Zerstörungsfreie Prüfung von Fügeverbindungen mit Induktions-Puls-Phasen-Thermografie

Von der Fakultät für Maschinenbau

der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von:	Christian Šrajbr
aus (Geburtsort):	Aachen, Deutschland

eingereicht am:	16.05.2014
mündliche Prüfung am:	27.06.2014
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger
	Prof. Dr.-Ing. Stefan Böhm

2014

Forschungsberichte des Instituts für Füge- und Schweißtechnik

Band 34

Christian Šrajbr

Zerstörungsfreie Prüfung von Fügeverbindungen mit Induktions-Puls-Phasen-Thermografie

Shaker Verlag
Aachen 2014

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., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3023-5
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 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs) der Technischen Universität Braunschweig. Die dargestellten Ergebnisse wurden im Wesentlichen in drei öffentlich geförderten Forschungsprojekten erzielt: *„Einsatz der Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung von Clinchverbindungen“, „ZfP-Kleben - Zerstörungsfreie Prüfung geklebter Bauteile“* und *„AkThIndu - Optimierung der Induktionsthermografie zur zerstörungsfreien Prüfung von Fügeverbindungen“.* Diese wurden als Einzelprojekte von der Arbeitsgemeinschaft der industriellen Forschungsvereinigungen e. V. (AiF), der Bayerischen Forschungsstiftung bzw. als Kooperationsprojekt vom Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) gefördert. Den Forschungsträgern, mitwirkenden Instituten und Firmen sei an dieser Stelle gedankt.

Danken möchte ich zudem Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger, der diese Arbeit betreut hat sowie Prof. Dr.-Ing. Stefan Böhm, der neben der Entwicklung und Förderung des Themas der aktiven Thermografie an Fügeverbindungen auch als zweiter Gutachter zur Verfügung stand. Bei Prof. Dr. Joachim Rösler möchte ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanken.

Mein besonderer Dank gilt auch den Kollegen und Studenten, die Zuarbeit für die entstandene Arbeit geleistet haben. Besonders hervorheben möchte ich dabei Brigitte Wolfrum, die meine Vorstellungen bezüglich der Visualisierung der Inhalte in Prinzipskizzen wiederholt übertroffen hat sowie Cliff Boodeea, Hanno Schmidt, Josse Scheele und Rabi Lahdo. Letztere haben im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten bzw. als wissenschaftliche Hilfskräfte geholfen, das Thema weiterzuentwickeln sowie durch sorgfältig dokumentierte und erzeugte Ergebnisse einen nicht zu unterschätzenden Anteil an dieser Arbeit geleistet.

Auch die Kollegen, die nicht oder in geringem Maße direkt an der Arbeit mitgewirkt haben, sollen nicht unerwähnt bleiben. Viele von ihnen haben mich in fachlichen, aber auch fachfremden Diskussionen inhaltlich sowie menschlich weitergebracht. Ich werde durch euch meine Zeit am Institut immer in einer sehr positiven Erinnerung haben und bin sehr froh über die Freundschaften, die sich hieraus entwickelt haben.

Besonderer Dank gilt auch meiner Frau Astrid, die mich stets unterstützt und angetrieben hat. Danke dir für die Bereitschaft so viel gemeinsame Freizeit zu opfern und natürlich auch für dein unermüdliches Korrekturlesen. Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern sowie meinen treuen Freunden Ingo und Tobi die mich - wenn nötig - auf den Boden zurückgeholt oder zum Weitermachen ermutigt haben.

Kurzfassung

Der steigende Werkstoffmix moderner Fahrzeugstrukturen erfordert eine zunehmende Anzahl qualitäts- und sicherheitsrelevanter Fügeverbindungen. Hier sind neben einer Weiterentwicklung der Fügetechniken auch neue Ansätze zur Qualitätssicherung der Fügeprozesse gefragt. Die Induktionsthermografie bietet sich als Prüflösung für eine Qualitätsbewertung dieser Fertigungsverfahren im Produktionsumfeld an, da der für eine aktive Thermografie benötigte lokale thermische Input in metallische Fügepartner mit einem hohen Wirkungsgrad eingebracht werden kann und eine gleichzeitig berührungslose Wirkungsweise vorliegt.

Jedoch müssen für die erfolgreiche Umsetzbarkeit einer Prüfung grundlegende Erkenntnisse zur komplexen Wechselwirkung der Induktionsanregung mit dem Prüfbereich und zur Fehlerdetektion auf Grundlage der Interaktion des Wärmeflusses mit den Fehlstellen zur Verfügung stehen. In dem vorgestellten Ansatz werden diese Grundlagen auf Basis der Auswahl einer geeigneten Anlagentechnik – luftgekühlten Mittelfrequenz-Induktionsgeneratoren in Verbindung mit passiv gekühlten, gekapselten und einfach wechselbaren Induktoren – für beispielhaft ausgewählte Fügeverbindungen im Dünnblechbereich geschaffen. Es wird dabei eine Vorgehensweise zur Bestimmung optimierter Erwärmungsfelder vorgestellt, mit denen die jeweilige Fügeverbindung gezielt geprüft werden kann. Mit Blick auf die Umsetzbarkeit in automatisierten Fertigungsprozessen wird bei der Prüfung die Puls-Phasen-Technik verwendet, mit der Prüfzeiten niedrig gehalten und gleichzeitig präzise zu bewertende sowie störungsarme Phasenbilder erzeugt werden.

Die Möglichkeiten und Grenzen der Induktions-Puls-Phasen-Thermografie werden an Laserstrahlschweiß-, Kleb- und mechanischen Fügeverbindungen bestimmt. Die Ergebnisse belegen das Potenzial der Technik mit der Detektierbarkeit nahezu sämtlicher fertigungsrelevanter Fehlstellen der untersuchten Fügeverbindungen. Es können dabei sogar thermografisch ungünstige Dickschicht-Klebverbindungen sowie Fügeverbindungen von Aluminiumfügeteilen geprüft und darin vorhandene Fehlstellen detektiert werden. Einzig Fehlstellen ohne geometrische Änderungen gegenüber dem fehlerfeien Zustand, wie sie nur bei „Kissing Bonds“ von Klebverbindung gefunden werden konnten, können nicht detektiert werden. Es können mit dieser Prüftechnik des Weiteren komplexe Prüfprobleme gelöst werden, wenn die erarbeiteten weiterentwickelten Anordnungen von Induktor zu Prüfkörper und/oder Induktorgeometrien genutzt werden. Mit der berührungslosen gezielten, lokalen Wirkungsweise lässt sich die Induktionsthermografie so für eine Vielzahl von Prüffällen in automatisierte Online- und/oder Offline-Prüfeinrichtungen von Fügeprozessen integrieren.

Abstract

An increasing number of modern car body structures offer a differential design of different materials, requiring a multitude of quality and safety relevant joint connections. Thus a development of new joining techniques and also new quality control methods for joining processes is essential. Induction-excited thermography is a well suited technique to ensure the quality of the joints in a production line, because of their contactless mode of action and high efficiency in exciting the active thermography based on thermal input in metallic components.

But for a successful realization of this technique, basic knowledge of the complex interaction of the inductive excitation and the inspection area as well as understanding of the flaw detection depending on an interaction of the heat flow and the flaws is needed. In this approach the fundamentals were developed with a well-suited induction system, air-cooled medium frequency induction generators in addition to passively cooled, encapsulated and easily changeable induction coils. For the application of induction thermography at different joint connections in thin sheets a possibility of determining optimized heating regions at the specific joints in this these materials had to be found. For achievement the goal of implementation of this NDT method in automated production processes a robust and fast evaluation of the joints quality is needed. This is realized by employing the pulse-phase-method, which provides low measurement times and produces phase images that are insusceptible to disturbances and can be precisely evaluated.

The possibilities and limitations of the induction-pulse-phase-thermography are established at laser-beam-welded, adhesive and mechanical joints. The results of these experiments are evidence for the high potential of this technique by detecting almost every production-relevant flaw at the examined joint types. Even joints with poor thermographic characteristics, as in semi-structural bonds with high material thicknesses and in the joining of aluminum sheets can be inspected and hidden defects be detected. Only flaw types without local or global changes of geometric characteristics in the joint are not detectable. But this kind of flaw was only found in “kissing” bonds of adhesive joints. Induction thermography can furthermore be applied in complex inspection situations. Therefore enhanced arrangements from inductor to the inspected area of the components and/or specially adapted inductors were designed and tested. Thus induction thermography is a locally and contactless acting inspection method that can be well employed for a multitude of test cases in automated online or offline test consoles in joining processes.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 1
2 Fehlstellen in Fügeverbindungen des Karosserieleichtbaus ... 4
2.1 Klebverbindungen ... 4
2.2 Mechanische Fügeverbindungen ... 7
2.2.1 Clinchverbindungen ... 8
2.2.2 Halbhohlstanznietverbindungen ... 10
2.3 Laserstrahlschweißverbindungen ... 11
2.4 Ableitung von Anforderungen an die Prüfung der Fügeverbindungen ... 14
3 Stand der Technik der Qualitätssicherung von Fügeverbindungen ... 16
3.1 Zerstörende Prüfverfahren ... 16
3.2 Manuelle zerstörungsfreie Prüfmethoden ... 17
3.3 Prozesskontrollen ... 18
3.4 Ultraschallprüfverfahren ... 20
3.5 Möglichkeiten und Grenzen herkömmlicher Prüfverfahren ... 21
4 Thermische Verfahren zur Prüfung von Fügeverbindungen ... 23
4.1 Passive Thermografie ... 23
4.2 Aktive Thermografie ... 24
4.2.1 Anregungskonzepte ... 25
4.2.2 Prüfung von Fügeverbindungen ... 26
4.3 Möglichkeiten und Grenzen thermografischer Verfahren ... 27
5 Grundlagen der Prüfung mit Induktions-Puls-Phasen-Thermografie ... 30
5.1 Wärmeflussthermografie an Fügeverbindungen ... 31
5.1.1 Instationäre Wärmeleitung ... 31
5.1.2 Wärmeleitung an Grenzflächen ... 32
5.1.3 Wechselwirkung des Wärmeflusses mit Fehlstellen von Fügeverbindungen ... 34
5.2 Induktionsanregung ... 38
5.2.1 Erwärmung aufgrund Wirbelstromverlusten ... 39
5.2.2 Einfluss von elektromagnetischen Größen und Materialeigenschaften 40
5.2.3 Einwirkbereich der Erwärmung ... 42
5.2.4 Geometrie des Prüfkörpers ... 44
5.3 Puls-Phasen-Auswertung ... 44
5.3.1 Funktionsprinzip [MAL01] ... 45
5.3.2 Tiefenauflösung in Abhängigkeit des Phasenwinkels ... 46
5.3.3 Einflussfaktoren auf die Ergebnisse der Puls-Phasen-Thermografie ... 47
6 Forschungsansatz und methodisches Vorgehen ... 51
7 Experimenteller Aufbau zur Prüfung von Fügeverbindungen ... 53

7.1 Aufbau und Funktion des Prüfsystems ... 53
7.2 Systemanpassung für unterschiedliche Prüfrandbedingungen ... 55
7.2.1 Prüfung in Transmissionsanordnung ... 57
7.2.2 Prüfung in Reflektionsanordnung ... 59
7.2.3 Prüfung mittels lateraler Wärmeflüsse ... 60
7.2.4 Einfluss der Fügeteilwerkstoffe auf das Erwärmverhalten ... 64
8 Probenherstellung und Simulation der relevanten Fehlstellen ... 66
8.1 Klebverbindungen ... 67
8.1.1 Strukturelle Klebverbindungen ... 67
8.1.2 Bördelfalzklebverbindungen ... 69
8.1.3 Semistrukturelle Klebverbindungen ... 70
8.2 Mechanische Fügeverbindungen ... 71
8.2.1 Clinchverbindungen ... 72
8.2.2 Halbhohlstanznietverbindungen ... 73
8.3 Laserstrahlschweißverbindungen ... 75
9 Ergebnisse der thermografischen Prüfung ... 80
9.1 Bestimmung der Prüfparameter und Darstellung der Ergebnisse ... 80
9.2 Prüfung von Fügeverbindungen mit zweiseitiger Zugänglichkeit ... 83
9.2.1 Klebverbindungen ... 83
9.2.2 Mechanische Fügeverbindungen ... 92
9.2.3 Laserstrahlschweißverbindungen ... 102
9.3 Prüfung von Fügeverbindungen mit einseitiger Zugänglichkeit ... 106
9.3.1 Prüfung in Reflektionsanordnung ... 106
9.3.2 Prüfung mittels lateraler Wärmeflüsse ... 111
9.4 Möglichkeiten und Grenzen der Technik ... 120
9.4.1 Klebverbindungen ... 121
9.4.2 Mechanische Fügeverfahren ... 123
9.4.3 Schweißverbindungen ... 125
9.5 Perspektiven der industriellen Umsetzbarkeit ... 127
9.5.1 Automatisierte Offline-Prüfungen ... 129
9.5.2 Online-Prüfungen ... 131
10 Zusammenfassung ... 133
11 Literaturverzeichnis ... 136