

Beitrag zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften z-Pin-verstärkter
Faser-Kunststoff-Verbundlamine

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von

André Knopp, geb. am 12. Juli 1976 in Rostock

aus Rostock

Rostock, 06. Juni 2014

Dissertation Universität Rostock, 2015

Tag der Einreichung: 6. Juni 2014

Tag der öffentlichen Verteidigung: 27. April 2015

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Scharr

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik / Leichtbau

Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Universität Rostock

Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Paschen

Lehrstuhl für Meerestechnik

Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Universität Rostock

Dr.-Ing. Klaus Edelmann

Premium AEROTEC GmbH

Bremen

Berichte aus dem Leichtbau

André Knopp

**Beitrag zur Verbesserung der mechanischen
Eigenschaften z-Pin-verstärkter Faser-Kunststoff-
Verbundlamine**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Rostock, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3772-2

ISSN 2364-1371

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

Mein Dank gilt allen,
die zum erfolgreichen Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

– Danke für eure Unterstützung –

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Beeinflussung der Eigenschaften von FKV-Materialien	5
2.1	Beeinflussung durch Veränderung der Matrixeigenschaften	5
2.2	Beeinflussung durch Veränderung der Faserarchitektur	7
2.3	Charakterisierung des z-Pin-Verfahrens	8
2.3.1	Fertigungstechnologie	9
2.3.2	Mikrostrukturelle Veränderungen	12
2.3.3	Eigenschaften z-Pin-verstärkter Faserverbundkunststoffe	19
2.3.4	Feuchte- und Temperatureinfluss	30
2.4	Verbundoptimierung durch Grenzflächenbeeinflussung	35
2.4.1	Faser/Matrix-Grenzfläche	35
2.4.2	Entscheidende Bindungskräfte	37
2.4.3	Benetzbarkeit	39
2.4.4	Degradation im Grenzflächenbereich	41
2.4.5	Ansätze zur Verbesserung der Verbundeigenschaften	43
3	Problemstellung und Ziele	47
4	Materialien und Testmethoden	53
4.1	Charakterisierung der verwendeten Materialien	53
4.1.1	Prepregmaterial	53
4.1.2	Z-Pin-Verstärkung	54
4.1.3	Angewendete Oberflächenbehandlungen	58
4.2	Experimentelle Methoden	60
4.2.1	Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskop	60
4.2.2	Untersuchungen mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie	61
4.2.3	Untersuchungen zur Benetzbarkeit der z-Pin-Oberfläche durch indirekte Kontaktwinkelbestimmung	62
4.2.4	Ermittlung der Pin-Pullout-Eigenschaften	64
4.2.5	Bestimmung der bruchmechanischen Eigenschaften unter Mode I -Be- anspruchung	67

4.2.6	Ermittlung der Biegeeigenschaften	70
5	Darstellung und Auswertung der ermittelten Ergebnisse	75
5.1	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen der z-Pin-Oberfläche	75
5.1.1	Oberflächentopographie un behandelter z-Pins	75
5.1.2	Oberflächenstruktur der z-Pins nach Tieftemperaturbehandlung	76
5.1.3	Oberflächenstruktur der z-Pins nach Plasmabehandlung	77
5.2	Photoelektronenspektroskopie (XPS)	78
5.2.1	Unbehandelte z-Pins	78
5.2.2	Tieftemperatur-Oberflächenbehandlung	82
5.2.3	Plasmabehandlung	83
5.3	Kontaktwinkel und Oberflächenenergien	86
5.4	Pin-Pullout-Eigenschaften	87
5.5	Mode I DCB-Untersuchungen	90
5.6	Ergebnisse der Untersuchungen der Biegeproben	94
5.6.1	Dickenänderung aufgrund des z-Pinnings	94
5.6.2	Quellverhalten der Probenkörper unter Einlagerungsbedingungen	96
5.6.3	Resultierende Feuchtigkeitsaufnahme	97
5.6.4	Biegefestigkeit und E-Modul unverpinnter und z-Pin-verstärkter UD-Lamine	101
5.6.5	Biegefestigkeit in Abhängigkeit von den Einlagerungsbedingungen	105
5.6.6	Biege-E-Modul in Abhängigkeit von der Einlagerung in künstlichem Seewasser	107
5.6.7	Bruchverhalten unverpinnter und verpinnter UD-Lamine	110
6	Zusammenfassung und Ausblick	115
6.1	Zusammenfassung	115
6.2	Ausblick	119
	Literaturverzeichnis	121