MAHLE

MAHLE Doktorandenprogramm
Schriftenreihe

09

Stoffschlüssige Fügeverbindung mit thermischer Leitfähigkeit und elektrischer Isolierung

Ann-Kathrin Sommer

Stoffschlüssige Fügeverbindung mit thermischer Leitfähigkeit und elektrischer Isolierung

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

von der Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden

angenommene Dissertation

vorgelegt von
Ann-Kathrin Sommer M. Sc.
geboren am 30.01.1993 in Nürnberg

Tag der Einreichung: 08.09.2020
Tag der Verteidigung: 01.04.2021

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel
Prof. Dr.-Ing. habil. J. P. Bergmann
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Türpe

Schriftenreihe des MAHLE Doktorandenprogramms

Band 9

Ann-Kathrin Sommer

Stoffschlüssige Fügeverbindung mit thermischer Leitfähigkeit und elektrischer Isolierung

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2021

Dresdner Fügetechnische Berichte
Band 48/2021

Copyright Shaker Verlag 2021
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8045-2
ISSN 2195-4402

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorandin im Bereich Grundlagen Technologien und Prozesssimulation bei der MAHLE Behr GmbH & Co. KG in Stuttgart in den Jahren 2017 bis 2020.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel, Leiter der Professur für Fügetechnik und Montage der TU Dresden, für die Betreuung der Arbeit, die konstruktiven Diskussionen und die zahlreichen fachlichen Anregungen zu ganzheitlichen Betrachtungsweisen in der Fügetechnik.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. J. P. Bergmann, Leiter des Fachgebiets Fertigungstechnik der TU Ilmenau, danke ich für die wertvollen Hinweise und für die Bereitschaft zur Übernahme des Zweitgutachtens.

Mein besonderer Dank gebührt der MAHLE International GmbH und der MAHLE Behr GmbH & Co. KG und insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. M. Türpe für die fachliche Unterstützung, die gewährten Freiheiten bei der Anfertigung dieser Arbeit, die zahlreichen Diskussionen sowie die kritische Durchsicht des Manuskripts. Herrn Dr.-Ing. B. Grünenwald gilt mein Dank für seine Anregungen und fachlichen Ratschläge.

Weiterhin möchte ich mich herzlich bei meinen Kollegen der MAHLE Behr GmbH & Co. KG für die freundliche Aufnahme und gewährte Unterstützung bedanken. Mein Dank gilt auch allen Labormitarbeitern, die mich bei der Durchführung und Analyse der Versuche unterstützt haben.
Ferner möchte ich auch den Mitarbeitern der Professur für Fügetechnik und Montage für die Hilfsbereitschaft und die Geduld bei der Durchführung verschiedener Lötversuche und für die fachlichen Diskussionen danken.
Den Firmen Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH und Rybak + Hofmann rhv-Technik GmbH & Co. KG danke ich für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung.

Ein ganz großer und besonderer Dank gebührt meinen Eltern, meiner Schwester und meinem Freund für ihre Unterstützung, ihr Verständnis, ihre Geduld und die motivierenden und aufmunternden Worte während der Anfertigung dieser Arbeit.

Kurzfassung

Leistungshalbleiterbauelemente stellen eine zentrale Rolle bei der Umsetzung alternativer Antriebskonzepte und des autonomen Fahrens in der Automobilindustrie dar. Die gestiegene elektrische Performance der Leistungshalbleiterbauelemente und die zunehmende Substitution von Cu-Kühlkörpern durch vakuumgelötete Kühlkörper aus Al-Werkstoffen erfordern neue Fertigungskonzepte und thermisch belastbare, stoffschlüssige Fügeverbindungen mit funktionsbestimmenden physikalischen Eigenschaften.

Grundlage der Arbeit ist daher die Erarbeitung eines methodischen Ansatzes zur Realisierung einer stoffschlüssigen Fügeverbindung mit vorgegebenen physikalischen Eigenschaften sowie die Auswahl und Entwicklung dieser stoffschlüssigen Fügeverbindung. Die ganzheitliche Methodik berücksichtigt dabei den Einfluss und die Wechselwirkungen der Bezugsgrößen Werkstoff, Konstruktion und Fertigungsverfahren auf die thermische Leitfähigkeit und die elektrische Isolierung der stoffschlüssigen Fügeverbindung. Das resultierende Fertigungskonzept umfasst das stoffschlüssige Fügen von mit Halbleiterbauelementen bestückten DCB-Substraten über eine Cu-Zwischenschicht auf vakuumgelötete Kühlkörper aus Al-Werkstoffen. Den Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen bildet die Herstellung einer stoffschlüssigen Fügeverbindung zwischen der Cu-Zwischenschicht und dem Aluminiumkühlkörper. Die Herausforderungen liegen insbesondere in der Ausbildung einer flächig stoffschlüssigen Fügeverbindung sowie in der Vermeidung eines verstärkten Wachstums von intermetallischen Phasen in der Fügezone. In einem ersten Schritt wird das Fügen von Al-Legierungen mit Kupfer in einem Ofenlötprozess unter Vakuum betrachtet. Der Einfluss der Aluminiumoxidschicht sowie von Prozessparametern und Lotwerkstoff auf die Ausbildung einer stoffschlüssigen Fügeverbindung werden nachgewiesen. Dabei werden die Grenzen von thermischen Fügeverfahren für stoffschlüssige Al-Cu-Mischverbindungen aufgezeigt. Die Mechanismen, die diese Grenzen definieren, sind ausführlich erläutert. Eine alternative Möglichkeit zur Erzeugung einer Al-Cu-Mischverbindung bietet das thermische Spritzen. Die Arbeit legt dar, dass sich stoffschlüssige Fügeverbindungen nicht ausschließlich durch Fügeverfahren herstellen lassen. Es erfolgt eine Validierung der thermisch gespritzten Al-Cu-Mischverbindung unter Temperaturbelastung und eine Analyse des Verhaltens unter elektronischer Last.

Für die Anwendung der ganzheitlichen Methode im Automobilbau und die industrielle Herstellung einer stoffschlüssigen Fügeverbindung mit funktionsbestimmenden physikalischen Eigenschaften ist ein grundsätzlicher Leitfaden vorhanden. Bei zukünftigen Fertigungsaufgaben bedarf es jedoch einer Berücksichtigung der Betriebsbedingungen.

Abstract

Power electronic components are key elements in implementing alternative drive concepts and autonomous driving in the automotive industry. The increased electrical performance of power electronics and the substitution of copper heat sinks with vacuum brazed heat sinks made of aluminium require new manufacturing concepts and thermally stable joints with functional physical properties.

Therefore, the basis of the current work is the development of a method for realising an adhesive bond[1] with predetermined physical properties and the selection and the design of the adhesive bond itself. The holistic method considers the influence and the interactions of the parameters material, construction and manufacturing technology to the thermal conductivity and the electrical insulation of the adhesive bond. The resulting manufacturing concept consists of adhesive bonding of an assembled DCB substrate via a copper interlayer on a heat sink made of aluminium. The focus of the experimental investigations is on the realization of a metallurgical bond between the copper interlayer and the vacuum brazed aluminium heat sink. The challenges consist especially in the formation of a planar and metallurgical bond as well as the avoidance of a stronger growth of intermetallic phases in the joining zone.

In a first step, aluminium alloys and copper are joined by vacuum brazing. The influence of the aluminium oxide layer as well as process parameters and filler metal are proven. The limits of thermal joining technologies for Al-Cu mixed joints are shown. The mechanisms that define these limits are described in detail. Another possibility for generating Al-Cu mixed joints offers thermal spraying. This work states that adhesive bonds can not be produced exclusively by joining technologies. The behaviour of thermally sprayed Al-Cu mixed joints under temperature and electronic load is investigated.

For application the holistic method in automotive industry and manufacturing an adhesive bond with predetermined physical properties a fundamental guideline is now available. However, for future manufacturing assignments operating conditions must be taken into account.

[1] translation for the german word *stoffschlüssig*; use not in the sense of a joint by an adhesive

Inhaltsverzeichnis

Vorwort **I**

Kurzfassung **III**

Abstract **V**

Abkürzungsverzeichnis **XI**

Symbolverzeichnis **XIII**

1 Einleitung **1**

2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft **3**
2.1 Anforderungen an Fügeverbindungen für Hochvoltkomponenten 3
2.1.1 Wärmeleitfähigkeit 4
2.1.2 Elektrische Isolierung 6
2.2 Fügeverbindungen in der Aufbau- und Verbindungstechnik 8
2.2.1 Kraft- und formschlüssige Fügeverbindungen 9
2.2.2 Stoffschlüssige Fügeverbindungen 10
2.3 Stoffschlüssige thermische Fügeverbindungen von Aluminiumlegierungen . . 12
2.3.1 Stoffschlüssige Fügeverbindungen durch Vakuumhartlöten 13
2.3.2 Oberflächenaktivierung und Benetzungsverhalten der natürlichen Aluminiumoxidschicht 14
2.4 Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen 16
2.4.1 System Aluminium-Kupfer 17
2.4.2 Fügeverfahren für stoffschlüssige Fügeverbindungen 22

3 Präzisierung der Aufgabenstellung **27**

4 Ansatz zur Realisierung einer stoffschlüssigen Fügeverbindung mit thermischer Leitfähigkeit und elektrischer Isolierung **29**
4.1 Werkstoffauswahl auf Basis der physikalischen Gesetzmäßigkeiten 30
4.2 Konstruktive Anordnung 40
4.3 Fügestellenanalyse 41
4.4 Zusammenfassung der Methodik 48

5 Vakuumhartlöten von Aluminium und Kupfer **51**
5.1 Experimentelles Vorgehen 51
5.1.1 Versuchsplanung und Methodik 51
5.1.2 Versuchsmaterialien 51
5.1.3 Analyseschwerpunkte 53

5.1.4 Prozessparameter 54
5.1.5 Versuchsauswertung 57
5.2 Diffusionslöten 57
5.2.1 Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren auf die Fügeverbindungsbildung 57
5.2.2 Folgerungen aus den Untersuchungen zum Diffusionslöten 60
5.3 Schmelzlöten mit AlSi(Mg)-Lot 60
5.3.1 Bedeutung der Löttemperatur 61
5.3.2 Einfluss der Dicke der Lotplattierung 63
5.3.3 Bedeutung der chemischen Zusammensetzung der Lotplattierung . . . 65
5.3.4 Folgerungen aus den Versuchen zum Schmelzlöten mit AlSi(Mg)-Lot . 67
5.4 Schmelzlöten mit AlCuSi(Mg)-Lot 70
5.4.1 Auswahl der chemischen Zusammensetzung des Lots 70
5.4.2 Benetzungs- und Lötverhalten der AlCuSi-Lotfolie 73
5.4.3 Lötverhalten des thermisch gespritzten AlCuSi(Mg)-Lots 77
5.4.4 Folgerungen aus den Untersuchungen zum Schmelzlöten mit AlCuSi(Mg)-Lot 79
5.5 Hypothesen und Modellbildung zu den Vorgängen im Grenzvolumen 80
5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Vakuumhartlöten 85

6 Stoffschlüssige Fügeverbindungen mittels Additiver Fertigung 89
6.1 Stoffschlüssiges Fügen durch thermisches Spritzen 91
6.2 Experimentelles Vorgehen 92
6.2.1 Versuchsmaterialien 92
6.2.2 Analyseschwerpunkte 93
6.2.3 Prozessparameter 95
6.2.4 Versuchsauswertung 95
6.3 Thermisches Spritzen von Kupfer auf Aluminium 96
6.3.1 Untersuchung der thermischen Spritzbarkeit 96
6.3.2 Simulativer Ansatz zur Bestimmung des thermischen Verhaltens . . . 101
6.4 Ableitungen zum Einsatz des thermischen Spritzens für stoffschlüssige Fügeverbindungen 106

7 Stoffschlüssige Fügeverbindungen mit physikalischen Eigenschaften für Leistungselektronikanwendungen im Automobilbau 109

8 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick 115

Literaturverzeichnis 119

Abbildungsverzeichnis 131

Tabellenverzeichnis 135

Glossar **137**

A Zusatzinformationen Vakuumhartlöten von Aluminium und Kupfer **139**

B Liste der wissenschaftlichen Beiträge **143**