Qualifizierung des Injektionsklebprozesses einer strukturellen CFK-Stahl-Verbindung unter Montagebedingungen

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Dennis Schuler
aus Binghamton, New York, USA

Tag des Kolloquiums:	12. Juli 2016
Referent:	Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Paul Ludwig Geiß

Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik

Band 124

Gerson Meschut
Dennis Schuler

Qualifizierung des Injektionsklebprozesses einer strukturellen CFK-Stahl-Verbindung unter Montagebedingungen

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5117-9
ISSN 1434-6915

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

Erklärung

Teilergebnisse aus dieser Arbeit sind bisher nicht veröffentlicht.

Zusammenfassung

Leichtbau in der Automobilindustrie führt zur Konzeption völlig neuartiger Karosseriekonzepte, die zunehmend verschiedene Werkstoffe in der Karosseriestruktur vereinen. Die Herausforderung beim Verbinden artfremder Werkstoffe besteht in den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, welche sich insbesondere bei den in den Lacktrocknungsöfen vorherrschenden hohen Temperaturen von bis zu 190 °C kritisch auswirken. Mit dem Injektionskleben wird in der vorliegenden Arbeit ein neues Klebverfahren für strukturelle Mischbauverbindungen qualifiziert, wodurch die sogenannte Delta-Alpha-Problematik im Fertigungsprozess der Lackiererei umgangen werden kann.

Die Qualifizierung des Injektionsverfahrens erfolgt am Beispiel einer Verstärkung des Fahrzeugseitenrahmens mit einem Hohlprofil aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) im Bereich des Dachrahmenverlaufs. Der CFK-Dachrahmen wird im Karosserierohbau in der Karosseriestruktur zwischen dem inneren und äußeren Stahl-Seitenrahmen fixiert. Die klebtechnische Verbindung des CFK-Dachrahmens mit dem Stahl-Seitenrahmen erfolgt nach dem Lackierprozess im kalten, spannungsfreien Zustand der Karosserie durch Injektion eines zweikomponentigen Polyurethanklebstoffs (PU) in den vorgehaltenen Klebspalt.

Abstract

Lightweight design in the automotive industry leads to the development of entirely new body structure concepts which combine more and more differing materials in the body structure. The challenge of joining dissimilar materials consists in the different coefficients of thermal expansion, which make an impact especially in the paint shop oven processes with temperatures up to 190 °C. With the idea of injection glueing, in the current paper a new joining technique for structural mixed material joints is qualified and in doing so, the so-called delta-alpha-difficulty in the production process of the paint shop can be avoided.

The qualification of the injection method will be realized by using the example of a reinforcement of the steel roof frame with a hollow profile made of carbon-fibre-reinforced plastic (CFRP). The CFRP-roof frame is fixed between the inner and outer side frame of the car body in the body shop. The joining of the CFRP-reinforcement with the steel side frame will be realized after the paint process in the cold and stressless condition of the body by injecting a two-component polyurethane (PU) adhesive into the bonding gap.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Stand der Erkenntnisse 3

2.1 Klebtechnik 3

2.2 Haftungsmechanismen 4

2.3 Anwendungen der Klebtechnik in der Karosseriestruktur 5

2.4 Injektionskleben 7

2.5 Fertigungsbedingte Einflüsse auf PU-Klebverbindungen 9

2.5.1 Anlagentechnische Einflüsse 9

2.5.2 Prozesstechnische Einflüsse 10

2.6 Eigenschaften von Klebverbindungen 11

2.7 Werkstoffmechanische Beschreibung von Klebstoffen 14

2.8 Simulation von Klebverbindungen 15

3 Aufgabenstellung 18

4 Versuchsrandbedingungen 22

4.1 Versuchswerkstoffe 22

4.1.1 Stahl 22

4.1.2 Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff 22

4.1.3 Zweikomponentiger Polyurethanklebstoff 23

4.1.4 Schaumsysteme zur Abgrenzung des Klebspalts 24

4.2 Einrichtung zur Klebstoffverarbeitung 25

4.3 Ermittlung mechanischer Eigenschaften 26

4.3.1 Zugscherprüfung unter quasistatisch-zügiger Belastung 26

4.3.2 Kopfzug-Scherzug-Prüfung unter quasistatisch-zügiger Belastung 31

4.4 Ermittlung rheologischer Eigenschaften 32

4.5 Charakterisierung von Oberflächeneigenschaften 33

4.5.1 Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA) 33

4.5.2 Kontaktwinkelmessung 34

4.5.3 Massenspektrometrie 35

5 Entwicklung des Injektionsverfahrens 37

5.1 Charakterisierung des rheologischen Verhaltens des Klebstoffs 37
5.2 Untersuchung der Eignung des Klebstoffs für das Injektionsverfahren 38
5.3 Einfluss der Klebstoffinjektion auf den Klebstoffverarbeitungsprozess 41
5.4 Einfluss der Klebstoffinjektion auf die Verbindungsfestigkeit 44
6 Analyse von prozessspezifischen Einflussfaktoren 49
6.1 Einfluss der Abgrenzung des Klebspalts während der KTL-Vernetzung..... 50
6.2 Einfluss der KTL-Einbrandtemperatur..... 55
6.3 Validierung des Versuchsaufbaus 58
6.4 Entwicklung einer für das Injektionskleben geeigneten Konstruktion..... 61
6.4.1 Belüftung des Klebspalts während der KTL-Vernetzung 61
6.4.2 Materialverträglichkeit des Schaumsystems..... 65
7 Ermittlung der Klebschichtbelastung am Fahrzeugaufbau im kritischen Lastfall ..67
8 Charakterisierung der Klebstoff- und Verbindungseigenschaften 71
8.1 Charakterisierung der Klebstoffeigenschaften 71
8.2 Untersuchung der CFK-Stahl-Verbundeigenschaften..... 73
8.2.1 Belastung unter Scherzug 73
8.2.2 Belastung unter Kopfzug 80
8.2.3 Belastung unter Schrägzug 85
8.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse 89
8.3 Diskussion des Spannungsverlaufs in der Klebschicht..... 92
9 Festigkeitsbewertung 94
9.1 Bewertungsansatz 94
9.2 Simulationsumgebung und Simulationsmodell 94
9.3 Ableitung eines Versagenskriteriums..... 96
9.4 Simulationsergebnisse..... 99
9.5 Validierung der Festigkeitsberechnung..... 102
9.6 Sicherheitsnachweis der Festigkeitsberechnung 104
10 Hinweise zur konstruktiven Auslegung und prozesstechnischen Umsetzung 107
11 Zusammenfassung 110
12 Literaturverzeichnis 112
13 Verwendete Normen und Richtlinien.....118