
Induktiv beschleunigte Klebungen in der Serienfertigung

Von der Gemeinsamen Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von: Sascha Nagel

aus: Dannenberg

eingereicht am: 15.10.2003

mündliche Prüfung am: 09.12.2003

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger, Prof. Dr.-Ing. Helmut Wohlfahrt,
Prof. Dr.-Ing. Thomas Reiner

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Ferrit Küçükay

2004

bonding and joining

Band 3

Sascha Nagel

**Induktiv beschleunigte Klebungen
in der Serienfertigung**

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2003

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 3-8322-3270-2

ISSN 1617-8890

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

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mir die Vollendung meiner Promotion ermöglichten:

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger danke ich für die Möglichkeit, meine Promotion anfertigen zu dürfen und für seine hervorragende fachliche Unterstützung und Anregungen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferrit Küçükay danke ich für die Übernahme des Prüfungsausschuß. Ebenso gilt mein Dank den Referenten Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Wohlfart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Reiner.

Den Geschäftsführen der IFF GmbH, Herrn Dr.-Ing. Christian Lammel und Herrn Prof. Dr. Karel Mazac danke ich für die großzügige Bereitstellung der Anlagen und Prüfmittel, die für das Anfertigen dieser Promotion notwendig waren, sowie ihre fruchtbare thematische und persönliche Unterstützung.

Den Mitarbeitern der IFF GmbH, Dr.-Ing Peter Dörfler, Dipl.-Ing. Florian Dirscherl, Dipl.-Ing. Farid Gohary, Dipl.-Ing. Ralf Schuster, Dipl.-Ing. Hans Hollinger und Martina Gürtner, sowie meinen Semestranten und Diplomanten danke ich für Unterstützung und das hervorragende und motivierende Arbeitsklima.

Ganz besonders danke ich natürlich meinen Eltern Regina und Antonius Nagel, die mir das Studium erst ermöglichten und mich jederzeit unterstützen und meiner Freundin Waltraud Felsl, die mich immer motivierte und hilfreich zur Seite stand.

INHALTSVERZEICHNIS

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	7
1 Einleitung	9
1.1 Induktive Klebstoffaushärtung in der Serienfertigung.....	9
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	10
2 Herstellung von strukturellen Verbindungen durch das Fügeverfahren Kleben ..	11
3 Stand der Erkenntnisse	15
3.1 Klebstoffe	15
3.2 Arten von Klebungen	16
3.3 Wärmeleitung von Klebungen	18
3.4 Bauteilverzug	19
3.5 Thermische Klebstoffhärtung	21
3.5.1 Anforderungen in der Serienfertigung.....	21
3.5.2 Verfahren zur Wärmeeinbringung.....	24
3.5.3 Vergleich.....	29
3.6 Grundlagen der induktiven Erwärmung	30
3.6.1 Wirkprinzip.....	30
3.6.2 Thermischer Wirkungsgrad.....	34
3.7 Induktionserwärmung in technischen Anwendungen	41
3.7.1 Technische Heizprozesse	41
3.7.2 Kleben.....	42
4 Aufgabenstellung	45
5 Versuchseinrichtungen.....	47
5.1 Anlagentechnik	47
5.2 Messtechnik	48
5.2.1 Temperaturmessung	48
5.2.2 Deformationsmessung	52
6 Ermittlung der Reaktionswärme in der Klebverbindung	57
6.1 Einflussfaktoren auf den Vernetzungsgrad	57
6.2 Reaktionswärme in der Klebschicht	60

7	Ermittlung der Einflussfaktoren auf den Bauteilverzug an Versuchskörpern.....	69
7.1	Prozessparameter	71
7.1.1	Zieltemperatur	71
7.1.2	Temperaturgradient.....	78
7.2	Konstruktion	83
7.2.1	Bauteilsteifigkeit.....	83
7.2.2	Position des Aufheizbereichs.....	86
7.3	Materialkennwerte	88
7.4	Methoden zur Minimierung des Bauteilverzugs.....	95
8	Anpassung der Anlagentechnik unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten	101
8.1	Anlagenminimierung.....	102
8.2	Induktoren für kleine Bauteile.....	103
8.3	Induktorflexibilisierung	105
9	Umsetzung am Originalbauteil.....	109
9.1	Aushärtung der Bördelnahtklebung am Beispiel einer Aluminiumfront- klappe.....	109
9.1.1	Beschreibung des Bauteils.....	109
9.1.2	Umsetzung der Induktionstechnik gemäß den Versuchsergebnissen am Probenkörper	116
9.1.3	<i>Bewertung der Verformungen</i>	132
9.2	Aushärtung der Unterfütterungsklebung am Beispiel einer Stahl- Seitenwand	133
9.3	Aushärtung von Befestigungselementen am Beispiel von Spiegelsockel und Gewindebolzen	146
10	Zusammenfassung	155
11	Literaturverzeichnis.....	159
12	Abbildungsverzeichnis	166

VERWENDETE FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

Größe	Einheit	Erklärung
λ	W / m K	Wärmeleitfähigkeit
α	$10^{-6} / \text{K}$	Längendehnungskoeffizient
γ	1/K	Volumendehnungskoeffizient
V_0	m^3	Ausgangsvolumen
T_0	$^{\circ}\text{C}$	Ausgangstemperatur
$\tan \delta$	-	Dielektrischer Verlustfaktor
ε_r	-	Dielektrische Verlustzahl
μ_0	$1,256 \cdot 10^{-6}$ V s / A m	Permeabilitätskonstante, absolute,
μ_r	-; -	Permeabilität, relative; Dipolmoment
Q	J	Wärmemenge
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
$\dot{q}$	W / m^2	Wärmestromdichte
I	A	Stromstärke
R	Ω ; -	Ohmscher Widerstand; Reaktionsgeschwindigkeit
t	s	Zeit
f	Hz	Frequenz
δ	mm; mm	Stromeindringtiefe; Klebschichtdicke
ζ	$\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$	Spezifischer elektrischer Widerstand
B	T	Induktion
H	A / m	Magnetische Feldstärke
P	W / m	Leistungsübertragungskonstante
r	m	Radius, bzw. Abstand zum Leiter
F	-	Leistungsübertragungskonstante
ρ	kg / m^3	Dichte

N	-	Windungszahl
L	mm	Länge
σ	N / mm ²	Spannung
E	kN / mm ²	Elastizitätsmodul
ε	-; -	Dehnung; Emissionszahl
β	K ⁻¹	Kubischer Dehnungskoeffizient

Abkürzung	Erklärung
-----------	-----------

EP	Epoxidharz
FT	Fügeteil
HF	Hochfrequenz
IR	Infrarot
IGBT	Insulated Bipolar Transistor
KTL	Kathodische Tauchlackierung
MF	Mittelfrequenz
PUR	Polyurethan
PWM	Pulsweitenmodulation
c	Spezifische Wärmekapazität
WLP	Wärmeleitpaste
