

***Materiaalkunde  
voor Ontwerpers  
en Constructeurs***

P. van Mourik  
J. van Dam

© VSSD

Eerste druk 1996

Tweede druk 1998

Derde druk 2001

DUP Blue Print is een imprint van

Delft University Press

Postbus 98, 2600 MG Delft

tel. +31 15 27 85678, telefax +31 15 27 85706, e-mail [info@library.tudelft.nl](mailto:info@library.tudelft.nl)

internet: <http://www.library.tudelft.nl/dup>

In opdracht van:

Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen te Delft

Poortlandplein 6, 2628 BM Delft

tel. +31 15 27 82124, telefax +31 15 27 87585, e-mail: [hlf@vssd.nl](mailto:hlf@vssd.nl)

internet: <http://www.vssd.nl/hlf>

webpagina over dit boek: <http://www.vssd.nl/hlf/m013.htm>

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, photo-copying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.*

ISBN 90-407-2212-9

NUGI 831

Trefw.: materiaalkunde



# Voorwoord

## ***Bij de derde druk***

Menselijke activiteiten berusten ook in de voorzienbare toekomst op het gebruik van een uitgebreid scala aan materialen. Het is een gemakkelijke voorspelling dat de variatie aan materialen, gegeven de toenemende complexiteit van concrete producten, alleen maar groter zal worden. Dit geldt niet alleen voor het nieuwste van het nieuwste, maar ook voor de materiaalklasse die sinds mensenheugenis in gebruik is: keramiek. Om aan deze complexiteit enigszins recht te doen, krijgen de keramische materialen in al hun verscheidenheid een corresponderende plaats en behandeling in deze derde druk. De behandelde onderwerpen variëren van glas, via baksteen en beton tot moderne functionele keramiek.

Bij de hierboven gesignaleerde toenemende complexiteit van materialen en producten worden materiaalkunde en materiaalkeuze als een geïntegreerd onderdeel van productontwikkeling en construeren steeds belangrijker. Eigenschappen zijn voor de ontwerper en de constructeur die meetbare aspecten van een stof die een sleutelrol spelen in het creatieve proces van materiaalkeuze. Welke eigenschappen dat zijn, wordt in een nieuw Hoofdstuk 2 toegelicht, waarin ook enkele meetmethoden van deze eigenschappen worden gegeven. In een eveneens nieuw Hoofdstuk 10 wordt de materiaalkeuze verder uitgewerkt, waarin de Ashby-aanpak een belangrijke rol kan spelen.

De toevoeging van deze twee hoofdstukken, nieuw in vergelijking met de voorgaande uitgaven van dit boek, en de integratie van de keramische materialen in deze derde druk leidden tot een nieuwe hoofdstukindeling van de behandelde stof. Daarbij is gestreefd naar een beperking van de hoofdstukomvang, waardoor de toegankelijkheid van het boek vergroot is.

De toevoeging van de nieuwe keramische onderwerpen vergroot de kring van gebruikers van dit boek: studenten industrieel ontwerpen, werktuigkundig constructeurs, maar ook bouwkundigen en civieltechnici. Dit sluit aan bij een al gegroeide praktijk. Het architecturale voorbeeld in het laatste Hoofdstuk past hierbij goed.

Bij de voorbereiding van deze nieuwe druk hebben de volgende personen een belangrijke rol als begeleidend lezer gespeeld. Voor Hoofdstuk 2 dr.ir. J. Zuidema en A.R. Wachters (beiden TU Delft), voor de gedeelten over de bouwkundige materialen dr.ir. A. Fraay en dr.ir. F.A. Veer (eveneens beiden TU Delft), voor de

gedeelten over de keramiek dr.ir. A. Goossens (TU Delft) en dhr. S. Pasveer (Koninklijke Porceleyne Fles te Delft). Voor Hoofdstuk 10 ir. M.J. ten Bouwhuijs (Universiteit Twente). Stimulerende contacten werden onderhouden met prof. ir. L. Katgerman, dr. A. Gotsis en ir. J. Prins (allen TU Delft). Voor de gastvrijheid betoond door de Sectie Polymeerkunde van de TU Delft (prof. dr.ir. J.J. Elmendorp, prof. dr.ir. S. Picken en prof.dr.ir. J. van Turnhout) zijn wij zeer erkentelijk.

Wij zijn verheugd dat dit boek in een derde druk kan verschijnen. Wij danken dhr. J. Schievink van de uitgever VSSD/DUP voor zijn enthousiasmerende belangstelling en inzet. Wij hopen dat met de hiervoor genoemde veranderingen de bruikbaarheid van dit boek voor de industrieel ontwerper en voor de constructeur in belangrijke mate vergroot is.

Delft, april/mei 2001

P. van Mourik & J. van Dam

# Aanwijzingen voor zelfstudie

In het studiejaar '94/'95 werd de 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 de volgende hulpmiddelen bij zelfstudie:

1. De gedetailleerde inhoudsopgave laat in één oogopslag het verband tussen de verschillende onderdelen van de stof zien.
2. Voor elk hoofdstuk zijn leerdoelen geformuleerd, zodat de student direct ziet waar in dat hoofdstuk de belangrijke accenten liggen. Deze leerdoelen zijn opgenomen in een afzonderlijke Appendix.
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 verwacht dat zij zelf een antwoord op een dergelijke studie-opdracht formuleren en

ook evalueren.

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

1. kennis van en inzicht in de structuur van materialen (Hoofdstukken 3 en 4)
2. basiskennis van veel toegepaste materialen (Hoofdstukken 5, 6, 7 en 8)
3. kennis van en inzicht in het verband tussen structuur, verwerking en resulterende eigenschappen (Hoofdstuk 9).

Hoofdstuk 1 schetst de plaats van Materiaalkunde binnen Industrieel Ontwerpen. Hoofdstuk 10 illustreert dat de verbinding tussen ontwerpen en daadwerkelijk produceren niet altijd gemakkelijk is.

Door de trefwoordenlijst, 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.



# Inhoud

VOORWOORD	5
Bij de derde druk	5
AANWIJZINGEN VOOR ZELFSTUDIE	7
INHOUD	8
1. INLEIDING	13
1.1. Metalen	17
1.1.1. Ferro-Metalen	18
1.1.2. Non-Ferro Metalen	18
1.2. Kunststoffen	20
1.3. Keramiek	21
1.3.1. Structurele keramiek	22
1.3.2. Functionele keramiek	23
2. EIGENSCHAPPEN EN MECHANISCHE BEPROEVING	25
2.1. Inleiding	25
2.2. Eigenschappen en hun samenhang	26
2.2.1. Elastische constanten	26
2.2.2. Breuktaaiheid	27
2.2.3. Dichtheid, warmte en slijtage	29
2.2.4. Samenhang van intrinsieke eigenschappen	29
2.3. Mechanische beproeving	31
2.3.1. Statisch: de trekproef	31
2.3.2. Statisch: de hardheidsmeting	36
2.3.3. Dynamisch: drie vormen van bezwijken	38
2.4. De waarde van materiaaleigenschappen	48
3. STRUCTUUR VAN MATERIALEN	49
3.1. Inleiding	49
3.2. Atoombouw en atoombinding	51
3.3. Metaalkristallen	56
3.3.1. Roosters	56
3.3.2. Kristalfouten	61
3.3.3. De versterking van metalen en metaallegeringen	67
3.3.4. Elektrochemische aantasting van metalen en	

metaallegeringen	71
3.4. Keramiek	74
3.5. Kunststoffen	82
3.5.1. De opbouw van polymeren	82
3.5.2. Ketenstructuur	85
3.5.3. Glastoestand en glas-rubber overgang	88
3.5.4. Semi-kristallijne polymeren	91
4. LEGERINGEN, OPLOSSINGEN, MENGESELS, BIJMENGESELS EN COMPOSITETEN	96
4.1. Inleiding	96
4.2. Opbouw van metaallegeringen	98
4.3. Toestandsdiagrammen voor binaire metaallegeringen	100
4.3.1. Onoplosbaarheid in de vaste toestand; eutecticum, peritecticum en intermetallische verbinding	101
4.3.2. Volledige oplosbaarheid in vaste toestand; mengkristallen	103
4.3.3. Beperkte oplosbaarheid in vaste toestand	105
4.3.4. Overgangspunten; gecompliceerde diagrammen	107
4.4. Toestandsdiagrammen voor binaire keramiek	110
4.5. Samengestelde kunststoffen	113
4.5.1. Polymeer-polymeer mengsels	113
4.5.2. Mengsels van polymeren met niet-polymeren; composieten	115
5. FERRO-METALEN	119
5.1. De kracht van ijzer, staal en gietijzer	119
5.2. IJzer	120
5.3. Staal	122
5.3.1. De structuur van staal bij normale afkoeling uit het austenietgebied	124
5.3.2. Gloeien van ongelegeerd staal	128
5.3.3. Staal voor carrosserieën	131
5.3.4. Harden van staal	134
5.3.5. Ontlaten van staal	138
5.4. Gietijzer	140
5.4.1. Ontstaan van de microstructuren van gietijzer	142
5.5. Gelegeerd staal	146
6. NON-FERRO METALEN	153
6.1. De sier, de duurzaamheid en de lichtheid van het bestaan	153
6.2. Aluminium en zijn legeringen	154
6.2.1. Zuiver aluminium, hergebruik en versterking	154
6.2.2. Aluminiumlegeringen	163

6.2.3.	Aluminiumkneedlegeringen	170
6.2.4.	Aluminiumgietlegeringen	182
6.3.	Koper en zijn legeringen	186
6.3.1.	Zuiver koper	186
6.3.2.	Binaire koperlegeringen	191
6.3.3.	Messing	193
6.3.4.	Brons	195
6.3.5.	De kleur van koper, messing, brons en nieuwzilver	197
6.4.	Magnesium en zijn legeringen	198
6.4.1.	Zuiver magnesium	198
6.4.2.	Magnesiumlegeringen	201
7.	KUNSTSTOFFEN	207
7.1.	Belangrijke thermoplasten	207
7.2.	Belangrijke thermoharders	211
7.3.	Belangrijke elastomeren	212
7.4.	Eigenschappen van kunststoffen	213
7.4.1.	Algemeen gedragspatroon	213
7.4.2.	Mechanische eigenschappen	220
7.4.3.	Oppervlakte-eigenschappen	232
7.4.4.	Thermische eigenschappen	235
7.4.5.	Elektrische eigenschappen	240
7.4.6.	Optische eigenschappen	243
7.4.7.	Milieu-invloeden	244
7.4.8.	Diffusie en permeabiliteit	245
8.	KERAMIEK: STOFFEN EN EIGENSCHAPPEN	248
8.1.	Inleiding	248
8.2.	Glas en glaskeramiek	249
8.3.	Porselein en aardewerk	255
8.4.	Baksteen	259
8.5.	Cement en beton	261
8.6.	Technische keramiek	270
8.6.1.	Mechanische eigenschappen	271
8.6.2.	Thermische en elektrische eigenschappen	272
8.6.3.	Optische eigenschappen	273
9.	STRUCTUUR EN VERWERKING VAN MATERIALEN	276
9.1.	Inleiding	276
9.2.	Verwerking via de gasfase	289
9.3.	Structuur en de verwerking via de vloeibare toestand	292
9.3.1.	Metaallegeringen	292

---

9.3.2.	De structuur van gietijzer, gegoten aluminiumlegeringen, gegoten koperlegeringen en gegoten magnesiumlegeringen	297
9.3.3.	Kunststoffen	306
9.4.	Structuur en de verwerking via de vaste toestand	312
9.4.1.	Plastische vervorming van metalen en metaallegeringen	312
9.4.2.	Plastische vervorming en verspaning van kunststoffen	330
9.5.	Structuur en verbindingen	332
9.5.1.	Lassen, solderen en lijmen van metaallegeringen	332
9.5.2.	Lassen van kunststoffen	338
9.5.3.	Lijmen van kunststoffen	340
10.	MATERIAALKEUZE, ONTWERPEN EN PRODUCEREN	342
10.1.	Inleiding	342
10.2.	Een voorbeeld van de nul-strategie: Delfts Blauw	345
10.3.	Een voorbeeld van de beredeneerde strategie: keramische kookplaat	347
10.4.	Een voorbeeld van systematische materiaalkeuze: zool van een stoomstrijkijzer	349
10.5.	Stadsmeubilair	356
10.5.1.	De exploitant	357
10.5.2.	De vervoersmaatschappij	359
10.5.3.	De ontwerper	360
	APPENDIX NOMENCLATUUR	363
	APPENDIX MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN	366
	APPENDIX RICHTWAARDEN VAN MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN BIJ KAMERTEMPERATUUR	376
	APPENDIX PRIJSVERHOUDINGEN	382
	APPENDIX SYSTEMATISCHE DETERMINATIE VAN KUNSTSTOFFEN	385
	ANTWOORDEN OP STUDIEVRAGEN	393
	STUDIEOPDRACHTEN	401
	OUDE TOEKOMST	407
	REFERENTIES	409
	LEERDOELEN	412
	TREFWOORDEN	415