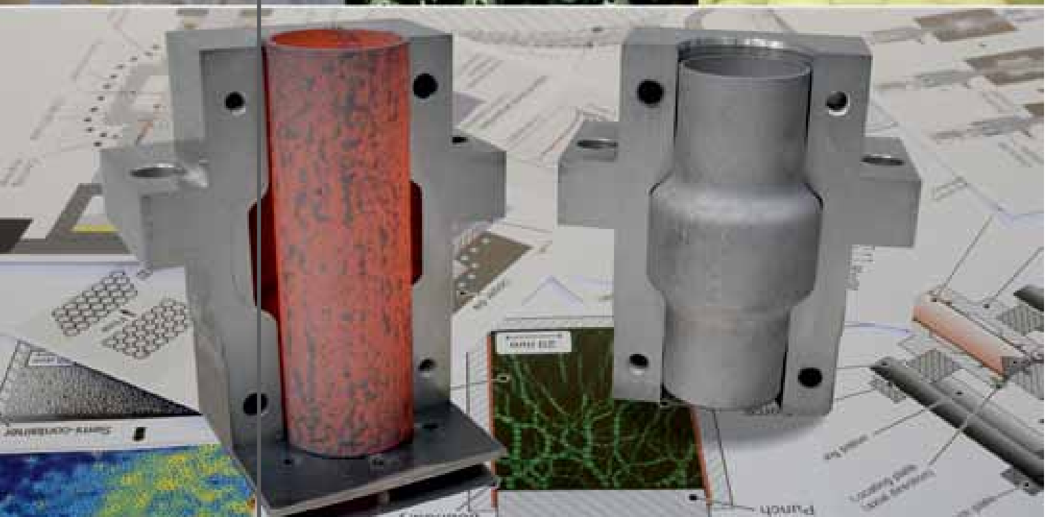
Institut für
Umformtechnik
und Leichtbau

Hui Chen

Granular medium-based tube press hardening



Reihe
Dortmunder
Umformtechnik

Nr. 96

Granular medium-based tube press hardening

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

Hui Chen M. Sc.

aus

Hubei, China

Tag der mündlichen Prüfung: 30.11.2017

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya
2. Gutachterin: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Dortmund, 2017

Vorsiztzender: Priv.-Doz. Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Andreas Zabel

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

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jörn Mosler

Tag der mündlichen Prüfung: 30.11.2017

Dortmunder Umformtechnik

Band 96

Hui Chen

Granular medium-based tube press hardening

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2017

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5701-0
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

This work was carried out during my time as a research assistant at the Institute of Forming Technology and Lightweight Components (IUL) of the TU Dortmund University.

I would like to express my deepest gratitude to my advisor, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya, for the confidence and constant support during my research work. His care, guidance and encouragement make this work possible. I would also like to kindly thank Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein from the Institute of Manufacturing Technology of the Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg for taking over as my co-advisor. Furthermore, thanks to Priv.-Doz. Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Andreas Zabel and Prof. Dr.-Ing. Jörn Mosler for investing valuable time and participating in the advisory committee of this thesis.

A special thanks goes to Prof. Dr. -Ing Karl Roll for the numerous discussions which gave me helpful advices in numerical simulation aspect. I would also like to sincerely thank Prof. Dr. -Ing Peter Haupt for the valuable discussions on topics of analytical description of granular medium and the heat conduction problem. This thesis can not be finished without their helps.

Additional thanks are directed to all of my colleagues at IUL for the outstanding assistance and collaborative partnership. I am grateful to the former and present colleagues during my stay at IUL, whose presence make my tense research life easier and more enjoyable. I would also like to specially extend my thanks to the chief engineer of IUL, Dr. -Ing. Nooman Ben Khalifa for his kindness support in every aspects, former head of the sheet metal forming group Dr. -Ing. Alper Güner and Dr.-Ing. Lars Hiegemann for their support on my thesis. My sincere thanks also go to Dipl. -Ing. Daniel Staupendahl for having useful discussions on various aspects of the research in the past few years. Thanks to Dipl. -Ing. Frank Steinbach, Dipl. -Ing. Thomas Mennecart, M. Sc. Christian Löbbe, Dipl.-Ing. Goran Grzancic and M. Sc. Kerim Isik for their kindness help. I thank Mr. Werner Feurer, Mr. Dirk Hoffmann and Mr. Andreas Herdt for their extensive support in my experimental works.

Last but not least, I would like to thank my family. Thanks for the understanding and support of my mother Lianming Shou and father Ningxing Chen, who raised me up with selfless dedications. Thanks to my sisters and brother who takes care my parents when I stayed out of China. This thesis is dedicated to the people who have given me countless care and trust in my life.

Dortmund, November 2017 Hui Chen

Abstract

Using granular materials as forming medium enables the press hardening process for tubes and profiles, which can produce lightweight components with high strength and high stiffness. However, granular material is a conglomeration of macroscopic particles unlike a fluid medium that possesses hydrostatic properties. The aim of this thesis is to investigate the physical concept of this new metal forming process, work out and extend the process limit.

First, the performance of granular material as working medium and the principle of choosing appropriate granular material is identified. A calibration procedure for the material model of granular material (i.e., Drucker-Prager Cap model) is introduced based on the characterization strategy of using instrumented die compaction tests and high-pressure direct shear tests. The accurate flow behavior of 22MnB5 material, which is essential for process numerical modelling, is characterized by a self-designed hot tensile test. The homogeneous induction heating of specimen is ensured by a single-strip face inductor and the precise temperature control is realized by close-loop control. Interaction properties including friction and heat transfer during the forming process are determined by high-pressure shear tests and heat transfer tests, which mimic the press hardening conditions. Inverse parameter identification is used to identify the heat transfer coefficients between the granular material and 22MnB5 blank under different contact pressures.

For a better understanding of the pressure transferring mechanism, an analytical model is developed, which deals with the tube free bulging under non-uniform loading pressures. With the combination of analytical models, the applied loading force for tube free bulging radii is predicted. The model is validated by a tubular free bulging experiment using granular medium.

A fully-coupled thermal-mechanical FE model of granular medium-based tube press hardening is established. Press hardening experiments for a T-shape 22MnB5 tube using granular material as forming medium are carried out. On this basis, the numerical model is validated by experiment measurements. The influence of process factors such as loading conditions, tube thicknesses and granular medium types are identified considering the tube hot bulging height. In order to specify the process limit of using granular materials as forming medium, axisymmetric tube press hardening experiments are designed and conducted as an example to define the process windows by FE simulation and experimental investigations.

This thesis establishes the required fundamental knowledge for an innovative granular medium-based tube press hardening process. Also, an alternative process of passive forming is proposed. The potential of producing high strength and high stiffness components offers the applications of lightweight construction in the automotive industry.

Zusammenfassung

Die Verwendung von granularem Material als Umformmedium ermöglicht das Presshärten von Rohren und Profilen und damit die Herstellung leichter Bauteile, welche eine hohe Festigkeit und gleichzeitig hohe Steifigkeit aufweisen. Granulate sind Gemenge von makroskopischen Partikeln und besitzen, im Gegensatz zu Fluiden, keine hydrostatischen Eigenschaften. Die während des Umformprozesses entstehende Druckverteilung ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig und bestimmt maßgeblich die Geometrie des resultierenden Bauteils. Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der physikalischen Grundlagen dieses neuen Umformprozesses, die Bestimmung der Prozessgrenzen und deren Erweiterung.

Zunächst wird das Verhalten von granularem Material als Arbeitsmedium untersucht und das Prinzip der Auswahl geeigneter Granulate erarbeitet. Für die Beschreibung des Verhaltens der Granulate wird als Materialmodell das Drucker-Prager Cap-Modell verwendet und für dieses ein Kalibrierverfahren entwickelt, welches sich auf Hochdruckscherversuche und Kompaktierversuche stützt. Das Fließverhalten von dem verwendeten Presshärtstahl 22MnB5 bei verschiedenen Temperaturen, wurde mit Hilfe eines eigens entwickelten Warmzugversuchs bestimmt. Die homogene Erwärmung der Zugprobe wird durch einen Flächeninduktor realisiert und die entstehende Temperatur durch einen Regelkreis gewährleistet. Die Wechselwirkung zwischen Rohr und Granulat, einschließlich Reibung und Wärmeübertragung während des Umformprozesses, werden durch Hochdruckscherversuche und Wärmeübergangsversuche bestimmt, welche die Bedingungen beim Presshärten nachbilden. Durch inverse Parameteridentifikation werden die Wärmeübergangskoeffizienten zwischen dem granularen Material und dem Stahlrohr bei verschiedenen Kontaktdrücken bestimmt.

Die Ergebnisse werden genutzt um ein analytisches Modell für die freie Rohraufweitung unter ungleichmäßigen Innendrücken zu entwickeln. Hierbei wird die Axialkraft bestimmt, die für die Erzeugung von spezifischen Rohraufweitradien notwendig ist. Das Modell wird experimentell validiert.

Zuletzt wird ein vollständig gekoppeltes thermisch-mechanisches FE-Modell für das Presshärten mittels granularer Medien erstellt. Zur Validierung des Modells werden T-förmige Rohrsegmente in experimentellen Presshärtversuchen erzeugt. Die Einflüsse von Prozessfaktoren wie die Beladungsbedingung, Rohrdicke und Art des granularen Mediums werden identifiziert. Die Prozessgrenzen werden anhand achssymmetrischer Presshärteexperimente bestimmt.

Diese Arbeit bildet die erforderlichen Grundlagen für das Presshärten von Rohren mittels granularer Medien. Das Verfahren bietet das Potenzial der Herstellung von hochfesten und gleichzeitig hochsteifen Bauteilen und ist damit prädestiniert für Leichtbauanwendungen in der Automobilindustrie.

Contents