

Vibrationsfügen thermoplastischer Verbindungselemente auf duromeren kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen

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

zur Erlangung der Würde

einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Jeanine Vluggen
aus: Heerlen, Niederlande

eingereicht am: 09.06.2016
mündliche Prüfung am: 19.10.2016

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Klaus Dilger
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Stefan Böhm

2016

Forschungsberichte des Instituts für Füge- und Schweißtechnik

Band 43

Jeanine Vluggen

**Vibrationsfügen thermoplastischer
Verbindungselemente auf duromeren
kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen**

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 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 978-3-8440-4926-8

ISSN 1614-4783

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 Doktorandin in der Abteilung technische Planung Verbindungsverfahren der BMW AG in München in Zusammenarbeit mit dem Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger, dem Leiter des ifs, danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen sowie die vielen wertvollen und fördernden Hinweise während dieser Zeit. Für die Übernahme des Koreferats und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit möchte ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Böhm bedanken.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Sascha Nagel, der mit fachlichem Input, kreativen Skizzen sowie großem Engagement bei der Betreuung entscheidend zu dieser Arbeit beigetragen hat. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts und der BMW AG bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere Paulina, Alex, Christoph und Toni haben mit Ihren Abschlussarbeiten einen wesentlichen Teil der Ergebnisse mitgestaltet.

Aus tiefstem Herzen danke ich meinen Eltern, dass sie es mir ermöglicht haben „immer weiter“ zu machen. Meinen Freund Jonathan danke ich für den bedingungslosen Rückhalt und dafür, dass er mich immer motiviert hat einen Schritt weiterzugehen.

München, November 2016

Jeanine Vluggen

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung und Technik	2
2.1 Fügen von punktuellen Verbindungselementen an duromeres CFK.....	2
2.1.1 Übersicht der Fügekonzepte.....	2
2.1.2 Fügetechnologien für Onsert-Konzepte.....	4
2.2 Vibrationsfügen von Duromeren mit Thermoplasten.....	6
2.2.1 Prozess des Vibrationsfügens.....	6
2.2.2 Thermische Belastung des duromeren CFK durch den Fügeprozess.....	8
2.2.3 Untersuchungen zu Prozessparametern.....	10
2.2.4 Untersuchungen zu Materialparametern.....	14
2.2.5 Wirkprinzip des Vibrationsfügens.....	15
2.2.6 Zusammenfassung und Abgrenzung.....	16
3 Motivation und Struktur der Arbeit	18
3.1 Motivation.....	18
3.2 Struktur der Arbeit.....	19
4 Versuchsplanung und Werkstoffe	21
4.1 Methodische Vorgehensweise.....	21
4.2 Werkstoffe und Fügeteile.....	24
4.2.1 Duromeres CFK.....	24
4.2.2 Thermoplastisches GFK.....	26
4.3 Versuchsaufbau und -durchführung.....	27
4.3.1 Aufbau der Reibschweißanlage.....	27
4.3.2 Probenherstellung.....	29
4.3.3 Mechanische Charakterisierung.....	32
4.3.4 Werkstoffanalyse.....	35
4.3.5 Thermische Analyse.....	37
4.3.6 Analyse mit bildgebenden Verfahren.....	38
4.3.7 Umweltsimulation durch Vibrationsprüfung mit Temperaturüberlagerung.....	39

5	Wirkprinzip des Vibrationsfügens	41
5.1	Wirkprinzip und Adhäsion in der Grenzschicht.....	42
5.1.1	Modell zur Ausbildung der Adhäsion in der Grenzschicht.....	42
5.1.2	Bestimmung der Anteile spezifischer und mechanischer Adhäsion.....	43
5.1.3	Untersuchungen zur Verkrallung.....	47
5.1.4	Untersuchungen zur Penetration und Infiltrierung.....	51
5.1.5	Fraktographische Untersuchungen.....	57
5.2	Einfluss mechanischer und thermischer Prozessfaktoren auf die CFK-Kohäsion.....	62
6	Weiterentwicklung des Vibrationsfügens zu einer anwendbaren Fügetechnologie	68
6.1	Anforderungen und Randbedingungen.....	68
6.1.1	Anforderungen der Serienfertigung.....	68
6.1.2	Randbedingungen CFK-Werkstoff.....	70
6.2	Entwicklung und Gestaltung eines Verbindungselements.....	71
6.2.1	Verbindungseigenschaften bei Kopfzug- und Zugscherbelastungen.....	71
6.2.2	Systematische Entwicklung des Verbindungselements.....	73
6.2.3	Bewertung der Lösungsprinzipien für das Verbindungselement.....	79
6.3	Vergleich und Bewertung der unterschiedlichen Reibschweißbewegungen.....	81
6.3.1	Prozessgerechte Gestaltung des Verbindungselements.....	82
6.3.2	Bewertung des Einflusses von Reibschweißbewegung und Verbindungselement auf die Kopfzugfestigkeit.....	84
6.3.3	Bestimmung einer Kombination von Reibschweißbewegung und Verbindungselement für optimale Kopfzugfestigkeiten.....	88
6.4	Gestaltungsrichtlinien für das Vibrationsfügen.....	92
6.4.1	Reibschweißbewegung und Schmelzefluss.....	93
6.4.2	Reibgeschwindigkeit und -leistung.....	94
6.4.3	Drehzahl, Frequenz und Amplitude.....	96
6.4.4	Anfahrdruck.....	101
6.4.5	Haltedruck und -zeit.....	101
7	Bewertung der Anwendbarkeit des Vibrationsfügens	104
7.1	Herausforderungen für die Anwendbarkeit des Vibrationsfügens in der Serienfertigung am Beispiel der Fahrzeugmontage.....	104
7.1.1	Verbindungsfestigkeit unter prozessbedingter CFK-Biegung.....	104
7.1.2	Einfluss des Anziehdrehmoments auf die Verbindungsfestigkeit.....	110

7.2 Statische und dynamische Absicherungsuntersuchungen für den Einsatz des Vibrationsfügens in einem Fahrzeug	113
7.2.1 Statische Verbindungsfestigkeit	113
7.2.2 Umweltsimulation durch Vibrationsprüfung mit Temperaturüberlagerung	114
7.2.3 Einfluss des Vibrationsfügens auf die dynamische Festigkeit des CFK	115
7.3 Zusammenfassende Bewertung der Anwendbarkeit des Vibrationsfügens	117
8 Zusammenfassung und Ausblick	123
9 Literaturverzeichnis	125
10 Betreute Abschlussarbeiten	130

Abkürzungsverzeichnis

a	=	Hebelarm [mm]
a_0	=	Amplitude [mm]
C	=	Kohlenstoff
CFK	=	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
d	=	Durchmesser [mm]
DSC	=	dynamischen Differenzkalorimetrie
EP	=	Epoxid
f	=	Frequenz [Hz]
F	=	Kraft [N]
FVK	=	Faserverbundkunststoff
g	=	Gramm
GFK	=	Glasfaserverstärkter Kunststoff
h	=	Stunde
H&P	=	Hegewald & Peschke
kN	=	Kilonewton
M_b	=	Biegemoment [Nm]
Mikro-CT	=	Mikro Computertomographie
MPa	=	Megapascal
N	=	Newton
n_{plan}	=	Versuchsplan- / Faktorstufenkombinationen
n_w	=	Anzahl Wiederholungen
p	=	Fügedruck [MPa]
P	=	Leistung [W]
PA	=	Polyamid
PA6GF30	=	Polyamid 6 mit 30 Gew.-% Glasfaseranteil
PUR	=	Polyurethan
RE	=	Rückstreuelektronen
REM	=	Rasterelektronenmikroskop
RTM	=	Resin-Transfer-Moulding
r	=	Radius [mm]
s	=	Sekunde(n)
s	=	Stichprobenstandardabweichung

s^2	=	Stichprobenvarianz
SE	=	Sekundärelektronen
t	=	Zeit [s]
t_m	=	Materialstärke [mm]
T_g	=	Glasübergangstemperatur [°C]
TGA	=	thermogravimetrische Analyse
TTT	=	Time-Temperature-Transition
UD	=	Unidirektional
UP	=	Polyester
v	=	Geschwindigkeit [m/s]
W	=	Widerstandsmoment [mm ³]
W_R	=	Reibarbeit [J]
σ_b	=	Biegezugfestigkeit [MPa]
Δ	=	Effekt