Numerische Simulation der Umformung von Sandwichblechen unter Berücksichtigung großer Krümmungen

Von der Fakultät Maschinenbau der
Technischen Universität Dortmund
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Siu Ping Afonichev
aus
Hong Kong

2017

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof.-Doz. Dr.-Ing. Jobst Bickendorf

Berichter: Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Sandra Klinge

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Mai 2017

Dortmunder Umformtechnik

Band 94

Siu Ping Afonichev

**Numerische Simulation der Umformung
von Sandwichblechen unter Berücksichtigung
großer Krümmungen**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5471-2

ISSN 1619-6317

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Industriedoktorandin bei der Volkswagen AG mit der Unterstützung des Instituts für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der Technischen Universität Dortmund.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya, dem Institutsleiter vom IUL, für die Möglichkeit zur Promotion sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen. Ebenso herzlich bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferats bei Herrn Professor Dr.-Ing. Mathias Liewald, dem Leiter des Instituts für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart.

Darüberhinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des IUL, die mich bei allen Fragen und sonstigen Belangen weitergeholfen und unterstützt haben. Insbesondere bedanke ich mich bei den Herren Dr.-Ing. Jörg Kolbe, Dr.-Ing. Alper Güner sowie Lars Hiegemann für ihre kompetente Betreuung über die lange Distanz zwischen Dortmund und Wolfsburg hinweg. Besonderer Dank gilt auch den technischen Mitarbeitern des IUL, insbesondere Werner Feurer, Andreas Herdt und Frank Volk, für ihre reibungslose Unterstützung und Geduld.

Ferner bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern und Kollegen der Abteilung Technologieplanung und -entwicklung bei der Volkswagen AG. Der Dank gilt insbesondere Dr.-Ing. Hubert Verhoeven für seine fachliche Betreuung, Anregungen und Ratschläge sowie Dr.-Ing. Yves Omboko, Mathias Merten und Georgios Georgiadis für ihre fachliche und menschliche Unterstützung. Außerdem möchte ich auch meinen Kolleginnen Denise Wiese und Alessa Wittmann ganz herzlich danken, dass sie mir auch als Freundinnen zur Seite standen und mich immer wieder aufs Neue motiviert haben.

Ferner gilt mein besonderer Dank meinem Ehemann Vladimir Afonichev, der mich während meiner Arbeit unterstützt und angetrieben hat. Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern, Schwestern und Schwiegereltern danken, die mir diesen Werdegang ermöglichten und mich auch bis heute stets gefördert haben.

Abstract

Lightweight sandwich sheets represent an alternative in the framework of body lightweight construction in terms of reducing CO₂ emissions. They are made of metal face sheets which form a shear-resistant bond with the thermoplastic core layer. The application of sandwich sheets in the car body requires a proper forming simulation method. The planner is able to optimize the entire production process by using the correct method. Observations show a different processing behaviour of sandwich sheets in comparison to solid sheets. The special behaviour of sandwich sheets is due to multi-layer construction with soft core. It is particularly apparent when the sandwich sheet is exposed to extreme bending and curvature, for example during hemming and wrinkling. In order to take this behaviour into account, a suitable simulation model representing the sandwich structure should be selected carefully.

The mechanics of the sandwich behaviour due to small curvature during forming processes can be reduced to bending and buckling. The first focal point of this work is the mechanical characterization of the sandwich sheet during bending and buckling. The analysis shows that the sandwich sheet is more sensitive to bending and buckling compared to solid sheet. The increased sensitivity can be attributed to the soft core. Second focal point is the numerical simulation of the sandwich sheet in forming processes. The investigation emphasizes on the behaviour of sandwich sheet when it flows through small curvature. This applies, for instance, to the hemming and wrinkling process. In such cases the layer-by-layer model is more capable of simulating the sandwich structure. The simplified modelling, which considers the average parameters and layer kinematics over the whole structure, can predict the feasibility of parts from a global perspective. However, when it comes to local effects important information may be lost with the simplified model, hence incorrect prediction can occur.

Zusammenfassung

Eine Möglichkeit zur Reduzierung des Fahrzeuggewichts und damit die Senkung der CO₂-Emission ist die Verwendung von Metall-Kunststoff-Metall-Sandwichblechen. Ihr Einsatz in der Karosserie erfordert eine geeignete Simulationethodik, damit ein Methodenplaner den Fertigungsprozess korrekt auslegen kann. Aufgrund des Mehrschichtaufbaus mit weicher Kernschicht ist für den Sandwichwerkstoff ein anderes Verhalten gegenüber monolithischem Werkstoff bei der Verarbeitung zu beobachten. Das besondere Verhalten zeigt sich vor allem im Bereich starker Krümmung wie sie zum Beispiel beim Falzen oder bei der Faltenbildung auftreten. Um dieses Verhalten zu berücksichtigen, muss das Modell zur Abbildung der Sandwichstruktur geeignet gewählt werden.

Die Mechanik des Sandwichverhaltens durch enge Krümmungen mit kleinen Radien reduziert sich auf das Biege- und Beulverhalten der vorliegenden Sandwichstruktur. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt zum einen in der mechanischen Charakterisierung des Sandwichbleches bei Biege- und Beulvorgängen. Die Analyse zeigt, dass sich das Sandwichblech aufgrund der weichen Kunststoffkernschicht biegeweicher bzw. beulsensitiver gegenüber metallischen Vollblechen verhält. Zum anderen beschäftigt sich die Arbeit mit der Umformsimulation von Sandwichblechen. Dabei liegt der Fokus auf die Untersuchung des Verhaltens bei starken Krümmungen wie sie beim Falzen oder auch bei der Faltenbildung auftreten. In solchen Fällen vermag eine schichtweise Modellierung der Sandwichstruktur das Verhalten am besten nachzubilden. Vereinfachte Modellierungen, die die Materialkennwerte und die Schichtverschiebungen über die Gesamtdicke mitteln und damit verschmieren, vermögen die Machbarkeit von Bauteilen global vorherzusagen. Lokale Effekte und Informationen gehen allerdings verloren und können bei bestimmten Fällen zu falschen Vorhersagen führen.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	v
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Mehrschichtverbundbleche	3
2.1.1 Einsatz von Sandwichblechen	3
2.1.2 Versagen von Sandwichstrukturen	5
2.2 Grundlagen des Beulens und Biegens von Sandwichverbunden	7
2.2.1 Biegesteifigkeiten von Sandwichstrukturen	7
2.2.2 Globale Instabilität von Sandwichbalken und Sandwichplatten	8
2.2.3 Lokale Instabilität der Deckschichten	13
2.2.4 Einfluss von Imperfektion und Plastizität	16
2.3 Einsatz von Blechumformsimulation	18
2.3.1 Einsatz im Produktentstehungsprozess	19
2.3.2 Elementformulierungen und Stoffgesetze	20
2.3.3 Abbildung der Ziehsicken	21
2.3.4 Rollfalzsimulation	22
2.3.5 Versagensvorhersage	23
2.4 Simulation von Sandwichverbunden	26
2.4.1 Sandwichmodellierung in der FEM	26
2.4.2 Umformung von Sandwichverbunden und ihre Simulation in FEM	28
2.5 Fazit zum Stand der Technik	31
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	33
4 Beul- und Biegeverhalten von Sandwichblechen	35
4.1 Analytische Vorbetrachtung des Sandwichbleches	36
4.1.1 Versagensform beim Knicken	36
4.1.2 Kritisches Lastverhältnis beim Beulen	39
4.1.3 Rückfederung nach dem Biegen	42
4.2 Tragfähigkeit von Sandwichblech- und Vollblechstreifen	44
4.2.1 Uniaxialer Druckversuch	45
4.2.2 Dreipunktbiegung und Auswertung	49
4.3 Verhalten in Ziehsicken anhand von Streifenzugversuchen	52
4.3.1 Durchführung des Streifenzugversuchs	52
4.3.2 Ergebnis des Streifenzugversuchs	54
4.4 Faltenbildung im konischen Napf	56
4.4.1 Versuchsrandbedingungen und -durchführung	56
4.4.2 Arbeitsbereiche der ausgewählten Sandwich- und Vollblechen	58

4.4.3	Kräfte und Spannungen im konischen Napf	60
4.5	Untersuchung auf Delamination	63
4.6	Zusammenfassung.....	65
5	Sandwichblech in der Umformsimulation	67
5.1	Modellierung der Sandwichstruktur in LS-DYNA.....	67
5.1.1	Schichtweise Elementierung der Sandwichstruktur.....	67
5.1.2	Abbildung über eine geschichtete Schale.....	68
5.1.3	Homogenisierungsmethode	69
5.1.4	Validierung anhand des Zugversuchs	74
5.2	Analyse der Formänderungen aus Experiment und Simulation	78
5.2.1	Konvergenzanalyse und Vergleich der Referenzmodelle	78
5.2.2	Sensitivitätsanalyse anhand Rundnapf und LDH-Napf	87
5.2.3	Validierung anhand Versuchswerkzeug.....	92
5.3	Untersuchung des Umformverhaltens in Ziehstücken	101
5.3.1	Numerische Nachbildung des Streifenzugversuchs	101
5.4	Untersuchung des Umformverhaltens beim Falzen	109
5.4.1	Ausgangssituation und Aufbau des Simulationsmodells	109
5.4.2	Analyse des Falzprozesses in der Simulation	112
5.5	Untersuchung anhand des konischen Napfes.....	115
5.5.1	Vergleich der Falten aus Simulation mit GS und SVS	116
5.5.2	Numerische Ermittlung der Wrinkling Limit Curve als Faltenkriterium..	117
5.5.3	Validierung und Diskussion des Faltenkriteriums	120
5.6	Zusammenfassung.....	121
6	Validierung anhand eines Realbauteils	123
6.1	Vorgehen und Voraussetzungen beim Vergleich zwischen Versuch und Simulation	123
6.1.1	Versuchsdurchführung und -auswertung	123
6.1.2	Numerische Untersuchungen zwischen GS und SVS	125
6.2	Ergebnisse anhand der Benchmarkkriterien	126
6.2.1	Benchmarkkriterium Platineneinzug.....	126
6.2.2	Benchmarkkriterium Blechdicke.....	128
6.2.3	Benchmarkkriterium Formänderungen	132
6.2.4	Benchmarkkriterium Faltenbildung	134
6.3	Zusammenfassung.....	137
7	Zusammenfassung und Ausblick	139
	Literaturverzeichnis	141
	Anhang A	153

Anhang B	155
Anhang C	159
Anhang D	161
Anhang E	165
Anhang F	171