Microstructure Evolution during Thermomechanical Multi-Step Processing of Extruded Aluminum Profiles

Zur Erlangung des akademischen Grades

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Ahmet Güzel

aus

Kırşehir/Türkei

Dortmund, 2014

Vorsitzender der Prüfungskommission:	Prof. Dr.-Ing. Markus Stommel
Berichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya
	Prof. Dr. Wojciech Z. Misiolek
	Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Frank Walther
Tag der mündlichen Prüfung:	24. Juli 2014

Dortmunder Umformtechnik

Band 83

Ahmet Güzel

Microstructure Evolution during Thermomechanical Multi-Step Processing of Extruded Aluminum Profiles

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2014

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3428-8
ISSN 1619-6317

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

Acknowledgements

The presented dissertation was emerged during my research activities as scientific assistant at the Institute of Forming Technology and Lightweight Construction of TU Dortmund University.

First and foremost, I would like to express my sincerest gratitude to Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya for providing me the unique opportunity to benefit from the excellent research facilities in his institute and for supervising this dissertation. I am also deeply indebted to Professor Wojciech Misiolek (Lehigh University, USA) for his great support, constructive comments and guidance throughout this research work. Furthermore, I remain grateful to Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier for giving me the chance of utilizing the experimental facilities in his lab and for evaluating my work. I thank Prof. Dr.-Ing. Markus Stommel and Prof. Dr.-Ing. Frank Walther for participating in the examination committee.

I would like to express my gratitude to Dr.-Ing Andreas Jäger for his excellent collaboration as my project partner during my research. I am especially grateful to Dr.-Ing. Nooman Ben Khalifa for his encouragement, helpfulness and invaluable suggestions, which enabled the accomplishment of this thesis. I acknowledge the collaboration of my colleagues Dipl.-Ing. Annika Foydl and Dr.-Ing. Martin Holzweißig gratefully, who helped me in the experimental investigations of this work.

I owe my deepest gratitude to Alper Güner, Emine Güner, Koray Demir, Hülya Uzuner, Turan Uzuner, Özde Ütkür, Volkan Güley, Kerim Işık and Celal Soyarslan for their invaluable friendship and for making Dortmund a great place to live.

Last but not least, I would like to thank my dearest family. I can't express my gratitude to my mother Yasemin Çelebi in words, whose unconditional love has always been my greatest strength in life. I am also grateful to my maternal aunts Lale Taşkıran, Şenol Seyfi and to their families, as well as to my maternal uncle İbrahim Çelebi. I never felt alone here in Germany with their continuous support and love.

Augsburg, September 2014 Ahmet Güzel

Abstract

Extruded aluminum profiles are widely used structural components in miscellaneous applications of the lightweight design. The conventional metal extrusion is utilized to manufacture straight profile sections with a constant cross section which exhibit homogeneous mechanical properties in the semi-finished profile. In order to meet the demands of specific mechanical properties and to introduce additional functional elements in the geometry of the profile, subsequent forming processes are required. Utilization of electromagnetic forming subsequent to hot aluminum extrusion to manufacture functionally graded extrusion profiles is an innovative forming technology introduced recently by Jäger et al. (2011).

The large deformations, intermediate to very extreme strain rates and elevated temperatures, which characterize the process chain of hot extrusion and subsequent electromagnetic compression, lead to a complex development in the microstructure which is linked to the mechanical properties of the material. The evolution of the microstructure during thermomechanical multi-processing of extruded aluminum profiles has not been investigated explicitly. The main aim of this research was to investigate the effect of thermomechanical processing conditions on the microstructure evolution for a wide range of plastic strain rates.

First, the microstructural evolution during the hot direct extrusion of aluminum alloy EN AW-6082 was investigated. A novel experimental approach was introduced, which preserves the dynamic evolution of grains by avoiding secondary recrystallization. Here, the dynamic grain structure evolution of a single material point was characterized by monitoring its migration along the flow line during extrusion. The resulting microstructure was related to the deformation history, which was calculated by finite element analysis. The finite element simulations of the extrusion process were performed by utilizing a constitutive setting, which accounts for the microstructural mechanisms like strain hardening and thermal softening. The corresponding model parameters were determined based on the experimental observations. Process simulation was validated by experimentally obtained material flow lines and ram force.

In order to perform numerical analyses and to predict material deformation during electromagnetic forming process, dynamic flow stress behaviour of the material was determined by performing drop-weight and split Hopkinson pressure bar tests. Based on the experimentally obtained dynamic response of the material, a flow stress model and the corresponding material parameters were presented. The effects of very high strain rates and temperatures on the microstructural evolution under impulse loading conditions were analysed and modelled.

In order to predict the final microstructure of the thermomechanically processed material, the entire process chain was simulated based on the proposed dynamic recrystallization model.

Zusammenfassung

Stranggepresste Aluminiumprofile sind weitverwendete Strukturbauteile für zahlreiche Anwendungen im Leichtbau. Konventionell ist das Verfahren gerade Halbzeuge herzustellen, die über den Querschnitt und die Länge möglichst homogene mechanische Eigenschaften aufweisen. Zur Gewährleistung spezifischer mechanischer Eigenschaften sowie zur Einführung zusätzlicher funktionaler Strukturelemente in der Profilgeometrie sind weiterverarbeitende Umformprozesse erforderlich. Die Anwendung elektromagnetischer Umformung kombiniert mit Strangpressen zur Herstellung von funktional gradierten Bauteilen ist eine innovative Umformtechnologie, die von Jäger et al. (2011) bereits entwickelt wurde.

Große plastische Verformungen, mittlere bis zu sehr hohe Dehnraten und sehr hohe Temperaturen, die die Prozesskette der Strangpressen und der elektromagnetischen Rohrkompression charakterisieren, führen zu einer sehr komplexen Gefügeentwicklung, die mit mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes verbunden ist. Die Entwicklung der Mikrostruktur während der thermo-mechanischen Weiterverarbeitung von stranggepressten Aluminiumprofilen wurde bisher nicht untersucht. Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss thermo-mechanischer Prozessbedingungen über ein breites Spektrum der plastischen Dehnraten zu untersuchen.

Zunächst wurde die Mikrostrukturentwicklung während des Strangpressens der Aluminiumlegierung EN AW-6082 untersucht. Ein neuartiger experimenteller Ansatz wurde vorgestellt, bei dem die dynamische Entwicklung der Gefüge durch Vermeidung von statischer Rekristallisation erhalten bleibt. Die dynamische Rekristallisation eines Materialpunktes wurde dabei durch Analysieren der Verformung entlang der Fliesslinie während des Strangpressens charakterisiert. Zudem wurde der Einfluss der Umformhistorie auf die resultierende Mikrostruktur ermittelt, die mittels FEM berechnet wurde. Die Prozesssimulation wurde anhand der Experimente validiert.

Zur numerischen Simulation der elektromagnetischen Umformung wurde die dynamische Fliessspannung des Materials mit Hilfe der Fallhammer- und Split-Hopkinson-Versuche ermittelt. Auf Basis von experimentell ermittelten dynamischen Verhalten des Werkstoffes wurden ein Fliessspannungsmodell und die dazugehörigen Materialkennwerte dargestellt. Die Einflüsse von sehr hohen Dehnraten und Temperaturen auf die Mikrostrukturentwicklung beim Hochgeschwindigkeitsumformen wurden analysiert und modelliert.

Um die endgültige Mikrostruktur des thermo-mechanisch verarbeitenden Werkstoffes vorhersagen zu können, wurde basierend auf dem vorgestellten Mikrostrukturmodell die Prozesskette (Strangpressen und elektromagnetische Rohrkompression) ganzheitlich simuliert.

Table of Contents