



**Prozesskettenentwicklung zur
Produktion dreidimensional
geflechtener keramischer Strukturen
für Hochtemperaturanwendungen**

Martin Kolloch

**„Prozesskettenentwicklung zur Produktion dreidimensional geflochtener
keramischer Strukturen für Hochtemperaturanwendungen“**

**„Process Chain Development for the Production of Three-Dimensional
Braided Ceramic Structures for High-Temperature Applications“**

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

vorgelegt von

Martin Johann Kolloch

Berichter: Univ.-Prof. Prof. h.c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries (RWTH)
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler (TUM)

Tag der mündlichen Prüfung: 28. November 2022

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar

Textiltechnik/Textile Technology

herausgegeben von

Univ. Prof. Professor h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries

Martin Kolloch

**Prozesskettenentwicklung zur Produktion
dreidimensional geflochtener keramischer Strukturen
für Hochtemperaturanwendungen**

Shaker Verlag
Düren 2023

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8996-7

ISSN 1618-8152

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

Teile dieser Arbeit basieren auf den Ergebnissen der von mir betreuten studentischen Arbeiten. Eine bibliographische Auflistung befindet sich am Ende des Literaturverzeichnisses.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Beschäftigung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University. Ich bedanke mich bei meinem Doktorvater Herrn Professor Gries für die hervorragende Betreuung, für die fachliche Anleitung und die persönliche Unterstützung während meiner Zeit am Institut für Textiltechnik. Herrn Professor Drechsler und Herrn Professor Eckstein danke ich für den regen fachlichen Austausch, sowie für die Übernahme des Koreferats und des Vorsitzes im Promotionsverfahren.

Des Weiteren danke ich meinen Kollegen sowie den Studenten und studentischen Hilfskräften für die gemeinsame Zeit und die Zusammenarbeit. Darüber hinaus danke ich meinen Kollegen aus der Gruppe für geflochtene Faserverbundwerkstoffe, mit denen ich mich neuen und wissenschaftlich herausfordernden Themen stellen durfte. Ein besonderer Dank gilt allen externen Partnern und Mentoren, darunter Herrn Dr. Thomas Bäumer von der Firma 2C-Composites GmbH & Co. KG, Herrn Felix Schreiber von der ark Industrie AG sowie Herrn Carsten Kleine von der SILTEX Flecht- und Isoliertechnologie GmbH & Co KG für die intensive und gute Zusammenarbeit. Zuletzt danke ich meiner Familie, die mich auf meinem Weg stets unterstützt und mir den Rücken freigehalten hat.

Aachen, im November 2022

Martin Kolloch

Kurzfassung

Oxidkeramische Faserverbundwerkstoffe (engl.: Oxide-Fibre-Composites; OFC) sind aufgrund ihres quasi-duktilen Bruchverhaltens, der hohen Dauereinsatztemperatur sowie der chemischen und oxidativen Beständigkeit eine potenzielle Schlüsseltechnologie für zukünftige Anwendungen in Luftfahrt und Energietechnik. Die inhärente Schwäche von OFC, durch die der Einsatz eingeschränkt wird, ist die hohe Scheranfälligkeit.

Das Ziel der Arbeit ist die Erhöhung der interlaminaren Scherfestigkeit von OFC durch eine simulativ ausgelegte dreidimensional geflochtene Verstärkungsstruktur. Dabei wird, um eine glatte Oberfläche und homogene Durchtränkung zu erreichen, das Infusionsverfahren modifiziert.

Zur Verarbeitung spröder Oxidkeramikfasern wird ein faserschonender Klöppel mit adaptiver Fadenführung zur Minimierung der auf den Roving wirkenden Querkräfte entwickelt. Durch die Adaption eines auf magnetischen Näherungssensoren basierenden Fadenbruchdetektionssystems auf Rückspulklöppel kann auf zusätzliche Fadenleitelemente verzichtet werden. Die Prozessauslegung wird durch die Erstellung eines virtuellen Zwillings mittels der Kombination eines Auslegungstools und einer Mehrkörpersimulation ermöglicht. Zur Modellierung der textilen Struktur wird eine topologische Simulation mit einem Kompaktierungsalgorithmus erweitert.

Durch die adaptive Fadenführung kann gegenüber einer herkömmlichen Fadenführung die Fadenspannungsschwankung um 43 % und die Filamentbruchrate um 55 % gesenkt werden. Im Rahmen eines Benchmarks von 2D-gewobenen OFC mit 3D-geflochtenen OFC wird bedingt durch einen z-Faseranteil von 13,1 % in Belastungsrichtung ein Anstieg der interlaminaren Scherfestigkeit von 96 % festgestellt. Durch das simulationsgestützte Auslegungstool ‚Virtual Braiding Simulation‘ (ViBraSi) ist die Variation der Preformarchitektur und die Erstellung eines digitalen Materialmodells auf Mikroebene möglich.

Abstract

Oxide fibre composites (OFCs) are a potential key technology for aerospace and energy applications due to their quasi-ductile fracture behaviour, high continuous service temperature and chemical and oxidation resistance. An inherent weakness of OFCs, which restricts their use, is their high susceptibility to shear.

The aim of the work is to increase the interlaminar shear strength by producing an OFC with a simulatively designed three-dimensional braided reinforcement structure. In order to achieve a smooth surface and homogeneous impregnation, the infusion process is modified.

For processing brittle oxide ceramic fibres, a fibre-friendly bobbin with adaptive yarn guidance is being developed to minimise the transverse forces acting on the roving. By adapting a yarn break detection system based on magnetic proximity sensors to rewind bobbins, additional yarn guiding elements can be omitted. Process design is enabled by creating a virtual twin using a combination of a design tool and a multi-body simulation. To model the textile structure, a topological simulation is extended with a compacting algorithm.

Compared to conventional yarn guidance, the adaptive yarn guidance reduces the yarn tension fluctuation by 43 % and the filament breakage rate by 55 %. In a benchmark comparison of 2D woven OFC with 3D braided OFC, an increase in the interlaminar shear strength of 96 % is determined due to a z-fibre content of 13.1 % in the loading direction. The simulation-based design tool 'Virtual Braiding Simulation' (ViBraSi) enables variation of the preform architecture and the creation of a digital material model on a micro level.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Zentrale Defizite und Lösungsansatz	5
1.3	Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise	6
2	Stand der Technik	8
2.1	Keramikfasern	8
2.2	Flechttechnologie	15
2.3	Keramikinfiltration	29
2.4	Verbundkeramiken	33
2.5	Virtuelle Prozess- und Produktentwicklung	46
3	Zieldefinition und methodisches Vorgehen	55
4	Marktübersicht und Produktdefinition	78
5	Anforderungsidentifikation an den 3D-Flechtprozess	89
6	Technologievorauswahl	94
7	Technologieentwicklung Flechtklöppel	104
7.1	Kontaktierung	107
7.2	Kompensationsmechanismus	113
7.3	Fadenbruchdetektion	120
8	Technologiebewertung des Flechtklöpfels	127
9	Maschinensteuerung und Prozesssimulation	138
9.1	Maschinensteuerungs- und Auslegungstoolentwicklung	139
9.2	Virtuelle Prozesssimulation	149
10	Prozesskettenentwicklung	174
10.1	Spulprozess	174
10.2	3D-Flechtprozess	179
10.3	Infiltration und Werkstoffprüfung	185

11	Technisch-wirtschaftliche Bewertung	195
11.1	Validierung am Demonstrator und technische Bewertung	196
11.2	Wirtschaftliche Bewertung	202
12	Zusammenfassung	210
13	Ausblick	215
13.1	Faserebene	215
13.2	Prozessebene – 3D-Flechtverfahren	216
13.3	Prozessebene – Infusion	218
13.4	Kompositebene	218
13.5	Bauteilebene	219
13.6	Simulationsebene	219
14	Summary	221
15	Abbildungs- und Tabellenverzeichnisse	227
15.1	Abbildungen	227
15.2	Tabellen	234
16	Literatur	237
17	Anhang	305
17.1	Anhang A: Abkürzungsverzeichnis, Formelzeichen	305
17.2	Anhang B: Grundlagen	312
17.3	Anhang C: Anforderungsbewertung	313
17.4	Anhang D: Hauptanforderungen	314
17.5	Anhang E: Klöppelauslegung und -bewertung	316
17.6	Anhang F: Topologische Darstellungsmöglichkeiten	325
17.7	Anhang G: Demonstratoren und Kostenrechnung	327