

Numerische und experimentelle Untersuchungen an Klebverbindungen mit gradiertem Klebschicht

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.- Ing.)
im Fachbereich Maschinenbau der
Universität Kassel

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Clemens Barthel
aus Melsungen

Melsungen, den 08.09.2006

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Schlimmer
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. A. Matzenmiller

Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel

Clemens Barthel

**Numerische und experimentelle Untersuchungen
an Klebverbindungen mit gradiertem Klebschicht**

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag
Aachen 2007

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., 2007

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. A. Matzenmiller

Tag der mündlichen Prüfung: 29.01.2007

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6112-2
ISSN 1613-3498

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Herrn Professor Schlimmer am Institut für Werkstofftechnik der Universität Kassel.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Schlimmer für die Anregung zur vorliegenden Arbeit, die großzügige Unterstützung und Betreuung sowie die stete Bereitschaft zur fachlichen Diskussion. Herrn Professor A. Matzenmiller danke ich für die Übernahme des Korreferates und die Unterstützung während der Zeit, in der die Dissertation entstand.

Den Kollegen am Institut, insbesondere Karl Michael Mihm, Dr. Jörg Bornemann und Thomas Herwig sowie Rainer Hunke und Dieter Poschmann, danke ich für die Anregungen und die gute, konstruktive Zusammenarbeit.

Der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) sei für die finanzielle Unterstützung gedankt.

Melsungen, im September 2006

Kurzfassung

Die Wahl eines Klebstoffs hängt in besonderem Maße von der zu fügenden Verbindung ab. So kann z.B. ein Klebstoff, der bei steifen Fügeteilen hervorragende Klebergegebnisse liefert, im Falle nachgiebiger Fügeteile ungeeignet sein. Insbesondere bei dünnen Fügeteilen, wie sie in der Praxis des Karosseriebaus verwendet werden, unterscheiden sich die Anforderungen an einen Klebstoff darüber hinaus bereits innerhalb einer Klebfuge. Diese Tatsache legt nahe, dass eine Klebverbindung durch das Einbringen von mehreren Klebstoffen in eine Klebfuge optimiert werden kann. In dieser Arbeit werden einschnittige Überlappklebverbindungen mit 1,7 mm dicken Stahlfügeteilen untersucht, bei denen im Bereich der Überlappungsenden epoxidharzbasierte Klebstoffe mit niedrigerem Elastizitätsmodul und höherer Verformbarkeit als im Mittelbereich verwendet werden.

Die in der Arbeit als „gradierte“ Klebverbindungen bezeichneten Klebungen mit zwei Klebstoffen in einer Klebfuge werden sowohl rechnerisch mit Finite-Elemente-Berechnungen als auch experimentell untersucht. Dabei gehen die Berechnungen durch die Wahl klebstoffgerechter Materialmodelle und die experimentellen Untersuchungen durch umfangreiche Grundversuche, die auch Überlagerung von Torsion und Druck enthalten, über die bisherigen Veröffentlichungen auf dem Gebiet der gradierten Klebschichten hinaus.

Als Klebstoffe werden einkomponentige, heißhärtende, epoxidharzbasierte Klebstoffe der Firma Dow verwendet. Im Mittenbereich der Überlappung kommt immer der Klebstoff Betamate 5103 zum Einsatz, der den höchsten Elastizitätsmodul und die höchste Festigkeit innerhalb der Betamate-Reihe hat. In den Randbereichen werden, der Beanspruchung entsprechend, zähmodifizierte Klebstoffe eingesetzt, die eine große Dehnfähigkeit besitzen.

Die mechanische Klebstoffcharakterisierung erfolgt an stumpf geklebten Rohrproben. Mit ihnen können in der Klebschicht Schubspannungen sowie ein dreiachsiger Normalspannungszustand und Kombinationen aus beiden induziert werden. Zyklische Be- und Entlastungsversuche zeigen, dass sich die zähmodifizierten Klebstoffe näherungsweise elastoplastisch verhalten. Mit den Klebstoffen werden Zug- und Torsionsversuche durchgeführt sowie verschiedene Beanspruchungskombinationen mit Torsion und Zug sowie Torsion und Druck untersucht. Hieraus können Fließflächen im Hauptspannungsraum konstruiert werden, die, zusammen mit dem Verfestigungsverhalten, Basis für die Wahl des Materialmodells und der zugehörigen Parameter sind.

Bei den Finite-Elemente-Analysen wird unterschieden zwischen Berechnungen mit Materialmodellen, die in ABAQUS standardmäßig zur Verfügung stehen, und

solchen, bei denen das Materialmodell der Klebstoffe in einer Benutzerroutine implementiert ist. Bei den Berechnungen mit den ABAQUS-Materialmodellen werden der hochfeste Klebstoff des Mittenbereichs mit dem linearen Drucker-Prager-Modell und der zähmodifizierte Klebstoff der Außenbereiche mit dem allgemeinen Drucker-Prager-Exponentenmodell modelliert. Im Fall der Berechnungen mit dem benutzerdefinierten Materialmodell (UMAT) werden beide Klebstoffe mit der UMAT-Routine modelliert. Die Routine enthält ein auf Schlimmer zurückgehendes Materialmodell, dessen Fließbedingung in der ersten Invarianten des Spannungstensors und der zweiten Invarianten des Spannungsdeviators formuliert ist und das dadurch die starke Abhängigkeit der Klebstoffe von hydrostatischen Spannungszuständen berücksichtigen kann. Versagensbedingungen, die mit den verwendeten Materialmodellen verknüpft werden können, existieren in ABAQUS nicht.

Nach der Überprüfung der Anwendbarkeit der ausgewählten Materialmodelle durch Nachrechnung der Rohrprobenexperimente werden FE-Modelle der einschnittigen Überlappklebverbindung mit variierender Aufteilung des 20 mm langen Überlappungsbereiches erstellt. Anhand der Berechnungsergebnisse kann das Tragverhalten der gradierten Klebverbindungen verstanden und ein Kriterium zur geeigneten Aufteilung in Innenbereich und Außenbereiche angegeben werden. Mit beiden Materialmodellen lassen sich gut übereinstimmende Berechnungsergebnisse an den Dünnschleibproben erzielen.

Zur Herstellung der Probekörper wird eine geeignete Fügevorrichtung konzipiert. Die Versuchsergebnisse bestätigen das Kriterium zur Aufteilung der Überlappungslänge und zeigen, daß im quasistatischen Versuch durch Gradierung eine Steigerung der Festigkeit von 10 % gegenüber dem geeigneteren der beiden Ausgangsklebstoffe erzielt werden kann.

Um den Einfluss der „Gradierung“ bei dynamischer Beanspruchung zu untersuchen, werden Wöhlerlinien für die gradierte Klebverbindung und die Klebverbindungen mit den Ausgangsklebstoffen erstellt. Die Bruchschwingspielzahlen der gradierten Klebungen betragen bei zwei der drei geprüften Lastniveaus ca. das Dreifache im Vergleich zu den Proben mit den Ausgangsklebstoffen. Die Verformungsmessungen zeigen, dass der spröde Klebstoff in der Überlappungsmitte verformungshemmend wirkt. Dadurch tritt das instationäre Kriechen bei den gradierten Klebverbindungen erst deutlich später ein als bei den ungradierten Klebverbindungen mit dem zähmodifizierten Klebstoff.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass die gradierten Klebschichten insbesondere bei schwingender Beanspruchung zu einer deutlichen Verbesserung des Tragverhaltens einer Klebverbindung beitragen können.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGS- UND FORMELZEICHEN-VERZEICHNIS	8
1 EINLEITUNG	12
2 AUFGABENSTELLUNG	13
3 STAND VON FORSCHUNG UND TECHNIK	16
3.1 Klebstoffe	16
3.2 Berechnung von Klebverbindungen	20
3.3 Gradierte Klebschichten	23
4 AUSWAHL DER KLEBSTOFFE UND DES STAHL	27
5 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN ROHRPROBEN ZUR KLEBSTOFFCHARAKTERISIERUNG	29
5.1 Probengeometrie, Herstellung und Lagerung	30
5.2 Prüfung der Rohrproben	32
5.2.1 Ermittlung der Gleitung während des Versuchs	33
5.2.2 Ermittlung der Dehnung während des Versuchs	35
5.2.3 Regelung von Dehnung und Gleitung während des Versuchs	37
5.2.4 Spannungszustand in der Klebschicht beim Zugversuch am Rohr	46
5.3 Ergebnisse für den Klebstoff Betamate 1496 V	47
5.3.1 Torsion	47
5.3.2 Zug	48
5.3.3 Kombination $\alpha = 6$	49
5.3.4 Kombination $\alpha = 2$	51
5.3.5 Kombination $\alpha = \frac{2}{3}$	52
5.3.6 Kombination $\alpha = -10$	54
5.3.7 Kombination $\alpha = -6$	56
5.3.8 Druck	58
5.3.9 Gemeinsame Darstellung aller Beanspruchungsarten für den Klebstoff Betamate 1496 V	59
5.3.10 Bestimmung der elastischen Materialkennwerte für den Betamate 1496 V	65
5.4 Ergebnisse für den Klebstoff Betamate 5103	67
5.4.1 Torsion	67
5.4.2 Zug	69
5.4.3 Kombination $\alpha = 4$	70
5.4.4 Kombination $\alpha = 1$	71
5.4.5 Kombination $\alpha = -10$	73
5.4.6 Kombination $\alpha = -6$	74

5.4.7	Gemeinsame Darstellung aller Beanspruchungsarten für den Klebstoff Betamate 5103	76
5.4.8	Bestimmung der elastischen Materialkennwerte beim Betamate 5103	80
5.5	Ergebnisse für den Klebstoff Betamate 1185	81
5.5.1	Torsionsversuch, Zugversuch und kombinierte Beanspruchungen	81
5.5.2	Bestimmung der elastischen Materialkennwerte beim Betamate 1185	84
5.6	Vergleich des Schubspannung-Gleitung-Verhaltens und Spannung-Dehnung-Verhaltens der unterschiedlichen verwendeten Klebstoffe	85
6	EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DER FLIEßFLÄCHEN	88
6.1	Betamate 1496 V	88
6.2	Betamate 5103	99
6.3	Betamate 1185	104
6.4	Normierte Darstellung der Fließflächen für alle drei Klebstoffe	106
7	ZUGVERSUCHE ZUR KENNWERTERMITTLUNG AN DEM FÜGETEILWERKSTOFF	108
7.1	Durchführung der Prüfung	108
7.2	Ergebnisse	110
8	FE-BERECHNUNGEN AN DER ROHRPROBE	113
8.1.1	Linearelastische Berechnungen	114
8.1.2	Nachrechnung der Grundversuche für den Klebstoff Betamate 1496 V mit dem Drucker-Prager-Exponentenmodell (DPE)	118
8.1.3	Nachrechnung der Grundversuche für den Klebstoff Betamate 5103 mit dem linearen Drucker-Prager-Modell (LDP)	133
8.1.4	Theorie nach Schlimmer (UMAT) und Parameteridentifikation	139
8.1.5	Nachrechnung der Grundversuche für den Klebstoff Betamate 1496 V mit der UMAT-Routine (Parameter: R. Mahnken)	142
8.1.6	Nachrechnung der Grundversuche für den Klebstoff Betamate 1496 V mit der UMAT-Routine (Parameter: C. Barthel)	148
8.1.7	Nachrechnung der Grundversuche für den Klebstoff Betamate 5103 mit der UMAT-Routine (Parameter: R. Mahnken)	156
9	FE-BERECHNUNGEN AN DER DÜNNBLECHPROBE	161
9.1	Linearelastische Berechnungen	164
9.2	Berechnungen gradierter Klebverbindungen mit elastoplastischen Materialmodellen, die in ABAQUS implementiert sind	168
9.2.1	Variation der Bereichslängen	168
9.2.2	Materialmodell der Fügeteile	169
9.2.3	Materialmodell für den Klebstoff Betamate 1496 V	170
9.2.4	Materialmodell für den Klebstoff Betamate 5103	170
9.2.5	Lasten	171
9.2.6	Ergebnisse	171

9.3 Berechnungen gradierter Klebverbindungen mit der UMAT-Routine	180
9.3.1 Variation der Bereichslängen	180
9.3.2 Materialmodell der Fügeteile	180
9.3.3 Materialmodell für den Klebstoff Betamate 1496 V	180
9.3.4 Materialmodell für den Klebstoff Betamate 5103	180
9.3.5 Lasten	180
9.3.6 Ergebnisse	180
9.3.7 Gegenüberstellung der Spannungen für eine Konstellation bei verschiedenen Materialmodellen	190
 10 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN KLEBVERBINDUNGEN MIT ZWEI KLEBSTOFFEN IN EINER KLEBVERBINDUNG	 194
10.1 Fügevorrichtung für gradierte Klebschichten	194
10.2 Herstellung und Prüfung von gradierten Klebschichten	198
10.3 Experimentelle Ergebnisse für gradierte Klebverbindungen	202
10.3.1 Festigkeiten im quasistatischen Versuch	202
10.3.2 Verformungsmessung an gradierten Klebschichten	205
 11 SCHWINGVERSUCHE	 212
 12 ZUSAMMENFASSUNG	 219
 13 LITERATUR	 226
 ANHANG	 231

Abkürzungs- und Formelzeichen-Verzeichnis

Abkürzungen

CCD	Charge-coupled Device
FE	Finite Elemente
FEM	Methode der Finiten Elemente
GOM	Gesellschaft für optische Messtechnik
MPC	Multi Point Constraint
Pos	Position
UMAT	User Material Routine in ABAQUS
2D, 3D	zwei-, dreidimensional
tr	Spuroperator

Einheiten

kN	Kilonewton
min	Minute
mm	Millimeter
s	Sekunde
°C	Temperatur in Grad Celsius
Hz	Hertz
MPa	Megapascal

Nomenklatur

gradierte Klebschicht:	Klebfuge mit zwei verschiedenen Klebstoffen, symmetrische Anordnung
ungradierte Klebschicht:	Klebfuge mit nur einem Klebstoff
Compliant-Bereiche:	Außenbereiche einer gradierten Klebschicht
Stiff-Bereich:	Der mittlere der drei Bereiche einer gradierten Klebschicht
Probenform A:	Doppelrohrprobe mit Innenradius/Außenradius = 50 mm / 60 mm
Probenform B:	Doppelrohrprobe mit Innenradius/Außenradius = 56 mm / 60 mm
Probenform C:	Doppelrohrprobe mit Innenradius/Außenradius = 54 mm / 60 mm

Formelzeichen

a	Parameter des Drucker-Prager-Exponentenmodells
a_1, a_2	Parameter der Fließbedingung nach Schlimmer
a_1^*, a_2^*	Parameter des plastischen Potentials nach Schlimmer
b	Parameter des Drucker-Prager-Exponentenmodells, Parameter des Verfestigungsansatzes bei der UMAT
c_1, c_2	Hilfsgrößen
d	Dicke
d'	Parameter des hyperbolischen Drucker-Prager-Modells
d_{LDP}	Parameter des linearen Drucker-Prager-Modells
e_v	Interne Variable („quasi Vergleichsdehnung“) bei der UMAT
$\hat{f}$	Fließbedingung nach Schlimmer
$\hat{g}$	Plastisches Potential nach Schlimmer/Mahnken
l	Abstand
l_0	Parameter des hyperbolischen Drucker-Prager-Modells
$l_{\text{mess,dehn}}$	Abstand zwischen Befestigungsschraube und Aufnehmernadel für Zug beim biaxialen Wegaufnehmer
l_{tors}	Abstand zwischen Befestigungsschraube und Aufnehmernadel für Torsion beim biaxialen Wegaufnehmer
p	ABAQUS-Koordinate in Abhängigkeit von I_1
p_t	Parameter des hyperbolischen Drucker-Prager-Modells
p_{tDPE}	Parameter des Drucker-Prager-Exponentenmodells
q	ABAQUS-Koordinate in Abhängigkeit von J_2
q_v	Parameter des Verfestigungsansatzes bei der UMAT
r_a	Außenradius
t	Zeit
u	Verschiebung in Umfangsrichtung
v	Verschiebung in Längsrichtung
A	Fläche
E	Elastizitätsmodul
E_{calc}	abgeminderter Elastizitätsmodul
E^*	Proportionalitätsfaktor beim Zugversuch am Rohr
E_{calc}^*	abgeminderter Proportionalitätsfaktor beim Zugversuch am Rohr

F	Kraft, Fließbedingung in ABAQUS-Nomenklatur
G	Schubmodul, plastisches Potential
I_1	Erste Invariante des Spannungstensors
J_2	Zweite Invariante des Spannungsdeviators
M	Moment
M_t	Torsionsmoment
P	Punkt, Parameter des Verfestigungsansatzes bei der UMAT
PosX, PosY	Positionen bei der Messung mit dem Laserextensometer
R	Quotient aus Oberspannung und Unterspannung
S	Spannungsdeviator
W	Widerstandsmoment
Y	Fließspannung
α	Verhältniswert, Winkel
β	Parameter des hyperbolischen Drucker-Prager-Modells
β_{LDP}	Parameter des linearen Drucker-Prager-Modells
γ	Gleitung
ε	Dehnung
ε	Dehnungstensor
λ	Proportionalitätsfaktor, Hauptspannungen
ν	Querdehnzahl
ν_{calc}	abgeminderte Querzahl
σ	Spannung
σ	Spannungstensor
σ_a	Spannungsamplitude
σ_m	Mittelspannung
σ_0	Oberspannung
σ_u	Unterspannung
$\bar{\sigma}_0$	Parameter des Drucker-Prager-Exponentenmodells
τ	Schubspannung
τ_a	Spannungsamplitude bei Schubbeanspruchung
τ_0	Schuboberspannung
τ_u	Schubunterspannung

φ	Verdrehwinkel
φ^*	Winkel, die zu Extrema führen
φ_1^*	Richtungswinkel der ersten Hauptdehnung
φ_2^*	Richtungswinkel der zweiten Hauptdehnung
Δ	inkrementelle Änderung
ψ	Parameter des Drucker-Prager-Exponentenmodells, Parameter des linearen Drucker-Prager-Modells
$\cdot$	Nach der Zeit abgeleitete Größe
1	Einheitstensor zweiter Ordnung
$\in$	Parameter des Drucker-Prager-Exponentenmodells

Indizes

f	Fügeteil
ges	gesamt
p	polar
t	torsional
true	wahre Größe
x, y, z	Kartesische Koordinatenrichtungen
xy, xz, yz	Richtung der Schubspannungen und Gleitungen
F	Fließgrenze
K	Klebschicht
T	Torsion
Z	Zug
Verf	Verfestigung
ξ	erste Achsrichtung des gedrehten Koordinatensystems
0	Ausgangszustand
1,2	erste und zweite Hauptrichtung

Exponenten

pl	plastisch
H	Hauptspannungsform
*	Größe im transformierten Koordinatensystem