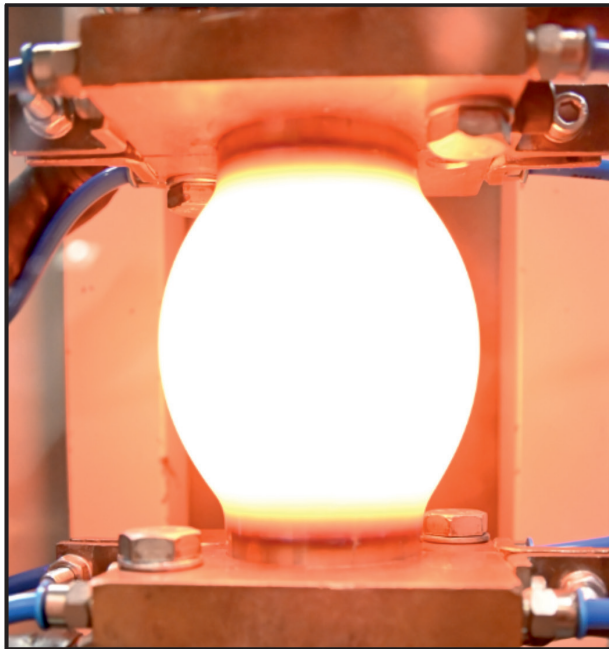


Mike Kamaliev

Isotherme Innenhochdruckumformung geschlossener Profile

Werkstoffcharakterisierung und Prozessumsetzung



**Isotherme Innenhochdruckumformung
geschlossener Profile**
Werkstoffcharakterisierung und Prozessumsetzung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Dr.-Ing.
von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Mike Kamaliev, M. Sc.
aus
Hildesheim

Dortmund, 2023

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Künne

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

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg

Prof. Dr. Moritz Schulze Darup

Tag der mündlichen Prüfung:

31. Mai 2023

Dortmunder Umformtechnik

Band 120

Mike Kamaliev

**Isotherme Innenhochdruckumformung
geschlossener Profile**

Werkstoffcharakterisierung und Prozessumsetzung

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2023

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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9168-7

ISSN 1619-6317

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau der technischen Universität Dortmund. An dieser Stelle möchte ich den Personen danken, die mich während dieser Zeit fachlich sowie persönlich unterstützt haben.

Beim Institutsleiter Prof. A. Erman Tekkaya bedanke ich mich für die Betreuung der Arbeit in Form von anregenden Diskussionen, konstruktiven Hinweisen und der Begutachtung meiner Ausarbeitung. Das mir entgegengebrachte jahrelange Vertrauen, hat diese Promotion erst ermöglicht. Bei Prof. Werner Homberg bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats meiner Dissertation. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Bernd Künne und Prof. Moritz Schulze Darup für die Mitwirkung in der Prüfungskommission als Vorsitzender und Mitberichter.

Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle dem Kollegium des Instituts, welches die gesamte Zeit durch seine offene, hilfsbereite sowie freundliche Art ein positives und motivierendes Arbeitsklima geschaffen hat. Sei es der fachliche Austausch mit wissenschaftlichen Kollegen, die Unterstützung der Techniker bei experimentellen Arbeiten oder die organisatorischen Hilfestellungen der Projektierung bzw. des Sekretariats - in seiner Gesamtheit konnte es mich in herausfordernden Situationen stützen und so stets den Fortschritt meiner Arbeit sichern. Hinzu kommen alle Studierenden, welche mich als studentische Hilfskräfte oder durch ihre studentischen Arbeiten unterstützt haben. Der wissenschaftliche Austausch sowie der aufgebrachte Einsatz haben einen signifikanten Einfluss auf meine Arbeit gehabt.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Bei meinen Eltern für ihre Unterstützung in jeglicher Hinsicht, wodurch meine wissenschaftliche Laufbahn überhaupt ermöglicht wurde. Bei meiner Frau für den Beistand während der letzten Jahre. Besonders in anspruchsvollen Phasen hat sie mich mit ihrer liebevollen und humorvollen Art auf Kurs gehalten.

Dortmund im Mai 2023



Mike Kamaliev

Abstract

Hot forming of sheet materials is a conventional method for producing high-strength and complex structures. The transfer to internal pressure processes opens up new areas of application through the production of hardened hollow structures. Previous research projects focused on the development of the process, whereby the single steps were often aligned to sheet metal forming. Innovations based on the use of tubular semi-finished products have only taken place to a limited extent. Also, the material characterization methods used are often based on standardized procedures such as the tensile and Nakajima test. As a result, the stress and strain conditions as well as the semi-finished products, with their unique characteristics, are not or only partially represented.

Based on this state of the art, the process of Isothermal-High-Temperature-Pneumofforming was developed. In this process, tubes are heated conductively and formed by means of internal pressure. The electrical current is maintained throughout the forming process, keeping the workpiece temperature almost constant. At the same time, with a static internal pressure, a higher forming degree can be achieved, based on thermal softening. After hot forming, the components can optionally be quenched and hardened from the inside by a volume flow of the forming medium.

New material characterization methods have been developed to gain necessary information for numerical process modelling. The *Hot-Tube-Bulge-Test* and the tempered tube tensile test allow for the quantification of isothermal forming limit curves. Furthermore, the *Hot-Tube-Bulge-Test* is suitable for recording flow curves. Compared to the hot tensile test, they achieve at least twice the effective strain and serve as a support for the selection of suitable extrapolation models. For quantifying thermal softening, creep rupture tests proved suitable. Based on the determined material properties, the Isothermal-High-Temperature-Pneumofforming was modelled numerically and validated on the basis of geometric parameters. The influence of the internal pressure, the die geometry and the loading time on the forming process were quantified. Depending on the die geometry and the internal pressure, process windows could be established.

The mechanisms of pressure-assisted forming were transferred to profiles. The pressure-assisted high-temperature profile bending was numerically modelled and experimentally validated. In this process, tubes are subjected to constant internal pressure, inductively heated locally and kinematically bent. With increasing internal pressure, wrinkling at the inner bend can be increasingly minimized. This is due to an induced stress superposition, which minimizes the critical compressive stresses at the inner bend.

Kurzzusammenfassung

Die Warmumformung von Blechwerkstoffen gilt als konventionelles Verfahren zur Herstellung hochfester und komplexer Strukturen. Die Übertragung auf die Innenhochdruckumformung ermöglicht durch die Herstellung von gehärteten Hohlstrukturen neue Anwendungsbereiche. Bisherige Forschungsprojekte fokussieren die Verfahrensentwicklung, wobei die Prozessschritte oft an die Blechumformung angelehnt sind. Innovationen, die auf dem Einsatz von rohrförmigen Halbzeugen beruhen, fanden nur in geringem Umfang statt. Auch die verwendeten Methoden zur Werkstoffcharakterisierung basieren häufig auf standardisierten Verfahren wie dem Zug- und Nakajimaversuch. Dadurch werden die Belastungs- und Formänderungsbedingungen sowie die Halbzeuge mit ihren spezifischen Eigenschaften nicht oder nur teilweise abgebildet.

Ausgehend von diesem Stand wurde das neue Verfahren der Isothermen-Hochtemperatur-Pneumoumformung entwickelt. Bei diesem Prozess werden Rohre konduktiv erwärmt und mittels Innendruck ausgeformt. Der elektrische Strom wird während des gesamten Formgebung aufrechterhalten, sodass die Werkstücktemperatur nahezu konstant bleibt. Durch thermische Entfestigungsmechanismen kann dabei mit zunehmender Prozessdauer eine höhere Formänderung bei gleicher Belastung erzielt werden. Nach der Warmumformung können die Bauteile durch einen Volumenstrom des Umformmediums abgeschreckt und somit gehärtet werden.

Zur Bestimmung erforderlicher Kennwerte für eine Prozessmodellierung wurden neue Methoden zur Werkstoffcharakterisierung entwickelt. Der *Hot-Tube-Bulge-Test* und der *Pressurized-Tube-Tensile-Test* ermöglichen die Aufnahme von Grenzformänderungskurven. Weiterhin eignet sich der *Hot-Tube-Bulge-Test* zur Aufnahme von Fließkurven. Sie erreichen im Vergleich zum Warmzugversuch einen zweifach höheren Umformgrad und dienen als Unterstützung bei der Auswahl geeigneter Extrapolationsmodelle. Die Messung der thermischen Entfestigung erfolgte durch Zeitstandversuche. Ausgehend von den ermittelten Materialkennwerten wurde die Isothermen-Hochtemperatur-Pneumoumformung numerisch modelliert und anhand geometrischer Kennwerte validiert. Der Einfluss des Innendrucks, der Werkzeuggeometrie und der Belastungszeit auf den Umformprozess wurde quantifiziert. In Abhängigkeit von der Werkzeuggeometrie und dem Innendruck wurden werkstoffspezifische Prozessfenster aufgestellt.

Die Mechanismen der Innenhochdruck-Umformung werden auf Profile übertragen. Das *druckunterstützte Hochtemperatur-Profilbiegen* wird numerisch modelliert und experimentell validiert. Bei diesem Verfahren werden Rohre mit konstantem Innendruck beaufschlagt, lokal induktiv erwärmt und kinematisch gebogen. Mit steigendem Innendruck kann die Faltenbildung zunehmend minimiert werden. Dies ist auf eine induzierte Spannungsüberlagerung zurückzuführen, welche die kritischen Druckspannungen am Innenbogen minimiert.

Inhaltsverzeichnis

Vorabveröffentlichungen von Inhalten	V
Formelzeichen und Abkürzungen	VII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Grundlagen thermisch gestützter Umformprozesse.....	3
2.1.1 Elastisches und plastisches Umformverhalten	3
2.1.2 Gefügeänderungen bei der Warmumformung.....	6
2.1.3 Thermische Behandlung metallischer Werkstoffe	9
2.2 Charakterisierungsmethoden bei erhöhten Temperaturen	14
2.2.1 Ermittlung und Einflussfaktoren auf das Fließverhalten.....	14
2.2.2 Bestimmung von Versagenskriterien	16
2.3 Innenhochdruck-Warmumformung von Rohren.....	18
2.3.1 Wirkmedien – Einteilung und Limitierungen	18
2.3.2 Prozessverfahren und -varianten	19
2.3.3 Thermisch basierte Umformung mittels Innendruck	21
2.4 Innenhochdruck-Charakterisierung von Rohren.....	24
2.4.1 Beschreibung der Spannungs-Dehnungszustände.....	24
2.4.2 Bestimmung von Versagenskriterien	26
2.5 Fazit aus dem Stand der Technik	28
3 Zielsetzung	29
4 Prozessauslegung und Randbedingungen	31
4.1 Prozessanforderungen und -gestaltung	31
4.2 Werkstoffauswahl	33
4.2.1 Werkstückwerkstoff	33
4.2.2 Matrizenwerkstoff	34
4.3 Anforderungen an die Werkstoffcharakterisierung	35
4.3.1 Ermittlung temperaturabhängiger Emissionskoeffizienten.....	36
4.3.2 Temperaturverteilung konduktiv erwärmter Rohre.....	37
4.4 Zwischenfazit	38
5 Charakterisierung thermisch-mechanischer Eigenschaften	39
5.1 Ermittlung des Fließverhaltens durch Warmzugversuche	40
5.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung	40
5.1.2 Bestimmung temperaturabhängiger Elastizitätsmoduln.....	41
5.1.3 Bestimmung und Extrapolation von Fließkurven	41
5.1.4 Ableiten notwendiger Drücke für die Innenhochdruck-Umformung.....	43

5.1.5	Charakterisierung der thermischen Entfestigung	44
5.2	Temperaturabhängige Gefügeentwicklung	46
5.3	Untersuchung tribologischer Bedingungen.....	48
5.4	Zwischenfazit	50
6	Hochtemperatur-Werkstoffcharakterisierung von Rohren	51
6.1	Bestimmung von Versagenskriterien	51
6.1.1	Expansionsversuch (HTB-Test) – Versuchsstand und Prozessparameter ..	52
6.1.2	Rohrzugversuch (PTT-Test) – Versuchsstand und Prozessparameter	56
6.1.3	Auswertmethodik der Grenzformänderung	59
6.1.4	Grenzformänderungsschaubilder bei erhöhten Temperaturen	67
6.2	Fließkurvenermittlung mittels Expansionsversuch.....	69
6.2.1	Analytische Beschreibung und Auswertung der Fließkurven.....	69
6.2.2	Experimentelle Regelung der Dehnrate	72
6.2.3	Auswertung und Extrapolation der Fließkurven	76
6.3	Zwischenfazit	79
7	Isotherme Innenhochdruck-Pneumoumformung	81
7.1	Prozessablauf und -parameter	81
7.2	Numerische Prozessanalyse	84
7.2.1	Aufbau des numerischen Modells	84
7.2.2	Analyse des Umformprozesses	86
7.2.3	Einfluss relevanter Prozessparameter auf die Ausformung	90
7.3	Experimentelle Modellvalidierung	96
7.4	Ableiten von Prozessfenstern.....	102
7.5	Einstellung von Produkteigenschaften	104
7.6	Zwischenfazit	106
8	Druckgestütztes-Hochtemperatur-Profilbiegen	109
8.1	Theoretische Prozessauslegung.....	109
8.2	Numerische Prozessanalyse	110
8.2.1	Bestimmung der thermischen Randbedingungen.....	110
8.2.2	Aufbau des Modells.....	112
8.2.3	Numerische Analyse der Umformung.....	114
8.3	Experimentelle Prozessumsetzung.....	117
8.3.1	Validierung des numerischen Modells	117
8.3.2	Maßhaltigkeit der Biegeradien	120
8.4	Ableiten von Prozessfenstern.....	121
8.5	Zwischenfazit	123
9	Zusammenfassung und Ausblick	125
10	Literaturverzeichnis	127

Anhang	139
Anhang A	Extrapolationskoeffizienten 139
Anhang B	MATLAB-Skript für die Radienauswertung 140
Anhang C	Python Skript zur Auswertung der Wandstärkenverläufe 141
Anhang D	Thermische Werkstoffkennwerte 144
Lebenslauf	145

Vorabveröffentlichungen von Inhalten

Publikationen

Die nachfolgend aufgeführten Veröffentlichungen sind im Rahmen dieser Dissertation entstanden und wurden mit Zustimmung des Promotionsausschusses vorab publiziert.

Kamaliev, M., Kolpak, F., Tekkaya, A.E, 2022. Isothermal High Temperature Pneumofforming of Stainless Steel Tubes at Low Pressure Levels. 8th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, Barcelona, Spanien, S. 615–622.

Kamaliev, M., Kolpak, F., Tekkaya, A.E, 2022. Isothermal hot tube material characterization – Forming limits and flow curves of stainless steel tubes at elevated temperatures. Journal of Materials Processing Technology 309, Nr. 117757.

Kamaliev, M., Flesch, J., Grodotzki, J., Tekkaya, A.E, 2023. Analysis of the isothermal high temperature pneumofforming process. International Journal of Material Forming 16, Nr. 44.

Studentische Arbeiten

Die Erkenntnisse der folgendem, von mir definierter und betreuten, studentischem Arbeiten werden ergänzend in dieser Dissertation verwendet:

Adams, T., 2021. Anwendungsorientierte Charakterisierung von Chromstählen für die Warmumformung, Masterarbeit, TU Dortmund

Bosse, G., 2021. Bestimmung der Grenzformänderungsdiagramme nichtrostender Stahlrohre bei erhöhten Temperaturen, Masterarbeit, TU Dortmund

Flesch, J., 2022. Prozessrealisierung der isothermen Warmumformung mittels Innenhochdruck, Masterarbeit, TU Dortmund

Kaup, D. 2022. Definition von Prozessgrenzen bei der spannungsüberlagerten Hochtemperatur Profilumformung, Bachelorarbeit, TU Dortmund

Paßmann, L., 2021. Numerische Modellierung des Temperaturgestützten-Innenhochdruck-Profilumformens, Masterarbeit, TU Dortmund

Schütze, J., 2022. Hot Tube Bulge Test – Beeinflussung von Dehnpfad und Grenzformänderung, Bachelorarbeit, TU Dortmund

Würtz, F., 2020. Modellierung der thermischen Randbedingungen basierend auf der induktiven Erwärmung beim TIP-Prozess, Bachelorarbeit, TU Dortmund

Yu, W., 2022. Determination of strain rate controlled flow curves using the isothermal hot tube bulge test, Masterarbeit, TU Dortmund

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A_{c1}	°C	Austenit Starttemperatur
A_{c3}	°C	Austenit Endtemperatur
b	mm	Breite des Ausgleichsfensters
c_p	J/kgK	Spezifische Wärmekapazität
D_B	mm	Durchmesser der Biegerolle
$D_{0,0}$	mm	Ausgangsdurchmesser des Rohres
E	MPa	Elastizitätsmodul / E-Modul
F	N	Kraft
F_N	N	Normalkraft
F_R	N	Reibkraft
F_{ax}	N	Axial wirkende Kraft
f	mm	Vorschub
h	mm	Höhe
k_f	MPa	Fließspannung
k_{f0}	MPa	Anfangsfließspannung
$k_{s,0}$	MPa	Statische Fließspannung
K_γ	µm	Austenitkorngröße
l	mm	Länge
L_B	mm	Hebelarm beim Profilbiegen
M_B	Nm	Biegemoment
M_s	°C	Martensit-Starttemperatur
M_f	°C	Martensit-Finishtemperatur
n	-	Verfestigungsexponent

Zeichen	Einheit	Beschreibung
p	MPa	Innendruck
p_0	MPa	Innendruck für eine anfängliche Ausformung
r	mm	Radius
r_C	mm	Ausgeformter Eckenradius
r_{spez}	-	Spezifische Radienzunahme
r_0	mm	Expansionsradius
$r_{0,0}$	mm	Ausgangsradius
R_D	mm	Werkzeugradius
$R_{p0,2}$	%	Dehngrenze
s	mm	Blechdicke / Rohrwandstärke
t	s	Zeit
t_σ	s	Belastungszeit bei den Zeitstandversuchen
t_p	s	Zeit unter maximalem Druck
T	°C	Temperatur
\dot{T}	K/s	Abkühlrate
\dot{T}_{krit}	K/s	Kritische Abkühlrate
T_S	°C	Schmelztemperatur
T_U	°C	Umformtemperatur
T_γ	°C	Austenitisierungstemperatur
u	mm	Umfangspfadlänge
v_f	mm/s	Vorschubgeschwindigkeit
$v_{f,R}$	mm/s	Zuggeschwindigkeit im Streifenzugversuch
w	mm	Freie Expansionslänge
x	mm	Zustellung der Biegerolle

Zeichen	Einheit	Beschreibung
α	W/m ² K	Wärmeübergangskoeffizienten
β	-	Dehnungsverhältnis
Δ	-	Differenz
ε	-	Dehnung
ε_{el}	-	Elastischer Dehnungsanteil
ζ	-	Emissionskoeffizient
ζ_G	-	Gesamtemissionskoeffizient
κ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
λ	μm	Wellenlänge
μ	-	Reibkoeffizient
ρ	mm	Krümmungsradius
σ	MPa	Spannung
σ_H	MPa	Hydrostatische Spannung
σ_r	MPa	Radiale Spannungen
σ_t	MPa	Technische Spannung
σ_{vM}	MPa	V. Mises Vergleichsspannung
ν	-	Querkontraktionszahl
φ	-	Umformgrad
$\bar{\varphi}$	-	Vergleichsdehnung nach v. Mises
$\bar{\varphi}_{pl}$	-	Vergleichsumformgrad
$\dot{\varphi}$	s ⁻¹	Dehnrate
$\dot{\bar{\varphi}}$	s ⁻¹	Vergleichsdehnrate

Indizes

Index	Beschreibung
0	Initialwert
$1, 2, 3$	Fortlaufende Variablen
a	Bezogen auf die Außenseite
A	Bezogen auf den Außenbogen beim Profilbiegen
F	Bezogen auf den ferritischen Edelstahl
i	Bezogen auf die Innenseite
I	Bezogen auf den Innenbogen beim Profilbiegen
j, k, l	Fortlaufende Variablen
M	Bezogen auf den martensitischen Edelstahl
max	Maximal
min	Minimal
V	Probenzustand nach dem Versagen
θ	Tangential
ϕ	Meridian
γ	Bezogen auf die Austenitisierung

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
DHP	D ruckgestütztes- H ochtemperatur- P rofilbiegen
DIC	D igital I mage C orrelation
FLC	F orming L imit C urve
Ferrit. ES	F erritischer E delstahl
HTB	H ot- T ube- B ulge (-Test)
Mart. ES	M artensitischer E delstahl
PTT	P ressurized- T ube- T ensile (-Test)