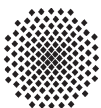
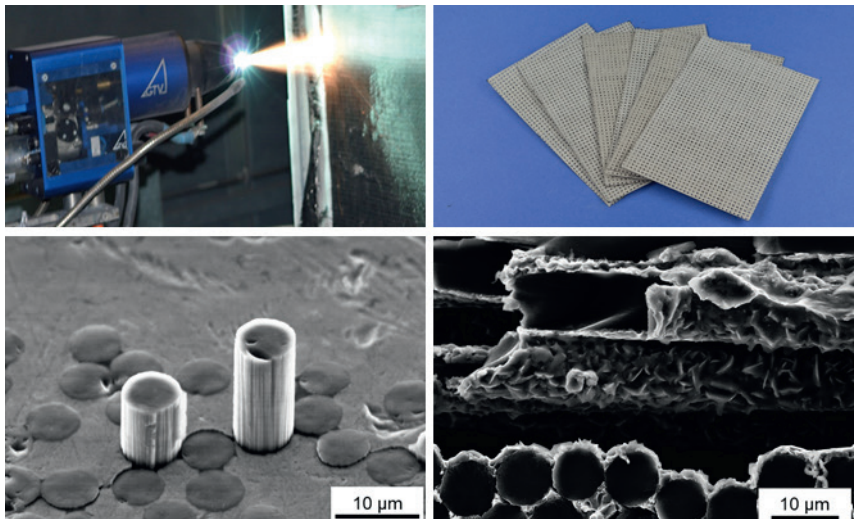


Miguel Jiménez Martínez

***Faserverstärkte Leichtmetalle mit
gezielter Grenzflächeneinstellung
durch C-Faserbeschichtungen
aus der Flüssigphase***



Faserverstärkte Leichtmetalle mit gezielter Grenzflächeneinstellung durch C-Faserbeschichtungen aus der Flüssigphase

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte
Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Miguel Jiménez Martínez
aus Huércal-Overa (Spanien)

Hauptberichter: o. Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. mult. Rainer Gadow

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Wielage

Tag der mündlichen Prüfung: 14.01.2020

Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile - IFKB
der Universität Stuttgart

2020

Forschungsberichte des Instituts für
Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB)

Miguel Jiménez Martínez

**Faserverstärkte Leichtmetalle mit gezielter
Grenzflächeneinstellung durch C-Faser-
beschichtungen aus der Flüssigphase**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7254-9

ISSN 1610-4803

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB) der Universität Stuttgart entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn o. Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. mult. Rainer Gadow für die gebotene Möglichkeit der Durchführung meiner Dissertation, seine Unterstützung auf fachlicher und persönlicher Ebene sowie das mir stets entgegengebrachte Vertrauen. Darüber hinaus bedanke ich mich dafür, dass ich die Ergebnisse meiner Arbeit auf nationalen und internationalen Tagungen vorstellen konnte und die Möglichkeit hatte, mit anderen Forschungsgruppen zusammen zu arbeiten.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Wielage danke ich für das fachliche Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Herrn apl. Prof. Dr. rer. nat. Frank Kern danke ich für die wertvolle Unterstützung bei der Planung und Durchführung der SPS-Verdichtungsversuche.

Mein persönlicher Dank gilt allen Mitarbeitern des IFKB für die gute Zusammenarbeit. Besonderer Dank gilt Herrn M.Sc. Steffen Eßlinger, Herrn Dipl.-Ing. Matthias Blum, Herrn Dipl.-Ing. Septimiu Popa und Herrn Dr.-Ing. Venancio Martínez García für die Hilfsbereitschaft und das sehr angenehme Arbeitsklima.

Herrn Dr.-Ing. Patrick Weichand danke ich für seine Geduld und Hilfsbereitschaft, vor allem während meiner Einarbeitungszeit am Institut und die vielen konstruktiven Anregungen. Den ebenfalls ehemaligen Mitarbeitern des IFKB Herrn Dr.-Ing. Martin Wenzelburger, Herrn Dr.-Ing. Philipp Müller und Herrn Dr.-Ing. Ulrich Schmitt-Radloff möchte ich für den freundlichen Rückhalt danken.

Von ganzem Herzen möchte ich meiner Verlobten Eva danken, die mich in diesen Jahren bedingungslos unterstützt hat und viel Geduld bei der Anfertigung dieser Arbeit aufbringen musste. Besonderer Dank gilt auch meinen Eltern, die auf vieles verzichten mussten, um meine akademische Ausbildung zu ermöglichen. Meinem Bruder danke ich für seine stetige Unterstützung während meines Studiums.

Stuttgart, im Februar 2020

Miguel Jiménez Martínez

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen	III
Abkürzungen	V
Extended Abstract	VII
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung und Arbeitsplan	3
3 Grundlagen und Stand der Technik	5
3.1 Leichtbau und Leichtbauwerkstoffe	5
3.1.1 Leichtbaustrategien	5
3.1.2 Werkstoffauswahl für den Leichtbau – Fallstudie Rohbau	9
3.1.3 Aluminium und seine Legierungen	14
3.2 Grundlagen der Verbundwerkstoffe	23
3.2.1 Definition	23
3.2.2 Einteilung der Verbundwerkstoffe	24
3.2.3 Faserverstärkungen	29
3.3 Faserverstärkte Metalle	42
3.3.1 Einführung und Definition	42
3.3.2 Historische Entwicklung	44
3.3.3 Herstellungsverfahren für Metallmatrix-Verbundwerkstoffe	45
3.3.4 Anwendungen faser- und partikelverstärkter Leichtmetalle	60
3.4 Faser/Matrix-Grenzfläche	62
3.4.1 Grenzfläche faserverstärkter Keramiken	64
3.4.2 Grenzfläche faserverstärkter Metalle	66
3.4.3 Besonderheiten der C _f /Al-Grenzfläche	69
3.4.4 Faserbeschichtung für die Einstellung der C _f /Al-Grenzfläche	72
3.5 Formgebung im teilflüssigen Zustand	79
3.5.1 Einführung	79
3.5.2 Rheologiemessungen von Metallschmelzen im teilflüssigen Zustand	82
3.6 <i>Spark Plasma Sintering</i>	84
3.6.1 Grundlagen	84
3.6.2 FAST/SPS-Verfahren für die MMC-Herstellung	86
4 Prozess- und Fertigungsmesstechnik	89
4.1 Messtechnik zur thermischen Analyse	89
4.1.1 Differenz-Thermoanalyse (DTA)	89
4.1.2 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)	90
4.1.3 Thermogravimetrie (TG)	91
4.1.4 Infrarotthermografie	91
4.2 Messtechnik zur mechanischen Charakterisierung	92
4.2.1 Drei-Punkt-Biegeversuch	93
4.2.2 Einzelfilament-Zugversuch	94
4.2.3 E-Modul durch Impulsanregungs-Verfahren	96
4.2.4 Einzelfaser <i>Push-Out</i> Versuch	97
4.2.5 Bestimmung des Faservolumengehalts	99

4.3	Messtechnik zur Bestimmung der Schmelzeigenschaften von Legierungen	100
4.3.1	Temperaturabhängigkeit des Flüssigphasenanteils	100
4.3.2	Bestimmung der Solidus- und Liquidustemperatur	101
4.4	Mikroskopie	101
4.4.1	Auflichtmikroskopie	101
4.4.2	Rasterelektronenmikroskopie	102
4.5	Raman-Spektroskopie	102
5	Herstellung und Charakterisierung von faserverstärkten Leichtmetallen	104
5.1	Einleitung	104
5.2	Werkstoffauswahl und Charakterisierung der Ausgangsmaterialien	105
5.2.1	Matrixlegierungen	105
5.2.2	Faserverstärkung	111
5.2.3	Präkeramische Polymere	113
5.3	Faserbeschichtung	117
5.3.1	Voruntersuchungen mit C-Faservovings	117
5.3.2	Beschichtung von Gewebezuschnitten	123
5.4	Herstellung der thermokinetisch gespritzten Halbzeuge	130
5.4.1	Eingesetzte Anlagentechnik	130
5.4.2	Ergebnisse der thermographischen Analyse	133
5.4.3	Charakterisierung der gespritzten Halbzeuge	135
5.5	Verdichtungsversuche mittels hydraulischen Pressens	136
5.5.1	Eingesetzte Anlagentechnik und experimentelles Vorgehen	136
5.5.2	Untersuchungen zur Verdichtung	140
5.5.3	Untersuchungen zur Faserkonditionierung	153
5.6	Verdichtungsversuche mittels SPS-Pressens	164
5.6.1	Eingesetzte Anlagentechnik und experimentelles Vorgehen	164
5.6.2	Untersuchungen zur Verdichtung	168
5.6.3	Untersuchungen zur Faserkonditionierung	183
6	Diskussion der Ergebnisse	189
6.1	Faserbeschichtung	189
6.2	Herstellung der Halbzeuge mittels thermischen Spritzen	189
6.3	Mit hydraulischer Presse verdichtete MMC-Proben	190
6.3.1	Verdichtungsprozess	190
6.3.2	Faser/Matrix-Grenzfläche	191
6.4	Mit SPS-Presse verdichtete MMC-Proben	195
6.4.1	Verdichtungsprozess	195
6.4.2	Faser/Matrix-Grenzfläche	196
7	Zusammenfassung und Ausblick	199
7.1	Zusammenfassung	199
7.2	Ausblick	201
8	Literaturverzeichnis	203