

Analyse und Bewertung
der mechanisch-technologischen
Eigenschaften von geschweißten
Mischverbindungen aus Aluminium und Titan

Vom Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen
zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. / EWE Rainer Kocik

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch, Universität Bremen

Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler, Universität Rostock

Tag der mündlichen Prüfung: 06.08.2009

Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik
Bremen

Band 46

Rainer Kocik

**Analyse und Bewertung der mechanisch-
technologischen Eigenschaften von geschweißten
Mischverbindungen aus Aluminium und Titan**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2009

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.: Bremen, Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8467-1

ISSN 1437-7659

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 parallel zu meiner Tätigkeit als Fachteamleiter bei der Airbus Deutschland GmbH in Zusammenarbeit mit der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT) der Universität Bremen, der Technologiebroker Bremen GmbH, dem Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik (BIAS) und dem Institut für Werkstoffforschung des GKSS-Forschungszentrums in Geesthacht. Während dieser Zeit habe ich sehr viel Unterstützung von Freunden, Kollegen, Studenten und Projektpartnern erfahren, die zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch, Leiter der Stiftung Institut für Werkstofftechnik in Bremen, für die Begleitung dieser Arbeit. Seine angenehme Betreuung in jeder Phase der Arbeit und die gute Zusammenarbeit mit ihm und seinen Mitarbeitern haben dieser Arbeit maßgeblich zum Erfolg verholfen. Bedanken möchte ich mich zudem bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler, Lehrstuhl für Werkstofftechnik an der Universität Rostock, für die Übernahme des Korreferats.

Besonders erwähnen möchte ich Dr. Rainer Tinscher, der als Mitarbeiter des IWT die Kooperation zwischen Airbus und den Bremer Instituten maßgeblich gestaltet hat. Mit großem Engagement, interessanten Diskussionen und vielen Anregungen haben insbesondere Dr. Gerhard Tempus (Airbus Deutschland GmbH) und Dr. Waman Vaidya (Institut für Werkstoffforschung, GKSS-Forschungszentrum) die werkstoffkundliche Seite dieser Arbeit unterstützt.

Ferner sehe ich auf eine sehr angenehme Kooperation mit Marcin Grden, Dr. Harald Kohn, Dr. Michael Kreimeyer, Prof. Dr.-Ing. Frank Vollertsen und Bernd-Martin Wischhusen vom BIAS, Dr. André Irrethier, Jens Schumacher und Olaf Stelling vom IWT, Manfred Horstmann und Dr. Mustafa Koçak vom Institut für Werkstoffforschung des GKSS-Forschungszentrums zurück.

Danken möchte insbesondere Andrea für viel Geduld und Motivation, Franziska für die Freude, die sie uns schenkt, und meinen Eltern, die den Grundstein für diese Arbeit gelegt haben.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	4
2.1 Der Begriff des „Multi-Material-Design“	4
2.2 Thermisches Fügen von Mischverbindungen	5
2.2.1 Schweißverbindungen	7
2.2.2 Lötverbindungen	9
2.2.3 Fügen durch „kombiniertes Schweißen und Löten“	11
2.3 Schweißen oder Löten? – Begriffsdefinitionen	20
2.4 Phasensaumbildung und Diffusionsvorgänge	22
3 Forschungsbedarf, Zielsetzungen und Vorgehensweise	30
4 Werkstoff- und Prozessbeschreibung	34
4.1 Grundwerkstoffe	34
4.1.1 Beschreibung des Werkstoffs TiAl6V4	34
4.1.2 Beschreibung des Werkstoffs EN AW-6056	36
4.1.3 Probenvorbereitung und Wärmenachbehandlung	40
4.2 Laserstrahlfügen von Titan und Aluminium	42
4.2.1 Versuchsaufbau	42
4.2.2 Prozessbeobachtung und Prozessüberwachung	45
4.2.3 Bestimmung des Temperaturfeldes	47
4.2.3.1 Thermoelementmessungen	47
4.2.3.2 Thermographie	50
4.2.4 Voruntersuchungen	51
4.2.4.1 Betrachtungen zum intermetallischen Phasensaum	51
4.2.4.2 Einfluss der Streckenenergie auf die Phasensaumdicke und Nahtgeometrie	53
4.3 Beschreibung des Werkstoffs EN AW-6056 in geschweißtem Zustand	55
4.3.1 Schweißen im Zustand T6	56
4.3.2 Schweißen im Zustand T4 mit anschließender Warmauslagerung	58

5 Simulation des Laserstrahlfügeprozesses	60
5.1 Randbedingungen und Vereinfachungen	60
5.2 Korrelation des FEM-simulierten Temperaturfeldes mit Thermoelementmessungen	63
5.3 Verzug und Eigenspannungen	66
5.3.1 Verzug und Biegevorspannung	66
5.3.2 Verzugs- und Eigenspannungssimulation	67
5.3.3 Einfluss der Umgebungstemperatur auf Verzug und Eigenspannungen	69
6 Untersuchung der Fügeverbindung bei quasistatischer Belastung	73
6.1 Voruntersuchungen	73
6.1.1 Festlegung des Probenentnahmebereichs	73
6.1.2 Berücksichtigung der Kaltauslagerung des Aluminiumwerkstoffs	75
6.1.3 Härteprüfungen und Zugversuche zur Beschreibung lokaler Eigenschaftsänderungen in Schweißnaht und WEZ	77
6.1.4 Temperatur-Zeit-Verlauf zur Beschreibung der Gefügebereiche von Schweißnaht und WEZ	81
6.1.5 Deformationsanalyse	83
6.2 Untersuchung der Fügeverbindung bei quasistatischer Zugbelastung	84
6.2.1 Einfluss der Prozessfolge	85
6.2.2 Einfluss der Nahtüberwölbung	85
6.2.3 Einfluss von Porosität	86
6.2.4 Einfluss der Streckenenergie	87
6.3 Zusammenfassung der Untersuchungen bei quasistatischer Belastung	88
7 Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten bei Zug-Schwell- Beanspruchung	90
7.1 Untersuchung der ortsabhängigen Ermüdungsfestigkeit	91
7.2 Einfluss der Prozessfolge	93
7.3 Einfluss der Nahtüberwölbung	94
7.4 Einfluss von Fehlstellen und Formänderungen	95
7.4.1 Oberflächenfehler	95
7.4.2 Verzug	97
7.4.3 Porosität	98
7.5 Zusammenfassung der Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit bei Zug- Schwell-Beanspruchung	99

8 Schadenstoleranz-Verhalten	101
8.1 Versuchsprogramm	104
8.2 Probenvorbereitung	105
8.3 Beschreibung des Rissfortschrittsverhaltens	106
8.3.1 Versuchsdurchführung.....	106
8.3.2 Rissfortschrittseigenschaften der Grundwerkstoffe	107
8.3.3 Rissfortschrittseigenschaften von Schweißnaht und WEZ.....	109
8.3.3.1 Rissausbreitung parallel zur Schweißnaht.....	111
8.3.3.2 Rissausbreitung senkrecht zur Schweißnaht.....	114
8.3.3.3 Einfluss von Porosität auf das Rissfortschrittsverhalten	117
8.3.3.4 Optimierung des Rissfortschrittsverhaltens	118
8.4 Untersuchung von Risszähigkeit und Restfestigkeit	120
8.5 Zusammenfassung der Untersuchungen zur Schadenstoleranz	122
9 Zusammenfassung und Ausblick	124
10 Anhang	127
10.1 Literaturverzeichnis.....	127
10.2 Standards und Spezifikationen	141