

Experimentelle und numerische Untersuchung von EP-Klebstoffen im Hinblick auf die Modellbildung zur Berechnung geklebter Verbindungen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

im Fachbereich Maschinenbau der
Universität Kassel

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jörg Bornemann
aus Vellmar

Vellmar, den 18.09.2003

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Schlimmer

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. O. Hahn

Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel

Jörg Bornemann

**Experimentelle und numerische Untersuchung
von EP-Klebstoffen im Hinblick auf die Modell-
bildung zur Berechnung geklebter Verbindungen**

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag
Aachen 2004

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2004

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

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Schlimmer

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. O. Hahn

Tag der mündlichen Prüfung: 22.01.2004

Copyright Shaker Verlag 2004

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-3087-4

ISSN 1613-3498

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstofftechnik im Fachgebiet Werkstofftechnik mit dem Schwerpunkt Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde der Universität Kassel.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. M. Schlimmer für die Anregung zur vorliegenden Arbeit, die großzügige Unterstützung und Betreuung sowie die stete Bereitschaft zur fachlichen Diskussion. Herrn Professor Dr.-Ing. O. Hahn danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an der Arbeit.

Den Kollegen am Institut, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Stephan Rohde und Dr.-Ing. Jürgen Häberle, danke ich für die stete Diskussionsbereitschaft, vielfältigen Anregungen und die gute konstruktive Zusammenarbeit. Herrn Dipl.-Ing. Stephan Rohde danke ich für das sorgfältige Korrekturlesen.

Der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungseinrichtungen (AiF) danke ich für die finanzielle Unterstützung.

Vellmar, im Juni 2004

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die experimentelle Untersuchung von EP-Klebstoffen im Hinblick auf die mechanische Modellbildung zur numerischen Berechnung des mechanischen Verhaltens geklebter Verbindungen. Aus den Erkenntnissen der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden Hinweise auf werkstoffmechanisch sinnvolle Grundversuche an In-situ-Proben zur Ermittlung berechnungsgerechter Klebstoffkennwerte und -kennfunktionen hergeleitet und die gegenwärtigen Möglichkeiten zur Berechnung geklebter Verbindungen aufgezeigt.

In einachsigen und kombinierten Grundversuchen an In-situ-Proben, stumpf geklebten Rohrproben, angelehnt an ISO 11003-1, sowie Zugscherproben in Anlehnung an ISO 11003-2, wurden die mechanischen Eigenschaften der Versuchsklebstoffe bestimmt. Ergebnisse der Versuche sind die elastischen bzw. pseudo-elastoplastischen Klebstoffkennwerte und Kennfunktionen sowie Beanspruchungsgrenzen.

Als werkstoffgerechte Versagens- bzw. Fließbedingung wurde ein aus dem allgemeinen plastischen Potential hergeleitetes Kriterium angewandt, das den an Rohrproben ermittelten Einfluss hydrostatischer Spannungsanteile berücksichtigt.

Erste Untersuchungen wurden für einen silbergefüllten elektrisch leitfähigen Klebstoff durchgeführt, der wegen seines hohen Anteils an Silberpartikeln bei Raumtemperatur ein annähernd linearelastisches Werkstoffverhalten besitzt. Durch Erweiterung der o. g. Versuchstechnik um eine Präzisionswiderstandsmessung konnte ein Zusammenhang zwischen mechanischem Beanspruchungszustand und gemessener elektrischer Widerstandsänderung einer geklebten Verbindung nachgewiesen werden.

An einem mechanisch durch 4-Punkt-Biegung beanspruchten elektronischen Bauteil wurde die Übertragbarkeit des linearelastischen Werkstoffmodells und der angewandten Anstrengungshypothese auf eine bauteilähnliche Klebverbindung gezeigt. Die experimentell durch Widerstandsmessung sowie mikroskopische Untersuchungen ermittelte Beanspruchungsgrenze und der Versagensort in der Klebschicht des Bauteils zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem numerischen Ergebnis.

Unter Wärmeeinfluss besitzt der hochgefüllte Klebstoff ein nichtlineares Werkstoffverhalten. Zähmodifizierte EP-Klebstoffe zeigen dieses bereits bei Raumtemperatur. Weitere experimentelle und numerische Untersuchungen zum nichtlinearen Werkstoffverhalten wurden daher an einem modifizierten EP-Klebstoff für Metallklebverbindungen (Strukturklebstoff) durchgeführt.

Die unter kombinierter Beanspruchung ermittelten Klebschichtfestigkeiten zeigen, dass die bisher in den FE-Programmen implementierten Anstrengungshypothesen nach Mises und Drucker-Prager auch für den untersuchten Strukturklebstoff nicht zutreffen. Die für den silbergefüllten Klebstoff als Versagensbedingung verifizierte Anstrengungshypothese beschreibt hingegen die experimentell ermittelte Fließortkurve des Strukturklebstoffs. Auf Basis dieser Fließbedingung können die Spannungs-Verformung-Zusammenhänge aus einachsigen und kombinierten Versuchen in einen einheitlichen Vergleichszustand überführt werden.

Berechnet man mit den bereits in FE-Programmen implementierten Stoffgleichungen das Verformungsverhalten einer geklebten Rohrprobe bei Zug- und Schubbeanspruchung sowie das Verformungsverhalten einer Zugscherprobe, stimmt das numerische Ergebnis bei reiner Schubbeanspruchung mit dem experimentellen Befund überein. Treten hydrostatische Zugspannungsanteile auf, stimmt das numerische Klebschichtverhalten nur bei kleinen rein elastischen Deformationen mit dem Experiment überein.

Das experimentell ermittelte Verformungsverhalten einer überlappt geklebten bauteilähnlichen Verbindung, deren Klebschicht einer äußeren Zugscherbeanspruchung mit geringen Anteilen hydrostatischer Zugspannung unterliegt, konnte mit dem in ABAQUS implementierten modifizierten Drucker-Prager-Modell numerisch berechnet werden.

Da sich die an Zugscherproben ermittelten Schubspannung-Gleitung-Kurven deutlich von denen aus Torsionsversuchen unterscheiden, wurden die an Rohrproben ermittelten Spannungs-Verformungs-Beziehungen den numerischen Berechnungen zugrunde gelegt. Aufgrund der vorliegenden numerischen Ergebnisse und der experimentellen Untersuchungen an weiteren zähmodifizierten EP-Klebstoffen wurden Hinweise für Fertigung und Versuchsauswertung von In-situ-Proben hergeleitet. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse unterscheiden sich die Schubspannung-Gleitung-Kurven aus Zugscher- und Torsionsversuch kaum.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Symbole, Indizes	XI
1 Einleitung und Problemstellung	1
2 Aufgabenstellung	3
3 Stand von Forschung und Technik	7
3.1 Metallklebungen mit Klebstoffen auf Epoxidharzbasis	8
3.2 Elektrisch leitfähige Klebstoffe für die Elektronik	9
3.3 Numerische Berechnung der Klebschichtbeanspruchung	14
4 Probekörper	23
4.1 Versuchswerkstoffe	23
4.1.1 Klebstoffe	23
4.1.2 Fügebauteilwerkstoffe	24
4.2 Probenfertigung für Grundversuche	25
4.2.1 Substanzprobe	26
4.2.2 Zugscherprobe	27
4.2.3 Rohrprobe	29
4.3 Bauteilähnliche Klebverbindungen	30
4.3.1 Elektronisches Bauteil	30
4.3.2 Gekerbte Überlappungsklebung	31
5 Versuchseinrichtungen	33
5.1 Klebstoffprüfung	33
5.1.1 Zugversuch	33

5.1.2	Zugscherversuch	35
5.1.3	Einachsige und kombinierte Zug- / Torsionsversuche	38
5.1.4	Elektrische Widerstandsmessung	44
5.2	Prüfung bauteilähnlicher Proben	48
5.2.1	Elektronisches Bauteil	48
5.2.2	Gekerbte Überlappungsklebung	50
6	Experimentelle Ergebnisse	51
6.1	Silbergefüllter Leitklebstoff	51
6.1.1	Klebstoffstruktur	51
6.1.2	Zugversuch	52
6.1.3	Zugscherversuch	53
6.1.4	Zug- / Torsionsversuche	69
6.1.5	Untersuchung des elektronischen Bauteils im 4-Punkt-Biegeversuch	78
6.1.6	Mikroskopische Untersuchung des elektronischen Bauteils	82
6.2	Zähmodifizierter Strukturklebstoff	87
6.2.1	Zugversuch	87
6.2.2	Zugscherversuch	88
6.2.3	Zug- / Torsionsversuche	92
6.2.4	Untersuchung der gekerbten Überlappungsklebung	100
7	Materialmodelle für EP-Klebstoffe	105
7.1	Linearelastisches Verhalten	105
7.2	Deformation-Plasticity-Modell	105
7.3	Allgemeine Fließbedingung / Anstrengungshypothese	106
7.4	Erweiterte Drucker-Prager Modelle	113

8 Lineare FE-Analyse eines silbergefüllten Leitklebstoffs	115
8.1 Materialmodell	115
8.1.1 Spannung-Dehnung-Beziehung	115
8.1.2 Versagensbedingung	116
8.2 FE-Analyse der Klebverbindung des elektronischen Bauteils	117
8.2.1 FE-Modell	117
8.2.2 Berechnungsergebnis	120
8.3 Vergleich mit experimentellem Ergebnis	123
9 Nichtlineare FE-Analyse eines zähmodifizierten Strukturklebstoffs	127
9.1 Spannung-Dehnung-Beziehung	127
9.1.1 Vergleichsspannung-Vergleichsdehnung nach Mises	127
9.1.2 Vergleichsspannung-Vergleichsdehnung nach Schlimmer	129
9.2 Analyse mit plastischem Potential nach Mises (Deformation-Plasticity-Modell)	134
9.2.1 Bestimmung der Ansatzfreiwerte	134
9.2.2 Validierung am Ein-Element-Modell	135
9.2.3 Nachrechnung der Rohrprobe bei Zug- und Torsionsbeanspruchung	137
9.2.4 Nachrechnung des Zugscherversuchs	141
9.3 Analyse mit plastischem Potential nach modifizierter Drucker-Prager-Bedingung	142
9.3.1 Bestimmung der Ansatzfreiwerte	143
9.3.2 Validierung am Ein-Element-Modell	145
9.3.3 Nachrechnung der Rohrprobe bei Zug- und Torsionsbeanspruchung	145
9.3.4 Nachrechnung des Zugscherversuchs	153
9.4 Auswahl eines Materialmodells für weitere Berechnungen	158

9.5 FE-Analyse der gekerbten Überlappungsklebung	159
9.5.1 FE-Modell	160
9.5.2 Berechnungsergebnis	161
9.6 Vergleich mit experimentell ermitteltem Bauteilverhalten	169
10 Konsequenzen für Grundversuche zur Klebstoffcharakterisierung	173
10.1 Probenherstellung	173
10.2 Versuchsdurchführung und Auswertung	181
11 Zusammenfassung	183
12 Literaturverzeichnis	189