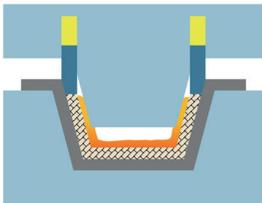


Experimentelle Untersuchung eines modifizierten Nasspressverfahrens für die Herstellung von hybriden Metall-Faserverbundkunststoff-Bauteilen

Hermann Opdemom

**Band
2019/35**



Experimentelle Untersuchung eines modifizierten Nasspressverfahrens für die Herstellung von hybriden Metall-Faserverbundkunststoff-Bauteilen

zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Wirt.-Ing. Hermann Klaus Opdemom
aus Emmerich am Rhein

Tag des Kolloquiums: 4. Dezember 2018
Referent: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger

Schriftenreihe Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen

Band 35/2019

Hermann Opdemom

**Experimentelle Untersuchung eines modifizierten
Nasspressverfahrens für die Herstellung von
hybriden Metall-Faserverbundkunststoff-Bauteilen**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2019

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6428-5

ISSN 2196-2200

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 Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur in der Abteilung Forschung & Entwicklung der BENTELER Automobiltechnik GmbH in Paderborn.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster, Leiter des Lehrstuhls für Leichtbau im Automobil (LiA) der Universität Paderborn, für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit und seine fachliche Unterstützung. Ein großer Teil meiner Motivation zur Erarbeitung dieses Forschungsthemas geht auf unsere wertvollen Diskussionen zu automobilen Leichtbauanwendungen und neuen FVK-Herstellungsmethoden zurück.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger, Leiter des Instituts für Füge- und Schweißtechnik (ifs) der Technischen Universität Braunschweig, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an meiner Arbeit bedanken. Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Tim Wibbeke von der Hochschule Hamm-Lippstadt für die gewinnbringenden Anregungen zu meiner Dissertation.

In einer Vielzahl von Projekten bei der BENTELER Automobiltechnik konnte ich fachlich und menschlich besonders viel von Herrn Rüdiger Erhardt, Herrn Volker Grienitz und Herrn Jörn Tölle lernen - ihnen gilt mein besonderer Dank. Frau Mechthild Wibbeke, Herrn Anatoli Enns, Herrn Jürgen Hildebrand und Herrn Stephan Steiner danke ich für ihre unermüdliche und oft sehr spontane Unterstützung. Mein Dank gilt ferner allen studentischen Mitarbeitern, von welchen ich besonders Herrn Marvin Bierkamp und Herrn Leo Leyboldt für ihren tatkräftigen Einsatz hervorheben möchte. Ich möchte mich außerdem bei Frau Caterina Linnig, Herrn Corin Reuter, Herrn Simon Pöhler und Herrn Zheng Wang vom LiA für die guten Kooperationen bedanken.

Ich danke meinen Söhnen Theodor und Titus, die mich stets an die wichtigen Dinge im Leben erinnern. Mein ganz persönlicher Dank gilt jedoch meiner Frau Lisa, die mich von Beginn an mit unendlicher Ausdauer, Verständnis und Zuneigung unterstützt.

Zusammenfassung

Das Nasspressverfahren ist ein Serienherstellungsprozess für Bauteile aus duroplastischen Faserverbundkunststoffen (FVK) mit einer geringen Geometriekomplexität. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein modifiziertes Nasspressverfahren untersucht, welches die Herstellung von hybriden Blech-FVK-Strukturen ermöglicht. Die stoffschlüssige Verbindung zwischen dem metallischen Trägerbauteil und einem lokalen FVK-Verstärkungselement wird durch Co-Bonding im Nasspresswerkzeug aufgebaut. Epoxidbasierte Matrixharze und Klebstoffe wurden mit Methoden der Klebtechnik sowie thermischen und rheometrischen Prüfungen charakterisiert, um ein materialspezifisches Fertigungsprozessfenster einzuzugrenzen. Experimentelle Untersuchungen zum Nasspressen von GFK-Laminaten und Stahl-GFK-Hybridstrukturen fokussierten die Mikrostruktur und das strukturelle Verhalten von stoffschlüssigen Hybridverbindungen. Unter anderem wurden Einflüsse von zeit-, temperatur- und druckabhängigen Fertigungsparametern sowie der Einsatz von Strukturklebstofffilmen und internen Trennmitteln analysiert. Anhand von Fallturmtests an hybriden Demonstratorkomponenten konnte das modifizierte Nasspressverfahren für die Herstellung crashrelevanter Karosseriebauteile qualifiziert werden.

Abstract

Wet compression moulding of fibre-reinforced polymers is a hot press technology for manufacturing simply shaped lightweight components in large volumes. This thesis investigates the potential of a modified wet compression moulding technique to produce hybrid metal-composite-components for safety-relevant body-in-white applications. Epoxy-based resins and adhesives were characterized regarding their structural, thermal and rheometric properties. Material and process influences on the laminate quality and the hybrid bond strength were studied on glass fibre reinforced polymers (GFRP) and hybrid steel-GFRP structures. Special attention was given to the use of structural adhesive films as an interface layer and the addition of an internal release agent to the resin. Drop tower tests on hybrid demonstrator components qualified the modified wet compression moulding technique for the production of crash-relevant automotive structures.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	2
1.2	Vorgehensweise	4
2	Erkenntnisstand von Wissenschaft und Technik	7
2.1	Faserverbundkunststoffe	7
2.1.1	Textile Verstärkungen	7
2.1.2	Matrixpolymere	9
2.1.3	FVK-Lamine und Leichtbauanwendungen	11
2.2	Hybridbauweisen	15
2.2.1	Allgemeine Betrachtung von Metall-FVK-Hybridstrukturen	17
2.2.2	Karosserieleichtbau mit Metall-FVK-Hybridbauteilen	19
2.3	Herstellung von FVK-Komponenten	23
2.3.1	Verarbeitung von duroplastischen Matrixharzen	24
2.3.2	Epoxidharze in der FVK-Fertigung	26
2.3.3	Resin Transfer Moulding	28
2.3.4	Prepreg-Verfahren	29
2.3.5	Nasspressverfahren	30
2.4	Herstellung von Metall-FVK-Hybridstrukturen	32
2.4.1	Fügen von FVK-Komponenten	32
2.4.2	Direkte Herstellungsverfahren für Metall-FVK-Hybridbauteile	34
3	Modifiziertes Nasspressverfahren für Metall-FVK-Hybridbauteile	41
3.1	Verfahrensbeschreibung	41
3.2	Werkstoffe	43
3.2.1	Textile Verstärkungsstruktur für nassgepresste Lamine	43
3.2.2	Harzsysteme für nassgepresste Lamine	45
3.2.3	Trennmittel	46
3.2.4	Klebstoffe und Klebstofffilme	47
3.2.5	Metallische Fügepartner	48
3.2.6	Prepreg	48

3.3	Experimentelle Vorrichtungen	49
3.3.1	Regelbare Hydraulik-Pressvorrichtung	49
3.3.2	Nasspresswerkzeug für Prüfplatten	50
3.3.3	Presswerkzeug für hybride Metall-FVK-Hutprofile	52
4	Untersuchung von Matrixharzen und Klebstoffen	55
4.1	Verbindungseigenschaften von Matrixharzen und Klebstoffen	55
4.1.1	Anforderungen an stoffschlüssige Metall-FVK-Verbindungen für crashrelevante Karosseriekomponenten	55
4.1.2	Mechanische Untersuchungsmethoden für hybride Metall- FVK-Verbunde	58
4.1.3	Prüfmethode zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Metall-Metall-Verklebungen	61
4.1.4	Ergebnisse der Zugscherprüfung von Metall-Metall- Klebstoffverbindungen	63
4.1.5	Prüfung des dynamischen Keil-Schlag-Widerstands	69
4.1.6	Diskussion der mechanischen Untersuchungen an Metall- Metall-Klebstoffverbindungen	73
4.2	Verarbeitungseigenschaften ausgewählter Polymersysteme	74
4.2.1	Untersuchung der thermischen Eigenschaften mittels dyna- mischer Differenzkalorimetrie	76
4.2.2	Rheometrische Untersuchung der Viskosität	79
4.2.3	Rheometrische Untersuchung der Gelzeit	81
4.3	Ableitung einer Verarbeitungsstrategie	85
5	Experimentelle Untersuchung des Nasspressverfahrens	89
5.1	Methoden zur Untersuchung des Nasspressverfahrens	89
5.1.1	Herstellung von Prüflaminaten im Nasspressverfahren	89
5.1.2	Porengehalt als Qualitätskriterium nassgepresster FVK- Lamine	91
5.1.3	Methode zur Quantifizierung des Porengehalts	93
5.2	Untersuchungen zum Einfluss des Fertigungsprozesses auf die Laminatqualität	95
5.2.1	Untersuchungen zur Vorverteilung des Matrixharzes	96
5.2.2	Untersuchung chemo-rheologischer und druckabhängiger Effekte beim Nasspressen	99

5.3 Untersuchungen zu den Verbindungseigenschaften von nassgepressten Stahl-GFK-Hybridlaminaten	104
5.3.1 Herstellung von Stahl-GFK-Hybridproben für die Verbindungsprüfung	104
5.3.2 Einfluss der Aushärtungsbedingungen auf Stahl-GFK-Hybridverbindungen	107
5.3.3 Einfluss der Grenzschicht auf Stahl-GFK-Hybridverbindungen	109
5.4 Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen an nassgepressten Hybridprüfplatten	113
6 Untersuchungen an hybriden Metall-FVK-Hutprofilen	115
6.1 Herstellung von hybriden Metall-FVK-Hutprofilen	115
6.2 Laminatuntersuchungen an hybriden Metall-FVK-Hutprofilen	118
6.3 Dynamische Biegeprüfung an hybriden Metall-FVK-Hutprofilen . . .	121
6.4 Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen an nassgepressten Hybridprofilen	126
7 Zusammenfassende Diskussion und Ausblick	129
7.1 Einflussfaktoren des Fertigungsprozesses und des Matrixharzes auf die Bauteilporosität im modifizierten Nasspressverfahren	129
7.2 Einsatz von Klebstofffilmen zum Co-Bonding eines hybriden Bauteils	131
7.3 Bewertung der untersuchten Werkzeug- und Prozesstechnik	133
7.4 Ausblick	136
8 Abkürzungen	139
9 Formelzeichen	141
10 Literatur	143