Experiments and Modelling of Elasto-Viscoplasticity for Thermoplastics with Asymmetric Effects

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Ahmed Shaban, M.Sc.
aus Giza, Ägypten

Tag des Kolloquiums: 29. Oktober 2010
Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Mahnken
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Lion

Schriften des Lehrstuhls für Technische Mechanik
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rolf Mahnken, M.Sc.

P-2011-5

Ahmed Shaban

Experiments and Modelling of Elasto-Viscoplasticity for Thermoplastics with Asymmetric Effects

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2010

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Rolf Mahnken, M.Sc.
Lehrstuhl für Technische Mechanik
Warburger Straße 100
33098 Paderborn
Tel.: +(49) 5251 602283

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0351-2
ISSN 1867-1675

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

Experimental tests for thermoplastics exhibit different behaviours for different loading types such as tension, compression and shear. This observation is called asymmetric effects. Also strain rate and temperature influence the mechanical behaviour of thermoplastics. One objective of this thesis is to formulate constitutive equations which can simulate the elasto-viscoplastic deformation of polymers taking into consideration the asymmetric, strain rate and temperature effects. Therefore different frameworks at small and large strains are presented. These frameworks are based on the concept of stress mode dependent weighting functions with a characteristic behaviour dependent on the loading state. In this concept, an additive decomposition of the flow rule is assumed into the sum of weighted stress mode related quantities. A main advantage of the concept is, that the stress modes can directly be associated to certain characteristic loading scenarios, such as tension, compression and shear, which are experimentally investigated in the laboratory. The capability of the proposed models is assessed by simulating a laser transmission welding process and a cold drawing process using a finite element programs such as ABAQUS. Another objective of this thesis is to model the induced anisotropic effects exhibited in the tensile/compressive tests using polymeric specimens. Thus another constitutive framework has been developed. In this framework a spectral decomposition is done for the inelastic strain tensor resulting into its eigenvalues and eigenvectors. Therefore the yield function can be formulated as a function of the maximum eigenvalue of the inelastic strain. The capability of the proposed approach is assessed by depicting the start of strain localization in the middle of a tension specimen and the propagation of plastic strain over the whole specimen.

Zusammenfassung

Experimentelle Versuche für die Thermoplaste zeigen verschiedene Verhaltensweisen für unterschiedliche Belastungstypen wie beispielsweise Zug-, Druck- und Scherversuche. Diese Beobachtung wird als Asymmetrie-Effekt bezeichnet. Auch die Dehnrate und die Temperatur beeinflussen das mechanische Verhalten für Thermoplaste. Ein Ziel dieser Arbeit ist die Formulierung von konstitutiven Gleichungen, welche die elasto-viskoplastische Deformation von Polymeren simulieren können, mit Berücksichtigung der Asymmetrie-, der Dehnrate- und der Temperatureffekte. Daher werden unterschiedliche frameworks von kleinen und großen Deformationen präsentiert. Diese basieren auf dem Konzept der Wichtungsfunktionen, deren charakteristisches Verhalten in Abhängigkeit zum Belastungszustand steht. In diesem Konzept wird die additive Dekomposition der Fließregel angenommen, als Summe von Spannungsmoden von abhängigen Anteilen. Der Hauptvorteil dieses Konzepts ist, dass die Spannungsmoden direkt mit bestimmten Belastungszuständen wie zum Beispiel Zug-, Druck- und Scherversuchen (die durch Experimente im Labor untersucht werden) assoziert werden können. Die Fähigkeit des vorgestellten Modells wird bewertet durch die Simulation des Laserdurchstrahlschweiß-Prozesses und des Kaltziehen-Prozesses, in dem unter anderem das Finite-Elemente-Programm ABAQUS genutzt wird. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung der induzierten Anisotropie-Effekte, welche durch Zug- und Druckversuche von polymeren Proben gezeigt werden sollen. Deshalb wurde ein weiterer konstitiver Rahmen entwickelt. Dazu wird die spektrale Dekomposition für den inelastischen Verzerrungstensor durchgeführt, um seine Eigenwerte und -vektoren zu erhalten. Damit kann die Fließfunktion in Abhängigkeit von dem Maximum der Eigenwerte der inelastischen Verzerrung formuliert werden. Die Fähigkeit des vorgestellten Ansatzes wird bewertet durch die anschauliche Darstellung des Beginns der Dehn-Lokalisierung in der Mitte einer Zugprobe sowie die Ausbreitung der plastischen Verzerrung durch die ganze Probe.

Preface

The work presented in this thesis was carried out in the field of experiments and modelling for polymers when I was employed as a research associate at the Chair of Engineering Mechanics (LTM), the Faculty of Mechanical Engineering at the University of Paderborn.

I would like to take this opportunity to thank God for his help in my life and in finishing this thesis. The financial support provided by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) under two successive grants:

1. Ma 1979/4-1 “Experimente und Modellbildung zur Eigenspannungsentwicklung beim Laserdurchstrahlschweißen von Thermoplasten unter besonderer Berücksichtigung des druckabhängigen und asymmetrischen Werkstoffverhaltens” and
2. Ma 1979/7-2 “Experimente und Modellbildung zur Eigenspannungsentwicklung beim Quasi-Simultan-Laserdurchstrahlschweißen von Thermoplasten unter besonderer Berücksichtigung großer Deformationen und der daraus folgenden Anisotropieentwicklung”

is gratefully acknowledged.

I would like to express my gratitude to Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Mahnken. He gave me the chance to work in his research group at the LTM. I would like to thank him for his support, his guidance and his ideas for this work and for accepting the main referee position. A sincere thank goes to Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Lion, from the Institute of Mechanics, the Faculty of Aerospace Engineering, Universität der Bundeswehr München, for his acceptance to become correferee for this thesis.

Furthermore I would like to thank Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner from the Chair of Polymer Engineering (KTP) at the University of Paderborn for the presidency of examination committee. This concerns additionaly Prof. em. Dr.-Ing. Helmut Potente, Dipl.-Ing. Lars Wilke and Dipl.-Ing. Dirk Bonefeld from the KTP for their significant support in the field of laser transmission welding and providing me with the experimental data. A lot of thanks goes to Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid from the Chair of Mechanical and Environmental Process Engineering (MVU) at the University of Paderborn for being a member in the examination committee. Many thanks goes to all my colleagues at the LTM for the pleasant working conditions and the excellent social atmosphere.

I would like to thank all other people who supported me during this work. My sincere gratitude goes to my wife who supported me during writing this thesis. Finally I am truely grateful for the everlasting support, the great basis and the chances my parents provided me with wherever I was and whatever idea I had. This includes also my beloved brothers with whom I have shared so many happy years.

Paderborn, July 2011 Ahmed Shaban

List of Publications

This thesis is based on the following papers:

1. Shaban, A.; Mahnken, R.; Wilke, L.; Potente, H.; Ridder, H. (2007): *Simulation of rate dependent plasticity for polymers with asymmetric effects*. Int. J. Solids Struct., 44: 6148–6162.
2. Potente, H.; Wilke, L.; Ridder, H.; Mahnken, R.; Shaban, A. (2008): *Simulation of the residual stresses in the contour laser welding of thermoplastics*. Polymer Eng. Sci., 48(4): 767–773.
3. Mahnken, R.; Shaban, A.; Potente, H.; Wilke, L. (2008): *Thermoviscoplastic modelling of asymmetric effects for polymers at large strains*. Int. J. Solids Struct., 45: 4615–4628.
4. Bonefeld, D.; Potente, H.; Shaban, A.; Mahnken, R. (2010): *Residual stresses at the quasi-simultaneous laser transmission welding of amorphous thermoplastics*. Polymer Eng. Sci., 50(8): 1520–1526.
5. Mahnken, R.; Shaban, A.: *Finite elasto-plastic model for polymers including asymmetric effects*. Submitted to Archive of Applied Mechanics in 2011.
6. Mahnken, R.; Shaban, A.; Schöppner, V.: *Modelling and simulation of induced anisotropy in glassy polymers*. Submitted to Int. J. Solids Struct. in 2011.

Contents