

Vezelversterkte kunststoffen

Mechanica en ontwerp

A.H.J. Nijhof

© VSSD

Eerste druk 2004

DUP Blue Print is een imprint van:

Delft University Press

P.O. Box 98, 2600 MG Delft, The Netherlands

tel. +31 15 27 85678, telefax +31 15 27 85706, e-mail info@library.tudelft.nl

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

Uitgegeven in opdracht van:

Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen te Delft

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. +31 15 27 82124, telefax +31 15 27 87585, e-mail: hlf@vssd.nl

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

URL met informatie over dit boek: **<http://www.vssd.nl/hlf/m010.htm>**

Aan docenten die dit boek in cursusverband gebruiken, kunnen de illustraties in dit boek desgewenst in digitale vorm beschikbaar gesteld worden. Men kan de collectie aanvragen bij emailadres hlf@vssd.nl

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.

Printed in The Netherlands

NUR 914, 971

Trefw.: vezelversterkte kunststoffen

ISBN 90-407-2484-9

Voorwoord

Moderne vezelversterkte kunststoffen dateren uit de vliegtuigbouw rond het begin van de tweede wereldoorlog. Sedertdien is de ontwikkeling en toepassing ervan gestaag voortgezet. Niet alleen in de lucht- en ruimtevaart, maar ook in andere sectoren van de techniek, met name in de chemische technologie en de transportsector; en met bekende toepassingen in de sport, zoals ski's, polsstokken, tennisrackets, hockeysticks, surfplanken, roeiboten en zeiljachten. Zo werd er binnen de Afdeling Werktuigbouwkunde van de Technische Hogeschool te Delft onder leiding van prof. dipl.-ing. J. Beyer, hoogleraar Textieltechniek, een pottwijnmachine ontwikkeld, waarvan de potten – een soort centrifuges – een vezelversterkte kunststof (vvk) wand hadden. Een van de aanknopingspunten was de in de textielwereld bekende wikkeltechniek, waarmee nu buizen en vaten werden vervaardigd uit in hars gedrenkte garens. De leeropdracht van zijn opvolger, prof. ir. K. van Harten, omvatte dan ook, naast Textieltechniek, Vezelversterkte Kunststoffen. In zijn laboratorium is op laatstgenoemd terrein voornamelijk onderzoek verricht aan vervaardigingstechnieken die zijn samen te vatten onder de term Resin Transfer Moulding, met de nadruk op de zogenaamde vacuüminjectie van hars in met droog, langvezelig materiaal gevulde mallen.

Om te kunnen concurreren met conventionele constructiematerialen is het noodzakelijk om de mogelijkheid de eigenschappen van een vvk constructie of onderdeel richting te geven, zoveel mogelijk te benutten. Voor het optimaal ontwerpen van en in vvk is daarom kennis van en rekenen met richtingsafhankelijke eigenschappen onontbeerlijk. In dat kader zijn twee colleges opgezet: 'Ontwerpen in vezelversterkte kunststoffen', een derdejaars keuzevak voor werktuigbouwkundige en andere studenten, en een hoofdvakcollege 'Mechanica van vezelversterkte kunststoffen'. Het collegedictaat van het derdejaarsvak dat voornamelijk is gebaseerd op de laminatentheorie, is ook op hts-en (de tegenwoordige technische hogescholen) gebruikt. Beide dictaten zijn nu geïntegreerd in dit boek.

De geboden stof is er op gericht om inzicht te kweken in vooral het mechanisch gedrag van vvk's. Om het boek tevens geschikt te maken voor zelfstudie wordt de theorie in kleine stappen aangeboden.

Bij de opzet van de stof is uitgegaan van de begrippen stijfheid en sterkte, en van een macro- en een microniveau om naar vvk's te kijken.

Op macroschaal wordt vvk als zijnde homogeen maar anisotroop beschouwd. Dit leidt tot gebruik van de lineaire elasticiteitstheorie voor homogene, anisotrope materialen. En qua sterkte tot een fenomenologische behandeling van breukcriteria voor dergelijke materialen. Deze materie wordt vervolgens in verschillende hoofdstukken toegepast, met de nadruk op een stijfheid- en sterkteanalyse van laminaten, regels voor de opbouw van laminaten – het koppelgedrag en het vermijden ervan – en optimalisatie. Kort is aandacht besteed aan hygrothermische effecten, fysische transportverschijnselen en de tijdsafhankelijkheid van het mechanisch gedrag. Praktische berekeningen zijn gebaseerd op experimenteel verkregen waarden van stijfheid en sterkte. Zo kan dit gedeelte van de stof apart worden bestudeerd. (Zie onderstaand selectief spoor door het boek.)

Om de richtingsafhankelijke stijfheidseigenschappen van vvk te schatten op basis van samenstelling en eigenschappen van de componenten zijn modellen nodig waarbij de componenten duidelijk zijn te onderscheiden. Naast de eenvoudige modellen worden

voor een beter begrip ook meer ingewikkelde modellen behandeld. Ook voor het leren begrijpen van het breukgedrag is het nodig het materiaal op vezelniveau te benaderen, waarbij ook een beroep wordt gedaan op inleidende breukmechanica.

In het laatste hoofdstuk wordt de stof gebruikt bij de modelvorming van weefselversterking, en bij het analyseren van twee werktuigkundige vvk-toepassingen: bladveren en vliegwielen.

De intentie van het boek is een Nederlandstalige ingang te vormen voor de merendeels Engelstalige vakliteratuur. De technische vakliteratuur is toegespitst op het materiaal en het ontwerpen en vervaardigen erin en ervan. In die literatuur wordt voornamelijk gebruikgemaakt van de verkorte indexnotatie voor spanningen, vervormingen en elasticiteitsconstanten. (Dat is ook het geval in onderstaand selectief spoor.) Voor degenen die zich verder willen verdiepen in de meer theoretische vakliteratuur is ook de tensornotatie ingeleid en op sommige plaatsen toegepast. Deze gedeelten kunnen zonder ernstig bezwaar worden overgeslagen.

Belangrijke bronartikelen staan in de tekst vermeld. Voor verdere verdieping wordt verwezen – met een nummer tussen vierkante haken – naar de boeken in de, overigens beknopte, literatuurlijst. Met behulp van internet is deze moeiteloos aan te vullen met meer recente werken.

Bij het afronden van het manuscript heb ik dankbaar gebruik kunnen maken van de kritiek van dr.ir. K.M.B. Jansen en vooral van het stimulerende en aanvullende commentaar van prof.dr.ir. R. Marissen.

Delft, 2003.

Ir. A.H.J. Nijhof

Een **selectief spoor** door de stof, met de nadruk op stijfheid en sterkte van laminaten. De vezelversterkte kunststof wordt daarbij opgevat als zijnde homogeen en anisotroop.

1. Inleiding.
2. Continuümmechanica van homogene, anisotrope materialen.
Paragrafen 2 en 7 overslaan.
3. Continuümmechanica van orthotrope lagen.
4. Micromodellen voor composietstijfheden.
Alleen de formules (4.39, 40, 41 en 43) zonder afleiding, plus par. 7.
5. Breukcriteria.
Behalve de afleidingen in subparagraaf 1.2.
8. De klassieke laminatentheorie.
Paragraaf 4 overslaan.
9. De invloed van de opbouw van een laminaat.
Paragrafen 2 en 5 overslaan.
10. Het optimaliseren tijdens het ontwerpen.
12. Toepassingsvoorbeelden.
Paragraaf 1 overslaan.

Inhoud

Voorwoord	v
1. Inleiding	1
1.1. De anisotropie van vezelversterkte kunststoffen	1
1.2. Kort historisch overzicht	2
1.3. Samenstelling; mengselregel	4
1.4. Technische constanten van een anisotroop materiaal	5
1.5. Eenvoudige modellen voor de stijfheid van unidirectioneel materiaal	7
1.6. Eenvoudige modellen voor de sterkte van unidirectioneel materiaal	12
1.7. Specifieke stijfheid en specifieke sterkte	18
1.8. Reële waarden voor stijfheid en sterkte van vezelversterkte kunststoffen	19
2. Continuümmechanica van homogene, anisotrope materialen	25
2.1. Spanningen en vervormingen in verkorte notatie	25
2.2. Spannings- en vervormingsleer in tensornotatie	28
2.3. De algemene wet van Hooke	36
2.4. Specifieke vormveranderingsarbeid	37
2.5. Materiaalsymmetrie: orthotropie en transversale isotropie	39
2.6. Technische constanten	44
2.7. Grenzen voor de technische constanten	50
3. Continuümmechanica van orthotrope lagen	53
3.1. Vlakspanningstoestand	53
3.2. Transformatie in de vorm van rotatie in het vlak van de laag	55
3.3. Het cyclische karakter van de gereduceerde stijfheidsconstanten	61
4. Modellen voor de composietstijfheden	65
4.1. Statistische homogeniteit	65
4.2. Effectieve elasticiteitsconstanten	68
4.3. Effectieve elasticiteitsconstanten bij transversale isotropie	73
4.4. De toepassing van minimum-energieprincipes	76
4.5. Vergelijking van heterogeen materiaal met homogeen materiaal	85
4.6. Andere sets stijfheidsformules voor u.d. vvk's en dispersies	87
4.7. Onderlinge vergelijking	98
5. Fysische eigenschappen van vezelversterkte kunststoffen	101
5.1. Expansie ten gevolge van veranderingen in de omgeving	101
5.2. Transportverschijnselen in vezelversterkte kunststoffen	108
6. Breukcriteria voor vezelversterkte kunststoffen	112
6.1. Breukcriteria voor orthotrope materialen	112
6.1.1. Lineaire breukcriteria	112
6.1.2. Kwadratische breukcriteria	118
6.1.3. Het tensorieel breukcriterium	124
6.1.4. Hybride breukcriteria	126
6.2. Onderlinge vergelijking van de verschillende breukcriteria bij VST	128

6.3. Nabeschouwing	131
7. Bezwijkmechanismen	133
7.1. De spanningsverdeling rond een scheurtip	133
7.2. Scheurgroei bij brosse materialen	139
7.3. De krachtoverdracht tussen een korte vezel en de matrix	150
7.3.1. De shear-lag-theorie voor een enkele korte vezel	151
7.3.2. De slip-theorie voor een enkele korte vezel	155
7.3.3. De pull-out-proef en de fragmentatieproef	158
7.4. Bezwijkmechanismen bij u.d. vvk	161
8. De klassieke laminatentheorie	165
8.1. Inleiding tot de klassieke plaattheorie	165
8.2. De laminatentheorie	169
8.3. De stijfheidsanalyse van een laminaat	176
8.4. Hygrothermische effecten	178
8.5. De sterkteanalyse van een laminaat	181
9. De invloed van de opbouw van een laminaat	189
9.1. Bijzondere stijfheidseffecten	189
9.2. De verschuivingstelling	194
9.3. Bijzondere opbouw van laminaten	196
9.4. De technische constanten van een ontkoppeld laminaat	203
9.5. Thermische uitzetting van een vlak quasi-isotroop laminaat	206
9.6. Interlaminaire spanningen aan de vrije randen	208
9.7. Aanbevelingen voor de opbouw van een laminaat	211
10. Het optimaliseren tijdens het ontwerpen	213
10.1. Het eerste concept van een laminaat	213
10.2. Wiskundig optimaliseren	216
10.3. Specifieke stijfheids- en sterktewaarden	223
11. Tijdsafhankelijk gedrag van vezelversterkte kunststoffen	229
11.1. Lineair visco-elastisch gedrag	229
11.1.1. Lineaire visco-elasticiteit	229
11.1.2. Kruip	231
11.1.3. Relaxatie	234
11.1.4. Verband tussen kruip en relaxatie	235
11.1.5. Quasi-elastisch gedrag	237
11.2. Visco-elasticiteit bij vvk laminaten	237
11.2.1. Een u.d. lamel	237
11.2.2. Laminaten	240
11.3. Vermoeiing	240
11.3.1. Wöhler-krommen	241
11.3.2. Breukcriteria voor vermoeiing	244
11.3.3. Geaccumuleerde vermoeiingsschade	246
11.3.4. Bedrijfszekerheid	250

12. Toepassingsvoorbeelden	253
12.1. Weefselversterking	253
12.1.1. Een symmetrische weefselversterkte laag, opgevat als homogene laag	253
12.1.2. Een symmetrische weefselversterkte laag, opgevat als laminaat	256
12.1.3. Een asymmetrische weefselversterkte laag	258
12.2. Bladveren	261
12.2.1. Een veer: accumulator van elastische energie	261
12.2.2. Vezelversterkte kunststof als (blad)verenmateriaal	265
12.2.3. Een bladveer met rechthoekige dwarsdoorsnede	266
12.3. Vliegwielen	270
12.3.1. De energie-inhoud van isotrope vliegwielen	271
12.3.2. Vliegwielen uit vvk	274
12.3.3. Prototypen van vvk vliegwielen	278
A1. Appendices bij hoofdstuk 4	283
A1.1. De formule van Eshelby	283
A1.2. Het variatieprincipe van Hashin en Shtrikman	288
A2. Appendices bij hoofdstuk 7	292
A2.1. De oplossing van een bipotentiaalvergelijking	292
A2.2. Spannings- en verplaatsingsveld rond een scheurtip in een plaat	294
Literatuur	297
Index van onderwerpen (met Engelse vertaling van de trefwoorden)	299
Index van (de meest gebruikte, specifieke) symbolen	310