

Prozessfenster für das Spannen von Rohrprofilen beim Rotationszugbiegen unter Berücksichtigung der Tribologie

DISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften

von
Dipl.-Ing. Markus Hinkel
geb. am 12.11.1982 in Siegen

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen
Siegen 2013

Gutachter:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietrich Bauer

Tag der mündlichen Prüfung: 09.10.2013

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik

Band 3

Markus Hinkel

**Prozessfenster für das Spannen von Rohrprofilen
beim Rotationszugbiegen unter Berücksichtigung
der Tribologie**

Shaker Verlag
Aachen 2013

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.: Siegen, Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2330-5

ISSN 2191-0030

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 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik (UTS) der Universität Siegen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel, Inhaber des Lehrstuhls für Umformtechnik, für die hilfreiche wissenschaftliche Unterstützung und für die Schaffung der notwendigen Freiräume für die Erstellung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietrich Bauer danke ich für das Übernehmen des Zweitgutachtens sowie den geführten wissenschaftlichen Diskussionen.

Weiterhin danke ich allen Kollegen und Mitarbeitern des Lehrstuhls, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Kersten und Herrn Dipl.-Ing. Christian Mathes, für die geführten fachlichen Diskussionen. Des Weiteren möchte ich mich bei den Studenten bedanken, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Danken möchte ich meinen Eltern, die mich bei meinem gesamten Ausbildungsweg stets unterstützt haben.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Verlobten Sabine ganz besonders bedanken, die mich während des ganzen Vorhabens immer unterstützt hat und somit einen großen Anteil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Netphen, den 09.10.2013

Markus Hinkel

Meiner Schwester

Daniela Hinkel

gewidmet

Zusammenfassung

Das Rotationszugbiegen wird vielfach in der Weiterverarbeitung von Rohrprofilen eingesetzt. Die Tendenzen beim Profilbiegen zeigen einen vermehrten Einsatz von dünnwandigen und eng gebogenen Rohren mit kleinen Biegeradien auf. Die Biegeteile dienen unter anderem als Strukturbauteile in der Automobilbranche, als medienführende Leitungen im Anlagenbau oder als Designelement bei Möbeln. Üblicherweise wird die Einrichtung des Biegeprozesses durch erfahrene Maschineneinrichter vorgenommen. In Ausnahmefällen wird die Einrichtung des Biegeprozesses unterstützt durch die Vorauslegung mit der FE-Simulation oder den Einsatz von Wissensdatenbanken. Diese Methoden haben den Nachteil, dass sie in der Erstellung sehr zeitaufwendig sind. Eine schnelle Vorauslegung des Biegeprozesses kann mit einem analytischen Modell realisiert werden.

Essentiell für das Rotationszugbiegen ist das Spannen des Profils. Das benötigte Biegemoment muss über die Spannbacken auf das Rohr übertragen werden. Wird eine ungeeignete Spannbacke oder Spannkraft ausgewählt, kann der Rohrquerschnitt plastisch im Spannbackenbereich deformiert oder die erforderliche Zugkraft nicht übertragen werden; das Rohr rutscht durch. Das Durchrutschen des Rohrs kann wiederum zur Faltenbildung am Innenbogen führen oder die Oberflächen des Rohrs beschädigen.

Für die Entwicklung einer Methodik zur Auslegung des Spannprozesses ist die Kenntnis der von den Spannbacken zu übertragenden Zugkraft und der übertragbaren Zugkraft erforderlich. Die Berechnung der erforderlichen Zugkraft erfolgt mit einem analytischen Modell. Neben der erforderlichen Zugkraft können mit diesem Modell das Biegemoment und weitere Prozesskräfte als Funktion des Biegewinkels bestimmt werden. Das analytische Modell wurde mithilfe der FE-Simulation und Experimenten verifiziert.

Für die korrekte Auswahl von Spannbackengeometrie, Spannbackenoberfläche und Spannkraft, muss deren Einfluss auf die übertragbare Zugkraft berechnet werden. Für die Quantifizierung der Einflussparameter wird in dieser Arbeit der neue Triboversuch „Rohrdurchziehversuch“ verwendet. Die konkave Geometrie der Spannbacken hat einen erheblichen Einfluss auf die übertragbare Zugkraft. Dieser Einfluss wird als der Geometriefaktor G bezeichnet. Mit dem Geometriefaktor G und der ermittelten Normal- und Reibkraft aus dem Rohrdurchziehversuch können Reibungskoeffizienten der Spannbacken-Tribozone bestimmt werden. Aus der Berechnung der erforderlichen und übertragbaren Zugkraft werden anschließend die Methodik zur Auslegung des Spannprozesses sowie ein Prozessfenster der übertragbaren Zugkraft in Abhängigkeit der Spannkraft abgeleitet.

Abstract

The Rotary Draw Bending is used to bend tubular profiles. The number of bend parts with thin wall thickness and small bending radii is increasing. Bend profiles are used for structure parts in automotive engineering, plant engineering or furniture design. Normally, an experienced machine operator executes the process set up. If this is not sufficient, the process set-up is assisted by numerical Finite Element calculations or knowledge based systems. Nevertheless, all described methods are very time consuming. For a fast process layout, an analytical model suits best.

A high significance has the clamping process. The clamp dies have to transmit the total bending moment to the tube. If the clamping force is too low, the tube slides through the clamp dies. In this case, a wrinkling at the intrados of the tube or a damage of the tube surface is possible. On the other hand, if the clamping force is too high, the tube will deform plastically between the clamping dies.

To develop a method for the design of the clamping process, the required and transmittable tension forces have to be determined. An analytical model calculates the required tension force. The required bending moment and further process forces depending on the bending angle can be determined with the analytical model. The analytical model was verified by FEA and experiments.

To select the right clamping force, clamp die geometry and surface, the knowledge of their influences on the process is essential. In this thesis, the new tribology test “Tube Drawing Test” for RDB is presented, to quantify the influence of set-up parameters on the clamping process. The concave geometry of the clamp die has a great influence on the transmittable tension force. This influence is described by the Geometry-factor “G”. Using the Geometry-factor and the measured normal and friction forces, a determination of a coefficient of friction for the clamp dies is possible.

In addition, the determination of the clamping force, the length of the clamp die and the surface of the clamp dies is possible. Based on the developed method, a process window for the transmittable tension force is shown.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung.....	3
2.1	Rotationszugbiegen von Rohrprofilen.....	3
2.1.1	Prozessbeschreibung, Biegewerkzeuge und Maschinenachsen	5
2.1.2	Begriffe beim Rotationszugbiegen.....	7
2.1.3	Biegeteilmerkmale und Verfahrensgrenzen	9
2.1.4	Berechnung der Dehnungen und Stauchungen	12
2.1.5	Erforderliches Biegemoment.....	14
2.1.6	Rückfederung und Eigenspannung.....	14
2.1.7	Spannen von Rohren.....	16
2.2	Reibung in der Umformtechnik	19
2.2.1	Reibgesetze.....	21
2.2.2	Triboversuche in der Umformtechnik	25
2.2.3	Triboversuche für das RZB	29
2.2.4	Tribologische Prüfung von Schmierstoffen	30
2.3	FE-Simulation des RZB-Prozesses.....	31
2.3.1	Untersuchungen zum RZB	32
2.3.2	Reibung in der FE-Simulation beim RZB.....	32
2.4	Schlussfolgerung aus dem Stand der Forschung	33
3	Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise.....	35
4	Triboversuche für das RZB.....	39
4.1	Tribozonen	39
4.2	Auswahl der Triboversuche	39
4.2.1	Tribozone Spannbacken und Vorschub.....	40
4.2.2	Tribozone Gegenhalter, Faltenglätter und Dorn	40
4.2.3	Tribozone Dornglieder außen.....	41
4.2.4	Tribozone Dornglieder innen	42
4.2.5	Tribozone Biegeform.....	42

4.3	Übersicht Triboversuche beim RZB.....	43
5	Versuchseinrichtung und Untersuchungsmethoden.....	45
5.1	Versuchsanlagen	45
5.1.1	Rotationszugbiegemaschine	45
5.1.2	Universalprüfmaschine.....	46
5.2	Messtechnik	47
5.2.1	Messwerterfassungssystem	47
5.2.2	Oberflächenmessgerät	47
5.2.3	Konturmesssystem.....	50
5.2.4	Härteprüfgerät.....	50
5.2.5	Wegmesssystem	51
5.2.6	Druckmessfolien.....	51
5.3	Versuchsaufbauten.....	53
5.3.1	Zugversuch	53
5.3.2	RZB-Triboprüfstand.....	53
5.3.3	Stauchversuch.....	54
5.3.4	Rohrdurchziehversuch.....	55
5.3.5	Biegeversuch	62
5.4	Versuchshalbzeug	64
5.4.1	Halbzeug.....	64
5.4.2	Werkstoffkennwerte	65
5.4.3	Rauheitskennwerte und ABBOTT-Kurven.....	69
5.5	FE-Simulation.....	70
6	Berechnung der erforderlichen Zugkraft	73
6.1	Modell zur Berechnung des Biegemoments.....	73
6.1.1	Ideelles Biegemoment	77
6.1.2	Prozessabhängige Biegemomentanteile	79
6.2	Verifizierung des analytischen Modells	82
7	Einflussparameter auf die übertragbare Zugkraft	89

7.1	Einfluss der Spannbackengeometrie.....	90
7.1.1	Bestimmung der Flächenpressung.....	90
7.1.2	Einfluss der Spannbackengeometrie auf die übertragbare Zugkraft.....	96
7.1.3	Einfluss der Reibung in Rohrumfangsrichtung.....	101
7.1.4	Nicht-kreisförmige Spannbackengeometrie.....	105
7.2	Bestimmung von Reibungskoeffizienten.....	107
7.3	Spannkraft.....	111
7.3.1	Minimale Spannkraft.....	111
7.3.2	Maximale Spannkraft.....	115
8	Methodik zur Auslegung des Spannprozesses.....	125
8.1	Vorgehensweise.....	126
8.2	Prozessfenster.....	128
9	Zusammenfassung.....	131
10	Literaturverzeichnis.....	135