diëlektrische constante 211
 diëlektrische verliesfactor 211
 dieptrekbaarheid 235, 264
 dieptrekken 229, 263
 dieptrekplaat 264
 dieptrekstaal 264
 dieptrekverhouding 265
 dipool 21
 dislocatie 29
 dislocatiedichtheid 253
 doorharding 251
 doorhardingsdiepte 105
 draaien 225
 driehoek produkt, materiaal en vervaardiging
 15, 16
 dunvloeibaarheid 100
 dwarsbruggen 175
 dwarscontractiecoëfficiënt 302

e

ϵ -carbide 98
 E-modulus 33, 182, 184
 E-modulus, complex 304
 E-modulus, gereduceerd 184, 185
 E-modulus, relatief 115

edelgasconfiguratie 18
 eenheidscel 23
 elasticiteitsgrens 302
 elasticiteitsmodulus 300
 elektrische leiding 130
 elektrische sterkte 212
 elektrische weerstand 210
 elektrochemische verspaning 225
 elektrodepotiaal 141
 elektron 17
 elektronenschil 17
 enkelvoudige keten 39
 entcopolymeren 44
 epoxyhars (EP) 70, 173
 equi-axiale kristallieten 234
 etheen-propreen rubber (EPR) 174
 etheen-tetrafluoretheen-copolymeer (ETFE)
 172
 etsen 33
 eutecticum 58
 eutecticum, ledeburiet 82
 eutectische samenstelling 58
 eutectische temperatuur 58
 eutectoïde 82
 extrapolatieprocedure 194
 extrudeerbaarheid 135, 235
 extruderen 228, 247
 extrusie, warm 266
 extrusieblazen 228
 extrusiesnelheid 269

f

fase 57
 FCC 24
 fenol-formaldehyde (PF) 173
 ferriet 81
 ferrietvormers 109
 ferritisch grijs gietijzer 102
 ferritisch nodulair gietijzer 102
 ferritisch roestvast staal 110
 flexibiliteit 51, 230
 folieblazen 228
 franje-micel 49
 frezen 225
 frisdrankblikje 132
 frisijzer 239
 fysische veroudering 182

g

γ -ijzer 79
 G-modulus, complex 304
 gel-coat 71
 geleiding, warmte 208
 geleidingsvermogen 151
 gemêleerd gietijzer 102, 103

gemiddelde spanning 302
 gereduceerde E-modulus 184, 185
 gietbaarheid 235
 gietbronzen 158, 243
 gieten 226
 gieten, rotatie 227
 gieten, verloren-was 227
 gieten, zand 225
 gietijzer 54, 74, 78, 99, 237
 gietijzer, ferritisch 102
 gietijzer, gemêleerd 102, 103
 gietijzer, grijs 99, 102
 gietijzer, nodulair 99, 102
 gietijzer, perlitisch 102
 gietijzer, smeedbaar 239
 gietijzer, wit 99, 102
 gietlegering, aluminium 144, 146, 147
 gietlegering, magnesium 167, 244
 gietlegeringen 114
 gietmessing 243
 gietstaal 75
 gietstructuur 232, 234
 glas-rubber-overgang 44
 glas-rubber-overgangstemperatuur 45, 52
 glasovergang, secundaire 46
 glaspunt 45, 179
 glastemperatuur 52
 glastoestand 44
 glijdingsmodulus 302
 glijlagers 158
 glijrichting 252
 glijstelsysteem 252, 253
 glijvlak 252
 gloeien, herstel 87, 256
 gloeien, homogeen 62, 266
 gloeien, normaal 84, 88
 gloeien, rekristalliserend 87, 128
 gloeien, zacht 88
 gloeien, oplos 129
 goudlegering 77
 GP zones 119
 grafiet 81
 grijs gietijzer 99, 102

h

haarscheuren 191
 Hall-Petch relatie 37
 harden van staal 93
 hardheid 200, 306
 hardsolderen 277
 HCP 24
 HDP 24
 HDT 205
 hergebruik 114

herstel 36
 hersteltemperatuur 36
 herstelgloeien 87, 256
 heteropolaire binding 19
 hexagonaal 23
 hoge verhouding van sterkte en dichtheid 135
 holten 27
 holten, microslink 235
 holten, octaëdrische 27
 holten, tetraëdrische 27
 homogeen gloeien 62, 266
 homopolaire binding 19
 hulpstoffen 68
 Hume-Rothery regels 56

i

ijzer 74, 78, 79
 incoherent 119
 integraalschuimen 72
 International Annealed Copper Standard 148
 interstitieel mengkristal 29, 56
 ionbinding 18
 ionrooster van NaCl 19
 ISO Heat Deflection Temperature 205
 isochroom 188
 isometrische kruipcurven 188
 isopreenrubber (IR) 174
 isotactisch 42

k

kalenderen 247
 kerfslagsterkte 200
 ketendistributie 185
 ketenflexibiliteit 44
 ketenlengte 185
 ketenoriëntaties 180
 ketenstructuur 41
 ketenvorming 39
 kiemvorming 234
 kleur van brons 159
 kleur van koper 159
 kleur van messing 159
 kleur van nieuwzilver 159
 kneedlegering 114
 kneedlegering, aluminium 129
 kneedlegering, magnesium 167
 koolstofequivalent 101
 koolstoffactor 100
 koper, zuiver 148
 koperlegeringen 76
 korrelgroei 259, 269
 korrelgrootte 31, 265, 268
 korrelverfijning 89
 korte-duur-modulus 182
 kouddeformatie 30

koudvervorming 131
 koudvervorming van staal 263
 kralen 292
 KRG 24
 krimpv verschillen 246
 kristallisatie 47
 kristallisatiegraad 177
 kristallisatiesnelheid 49
 kristalrooster 24
 kristalsegregatie 62, 240
 kristalssystemen 23
 kritische rek 194
 kritische scheurlengte 304
 kritische spanning 304
 kruip 181, 182, 185
 kruipcurven, isometrische 188
 kruipsnelheid 302
 kubisch 23
 kunststoffen, lassen 278
 kunststoffen, lijmen 280
 kunststoffen, vezelversterkt 70
 KVG 24
 kwaliteit 230

L

lasbaarheid 99, 140
 lasnaad 276
 lasprocessen 273
 lassen 140, 229, 272
 lassen van kunststoffen 278
 ledeburiet 102
 ledeburiet-eutecticum 82
 legering 54
 legering, aluminium 76, 129, 144, 146, 147
 legering, goud 77
 legering, kneed 114
 legering, koper 76
 legering, magnesium 76, 163, 167, 244
 legering, nikkel 77
 legering, versterken 34
 legering, wolfram 77
 legering, zilver 77
 legering, zink 76
 legeringselement 54
 levensduur 304
 lichte metalen 112
 lichtveroudering 214
 lijmen 229, 272
 lijmen van kunststoffen 280
 lijmverbindingen 278
 lijnfouten 29
 liquidus 59
 Lüdersbanden 254, 264

M

macroslink 235
 magnesium, zuiver 160
 magnesiumbranden 162
 magnesiumgietlegeringen 167, 244
 magnesiumkneedgelegingen 167
 magnesiumlegeringen 76, 163
 martensiet 93
 martensitisch roestvast staal 111
 martensitische omzettingen 95
 materiaalbenutting 230
 maximale spanning 302
 maximale spanningsamplitude 137
 melamine-formaldehyde (MF) 173
 melt fracture 180
 mengkristal, interstitieel 29, 56
 mengkristallen 29, 61
 mengsel 54
 messing 54, 155
 messing, kleur 159
 messingsoorten 156, 157
 metaalbinding 19
 metaalkarakter 18
 metalloïde karakter 18
 M_f -temperatuur 96
 Mg-Al 163
 Mg-Zn 164
 Mg-Zr 166
 microporositeit 235, 244
 microslink 244
 microslinkholten 235
 milieu-resistentie 213
 Miner, regel 139
 minimale spanning 302
 modulus, reciproom 189
 modulus, secant 183
 modulus, tangens 183
 modulus, verlies 304
 molecuul 18
 molecuulmassa 176
 monomeren 39
 M_s -temperatuur 96

N

nadrukken 248
 netwerken 39
 neutron 17
 nieuwzilver 159
 nieuwzilver, kleur 159
 nikkellegeringen 77
 nitrilrubber (NBR) 174
 nodulair gietijzer 99, 102
 normaal gloeien 84, 88
 normaal gloeitemperatuur 89

nylon-6 (PA6) 40

o

omklapproces 93
 omzetten 292
 onderkoeling 232
 onderperlitisch staal 82
 onderste vloeigrens 302
 ontlaattemperatuur 98
 ontlaatrampen 97
 ontlaten 97
 onverzadigde polyesters (UP) 173
 onzuiverheid 54
 opkomer 235
 oplosbaarheidslijn 62
 oplogloeien 129
 oplosharding 35, 37, 116
 oplossing 54
 opslagmodulus 304
 optische anisotropie 213
 optische eigenschappen 212
 orenvorming 128
 overgang, secundaire 52

p

patenteren 98
 perlitisch nodulair gietijzer 102
 Periodiek Systeem 18
 peritectisch evenwicht 59
 perliet 82
 perlitisch grijs gietijzer 102
 permeabiliteit 215, 216
 persen 229
 plooihouderdruk 291
 polair 21
 polariteit 21
 polykristallijn 254
 polyamide (PA) 40, 170
 polybuteen (PB) 172
 polybuteentereftalaat (PBTP) 171
 polycarbonaat (PC) 171
 polyesters 70
 polyetheen (PE) 40, 168
 polyetheentereftalaat (PETP) 40, 171
 polyetherketon (PEEK) 172
 polyethersulfon (PES) 172
 polyfenyleenether (PPE) 171
 polyfenyleenoxyde (PPO) 171
 polyfenyleensulfide (PPS) 171
 polyimide (PI) 171
 polyisopreen 174
 polymeerblend 67
 polymeerketens 42
 polymerisatie 20
 polymethylmetacrylaat (PMMA) 40, 170

polymethylpenteen (PMP) 172
 polyoxymethyleen (POM) 40, 170
 polypropreen (PP) 40, 169
 polystyreen (PS) 40, 169
 polystyreen, slagvast 67
 polysulfon (PSU) 171
 polytetrafluoretheen (PTFE) 40, 172
 polyurethaanrubber (PUR) 175
 polyurethanen (PU) 173
 polyvinylchloride (PVC) 40, 169
 polyvinylideenfluoride (PVDF) 172
 precipitatie 117, 129
 precipitatieharding 35, 38, 117, 119
 proportionaliteitsgrens 302
 proton 17
 puntfout 28

q

θ -fase 119
 θ' -fase 119
 θ'' -zones 119

r

randdislocatie 29, 253
 random-copolymeer 43
 reciproke modulus 189
 recirculatie 113
 recycling 113
 refroidissement 79
 regel van Miner 139
 rek 300
 rek, kritisch 194
 rek, ware 308
 rekristallisatie 35, 36, 258
 rekristallisatietemperatuur 37
 rekristallisatietextuur 128
 rekristallisatietweelingen 27
 rekristalliserend gloeien 87, 128
 relatieve E-modulus 115
 relatieve sterkte 115
 restausteniet 97
 roest 107
 roestvast staal, austenitisch 111
 roestvast staal 74, 107, 110
 roestvast staal, martensitisch 95
 roet 178
 roosterconstanten 24
 roosterparameters 24
 rotatiegieten 227
 rubber 41, 78, 174
 rubbergebied 177
 rubberplateau 178

s

scheuren, warm 242

- scheurgroei 191
 scheurinitiatie 191
 scheurlengte, kritisch 304
 schil, buiten 18
 schroefdislocatie 29, 253
 schuifspanning 302
 schuim 71
 secantmodulus 183
 secundaire binding 19, 22
 secundaire glasovergang 46
 secundaire overgang 52
 segregatie 234
 semi-coherent 119
 semi-kristallijne toestand 176
 sferulieten 49
 siliconenrubbers 174
 sinaasappelhuid 37, 128, 259
 sinteren 229
 slagsterkte 46, 181, 197
 slagvast polystyreen 67
 slakkenbanen 266
 slijpen 225
 slijtage 203
 slink 100, 235, 241
 smeden 227
 smeden, warm 267
 smeltbreuk 180, 248
 smeltpunt 179
 smelttemperatuur 52
 soldeerverbindingen 277
 solderen 229, 272
 solderen, hard 277
 solderen, zacht 277
 soortelijke weerstand 210
 sorbiet 98
 spanning 300
 spanning, gemiddeld 302
 spanning, kritisch 304
 spanning, maximaal 302
 spanning, minimaal 302
 spanning, schuif 302
 spanning, ware 308
 spanningsconcentratie 198
 spanningsamplitude 302
 spanningsamplitude, maximaal 137
 spanningsarm gloeien 87
 spanningsconcentratiefactor 304
 spanningscorrosie 214, 257
 spanningsrelaxatie 181, 190
 spanningsverhouding 302
 sprongbelasting 138
 spuitgietsblazen 228
 spuitgietsen 226, 248
 spuitgietsmatrijzen 243
 staal 54, 74, 78
 staal, bovenperlitisch 82
 staal, ferritisch 110
 staal, harden 93
 staal, martensitisch 95
 staal, onderperlitisch 82
 stansen 229
 steek 262
 sterkte, relatief 115
 stoltraject 145, 241
 structuurschuimen 72
 stuivers 158
 styreen-acrylonitril (SAN) 169
 styreen-butadien rubber (SBR) 173
 substitutieel mengkristal 29, 56
 superpositiebeginsel 187
 syndiotactisch 42
- t**
- taaie breuk 191
 taaiheid 183
 taaiheid, breuk 304
 tangensmodulus 183
 teflon 172
 temperatuur, brosheid 204
 temperatuurgradiënt 233
 temperatuurzones 276
 temperijzer 240
 terugvering 270
 tetrafluoretheen-perfluorpropeen (FEP) 172
 tetragonaal 23
 thermoharders 41, 77
 thermoplasten 41, 77
 thermoplastische rubbers (TPE's) 174
 titaanlegeringen 76
 toestand, amorf 175
 toestanddiagram 57
 toestanddiagram Cu-Be 152
 toestanddiagram Cu-Ni 155
 toestanddiagram Cu-Ni-Sn 160
 toestanddiagram Cu-Sn 154
 toestanddiagram Cu-Zn 66
 toestanddiagram Fe-C 66
 toestanddiagram Mg-Al 164
 toestanddiagram Mg-Zn 165
 toestanddiagram Mg-Zr 166
 tractiedraad 151
 trans-configuraties 43
 transparant 178
 treksterkte 182, 190, 191, 300
 troostiet 94
 tweelingen 27, 256
- u**
- uitharding 129

uitvoeringsparameters van de
precipitatieharding 119
ultimate tensile stress 182
uniforme rek 308
universeel brons 158
ureum-formaldehyde (UF) 173

v

vacature 28
vacuümvormen 229
valentie-elektronen 18
Van-der-Waals-bindingen 19, 22
vermoeiingsgrens 137
veredelen 98
verlaging van de vermoeiingssterkte 257
verliesfactor, diëlektrisch 211
verliesmodulus 304
verloren-was-gieten 227
vermoeiing 197
vermoeiingseigenschappen 137
vermoeiingssterkte 304
vermoeiingssterkte, verlaging 257
vernetting 251
veroudering 38
veroudering, fysisch 182
veroudering, licht 214
verspaanbaarheid 163
verspaanbaarheidsindex 268
verspaning, elektrochemisch 225
verspaning, vonk 225
versterking van metaallegeringen 34
versterking van metalen 34
versteving 35, 116, 252, 253
verwekingstemperatuur 205
verwerkingskosten 230
vezelstructuur 86
vezelversterkte kunststoffen 70
Vicat 205
Vicat Softening Temperature 205
visco-elasticiteit 180
viscositeit 176
vlakfout 31
vloei-grens 182, 183, 300
vloei-grens, bovenste 302
vloei-grens, onderste 302
vloei-temperatuur 52
vloei-vermogen 241
volumerelaxatie 181
volumeretardatie 249
vonkverspaning 225

vormfactor 304
vormfixatie 246
vormherstel 187
vorminstabiliteit 256
vormzand 240
vrije volume 46
VST 205
vulcaniseren 175
vulstof 54, 69

w

walsen 227
wanddikte 145, 238
wanddiktegevoeligheid 239
ware rek 308
ware spanning 308
warmextrusie 266
warmscheuren 242
warmsmeden 267
warmte-beïnvloede zone 276
warmtegeleiding 208
warmvervorming 134, 262
warping 250
waterstofbinding 22
waterstofbrug 22, 47
weeping 196
weerstand tegen corrosie 140
weerstand, elektrisch 210
Weibull-statistiek 306
Weicheldiagram 237
wigproef 101
wit gietijzer 99, 102
wit smeedbaar gietijzer 239
Wöhler-diagram 197
wolframlegeringen 77
wrijvingscoëfficiënt 202, 203

y

yield stress 182

z

zachtgloeien 88
zachtsolderen 277
zandgieten 225
zilverlegeringen 77
zinklegeringen 76
zonlichtbestendigheid 213
zuiver koper 148
zuiver magnesium 160
zuurstofindex 209
zware metalen 112

ex. 2272344

**Andere uitgaven van de Delftse Universitaire
Pers op het gebied van de materiaalkunde**

METAALKUNDE

**prof.dr. G. den Ouden en
prof.dr.ir. B.M. Korévaar**

Deze nieuwe metaalkundeboeken zijn in het bijzonder gericht op het verwerven van kennis van metalen als constructiemateriaal en het maken van een verantwoorde materiaalkeuze.

In het eerste deel worden de grondslagen van de metaalkunde en de meest voorkomende begrippen besproken. Hierbij worden de belangrijkste metaalstructuren en de daaruit voortvloeiende fysische en mechanische eigenschappen van metalen en legeringen behandeld. Verder komen de effecten van plastische vervormingen en van warmtebehandelingen op de structuren en de eigenschappen aan de orde. De bereiding en vormgeving van metalen en legeringen en de effecten daarvan op de constructieve eigenschappen worden kort besproken.

Het tweede deel is voornamelijk gericht op de materiaalkeuze bij toepassing van metalen. Eerst worden de productiemethoden, fasetransformaties en warmtebehandelingen van staal besproken en het belang daarvan voor de toepassingen van staal. Vervolgens wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste staalsoorten en hun toepassingsmogelijkheden. Daarnaast wordt aandacht besteed aan de gietijzersorten en aan aluminium- en koperlegeringen.

deel 1, 199 pag., ISBN 90-407-1281-6

(1996)

deel 2, 260 pag., ISBN 90-407-1282-4

(1996)

POLYMEREN

**van keten tot kunststof
prof.dr.ir. A.K. van der Vegt**

Om de eigenschappen van kunststoffen in de praktijk te kunnen begrijpen is een goede kennis van het gedrag van polymeren onmisbaar, een gedrag dat in een aantal opzichten sterk afwijkt van dat van andere stoffen.

In dit boek wordt gepoogd een inzicht te geven in de eigenschappen van polymeren zoals die enerzijds beheerst worden door de moleculaire structuur, en zoals die anderzijds bepalend zijn voor het praktische gedrag van kunststoffen, hetzij in de verwerking, hetzij in de eigenschappen van het eindproduct.

Na een inleiding worden in dit boek behandeld: Moleculaire opbouw • Glastoestand en glas-rubber overgang • kristallijne polymeren • Rubbertoestand en vloeibare toestand • Visco-elsticiteit • Mechanische eigenschappen • Overige eigenschappen (thermische-, elektrische-, optische eigenschappen, milieu-invloeden, spanningcorrosie, diffusie en permeabiliteit) • Samengestelde kunststoffen • Materiaalgegevens • Vormgeving (gieten en persen, spuitgieten, kalenderen en extruderen, vormgeving half-fabrikaten, vormgeving samengestelde kunststoffen).

242 pag., ISBN 90-407-1283-2

(1996)

**VRAAGSTUKKEN POLYMEREN
behorend bij Polymeren, van keten tot
kunststof
prof.dr.ir. A.K. van der Vegt**

Dit vraagstukkenboek biedt een rijke verzameling oefenmateriaal voor de bestudering van bovengenoemd theorieboek. De opgaven zijn voorzien van uitgewerkte antwoorden.

96 pag., ISBN 90-407-1284-0

(1994)

NIET-DESTRUCTIEF ONDERZOEK drs. W.J.P. Vink

Dit boek biedt een overzicht van de niet-destructieve methoden, die voor het onderzoek van metalen beschikbaar zijn.

Er zijn hoofdstukken in opgenomen over visuele inspectie, magnetisch onderzoek, penetrant onderzoek, wervelstroomonderzoek, ultrasoon onderzoek, radiografie, neutrografie, de persproef, lekdetectiemethoden, akoestische emissie, thermische inspectiemethoden, holografische interferometrie, de moiré-methode, scheurdieptemetingen, laagdiktemetingen, vibratieanalyse, microgolffstraling.

Voorts is er een hoofdstuk met een korte behandeling van diverse andere methoden.

Het boek wordt afgesloten met hoofdstukken over de organisatie van het n.d.o., de veiligheid en de beoordeling van het onderzoeksresultaat.

De nieuwe druk van het boek (januari 1996) is sterk uitgebreid en rijk geïllustreerd.

464 pag., ISBN 90-407-1147-X

(1996)

LASTECHNOLOGIE prof.dr. G. den Ouden

Voor het duurzaam verbinden van materialen is in de loop der tijden een groot aantal methodes en technieken ontwikkeld. Solderen, lijmen, en lassen zijn bekende voorbeelden, die elk een zeer belangrijke rol spelen in de metaalverwerking. Vooral lassen wordt op grote schaal toegepast.

Dit boek is bedoeld voor studenten aan technische universiteiten en hogescholen en voor degenen die bij hun werk met het onderwerp te maken hebben. De stof is gegroepeerd in drie delen: processen, metaalkundige aspecten en toepassing. In het gedeelte over processen wordt de meeste aandacht besteed aan booglassen, maar ook een reeks andere lasprocessen, solderen en thermisch snijden komen aan de orde. Bij de toepassingen wordt ingegaan op het lassen van ongelegeerd en laaggelegeerd staal, het lassen van roestvast staal en het lassen van aluminium. "Al met al een goed leesbaar studieboek dat in iedere boekenkast thuis hoort" (R.W.A. van den Berg in *Lastetechniek* van november 1987). "Het boek is overzichtelijk en ademt op een prettige manier deskundigheid uit." (L.J. de Ridder in *De Constructeur* van juni 1988).

203 pag., ISBN 90-407-1285-9

(1993)

Andere titels op dit vakgebied:
**CORROSIE EN CORROSIEBESCHERMING
prof.dr. J.H.W. de Wit**

ca. 200 pag., ISBN 90-407-1286-7

(verschijnt 1997)

**FRACTURE MECHANICS
ir. H.L. Ewalds en dr. R.J.H. Wanhill**

304 pag., ISBN 90-407-1287-5

(1993)

**PHYSICAL ASPECTS OF ARC WELDING
prof.dr. G. den Ouden (red.)**

112 pag., ISBN 90-407-1288-3

(1994)

2272344



Foto: F. Hammers, Laboratorium voor Materiaalkunde TU Delft

Materiaalkunde voor Ontwerpers

Dit boek beoogt de integratie van verschillende onderdelen van het vak Materiaalkunde: Staal & Gietijzer, Non-Ferro Metalen en Kunststoffen. Door deze integratie hopen de auteurs te bereiken dat de contactvlakken met andere onderdelen van de studie voor Ingenieur Industrieel Ontwerpen, zoals het ontwerpen zelf en de vervaardiging, duidelijk voor het voetlicht treden. Materiaalkunde is een geïntegreerd onderdeel van het gehele ontwerpproces.

In de onderscheiden hoofdstukken worden behandeld:

- Structuren van materialen
- Legeringen, oplossingen, mengsels, bijmengsels en composieten
- Enkele belangrijke materialen
- Structuur en verwerking van materialen
- Ontwerpen en produceren

Uitgegeven in opdracht van de Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen te Delft door de Delftse Universitaire Pers
ISBN 90-407-1320-0

ISBN 90-407-1320-0



9 789040 713200