Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 232

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 232

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der KIT-Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Sven Coutandin, M.Sc.

aus Bad Kreuznach

Tag der mündlichen Prüfung:	30.04.2020
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, 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 978-3-8440-7413-0
ISSN 0724-4967

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

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Rahmen des Projekts *„Methodik zur endkonturnahen, faltenfreien Herstellung von textilen Preforms mit Hilfe einer segmentbasierten Stempeldrapierung“*, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Übernahme des Hauptreferats. Seine Unterstützung und sein Vertrauen in meine Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und später als Oberingenieur der Forschungsgruppe Leichtbaufertigung haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher für die Übernahme des Korreferats sowie bei Frau Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova für den Prüfungsvorsitz.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des wbk und insbesondere beim Forschungsbereich Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung für ihre Unterstützung und das stets offene Arbeitsklima herzlich bedanken. Hervorheben möchte ich zusätzlich die zahlreichen Studierenden, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeit oder als wissenschaftliche Hilfskraft immer eine wichtige Stütze waren.

Mein größter Dank gebührt schließlich meiner Familie, ohne deren bedingungslose Unterstützung, Verständnis und motivierenden Worte diese Arbeit sicherlich nicht möglich gewesen wäre.

Karlsruhe, im Mai 2020

Sven Coutandin

Abstract

Stamp preforming offers high potential for the production of complex, shell-shaped preforms, which is a key process in the manufacturing of continuous fibre-reinforced plastics. An innovative approach to improve preform quality consists in a segmented tooling system. The tooling system provides a multitude of options for tool segmentation and sequence, so that an intuitive definition of the tool setting is no longer possible. In addition, sequential closing of the tool segments changes the forming temperature and duration. Suitable activation parameters for the binder must therefore be defined to ensure low resistance to deformation and sufficient stability after the forming process.

The objective of this thesis constitutes in the development of a method that defines the process strategy for preforming with a segmented tooling system based on a material and a component geometry. The process strategy includes tool segmentation and sequence as well as activation time and temperature.

In this thesis, different models are developed and validated to define the process strategy, which are then combined into a systematic procedure. A simplified temperature model enables the calculation of the start and end temperature of the forming process for different tool segmentations and sequences depending on the material and contact parameters. The stability of the preform requires a balanced inter- and intra-laminar binder content. To determine this aspect, an impregnation model is presented. That way, a minimum forming and activation temperature as well as a short activation time can be identified. The definition of the tool segmentation is based on a geometric analysis of the part. The tool sequence is optimised by coupling an FE-based forming model with a genetic algorithm that minimises wrinkling in the preform. On the basis of two independent parts, the procedure to increase preform quality is validated. It is thus possible to produce more complex parts by defining a process strategy for preforming with a segmented tooling system compared to a non-segmented forming tool.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Abkürzungen IV

1 Einleitung 1

1.1 Motivation 1

1.2 Aufbau der Arbeit 3

2 Stand der Forschung und Technik 5

2.1 Verfahren zur Herstellung textiler Preforms 6

2.1.1 Binder-Umformtechnik als sequentielles Preformingverfahren 7

2.1.2 Werkzeug- und Materialführungssysteme für das Preforming 12

2.1.3 Modellierung und Prozessstrategien für das Preforming 17

2.2 Eigenschaften bebinderter textiler Materialien 27

2.2.1 Bindersysteme 27

2.2.2 Einfluss von Bindersystemen auf das Preforming 29

2.3 Folgerung aus dem Stand der Forschung und Technik 33

3 Zielsetzung und Vorgehensweise 35

3.1 Zielsetzung 35

3.2 Vorgehensweise 36

4 Preforming mit einem segmentierten Werkzeugsystem 40

4.1 Eingesetzte Materialien 41

4.1.1 Textile Materialien 41

4.1.2 Bindersysteme 42

4.2 Anlagen- und Werkzeugtechnik 46

4.2.1 Anlagentechnik 46

4.2.2 Materialführungssystem 47

4.2.3 Werkzeugtechnik 48

4.3 Faktorstufen und Versuchsdurchführung 50

4.3.1 Faktorstufen der Versuchsreihe Bindersystem 51

4.3.2 Faktorstufen der Versuchsreihe Werkzeugsystem 51
4.3.3 Versuchsdurchführung und Auswertung 54
4.4 Ergebnisse der experimentellen Analyse 58
4.4.1 Ergebnisse der Versuchsreihe Bindersystem 58
4.4.2 Ergebnisse der Versuchsreihe Werkzeugsystem 61
5 Verhalten bebinderter Textile bei hohen Temperaturen 65
5.1 Analyse und Modellierung der Textiltemperatur 65
5.1.1 Modellierung der Textiltemperatur 66
5.1.2 Validierung des Temperaturmodells 72
5.1.3 Analyse der Einflussparameter auf das Temperaturmodell 76
5.2 Experimentelle Analyse des Verformungsverhaltens 80
5.2.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung 80
5.2.2 Versuchsergebnisse zur Intra-Ply-Scherung 85
5.2.3 Versuchsergebnisse zur Intra-Ply-Biegung 89
5.2.4 Versuchsergebnisse zur Inter-Ply-Verschiebung 90
5.3 Analyse der Tränkung des textilen Materials 93
5.3.1 Einfluss der Aktivierungsparameter auf das Verformungsverhalten 93
5.3.2 Experimentelle Untersuchung der Tränkung des textilen Materials 97
5.3.3 Modellierung der Tränkung des textilen Materials 100
6 Modellierung für ein segmentiertes Werkzeugsystem 111
6.1 Modellaufbau und Modellierung des Materialverhaltens 111
6.1.1 Automatisierter Modellaufbau in ABAQUS 112
6.1.2 Modellierung des Materialverhaltens 116
6.1.3 Modellierung des Kontaktverhaltens 120
6.2 Validierung des Modells für das Preforming 123
6.2.1 Versuchsaufbau und Simulationsparameter 124
6.2.2 Ergebnisse und Validierung des Modells 127
6.2.3 Bewertung der Preformqualität anhand von Zielfunktionen 129

7 Prozessstrategie für ein segmentiertes Werkzeugsystem 136

7.1 Ermittlung der Werkzeugsegmentierung und -sequenz 136

7.1.1 Geometrieanalyse zur Segmentierung des Werkzeugsystems 136

7.1.2 Genetischer Algorithmus zur Optimierung der Werkzeugsequenz 143

7.1.3 Experimentelle Validierung des Optimierungsverfahrens 149

7.2 Validierung der Prozessstrategie 153

7.2.1 Prozessstrategie für eine reale Bauteilgeometrie 153

7.2.2 Experimentelle Validierung der Prozessstrategie 158

8 Zusammenfassung und Ausblick 161

8.1 Zusammenfassung 161

8.2 Ausblick 164

Literaturverzeichnis 166

Anhang I