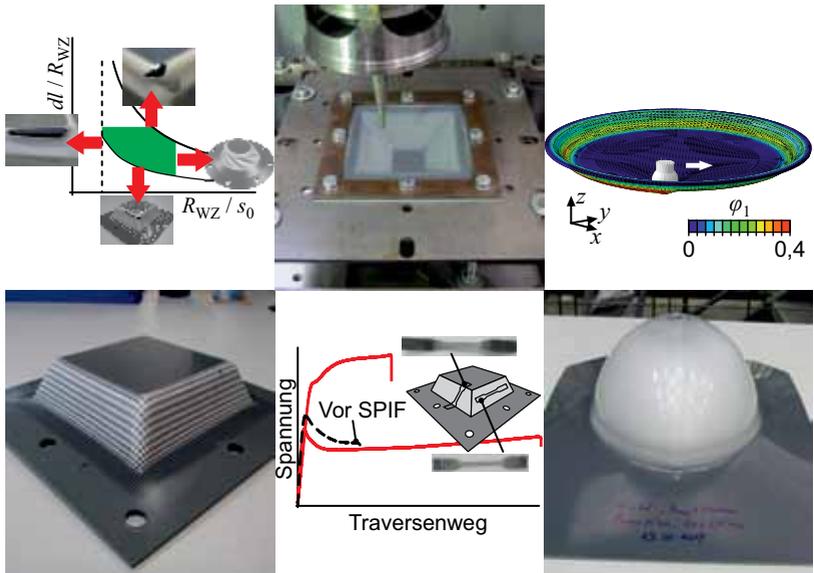


Sammer Alkas Yonan

Inkrementelle Kaltumformung von Thermoplasten



Inkrementelle Kaltumformung von Thermoplasten

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

Dipl.-Ing. Sammer Alkas Yonan

aus

Mosul

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Februar 2018

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer

Dortmund, 2018

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Künne
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Markus Stommel
Tag der mündlichen Prüfung: 27. Februar 2018

Dortmunder Umformtechnik

Band 98

Sammer Alkas Yonan

Inkrementelle Kaltumformung von Thermoplasten

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6026-3

ISSN 1619-6317

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

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der Technischen Universität Dortmund. Ich möchte mich besonders beim Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya, für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit und zur Promotion bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Peter Haupt für die lehrreichen Diskussionen und Unterstützung bei der Werkstoffmodellierung. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr. Celal Soyarslan für die hilfreiche Zusammenarbeit bei der praktischen Umsetzung der Werkstoffmodellierung in der Prozesssimulation bedanken. Bei Prof. Dr. Paulo A. F. Martins möchte ich mich herzlich bedanken für die fachliche Unterstützung während seines Forschungsaufenthalts am IUL.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am IUL, insbesondere bei Dr. Lukas Kwiatkowski, Volker Franzen, Dr. Gerd Sebastiani, Peter Siczekarek und Thai Dang für die fachliche Unterstützung und die konstruktive Kritik. Bei den Kollegen Dirk Hoffmann, Andreas Herdt, Frank Volk und Ulrich Wornalkiewicz und Werner Feurer sowie bei den studentischen Hilfskräften und Studienarbeitern, insbesondere bei Lasse Linnepe, Massi Sadat, Michael Hoos, Marco Rasel sowie Murat Dogan und Dario Goebels, möchte ich mich für die Mitarbeit und Unterstützung im experimentellen Bereich herzlich bedanken.

Schließlich bedanke ich mich herzlich bei meiner Frau Stefanie, meinen Kindern sowie meinen Eltern und Geschwistern, die mich in vielfältiger Weise unterstützt haben.

Dortmund, Juni 2018

Sammer Alkas Yonan

Abstract

Single point incremental forming is a flexible sheet forming process that gradually produces parts by a pin-like tool in small forming zones. The aim of this work is to analyse and develop the single point incremental cold forming process of thermoplastics to contribute to its establishment as an alternative for prototyping and small batch production. To achieve that, fundamental investigations with regard to formability of thermoplastics through the example of PC, PE-HD, and PVC at room temperature as well as experimental and numerical analysis of this forming process are performed.

Specific material characterisation tests show non-linear rate-dependent mechanical behaviour during cold forming of thermoplastics. Stretch loading induces an alignment of molecular chains resulting in higher strength along the loading direction. This leads, unlike metals, to stabilisation and spreading of necked area. At cyclic loading, kinematic hardening is verified.

Experimental investigations of single point incremental forming of thermoplastics reveal part properties, forming limits, and tool forces depending on process parameters. Initial sheet thickness, tool radius, and vertical tool infeed are identified to be the key process parameters. The forming process induces plastic anisotropy in part resulting in higher strength along the part wall. Based on part properties and occurring failure modes, a process window using dimensionless parameters and defining a safe working area is created to allow reliable process design. The fracture forming limit line is verified to be the maximum achievable strain by incremental forming of thermoplastics. This is determined from fracture strains at tensile and bulge tests.

Numerical investigations are performed to analyse the states of stress and strain during the forming process depending on key process parameters. For this purpose, a specially created viscoplastic material model is used. Simulations using a simplified 3D model reveal alternating bending and unbending superimposed by tension and high contact stress during forming.

Multi-stage strategy is applied to control the strain path during incremental forming and hence extend the process limit defined by a maximum wall angle. For the design of multi-stage Processes, the acquired knowledge about plastic anisotropy, safe working area, and forming limits are applied.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Formelzeichen und Abkürzungen	xi
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse	5
2.1 Einteilung der Kunststoffe	5
2.2 Kaltumformung von Thermoplasten	6
2.3 Werkstoffmodelle für die Finite-Elemente-Analyse der Kaltumformung von Thermoplasten	9
2.3.1 Modellierung mit Modellen aus der Metallumformung	9
2.3.2 Modellierung mit eigens für Thermoplaste entwickelten / angepassten viskoplastischen Modellen	11
2.4 Inkrementelle Blechumformung	12
2.4.1 Verfahrensvarianten	13
2.4.2 Prozessparameter	14
2.4.3 Formänderungszustand	15
2.4.4 Spannungszustand	16
2.4.5 Formänderungsgrenzen und Versagensfälle	17
2.4.6 Ursachen für die erhöhten Formänderungsgrenzen bei SPIF	18
2.4.7 Mehrstufige inkrementelle Umformung	20
2.5 Inkrementelle Umformung von Thermoplasten bei Raumtemperatur	22
2.5.1 Bauteileigenschaften	22
2.5.2 Formänderungsgrenzen und Versagensfälle	24
2.6 Fazit	25
3 Zielsetzung	27
4 Charakterisierung der Kaltumformbarkeit von Thermoplasten	29
4.1 Eingesetzte Werkstoffe	29
4.2 Werkstoffcharakterisierung	30
4.2.1 Zugversuch	30
4.2.2 Nakajima-Versuch	37
4.2.3 Zyklisches Werkstoffverhalten	39
4.2.4 Hydraulischer Tiefungsversuch	41
4.2.5 Schichtstauchversuch (Druckversuch)	42
4.2.6 Bleibende Dichteänderung infolge der Umformung	43

4.3	Tiefziehbarkeit von Thermoplasten bei Raumtemperatur	44
4.4	Fazit.....	47
5	Experimentelle Untersuchung der inkrementellen Kaltumformung von Thermoplasten	49
5.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	49
5.1.1	Versuchsstand.....	49
5.1.2	Werkstoffe	49
5.1.3	Versuchsplanung	51
5.1.4	Werkstückgeometrie.....	53
5.1.5	Messwertermittlung.....	53
5.1.6	Versuchsdurchführung	55
5.2	Bauteileigenschaften	55
5.2.1	Formgenauigkeit.....	55
5.2.2	Formänderung an der Bauteiloberfläche.....	58
5.2.3	Werkzeugkraft	64
5.2.4	Versagensfälle	70
5.3	Prozessfenster für die Inkrementelle Umformung von Thermoplasten.....	74
5.4	Fazit.....	78
6	Analyse der plastischen Formänderung und der Formänderungsgrenze bei der inkrementellen Kaltumformung von PVC	79
6.1	Analyse der Formänderungsgrenze bei PVC.....	79
6.2	Ermittlung der Bruchlinie von duktilen Werkstoffen mittels SPIF	81
6.3	Plastische Anisotropie infolge der inkrementellen Kaltumformung	82
6.4	Analytische Beschreibung der Formänderungen und Spannungen bei SPIF	86
6.5	Anwendung von spannungsbasierten Kriterien zur Versagensbeschreibung	88
6.6	Fazit.....	92
7	Numerische Untersuchung der inkrementellen Kaltumformung von Thermoplasten	93
7.1	Werkstoffmodellierung mit Modellen aus der Metallumformung.....	93
7.2	Entwicklung eines viskoplastischen Werkstoffmodells für die SPIF von Thermoplasten.....	95
7.2.1	Konstitutive Gleichungen.....	96
7.2.2	Parameteridentifikation und Validierung mit dem Zugversuch.....	100
7.2.3	Implementierung in <i>Abaqus</i>	104
7.2.4	Validierung der ausgewählten Werkstoffmodelle für zyklische und dreidimensionale Belastungszustände.....	105
7.3	Simulationsmodell für die inkrementelle Umformung	109
7.4	Parameterstudie mittels vereinfachten Simulationsmodells	112

7.4.1 Vereinfachtes Simulationsmodell für die inkrementelle Umformung.....	113
7.4.2 Versuchsplan	113
7.4.3 Spannungszustand	114
7.4.4 Formänderungszustand.....	114
7.4.5 Kontaktfläche	118
7.4.6 Abschätzung der Kontaktfläche mittels vereinfachten Modells	120
7.5 Fazit.....	122
8 Mehrstufige inkrementelle Umformung	125
8.1 Inkrementelle Umformung von Rohr-/Lochflanschen.....	125
8.1.1 Versuchsbeschreibung.....	125
8.1.2 Versuchsauswertung.....	126
8.1.3 Auslegung des mehrstufigen SPIF-Prozesses für Thermoplaste	130
8.2 Erweiterung der Prozessgrenzen durch mehrstufige inkrementelle Umformung	130
8.2.1 Versuchsbeschreibung.....	130
8.2.2 Versuchsauswertung.....	131
8.3 Fazit.....	133
9 Zusammenfassung und Ausblick	135
Literaturverzeichnis	137
Anhang	143
A. Plastizitätstheoretische Grundlagen zur Herleitung der konstitutiven Gleichungen (Gl. (6.8)).....	143
B. Matlab-Code zur Lösung der konstitutiven Gleichungen des viskoplastischen Materialmodells.....	145

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
1	-	Einheitstensor
A_{gt}	-	Gesamtdehnung bei Höchstkraft (Zugversuch)
a	-	Materialparameter
a_{Swift}	MPa	Materialparameter
b	-	Materialparameter
c	-	Materialparameter
D	mm	Durchmesser
D^A	MPa	Kritische Spannung nach Ayada et al. (1987)
D^{CL}	MPa	Kritische Spannung nach Cockcroft und Latham (1968)
D^{krit}	MPa	Kritische Spannung bei spannungsbasierten Versagenskriterien
D^{RT}	MPa	Kritische Spannung nach Rice und Tracey (1969)
$D_{Stempel}$	mm	Stempeldurchmesser (Tiefziehen, Nakajima-Versuch)
d	mm	Durchmesser
dl	mm	Bahnabstand auf Werkstückkontur (meridionale Richtung)
dr	mm	Bahnabstand in radialer Richtung
dz	mm	Bahnabstand in vertikaler Richtung
E	MPa	Elastizitätsmodul
E	-	Dehnungstensor
E^D	-	Deviatorischer Anteil des Dehnungstensors
e	-	Eulersche Zahl
G	MPa	Schubmodul

Zeichen	Einheit	Beschreibung
G_1	MPa	Materialparameter
G_2	MPa	Materialparameter
G_3	MPa	Materialparameter
h	mm	Rillenhöhe
I_y	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment
K	MPa	Kompressionsmodul
k	K	Arrhenius-Konstante
m	-	Geradensteigung
n	-	Verhältnis der Fließspannungen in Druck und Zug
p_{NH}	bar	Niederhalterdruck (Tiefziehen)
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	Streckgrenze
R_{WZ}	mm	Werkzeugradius
r	-	Anisotropie
s	mm	Aktuelle Dicke
S	-	Spannungstensor
S^D	-	Deviatorischer Anteil des Spannungstensors
s_0	mm	Ausgangsdicke
T	°C	Temperatur
T_g	°C	Glasübergangstemperatur
t	s	Zeit
tr E	-	Spur des Dehnungssensors
tr S	-	Spur des Spannungssensors
v	mm/s	Geschwindigkeit
v_{St}	mm/s	Stempelgeschwindigkeit (Tiefziehen)

Zeichen	Einheit	Beschreibung
z_{\max}	mm	Maximale Höhe / Tiefe des inkrementell umgeformten Bauteils
α	-	Quotient der Hauptspannungen σ_1 / σ_2
β	-	Quotient der Hauptformänderungen φ_1 / φ_2
γ	-	Winkel in Bogenmaß
Δ	-	Differenz
ε	%	Technische Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	%/s	Dehnungsgeschwindigkeit
$\dot{\varepsilon}^D$	%/s	Deviatorische Dehnungsgeschwindigkeit
$\dot{\varepsilon}^V$	%/s	Volumetrische Dehnungsgeschwindigkeit
$\varepsilon_{\text{Dicke}}$	%	Dickenabnahme
η	MPa	Materialparameter
κ	mm ⁻¹	Krümmung
λ	-	Streckung (= l / l_0)
μ	-	Reibungskoeffizient
ν	-	Querkontraktionszahl (Poissonzahl)
π	-	Kreiszahl
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	MPa	Spannung
σ_h	MPa	Hydrostatischer Anteil des Spannungstensors
σ_t	MPa	Technische Spannung
σ_V	MPa	Vergleichsspannung nach von Mises
σ_w	MPa	Wahre Spannung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
φ	-	Formänderung, Umformgrad, wahre Dehnung
$\dot{\varphi}$	1/s	Formänderungsgeschwindigkeit
φ_V	-	Vergleichsformänderung nach von Mises
$\varphi_{V,B}$	-	Vergleichsformänderung bei Bruch
Ψ	°	Zargenwinkel
ψ	-	Zargenwinkel in Bogenmaß

Indizes

Index	Beschreibung
0	Anfangswert
max	Maximal
min	Minimal
ov	Overstress (Überspannung)
ref	Bezugsgröße
verstreckt	Probendimension oder –festigkeit im umgeformten Zustand (Zugversuch)
WZ	Werkzeug

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
CAD	Computer Aided Design (rechnerunterstütztes Konstruieren)
CAM	Computer Aided Manufacturing (rechnerunterstützte Fertigung)
CNC	Computerized Numerical Control (rechnergestützte numerische Steuerung)

Abkürzung	Beschreibung
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFL	Fracture Forming Limit Line (Bruch-Grenzformänderungslinie)
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte
PC	Polycarbonat
PVC	Polyvinylchlorid
SPIF	Single Point Incremental Forming (inkrementelle Umformung ohne Gegenwerkzeug)
VP	Viskoplastizität
ZTV	Zeit-Temperatur-Verschiebung