

Fortschrittsberichte aus der Produktionstechnik

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm
Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier
Universität Kassel

Band 8

Doreen Kandora

**CFK-Aluminium-Hybridverklebungen
im automobilen Rohbau**

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: Kassel, Univ., Diss., 2016

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm, Universität Kassel
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Christian Schäfers, Hochschule Osnabrück
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach, Universität Kassel
Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier, Universität Kassel

Tag der mündlichen Prüfung: 17.05.2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4754-7
ISSN 2195-5670

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

Meiner Tochter Lia Isalie Kandora

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorandin im Labor für Karosserieentwicklung und Leichtbau an der Hochschule Osnabrück in Kooperation mit dem Laboratorium für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren der Universität Kassel und der Sika Technology AG.

Zu besonderem Dank bin ich meinen Betreuern verpflichtet, denn ohne ihren akademischen Rat wäre diese Arbeit nicht entstanden. Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm, dem Leiter des Laboratoriums für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren im Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel, danke ich sehr für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit, die stets wertvolle Unterstützung und die uneingeschränkte Bereitschaft zu konstruktiven Gesprächen und Hilfestellungen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Schäfers danke ich im Besonderen für die sehr gute Betreuung und Unterstützung, die regelmäßigen Gespräche mit den sich daraus ergebenden Anregungen und fruchtbaren fachlichen Diskussionen. Im Laufe dieser Zeit ist er mir nicht zuletzt auch durch die privaten Gespräche zu einem freundschaftlichen Wegbegleiter geworden.

Mein außerordentlicher Dank gilt auch der Sika Technology AG, insbesondere dabei den Herren Urs Jäger und Urs Rheinegger, die meine Arbeit mit bereichernden Tipps und Diskussionsbeiträgen in regelmäßigen Zusammenkünften in fruchtbare Bahnen gelenkt haben. Des Weiteren danke ich der Sika Technology AG nicht nur für die finanzielle sondern auch für die experimentelle Unterstützung sowie die Bereitstellung der Klebstoffmuster und die sehr interessanten Einblicke in ihre Laboratorien in der Schweiz.

Für die zahlreichen Hilfestellungen und die Unterstützung möchte ich mich ganz herzlich beim gesamten Team des „tff“ der Uni-Kassel bedanken, im Besonderen dabei bei Herrn Martin Kahlmeyer und Holger Thiede sowie bei Holger Uphoff, Mitarbeiter des Fachbereiches für Physikalische Technik der FH-Münster. Herzlichst gedankt sei auch der Leiterin des Laborbereiches für organische Chemie und Polymerchemie Prof. Dr. rer. nat. habil. Claudia Kummerlöwe und ihrer Mitarbeiterin Hannelore Schmidt für das entgegengebrachte Vertrauen und insbesondere für die Möglichkeit, innerhalb

des Labors frei arbeiten zu dürfen. Mein weiterer Dank gilt dem Leiter des Labors für Kunststoffprüfung Herrn Prof. Dr. rer. nat. Norbert Vennemann und seinem Mitarbeiter Dirk Bröker für die Unterstützung bei der Prüfung von Kunststoffen. Dem Leiter des Labors für Materialdesign und Werkstoffzuverlässigkeit Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krupp und seinen Mitarbeitern danke ich für die Erlaubnis, das Labor nutzen zu dürfen, und die Hilfestellungen bei der Herstellung der Schliffproben.

Mein herzlicher Dank richtet sich auch an die Mitarbeiter der Betriebswerkstatt der Hochschule Osnabrück und an die Arbeitsgruppe Leichtbau, natürlich einschließlich der „Ehemaligen“. Harald Frank danke ich für seine Hilfe bei der Zusammenstellung der Messaufbauten und ihrer Inbetriebnahme sowie seine Geduld beim Löten zahlreicher Verbindungen in der Messelektronik. Arne Molitor, Daniel Steven, Martin Schmidt und Alexander Kuhlmann, danke ich ebenfalls; mit ihrem Fachwissen auf dem Gebiet der Konstruktion und der Simulation haben sie zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Nils Hämmerling und Daniel Brontsch danke ich außerordentlich für die wertvolle und unermüdliche Unterstützung im Kleblabor. Allen studentischen Hilfskräften und Studenten, die sich mit Bachelorarbeiten, Masterprojekten und Studienarbeiten an dieser Arbeit beteiligt haben, danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit und ihre tatkräftige Unterstützung.

Eine herausragende Stellung in jeglicher Hinsicht nehmen meine Familie, meine Freunde, aber allen voran meine Eltern ein. Als liebevolle Motivationsquelle mit unermüdlicher Unterstützung habt ihr erheblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen und sie zu dem werden lassen was sie heute ist. Ich danke euch von Herzen nicht nur für das Interesse und das Korrekturlesen, sondern auch für das Verständnis und für die Geduld, welche ihr mir insbesondere in der letzten, sehr intensiven Phase gezeigt habt. Ein herzliches Dankeschön auch dafür, dass ihr mich in zweifelnden Momenten immer wieder aufgebaut und stets an mich geglaubt habt!

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
0	Kurzfassung	1
1	Einleitung	3
1.1	Problemstellung und Motivation	4
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	7
2	Stand der Technik	9
2.1	Polymerwerkstoffe	9
2.1.1	Thermomechanische Eigenschaften und charakteristische Zustandsbereiche	12
2.1.2	Einfluss der chemischen Struktur auf das thermomechanische Werkstoffverhalten.....	14
2.1.3	Chemie der Klebstoffe.....	15
2.1.4	Bildung und Aufbau eines Epoxidharz-Klebstoffes	16
2.1.5	Vernetzungsreaktionen der Epoxidharze	17
2.1.6	Zusammensetzung von 1K-EP	18
2.1.7	Flexibilisierung von Epoxidharzklebstoffen	19
2.2	Faserverstärkte Kunststoffe	22
2.2.1	Kohlefaserverstärkte Kunststoffe	23
2.2.2	Matrixsysteme von Faserverbundkunststoffen	24
2.2.3	Fügen von Faserverstärkten Kunststoffen	25
2.3	Bedeutung der Füge­teiloberflächen beim Kleben	27
2.3.1	Oberflächenbehandlungsverfahren.....	27
2.3.2	Polarität der Oberfläche	28
2.3.3	Benetzungsverhalten der Oberfläche	29
2.4	Entstehung der $\Delta\alpha$-Problematik in der Hybridbauweise ...	31
2.4.1	Auswirkungen der $\Delta\alpha$ -Problematik während der Klebstoffaushärtung im KTL-Ofen.....	33
2.4.2	Toleranzmöglichkeiten gegenüber Gleitungsbeanspruchungen	36
2.5	Alterungsverhalten von Klebverbindungen	38
3	Versuchswerkstoffe	42
3.1	Klebstoffsysteme	42
3.2	Klebstoffrezeptur und Modifikation der Klebstoffe	44
3.3	Fügeteilwerkstoffe	47
3.3.1	CFK-Laminat	47
3.3.2	Fügeteilwerkstoff Aluminium	49

	3.3.3	Fügeteilwerkstoff Stahl.....	51
4		Verwendete Prüfmethode und Versuchseinrichtungen..	52
	4.1	Messung des Kontaktwinkels.....	52
	4.1.1	Messprinzip des liegenden Tropfens	52
	4.1.2	Probenpräparation und Versuchsdurchführung	52
	4.2	Differential-Scanning-Calorimetry (DSC).....	56
	4.2.1	Messprinzip	56
	4.2.2	Probenpräparation und Versuchsdurchführung	58
	4.3	Zugversuch.....	59
	4.3.1	Messprinzip	59
	4.3.2	Probengeometrie und Versuchsdurchführung	59
	4.4	Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebung nach DIN EN ISO 1465.....	60
	4.4.1	Messprinzip	60
	4.4.2	Probengeometrie und Versuchsdurchführung	60
5		Charakterisierung des Bauteilverzuges nach der Klebstoffaushärtung	62
	5.1	Entwicklung einer $\Delta\alpha$-Prüfmethodik	63
	5.1.1	Probenpräparation des $\Delta\alpha$ -Prüfaufbaus	64
	5.1.2	3D-Scan des $\Delta\alpha$ -Prüfaufbaus	66
	5.1.3	Reproduzierbarkeit des Scanvorgangs.....	69
	5.1.4	Thermische Versuchsbedingungen	70
	5.2	Verformung in Abhängigkeit der Klebschichtdicke	71
	5.3	Verformung in Abhängigkeit von E-Modul und T_g.....	74
	5.4	Verformung in Abhängigkeit von der Zeit	80
	5.5	Prüfung des Relaxationsverhaltens	86
	5.5.1	Probenpräparation und Versuchsdurchführung	88
	5.5.2	Ergebnisse Relaxationsmessungen.....	90
	5.6	Verformung in Abhängigkeit von der Abkühlzeit	95
	5.7	Mikroskopische Untersuchungen der Klebstoffgrenzschicht	97
	5.7.1	Messprinzip	97
	5.7.2	Probenpräparation und Versuchsdurchführung	98
	5.8	Zusammenfassung	103
6		Simulation des $\Delta\alpha$-Prüfaufbaus.....	104
	6.1	Aufbau des Simulationsmodells	104
	6.2	Simulationsergebnisse.....	109

6.3	Zusammenfassung	113
7	Charakterisierung klebstoffspezifischer Vorgänge beim Aushärten	114
7.1	Expansions- und Kontraktionsmessung - Wegmessung -	115
7.1.1	Expansions- und Kontraktionsvorgänge während der Klebstoffaushärtung	115
7.1.2	Konstruktive Umsetzung der Messapparatur.....	116
7.2	Spannungsaufbau während der Klebstoffaushärtung	120
7.2.1	Härtungsbedingte Klebstoffspannungen.....	120
7.2.2	Konstruktive Umsetzung der Messapparatur.....	121
7.3	Versuchsaufbau beider Messverfahren.....	123
7.4	Versuchsdurchführung	124
7.4.1	Geometrie der Versuchswerkstoffe.....	124
7.4.2	Bestimmung der Aufheiz- und Abkühlbedingungen....	125
7.4.3	Probenpräparation und Versuchsdetails.....	128
7.4.4	Nullkurven der Messapparaturen.....	128
7.5	Darstellung und Bewertung der Messergebnisse	131
7.5.1	Wegmessung	131
7.5.2	Zusammenfassung.....	135
7.5.3	Kraftmessung.....	136
7.5.4	Zusammenfassung.....	138
8	Prüfung des Alterungs- und Beständigkeitsverhaltens..	139
8.1	Verbundeigenschaften nach Kurzzeitalterung PV1200...	139
8.2	Zusammenfassung	148
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	149
	Literaturverzeichnis.....	VII
	Abkürzungsverzeichnis	XVII
	Symbolverzeichnis	XIX
	Abbildungsverzeichnis	XXI
	Tabellenverzeichnis.....	XXV
	Anhangsverzeichnis.....	XXVII
	Anhang	XXIX