

**Berichte aus dem
Institut für Umformtechnik
der Universität Stuttgart
Herausgeber:
Prof.em.Dr.-Ing.Dr.h.c.K.Lange**

123

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Wolfgang Müller

**Beitrag zur Charakterisierung
von Blechwerkstoffen
unter mehrachsiger
Beanspruchung**

Mit 112 Abbildungen und 12 Tabellen



Springer

Dr.-Ing. Wolfgang Müller

Institut für Umformtechnik

Universität Stuttgart

Dr.-Ing. habil. Klaus Pöhlandt

apl. Professor an der Universität Stuttgart

Institut für Umformtechnik

D 93

ISBN 978-3-540-61438-8

ISBN 978-3-662-01062-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-01062-4

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1996

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Gesamtherstellung: Copydruck GmbH, Heimsheim

SPIN 10542428

62/3020-6543210

GELEITWORT DES HERAUSGEBERS

Die Umformtechnik zeichnet sich durch sehr gute Werkstoffauswertung und hohe Mengenleistung in der Serienfertigung gegenüber anderen Fertigungsverfahren aus, wobei Beibehaltung der Masse, Änderung der Festigkeitseigenschaften während eines Vorgangs und elastische Rückfederung der Werkstücke nach einem Vorgang wesentliche Merkmale sind. Weiter sind die benötigten Kräfte, Arbeiten und Leistungen sehr viel größer als z.B. bei spanenden Verfahren. Die sichere Beherrschung eines Verfahrens in der industriellen Fertigung und die zunehmende Forderung nach Vermeidung bzw. Minimierung spanender Nacharbeit erzwingen die geschlossene Betrachtung des Systems "Umformende Fertigung" unter zentraler Berücksichtigung plastizitätstheoretischer, werkstoffkundlicher und tribologischer Grundlagen.

Das Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart stellt entsprechend Forschung und Entwicklung zum einen auf die Erarbeitung von Grundlagenwissen in diesen Bereichen ab, zum anderen untersucht und entwickelt es Verfahren unter Anwendung spezieller Meßtechniken mit dem Ziel einer genauen quantitativen Ermittlung des Einflusses der Parameter von Vorgang, Werkstoff, Werkzeug und Maschine. Die Behandlung von Problemen des Maschinenverhaltens, der Maschinenkonstruktion sowie der Werkzeugauslegung und -beanspruchung, der Auswahl hochbeanspruchbarer, verschleißfester Werkzeugbaustoffe und schließlich der Tribologie gehört entsprechend ebenfalls zum Arbeitsgebiet, das durch die Erfassung organisatorischer und betriebswirtschaftlicher Fragen abgerundet wird.

Im Rahmen der "Berichte aus dem Institut für Umformtechnik" erscheinen in zwangloser Folge jährlich mehrere Bände, in denen über einzelne Themen ausführlich berichtet wird. Dabei handelt es sich vornehmlich um Abschlußberichte von Forschungsvorhaben, Dissertationen, aber gelegentlich auch um andere Texte. Diese Berichte sollen den in der Praxis stehenden Ingenieuren und Wissenschaftlern zur Weiterbildung dienen und eine Hilfe bei der Lösung umformtechnischer Aufgaben sein. Für die Studieren-

den bieten sie die Möglichkeit zur Vertiefung der Kenntnisse.
Die seit zwei Jahrzehnten bewährte freundschaftliche Zusammen-
arbeit mit dem Springer-Verlag sehe ich als beste Voraussetzung
für das Gelingen dieses Vorhabens an.

Kurt Lange

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. K. Pöhlandt möchte ich sehr herzlich für das mir entgegengebrachte Vertrauen und seine stets hilfsbereite Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit danken.

Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. H. J. Bunge sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Dietmann danke ich für die freundliche Übernahme der Mitberichte, für die eingehende Durchsicht dieser Arbeit und die sich daraus ergebenden wertvollen Hinweise.

Mein Dank gilt weiterhin meinem Lehrer Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. K. Lange für die Hinführung zur Umformtechnik und für interessante fachliche Diskussionen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Siegert, dem Direktor des Instituts für Umformtechnik der Universität Stuttgart, bin ich für die Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit zu Dank verpflichtet.

Mein besonderer Dank gilt meinen Institutskollegen N. Becker, K.-J. Fann und A. Ruf, mit denen ich in allen Phasen der Arbeit sehr kreativ diskutieren konnte.

Ferner möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am IfU-Stuttgart, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, herzlich bedanken.

Nicht zuletzt möchte ich meinen geschätzten Eltern sowie meiner lieben Frau für deren ausdauernde Hilfe und Geduld bei der Erstellung dieser Arbeit ein herzliches Vergelt's Gott sagen.

Laichingen, im April 1996

Wolfgang Müller

	Inhaltsverzeichnis	9
	Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes	12
0	Zusammenfassung	15
1	Einleitung	17
2	Stand der Kenntnisse	18
2.1	Anisotropie-Kennwerte	19
2.2	Verfestigungsexponent	22
2.3	Einflußgrößen bei der Blechherstellung	22
2.4	Einflußgrößen bei der Ermittlung von Kennwerten	23
2.5	Weitere Einflußgrößen	24
2.6	Modell- oder Bauteilversuche	24
2.7	Grenzformänderungsschaubild	25
2.8	Mehrachsiges Werkstoffprüfung	26
2.9	Zusammenfassende Bewertung	27
3	Aufgabenstellung und Zielsetzung	30
4	Werkstoffauswahl und Standardversuche	32
4.1	Untersuchte Werkstoffe	32
4.1.1	Stahlwerkstoffe	32
4.1.2	Cu-Zn-Legierung	34
4.1.3	Aluminiumlegierungen	34
4.2	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	36
4.2.1	Flachzugversuch	36
4.2.1.1	Mechanische Kennwerte	39
4.2.1.2	Fließkurven	39
4.2.1.3	Verfestigungsexponenten	40
4.2.1.4	Anisotropie-Kennwerte	43
4.2.2	Hydraulischer Tiefungsversuch	49
4.2.2.1	Versuchsbeschreibung	49
4.2.2.2	Fließkurven aus dem hydraulischen Tiefungsversuch	52
4.2.3	Ericksen-Tiefungsversuch	52
4.2.4	Grenzformänderungsschaubild	53
4.2.4.1	Versuchsbeschreibung	53
4.2.4.2	Schaubilder	55
5	Weiterführende Untersuchungen	57
5.1	Hydraulischer Tiefungsversuch	57
5.1.1	Formänderungen bei kreisrunden Ziehringen	57
5.1.1.1	Numerische Berechnung der Dickenformänderung	57
5.1.1.2	Experimentelle Bestimmung der Dickenformänderung	58

5.1.2	Formänderungen bei elliptischen Ziehringen	60
5.1.2.1	Numerische Berechnung der Dickenformänderun	61
5.1.2.2	Experimentelle Bestimmung der Dickenformänderung	61
5.2	Näpfchenziehversuch	66
5.2.1	Kennwerte	69
5.2.2	Formänderungen und Maßhaltigkeit	70
5.3	Modifiziertes Grenzformänderungsschaubild	78
5.3.1	Vorstellung des Verfahrens	78
5.3.2	Schaubilder	79
5.4	Tiefzug eines quadratischen Napfes	82
5.4.1	Versuchsbeschreibung	82
5.4.2	Ergebnisse	83
5.5	Texturuntersuchungen	87
5.5.1	Grundlagen	87
5.5.2	Experimentelle Bestimmung der Polfiguren	90
5.5.3	Berechnung der Orientierungsverteilungsfunktion	92
5.5.4	Ermittlung des r-Wert-Verlaufes aus Texturuntersuchungen	93
6	Neuausgelegter Kreuzzugversuch	95
6.1	Fließortkurven	95
6.1.1	Einführung und Grundlagen	95
6.1.2	Verfahren zur Aufnahme von Fließortkurven	100
6.2	Optimierung der Probengeometrie	103
6.2.1	Voraussetzungen für eine optimale Geometrie	103
6.2.2	Finite-Element-Berechnung	104
6.2.2.1	Grundlagen	105
6.2.2.2	Variation von Geometrieparametern	107
6.2.2.3	Berechnete Kreuzzugprobe	110
6.2.3	Spannungsoptische Überprüfung der Probengeometrie	114
6.3	Versuchsbeschreibung	116
6.3.1	Die CNC-Streckziehanlage	116
6.3.2	Notwendige Versuchssperipherie	117
6.3.2.1	Probeneinspannung	117
6.3.2.2	Kraftmessung	119
6.4	Experimentelle Bestimmung von Fließortkurven	119
6.4.1	Ermittlung von Anfangsfließortkurven	119
6.4.1.1	Definition und Bestimmung des Fließbeginns	120
6.4.1.2	Versuchsdurchführung	123
6.4.1.3	Vorversuche	126
6.4.1.4	Festlegung des äquivalenten Probenquerschnitts	129
6.4.1.5	Ermittlung der Fließspannungen	133
6.4.1.6	Darstellung durch eine Ellipsengleichung	135

6.4.2	Ermittlung von Folgefließortkurven	136
6.4.2.1	Einbringung von Vordehnungen	136
6.4.2.2	Bestimmung des Fließbeginns nach vorausgegangenen Dehnungen	138
7	Ergebnisse aus dem Kreuzzugversuch	139
7.1	Anfangsfließortkurven	139
7.1.1	Vergleich mit hypothetischen Fließortkurven	139
7.1.1.1	Stahlwerkstoffe	139
7.1.1.2	CuZn37 w	141
7.1.1.3	Aluminiumlegierungen	143
7.1.2	Qualitativer Vergleich mit der neuen Hill'schen Formulierung	145
7.1.3	Vergleich mit Fließortkurven aus der Texturanalyse	147
7.2	Folgefließortkurven bei Aluminiumwerkstoffen	149
7.2.1	AlMg5 w	149
7.2.2	AlMgSi1 ka/II	150
7.2.3	AlMgSi1 ka/I	150
8	Diskussion der Ergebnisse	153
8.1	Zusammenfassender Vergleich der auf verschiedenen Wegen ermittelten Fließortkurven	153
8.2	Fließortkurven im zweiten bis vierten Quadranten	154
8.3	Bezug der Fließortkurven zum r-Wert und zur Tiefzieheignung	156
9	Ausblick	158
	Schrifttum	160
	Anhang	171

Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes

A_g	%	Gleichmaßdehnung
α	Grad	Winkelintervall
β	-	Ziehverhältnis
β_{0max}	-	Grenzziehverhältnis
C	N/mm^2	Werkstoffkennwert
D	mm	Blech- bzw. Rondendurchmesser
d_0, d_{St}	mm	Stempeldurchmesser
d_M	mm	Matrizen- bzw. Ziehringdurchmesser
ε	%	Dehnung
F	N	Kraft
h	mm	Napfhöhe
HV	N/mm^2	Vickers-Härte
φ	-	Umformgrad
φ_b, φ_s	-	Umformgrad in Breiten- bzw. Dickenrichtung
$\dot{\varphi}$	s^{-1}	Umformgeschwindigkeit
k_f	N/mm^2	Fließspannung, Formänderungsfestigkeit
L_0	mm	Einschnürlänge
n	-	Verfestigungsexponent
r	-	senkrechte Anisotropie
Δr	-	ebene Anisotropie
R_1	mm	Kerbradius
R_2	mm	Flanschradius
R_{eH}	N/mm^2	obere Streckgrenze
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
R_p	N/mm^2	Dehngrenze bei nichtproportionaler Dehnung
r_z, r_M	mm	Ziehring- bzw. Matrizenradius
s	mm	Blechdicke
S	mm^2	Querschnittsfläche
σ	N/mm^2	Normalspannung
τ	N/mm^2	Schubspannung
T	%	Tiefziehsicherheit
u_z	mm	Ziehspalt
u_z/s_0	-	relativer Ziehspalt
Z	%	Zipfligkeit, relative Zipfelhöhe

Abkürzungen:

/I	Modifikation I
/II	Modifikation II
EPDAN	Elastisch-Plastische-Deformations-Analyse
FOK	Fließortkurve
GEH	Gestaltänderungsenergiehypothese
ka	kaltausgehärtet
kfz	kubisch-flächenzentriert
M100	unlegiertes Mineralöl
ODF	Orientierungsverteilungsfunktion
w	weichgeglüht
WR	Walzrichtung

Indizes:

BR	Bodenreiß...
m	Mittelwert, mittlere...
max	Maximal...
min	Minimal...
N	Niederhalter...
St	Stempel...
v	Vergleichs...
t	tangential...
x	in x-Richtung
y	in y-Richtung
z	Zieh..., Zug...
0	Anfangsabmessungen, Null Grad zur Walzrichtung
1	Endabmessungen
1,2,3	Hauptrichtungen

