

Intrinsische Risse und Poren in Kohlenstoff Verbundwerkstoffen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.

von der Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Jörg-Martin Gebert
aus Stuttgart

Tag der mündlichen Prüfung: 13.12.2010

Hauptreferent: Prof. Dr.rer.nat. Alexander Wanner
Korreferent: Prof. Dr.rer.nat. Michael J. Hoffmann

Schriftenreihe Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik

Band 68/2011

Jörg-Martin Gebert

**Intrinsische Risse und Poren
in Kohlenstoff Verbundwerkstoffen**

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9800-5

ISSN 1439-4790

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffkunde I des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Herrn Prof. Dr. Alexander Wanner danke ich herzlich für Übertragung des Teilprojektes D11 (SFB 551), das damit entgegengebrachte Vertrauen, das stetige Interesse am Fortschritt der Arbeit und die Übernahme des Hauptreferates. Herrn Prof. Dr. Michael Hoffmann danke ich für die Übernahme des Korreferates. Der Institutsleitung danke ich für die fortwährende Unterstützung auch über den Förderzeitraum des DFG-Projektes hinaus.

Die Arbeit wäre sicherlich nicht ohne fachliche Unterstützung gelungen, wofür ich meinen ehemaligen Kollegen am Institut für Werkstoffkunde I sowie im Sonderforschungsbereich 551 herzlich danke. Für ein angenehmes und zielorientiertes Arbeitsklima danke ich allen Kollegen, insbesondere Herrn Dr. Kay Weidenmann. Aus dem SFB 551 danke ich Frau Dr. Romana Piat sowie den Herren Dr. Andreas Pfrang, Dr. Aijun Li, Dr. Moez Guellali, Dr. Boris Reznik und Ralf Ermel. Für die Berechnung effektiver elastischer Konstanten mittels Abaqus danke ich Herrn Felix Fritzen für die entscheidenden Hinweise. Besonderer Dank gilt meinem langjährigen Zimmerkollegen und Freund, Herrn Dr. Siddhartha Roy.

In dieser Arbeit sind zahlreiche Ergebnisse von Studien- und Diplomarbeiten eingeflossen. Hierfür danke ich herzlich: Jörg Weber, Manuela Gauweiler, Benjamin Viering und Stefan Dietrich. Ferner danke ich allen studentischen Mitarbeitern für deren Unterstützung.

Im Besonderen danke ich meinen Eltern, Gabriele und Horst Gebert, meinem Bruder Dr. Matthias Gebert sowie meiner Ehefrau, Stephanie Gebert.

Inhaltsübersicht

1	EINLEITUNG	1
2	KENNTNISSTAND	3
2.1	Verbundwerkstoffe	3
2.1.1	Grundlagen zu Verbundwerkstoffen.....	3
2.1.2	Fasereigenschaften	5
2.1.3	Matrixeigenschaften.....	6
2.1.4	Faser-Matrix-Grenzfläche	7
2.1.5	Anwendungsbeispiele	8
2.2	Kohlenstofffaser-Kohlenstoffmatrix-Verbundwerkstoffe	9
2.2.1	Allotrope Modifikationen des Kohlenstoffs	9
2.2.2	Herstellung von Kohlenstofffasern	11
2.2.3	Herstellung von C/C-Verbundwerkstoffen.....	15
2.2.4	Charakterisierung der Mikrostruktur.....	20
2.2.5	Gefügebestandteile auf oberster Hierarchieebene.....	22
2.2.6	Evolution und Klassifizierung von Rissen und Poren in Laminaten.....	23
2.3	Berechnung effektiver elastischer Kenngrößen	24
2.4	Zerstörungsfreie Prüfmethoden zur Struktur-Eigenschafts-Korrelation.....	29
2.4.1	Mikro-Computertomografie	29
2.4.2	Dynamische Verfahren zur Materialcharakterisierung	34
3	VERSUCHSWERKSTOFFE UND PROBENGEOMETRIEN.....	41
3.1	Versuchswerkstoffe	41
3.1.1	Untersuchte Faserpreforms	41
3.1.2	Chemische Gasphaseninfiltration	43
3.1.3	Sukzessive thermische Nachbehandlung	44
3.1.4	Pyrolytischer Kohlenstoff von Schunk Kohlenstofftechnik.....	44
3.2	Probengeometrien.....	45
3.2.1	Probengeometrien der nicht infiltrierten Preform.....	46
3.2.2	Probengeometrien des C/C-Verbundwerkstoffs.....	47
3.2.3	Probengeometrien des pyrolytischen Kohlenstoffs	49
4	VERSUCHSEINRICHTUNGEN UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	53
4.1	μ -Computertomographie	53
4.1.1	CT mit konventioneller Röhrenstrahlung (Desktop-CT der Firma Skyscan).....	53
4.1.2	CT am Synchrotron (ANKA).....	54
4.2	Ultraschallspektroskopische Untersuchungen	55
4.2.1	Ultraschallphasenspektroskopie	55
4.2.2	Resonante Ultraschallspektroskopie	56

4.3	Weitere Charakterisierungen.....	57
4.3.1	Porositäts- und Dichtemessungen.....	57
4.3.2	Metallographische Untersuchungen.....	57
5	ERGEBNISSE	59
5.1	CVI-C/C: Filz.....	59
5.1.1	Lichtmikroskopische Aufnahmen.....	59
5.1.2	Dichte und offene Porosität.....	62
5.1.3	μ -computertomographische Ergebnisse.....	64
5.1.4	Ultraschallphasenspektroskopische Ergebnisse.....	69
5.1.5	Resonanzspektren.....	76
5.2	CVI-C/C: 2D-Laminat.....	78
5.2.1	Lichtmikroskopische Aufnahmen.....	78
5.2.2	Dichte und offene Porosität.....	81
5.2.3	μ -computertomographische Ergebnisse.....	83
5.2.4	Ultraschallphasenspektroskopische Ergebnisse.....	99
5.2.5	Resonanzspektren.....	114
5.2.6	Berechnung effektiver elastischer Konstanten.....	116
5.3	CVI-C/C: 2D-Laminat. Glühungen bis 2800 °C.....	121
5.4	Pyrolytischer Kohlenstoff (PyC).....	125
6	DISKUSSION.....	137
7	ZUSAMMENFASSUNG.....	155
8	LITERATURANGABEN	183

ANHANG

Symbolverzeichnis.....	159
Berechnung der Kohlenstoffoberfläche.....	161
Berechnung elastischer Konstanten für orthotropes Materialverhalten.....	164
Berechnung elastischer Konstanten für transversalisotropes	
Materialverhalten und Abschätzung des fortgepflanzten Fehlers.....	165
Tabellarische Ergebnisse der untersuchten Chargen.....	167
Berechnete elastische Konstanten für Filz- und UD-Lagen (CFC-Laminat).....	173