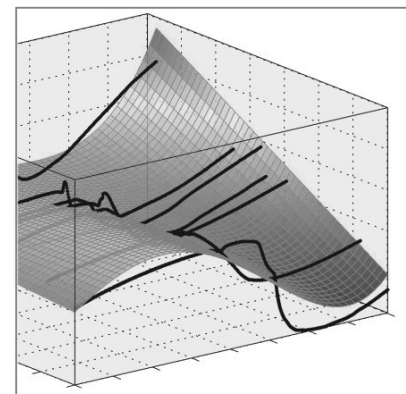
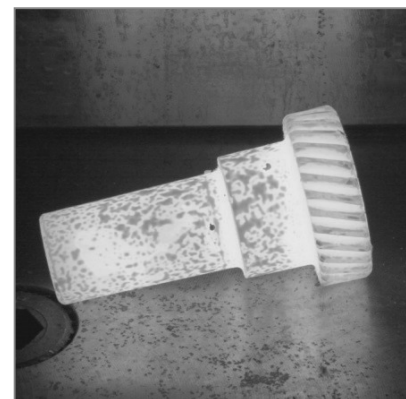
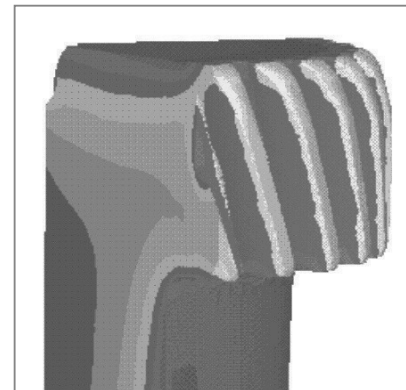


Dirk Odening

Werkstoffeinfluss auf das Prozess- und Schrumpfungsverhalten von Schmiedestählen beim Präzisionsschmieden

Berichte aus dem IFUM · Band 4/2013
Herausgeber: Bernd-Arno Behrens



Berichte aus dem IFUM

Wissenschaftliche Schriftenreihe des
Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen
der Leibniz Universität Hannover

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Zugleich: Dissertation,
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das
des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in
Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen
Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© TEWISS-Technik und Wissen GmbH, 2013
An der Universität 2 ♦ 30823 Garbsen
Tel: 0511-762-19434 ♦ Fax: 0511-762-18037
www.tewiss.uni-hannover.de ♦ mail: info@pzh-verlag.de

ISBN 978-3-944586-20-5
ISSN 1613-9704

Verlag: TEWISS-Technik und Wissen GmbH

Herstellung: Digital Print, Hannover
Printed in Germany

**Werkstoffeinfluss auf das
Prozess- und Schrumpungsverhalten
von Schmiedestählen beim Präzisionsschmieden**

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Dirk Odening
geboren am 29.01.1978 in Gehrden

2013

Referent: Professor Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Korreferent: Professor Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Friedrich-Wilhelm Bach
Institut für Werkstoffkunde (IW)

Vorsitzender: Professor Dr.-Ing. Gerhard Poll
Institut für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT)

Tag der Promotion: 16.08.2013

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens, dem Leiter des Instituts, danke ich herzlich für die für die wohlwollende Unterstützung und die vertrauensvolle Einräumung aller wissenschaftlichen Freiheiten bei der Durchführung dieser Arbeit. Mein weiterer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Friedrich-Wilhelm Bach für die Übernahme der Korreferats und Professor Dr.-Ing. Gerhard Poll für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungskommission.

Teile der vorgestellten Inhalte wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ erarbeitet. Ich möchte mich bei allen wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern dieses SFB für die gute Zusammenarbeit bedanken. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Reimche und Frau Vera Böhm, Herrn Dr. Nürnberger und Herrn Thorsten Gretzki vom Institut für Werkstoffkunde sowie Herrn Rüdiger Gillhaus vom Institut für Mess- und Regelungstechnik. Der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) danke ich für die finanzielle Förderung meines Projekts und des gesamten Sonderforschungsbereichs.

Ich danke allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für die gute Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Mein besonderer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen aus der Abteilung Massivumformung, die immer ein offenes Ohr und eine freie Hand für mich hatten. Ohne die Unterstützung insbesondere durch das technische Personal wäre mir die Durchführung und Auswertung der umfangreichen Schmiedeversuche und Messreihen nicht möglich gewesen. Der erlebte kollegiale Zusammenhalt bleibt mir unvergessen. Mein weiterer Dank gilt den Kollegen aus den Abteilungen CA-Techniken und Numerische Methoden für Ihre tatkräftige Unterstützung bei der geometrischen Matrizenkorrektur und der Materialcharakterisierung. Den Herren Thiele und Ernst von der trimetric 3D Service GmbH danke ich sehr für die optische Messung meiner Schmiedebauteile. Für die kritische Durchsicht dieser Arbeit möchte ich mich besonders bei Insa Pfeiffer, Tobias Vieregge und Ingo Lüken bedanken. Eure konstruktiven Anregungen haben mich vor Betriebsblindheit bewahrt, ihr wart mir eine große Hilfe.

Mein größter Dank gebührt meiner Familie: meinen Eltern, die durch ihren Rückhalt und ihre jahrelange Unterstützung die Voraussetzung für diese Arbeit geschaffen haben, meinem Bruder Jens, der mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand und nicht zuletzt meiner Verlobten Najmeh, die mit ihrer Geduld und moralischen Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Ohne Euch wäre die Ausarbeitung dieser Dissertation für mich nicht möglich gewesen. Ich danke Euch sehr.

Hannover, im August 2013

Dirk Odening

„Every moment is a moment of research ... stay curious“
(James Acheson, February 27, 2006)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand von Wissenschaft und Technik.....	4
2.1	Einführung in die Umformtechnik und das Gesenkschmieden.....	4
2.1.1	Werkstoffspektrum	7
2.1.2	Fertigungsgenauigkeit	9
2.1.3	Wirtschaftliche Bedeutung	10
2.2	Fertigungsverfahren zur Verzahnungsherstellung.....	12
2.2.1	Konventionelle Prozesskette zur Herstellung verzahnter Bauteile ...	13
2.2.2	Alternative Fertigungsverfahren zur Verzahnungsherstellung	16
2.2.2.1	Urformende Fertigungsverfahren	16
2.2.2.2	Umformende Fertigungsverfahren.....	17
2.3	Präzisionsschmieden von Laufverzahnungen	20
2.3.1	Historische Entwicklung des Verzahnungsschmiedens.....	20
2.3.2	Untersuchungen zum Präzisionsschmieden von Verzahnungen	23
2.3.2.1	Prozess- und Werkzeuggestaltung.....	24
2.3.2.2	Schmieden im geschlossenen Gesenk	25
2.3.2.3	Auswerfen verzahnter Schmiedebauteile	26
2.3.2.4	Maßhaltigkeit von Präzisionsschmiedebauteilen.....	27
2.3.2.5	Werkstoffeinfluss auf die Maßhaltigkeit	33
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	38
4	Erweiterung des Bauteilspektrums präzisionsgeschmiedeter Bauteile.....	41
4.1	Schmiedegerechte Bauteilgestaltung	43
4.2	Rechnerunterstützte Prozessauslegung und Stadienplanung	44
4.3	Auswahl der Umformmaschine.....	47
4.4	Auslegung und Konstruktion der Schmiedewerkzeuge	48
4.5	Bewertung des Schmiedeprozesses	53
5	Analyse des werkstoffspezifischen Prozessverhaltens.....	56
5.1	Auswahl und Charakterisierung der Versuchswerkstoffe	56
5.2	Durchführung der Schmiedeversuche	57

5.2.1	Prozessanalyse	58
5.2.1.1	Analyse der Video- und Thermographieaufnahmen	58
5.2.1.2	Analyse der Umformkräfte	59
5.2.2	Bauteilanalyse	61
5.2.2.1	Vergleich der Kopf- und Fußkreisdurchmesser	61
5.2.2.2	Vergleich der Zahnkonturen.....	64
5.2.2.3	Vergleich des Formfüllungsverhaltens	66
5.3	Bewertung und Deutung der Ergebnisse	72
6	Analyse der thermophysikalischen Werkstoffeigenschaften	74
6.1	Auswahl und Charakterisierung der Versuchswerkstoffe	74
6.2	Untersuchungen zur thermophysikalischen Werkstoffcharakterisierung	77
6.2.1	Analyse der Wärmeausdehnung	78
6.2.1.1	Auswahl der Messmethode und -apparatur	78
6.2.1.2	Aufnahme und Auswertung der Kennwerte	79
6.2.1.3	Vergleich mit vorliegenden Materialkennwerten	81
6.2.2	Analyse der Wärmekapazität	83
6.2.2.1	Auswahl der Messmethode und -apparatur	84
6.2.2.2	Aufnahme und Auswertung der Kennwerte	84
6.2.2.3	Vergleich mit vorliegenden Materialkennwerten	86
6.2.3	Analyse der Wärmeleitfähigkeit.....	88
6.2.3.1	Auswahl der Messmethode und -apparatur	89
6.2.3.2	Aufnahme und Auswertung der Kennwerte	90
6.2.3.3	Vergleich mit vorliegenden Materialkennwerten	93
6.3	Bewertung und Deutung der Ergebnisse	95
7	Entwicklung eines analytischen Materialmodells.....	101
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	107
9	Literaturverzeichnis	111
9.1	Patentverzeichnis.....	118
9.2	Normenverzeichnis	120
10	Anhang	123

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
A	-	werkstoff- und phasenabhängige Materialkonstante
A	mm ²	Querschnittsfläche
A_{Fe}	-	relative Atommasse Eisen
A_i	-	relative Atommasse weiterer Legierungselemente
a	mm ² /s	Temperaturleitfähigkeit
α	1/K; 1/°C	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient ¹⁾
α_m	1/K; 1/°C	mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient ¹⁾
$\alpha_{x,y,z}$	1/K; 1/°C	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient in x-,y-,z-Richtung ¹⁾
α_v	°	Profilwinkel der Verzahnungskontur
B	-	werkstoff- und phasenabhängige Materialkonstante
b_{ist}	mm	formgefüllte Zahnbreite
b_{ref}	mm	maximal formgefüllte Zahnbreite (Referenz)
β	°	Schrägungswinkel
C	-	werkstoff- und phasenabhängige Materialkonstante
$C_{\ddot{A}}$	-	Kohlenstoffäquivalent nach RUHFUS und PFLAUME
c_i	%	Massenprozent der Legierungselemente
c_m	J/(mol K)	molare Wärmekapazität
c_p	J/(kg K); J/(kg °C)	spezifische Wärmekapazität ¹⁾
$c_{v,m}$	J/(kg K)	isobare molare Wärmekapazität
$c_{v,m}$	J/(mol K)	isochore molare Wärmekapazität
D	-	werkstoff- und phasenabhängige Materialkonstante
d_{ist}	mm	formgefüllter Schaftdurchmesser (Ist)
$d_{k,f-Bauteil}$	mm	Kopf-/Fußkreisdurchmesser Bauteil
$d_{k,f-Matrize}$	mm	Kopf-/Fußkreisdurchmesser Matrize
d_{korr}	mm	korrigierter Durchmesser
d_{ref}	mm	maximal formgefüllter Schaftdurchmesser (Referenz)
d_{soll}	mm	vorgegebener Durchmesser (Soll)

$\Delta_{Schrumpvf}$	%	relative Schrumpfung
Δl_{ϑ}	%	temperaturbestimmtes Schwindmaß
$\Delta_{k,f}$	-	Korrekturfaktor Kopf-/Fußkreisdurchmesser
$\Delta d_{k,f-rel}$	%	relative Schrumpfung Kopf-/Fußkreisdurchmesser
δ	mm	Normalverschiebung des Verzahnungsprofils
E	-	werkstoff- und phasenabhängige Materialkonstante
F_{Umform}	[kN]	Umformkraft
FF_{Schaft}	%	relative Formfüllung Schaft
FF_{Zahn}	%	relative Formfüllung Zahn
λ	W/(m K); W/(m °C)	Wärmeleitfähigkeit ¹⁾
$K_{T-\lambda}$	-	temperatur- und werkstoffabhängige Korrekturfunktion
m	kg	Stoffmasse
mol	-	Stoffmenge
ψ	-	Atommassenverhältnis
Q	J	Wärmeenergie
ρ	kg/m ³	Dichte
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
ΔR	mm	Maßabweichung
R_{soll}	mm	vorgegebene radiale Bauteilabmessung
R_{ist}	mm	realisierte radiale Bauteilabmessung
Δr	mm	radialer Schrumpfungsbetrag
Δs	mm	tangentialer Schrumpfungsbetrag
T	°C	Temperatur
$T_{Rohteil}$	°C	Rohteiltemperatur
T_{RT}	°C	Raumtemperatur
$T_{Zwischenform}$	°C	Zwischenformtemperatur
ϑ	K; °C	Temperaturdifferenz ¹⁾
ψ	-	Atommassenverhältnis

¹⁾ Zur Übertragung auf die üblicherweise in °C angegebenen Umformtemperaturen erfolgt die Angabe der temperaturabhängigen Kenngrößen im Rahmen dieser Arbeit abweichend von der allgemein gültigen Definition in Abhängigkeit von der Temperatur in °C.

Chemische Symbole

Zeichen	Bezeichnung
<i>Al</i>	chemisches Element Aluminium
<i>C</i>	chemisches Element Kohlenstoff
<i>Cr</i>	chemisches Element Chrom
<i>Fe</i>	chemisches Element Eisen
<i>Mn</i>	chemisches Element Mangan
<i>Mo</i>	chemisches Element Molybdän
<i>Ni</i>	chemisches Element Nickel
<i>Si</i>	chemisches Element Silizium
<i>Ti</i>	chemisches Element Titan
<i>V</i>	chemisches Element Vanadium
<i>W</i>	chemisches Element Wolfram

Abkürzungen

A ₁ -Temperatur	Umwandlungstemperatur Perlit <-> Austenit
A ₃ -Temperatur	Umwandlungstemperatur α - bzw. β -Eisen <-> γ -Eisen
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DMS	Dehnungsmessstreifen
DSC	Dynamische Differenz-Kalorimetrie
FEM	Finite-Elemente Methode
IFUM	Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
IMR	Institut für Mess- und Regelungstechnik
IT	ISO-Toleranzsystem nach DIN EN ISO 286-1/-2
IW	Institut für Werkstoffkunde
LFA	Laser-Flash-Apparatur
NE-Metall	Nichteisenmetall
NKW	Nutzkraftwagen
PKW	Personenkraftwagen
SFB	Sonderforschungsbereich
VDEh	Verein Deutscher Eisenhüttenleute
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.

Kurzfassung

Präzisionsschmieden ist ein umformtechnisches Fertigungsverfahren zur endkonturnahen Fertigung hochbelastbarer Bauteile. Die hohe Material- und Energieeffizienz dieser Fertigungstechnologie stellen insbesondere in Zeiten der globalen Energie- und Rohstoffverknappung einen wesentlichen Wettbewerbsvorteil gegenüber konventionellen Fertigungsrouten mit vorwiegend spanender Formgebung dar. Nach der Umformung mit direkter Wärmebehandlung aus der Schmiedewärme ist oftmals nur noch eine abschließende Hartfeinbearbeitung definierter Funktionsflächen mit minimalen Spanvolumina erforderlich. Bereits während der Umformung der auf bis zu 1250 °C erwärmten Rohteile ist eine prozess- und geometriebedingt inhomogene Auskühlung des Schmiedebauteils festzustellen. Die hieraus resultierende inhomogene Temperaturverteilung im Schmiedebauteil zieht neben lokal ungleichmäßigen Umformbedingungen ein ungleichmäßiges Schrumpfungsverhalten der ausgeformten Bauteilgeometrie nach sich. Zur Sicherstellung der geforderten Fertigungstoleranzen ist dieses Prozessverhalten durch eine geometrische Korrektur der formgebenden Matrize zu kompensieren. In verschiedenen Forschungsarbeiten wurde neben der Bauteilgeometrie und der gewählten Rohteiltemperatur auch der eingesetzte Werkstückwerkstoff als Einflussgröße auf das Schmiedeergebnis und die Abmaße präzisionsgeschmiedeter Bauteile identifiziert. Um das werkstoffabhängige Schrumpfungsverhalten warm umgeformter Bauteile bereits bei der Auslegung und Korrektur der Schmiedewerkzeuge einschätzen und kompensieren zu können, werden im Rahmen dieser Arbeit die zugrundeliegenden thermophysikalischen Eigenschaften Wärmeausdehnung, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit verschiedener Schmiedestähle für den schmiederelevanten Temperaturbereich eingehend untersucht und charakterisiert. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt durch Identifikation phänomenologischer Zusammenhänge die Entwicklung eines Materialmodells zur analytischen Beschreibung des temperatur- und legierungsabhängigen Prozess- und Schrumpfungsverhaltens. Die genaue Kenntnis über das zu erwartende Materialverhalten im Schmiedeprozess unterstützt den Konstrukteur bei der prozess- und werkstoffangepassten Werkzeugentwicklung und -konstruktion und soll zukünftig zu einer deutlichen Verkürzung der zeit- und kostenintensiven Entwicklungs- und Erprobungsphase von Präzisionsschmiedeprozessen beitragen.

Schlagworte: Präzisionsschmieden, Werkzeugkorrektur, Wärmeausdehnung, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit

Abstract

Precision forging is an innovative manufacturing process for the near-net-shape production of high performance components. Especially in times of global shortages of raw materials and energy the high material and energy efficiency of precision forging represent a competitive advantage over conventional manufacturing routes based on shape-cutting technologies. Subsequent to the forming and integrated heat treatment process only a final hard-finishing of specific functional surfaces with minimum cutting volumes is necessary. The forming takes place at process temperatures of up to 1250 °C. Already in the process of forging a process- and geometry-related inhomogeneous cooling of the part can be observed. Apart from local inhomogeneous forming conditions the temperature distribution affects the subsequent shrinkage of the hot forged parts. To meet the high accuracy demands of precision forged parts this process behavior has to be considered and compensated by an adapted tool design. Forging tests have shown that there is a correlation between the used materials and the process temperature on the one hand and the resulting component size after cool down on the other hand. In the context of this work the thermo-physical properties thermal expansion, thermal capacity and thermal conductivity of typical forging steels have been investigated fundamentally. Through the identification of phenomenological correlations an analytical material model has been established to enable a material-adapted process and tool design. In future, the obtained results will contribute to a reduction of the time- and cost-intensive development and trialing phases by support the designers and constructors of precision forging tools.

Keywords: precision forging, tool design, heat expansion, heat capacity, heat conductivity