

Flußmittelfreies Fügen von schwer benetzbaren Oberflächen

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur
Frank Hillen

aus

Mainz

Berichter: Univ.-Prof. Dr. techn. Prof. h.c. (RC) Erich Lugscheider
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Klocke

Tag der mündlichen Prüfung: 2. Juli 2001

„D 82 (Diss. RWTH Aachen)“

Werkstoffwissenschaftliche Schriftenreihe

Band 47

Frank Hillen

**Flußmittelfreies Fügen von
schwer benetzbaren Oberflächen**

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Hillen, Frank:

Flußmittelfreies Fügen von schwer benetzbaren Oberflächen / Frank Hillen.

Aachen : Shaker, 2001

(Werkstoffwissenschaftliche Schriftenreihe ; Bd. 47)

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2001

ISBN 3-8265-9507-6

Copyright Shaker Verlag 2001

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9507-6

ISSN 1437-8450

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand parallel zu meiner Tätigkeit als Leiter des Bereiches „Löttechnik“ bei der Firma Euromat GmbH in Heinsberg.

Herrn Univ.-Prof. Dr. techn. E. Lugscheider danke ich für die Stellung des Themas, sein großes Interesse am Fortgang der Arbeit und nicht zuletzt für die Unterstützung bei der Durchführung von Versuchen am Lehr- und Forschungsgebiet Werkstoffwissenschaften der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. F. Klocke für die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Prof. Dr. R. Poprawe M.A. für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Herrn Dr. I. J. Rass, Geschäftsführer der Firma Euromat GmbH, sei für die Freiräume gedankt, die er mir zur Erstellung dieser Arbeit eingeräumt hat.

Mein besonderer Dank richtet sich ferner an Herrn Dr. M. H. Biglari von Mat-Tech (NL), zuvor Witmetaal (NL), für die Durchführung von elektronenmikroskopischen Untersuchungen und die Bereitstellung von Versuchsmaterialien sowie die zahlreichen fachlichen Diskussionen, die der Arbeit zusätzliche Impulse geben konnten. In diesem Sinne sei auch Herrn M.A. Oud von Coining Corporation of America (USA), zuvor Witmetaal (NL), gedankt. Für die Unterstützung bei der Durchführung weiterer elektronenmikroskopischer Untersuchungen sei Herrn Prof. Dr. H. Dören von der Fachhochschule Aachen und Herrn Dr. Karduck vom Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskopie von der RWTH Aachen gedankt.

Ferner danke ich allen Mitarbeitern der Firma Euromat GmbH, speziell der Abteilung „Löttechnik“, die mich bei der Durchführung der Versuche unterstützt haben. Für ihren persönlichen Einsatz danke ich meinem Mitarbeiter Herrn F. Kiendl, sowie meinen Diplomarbeitern Herrn G. Philipsen und Herrn C. Lehne, und meinem ehemaligen Mitarbeiter Herrn G. Harsch.

Insbesondere meiner Frau Lesa-Anne möchte ich danken, die durch ihr liebevolles Verständnis und ihren großen Rückhalt während arbeitsintensiver Phasen bei der Erstellung sehr wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat. Meinen Eltern möchte ich danken, daß sie mir mein Studium ermöglicht haben.

Kurzfassung

Steigende Anforderungen an neu entwickelte Bauteilkomponenten setzten unter dem Gesichtspunkt der Werkstoffauswahl in vielen Fällen einen hybriden Aufbau voraus, da das Eigenschaftsprofil eines einzelnen Werkstoffes die komplexen Randbedingungen der gesamten Struktur nur unzureichend erfüllt. Neben den Stählen gehören Aluminium- und Kupferwerkstoffe zu den wichtigsten metallischen Konstruktionswerkstoffen. Eine Schlüsselfunktion zur erfolgreichen Umsetzung derartiger Werkstoffkonzepte ist die Bereitstellung einer adäquaten Füge-technik, wobei das Löten ein sehr flexibles Verbindungsverfahren ist. Die individuelle Werkstoffcharakteristik der angeführten Konstruktionswerkstoffe bedingt, daß einer der beiden Fügepartner zuvor metallisiert wird bzw. durch eine Plattierung modifiziert wird, damit die Verbindung zwischen artgleichen Werkstoffen mit konventionellen Lötverfahren erfolgen kann.

Gegenstand der dargestellten Untersuchungen ist die Entwicklung von Weichlotlegierungen und eines flußmittelfreien Lötprozesses, der das direkte Benetzen der Eisenwerkstoffe S235JR und X5CrNi18-10 sowie der Nichteisenmetalle AlMg3 und SF-Cu ermöglicht. Zur Zerstörung oxidischer Deckschichten auf den Grundwerkstoffen und der flüssigen Lot-schmelze wurden alternativ ultraschallunterstützte und mechanisierte Reiblötvverfahren eingesetzt. Aufbauend auf theoretischen Betrachtungen, die neben einer Literaturlauswertung zu bleifreien Weichloten, der theoretischen Legierungskonzeption durch Auswertung binärer und ternärer Phasendiagramme auch eine Abschätzung des Oxidationsverhaltens einzelner Lot- und Grundwerkstoffbestandteile einschließt, wurden 41 Sn-Basislote und 27 Zn-Basislote hergestellt. Vor der Durchführung von Benetzungs- und Lötversuchen, wurden der Schmelzbe-reich der neuen Lotlegierungen mittels DTA bestimmt, Mikrohärtigkeit der Lotmatrix und lotinhärenter Hartphasen ermittelt, sowie relevante physikalische Eigenschaften, das Oxidationsverhalten und die Mikrostruktur ausgewählter Lotlegierungen analysiert.

Zur mechanischen Qualifizierung der Lötverbindungen wurden artgleiche Lötverbindungen hergestellt, die mittels Scher- und Zugversuchen bei RT und erhöhten Prüftemperaturen untersucht wurden. An Hand ausgewählter Lotwerkstoffe wurde die Reaktionskinetik der Reaktionsschichten zwischen Lot- und Grundwerkstoff beurteilt. Der Fügezonenaufbau gelöteter Werkstoffverbunde wurde abschließend in mechanischer (Nanoindentation) und metallurgi-scher Hinsicht (REM) bewertet.

Abstract

Increasing demands on newly developed components require, with regard to material selection, very often hybrid designs, since the property profile of an individual material is not sufficient to meet the complex conditions of the complete structure. In addition to steel, Aluminum and copper materials are the most common used design materials. A key function to realize that kind of material concept, is to provide an adequate joining technique, whereas soldering is considered to be the most flexible joining method. The specific material characteristic of said design materials requires that one of the materials to be joined be metalized or modified by plating, so that joints can be made by means of conventional soldering processes.

Subject of the investigations in hand is the development of soft solders and a fluxless solder process, which allow direct wetting of the iron materials S235JR and X5CrNi18-10, as well as the non-iron metals AlMg3 and SF-Cu. Alternatively ultrasound supported and automated friction solder processes have been used, to destroy oxide top layers on parent materials and on the solder melt. Based on theoretical examinations, which included a literature evaluation of lead-free soft solders, as well as the theoretical alloy design by interpreting binary and ternary phase diagrams, and evaluation of the oxidation behavior of individual solder and base material constituents, 41 tin-based and 27 zinc-based solders were alloyed. Before performing wetting and soldering tests, the melting range of the new solders were determined by DTA, the micro-hardness of the solder matrix and solder inherent hard phases were measured and the oxidation behavior and the microstructure of selected solder alloys were analyzed.

To qualify solder joints in a mechanical manner, similar solder joints were made and subjected to shear and tensile tests at room and elevated temperatures. Reaction kinetics of reaction layers between solder and base material were evaluated for selected solder alloys. Finally the structure of soldered joints were analyzed with regard to mechanical (nano-indentation) and metallurgical (REM) performance.

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Entwicklungstendenzen bei der Weichlotkonzeption	4
3	Grundwerkstoffe	14
3.1	Nichteisenmetalle	14
3.1.1	Aluminiumlegierung AlMg3 (3.3535)	14
3.1.1.1	Metallurgische Grundlagen des Systems AlMg3	14
3.1.1.2	Eigenschaften von AlMg3	16
3.1.2	Kupferwerkstoff SF-Cu (2.0090)	18
3.1.2.1	Eigenschaften von SF-Cu	19
3.2	Eisenwerkstoffe	23
3.2.1	Allgemeiner Baustahl S235JR (1.0037)	23
3.2.2	CrNi-Stahl X5CrNi18-10 (1.4301)	26
4	Lotwerkstoffe	30
4.1	Qualifikation von Lotlegierungsbestandteilen	30
4.2	Konstitutionsbetrachtungen	35
4.2.1	Gruppe I: Basiselemente Sn und Zn	35
4.2.2	Gruppe II: Ag, Cu, Pd, In, Sb, Zn, Al	36
4.2.3	Gruppe III: Ti, Nb, Hf, Ta, V	47
4.2.4	Gruppe IV: Ce	50
4.2.5	Gruppe V: Ga	53
4.2.6	Gruppe VI: Cr, Ni, Co, Mn, Si	54

5	Phänomenologische Aspekte des Lötens	56
5.1	Physikalisch-chemische Vorgänge beim Löten	56
5.2	Metalloxydation	60
5.2.1	Phänomenologie und Kinetik der Metalloxydation	61
5.2.2	Thermodynamik der Oxidbildung	65
6	Verfahrenstechnische Grundlagen	74
6.1	Induktive Erwärmung	74
6.2	Methoden zur Entfernung oxidischer Deckschichten	76
7	Versuchsmethodik und Analytik	83
7.1	Systematik der Werkstoff- und Verfahrensentwicklung	83
7.2	Lötverfahren - Versuchsaufbau und -durchführung	86
7.3	Lotherstellung	90
7.3.1	Lichtbogenofen	91
7.3.2	Induktionsschmelzriegel	91
7.4	Methoden der Werkstoffcharakterisierung	92
7.4.1	Loteigenschaften	92
7.4.1.1	Differenz-Thermo-Analyse (DTA)	92
7.4.1.2	Thermogravimetrie	93
7.4.1.3	Dilatometrische Messungen	93
7.4.1.4	Impulserregungsverfahren	94
7.4.2	Struktur- und Gefügeanalyse	95
7.4.2.1	Rasterelektronenmikroskopie (REM)	95
7.4.2.2	Elektronenstrahlmikroanalyse (ESMA)	96
7.4.2.3	Röntgendiffraktometrie	96
7.4.2.4	Mikrohärtemessungen	97
7.4.2.5	Nanoindentation	97
7.4.3	Festigkeitsuntersuchungen	97

8	Charakterisierung der Lotwerkstoffe	99
8.1	Metallurgische Aspekte	99
8.2	Loteigenschaften	105
8.2.1	Schmelzverhalten und Mikrohärt	105
8.2.1.1	Sn-Basislote	106
8.2.1.2	Zn-Basislote	112
8.2.2	Physikalische Eigenschaften	117
8.3	Auswertung thermogravimetrischer Messungen	118
8.4	Zusammenfassende Betrachtungen	130
9	Charakterisierung der Lötverbindungen	132
9.1	Mechanisch-technologische Charakterisierung	132
9.1.1	Sn-Basislote	133
9.1.1.1	Scher- und Zugfestigkeit	133
9.1.1.2	Hochtemperaturfestigkeit	140
9.1.1.3	Wachstumskinetik von Reaktionsschichten	142
9.1.2	Zn-Basislote	146
9.1.2.1	Scher- und Zugfestigkeit	147
9.1.2.2	Wachstumskinetik von Reaktionsschichten	151
9.2	Metallurgische Analyse	155
9.2.1	Sn-Basislote	156
9.2.1.1	AlMg3 - SF-Cu - Lötverbindungen	156
9.2.1.2	AlMg3 - Stahl - Lötverbindungen	159
9.2.2	Zn-Basislote	165
9.2.2.1	AlMg3 - SF-Cu - Lötverbindungen	166
9.2.2.2	AlMg3 - Stahl - Lötverbindungen	170
9.3	Zusammenfassende Betrachtungen	177
10	Zusammenfassung	179
11	Literatur	182