



Andreas Schneidt

**Mehrphasige phänomenologische
sowie mehrskalige mikroskopische
Modellierung von Phasenumwandlungen
in einem Hybridumformprozess**

**Mehrphasige phänomenologische sowie mehrskalige
mikroskopische Modellierung
von Phasenumwandlungen in einem Hybridumformprozess**

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Andreas Schneidt, M.Sc.
geboren am 08.03.78 in Karaganda, Kasachstan

Tag der Kolloquiums: 25. Mai 2016

Referenten: Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Mahnken
Korreferent: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Thomas Antretter
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Böhlke

Schriften des Lehrstuhls für Technische Mechanik
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rolf Mahnken, M.Sc.

P-2017-1

Andreas Schneidt

**Mehrphasige phänomenologische sowie mehrskalige
mikroskopische Modellierung von Phasen-
umwandlungen in einem Hybridumformprozess**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2016

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Rolf Mahnken, M.Sc.
Lehrstuhl für Technische Mechanik
Warburger Straße 100
33098 Paderborn
Tel.: +(49) 5251 602283

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5671-6
ISSN 1867-1675

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

Abstract

The main objective of this thesis is the numerical simulation of hybrid-forming processes in steel production with particular focus on phase transformation. In order to display the specific processes two methods of material modeling, a macroscopic-phenomenological and micromechanical multiscale approach are formulated. The thermodynamically consistent phenomenological multiphase model combines a variety of features such as time- and temperature-dependent phase transformation, austenitisation, transformation plasticity, volume change, temperature- and microstructure-dependent elastoplasticity and viscoplasticity. The FEM simulation of the hybrid-forming process is based on numerical implementation and exhibits good agreement with the structure distribution in the real shaft. Furthermore, it illustrates the possibilities for prediction of the phase distribution by varying the process parameters. A physically motivated, thermodynamic-consistent multiscale model for N-grains and n-bainite variants is developed in the second step, which combines the elasto-viscoplastic behavior with a phase transformation in a polycrystalline structure. This model is capable of capturing both TRIP effects, the contribution due to load-based orientation of bainite-variants ("Magee effect") and plastic accommodation of the new phase ("Greenwood-Johnson effect"). Finally, these phenomena are evaluated quantitatively for different loads.

Zusammenfassung

Die zentrale Zielsetzung der hier vorliegenden Dissertation ist die numerische Simulation von Hybridumformungsprozessen unter besonderer Berücksichtigung der Phasenumwandlung. Zur Abbildung der spezifischen Vorgänge in diesem Prozess werden zwei Modellierungsstrategien, ein makroskopisch-phänomenologischer und ein mikromechanischer Mehrskalensansatz verfolgt. Das entwickelte thermodynamisch konsistente, phänomenologische Mehrphasenmodell vereint in sich vielfältige Eigenschaften wie zeit- und temperaturabhängige Phasenumwandlung, Austenitisierung, Umwandlungsplastizität, Volumenveränderung, temperatur- und mikrostrukturabhängige Elasto- bzw. Visko- plastizität. Die auf der numerischen Implementierung basierende FEM-Simulation des Hybridumformprozesses zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit der Gefügeverteilung in der realen Welle und veranschaulicht die Möglichkeiten der Vorhersagbarkeit der Phasenverteilung durch Variation der Prozessparameter.

Ferner wird ein physikalisch motiviertes und thermodynamisch konsistentes Mehrskalensmodell für N-Körner und n-Bainitvarianten entwickelt, welches das elasto-viskoplastische Verhalten mit der Phasenumwandlung in einer polykristallinen Struktur kombiniert. Das implementierte Mehrskalensmodell bildet die Volumenänderung infolge der Phasenumwandlung, die Umwandlungsplastizität, die Rückverformung der umwandlungsplastischen Verzerrung sowie den Magee- und den Greenwood-Johnson-Effekt ab. Diese Phänomene werden für verschiedene Belastungen quantitativ evaluiert.

Liste der Veröffentlichungen

- MAHNKEN, R., SCHNEIDT, A., ANTRETTER, T., EHLENBRÖCKER, U., WOLFF, M.: Multi-scale modeling of bainitic phase transformation in multi-variant polycrystalline low alloy steels. *International Journal of Solids and Structures*, **54** (2015), S. 156–171
- MAHNKEN, R., WOLFF, M., SCHNEIDT, A., BÖHM, M.: Multi-phase transformations at large strains Thermodynamic framework and simulation. *International Journal of Plasticity*, **39** (2012), S. 1–26
- MAHNKEN, R., SCHNEIDT, A., TSCHUMAK, S., MAIER, H.: On the simulation of austenite to bainite phase transformation. *Computational Materials Science*, **50** (2011), Nr. 6, S. 1823–1829
- PARVIZIAN, F., SCHNEIDT, A., SVENDSEN, B., MAHNKEN, R.: Thermo-mechanically coupled modeling and simulation of hot metal-forming processes using adaptive remeshing method. *GAMM-Mitteilungen*, **33** (2010), Nr. 1, S. 95–115
- MAHNKEN, R., SCHNEIDT, A., ANTRETTER, T.: Macro modelling and homogenization for transformation induced plasticity of a low-alloy steel. *International Journal of Plasticity*, **25** (2009), Nr. 2, S. 183–204
- MAHNKEN, R., SCHNEIDT, A.: Simulation of a hybrid-forming process considering phase transformations in the workpiece. Steinhoff, K.; Maier, H.J.; Biermann, D. (Eds.): *Functionally graded materials in industrial mass production*. (2009), Verlag Wissenschaftliche Skripten, S. 175–184
- SCHNEIDT, A., MAHNKEN, R.: Macromodelling of Transformation Induced Plasticity combined with Viscoplasticity for Low-Alloy Steels. *Steel Research International*, **79** (2008), Nr. 2, S. 116
- SCHNEIDT, A., MAHNKEN, R.: Modeling of bainitic phase transformation. *PAMM 10* (2010), Nr. 1, S. 323–324
- MAHNKEN, R., SCHNEIDT, A.: A thermodynamic framework and numerical aspects for transformation-induced plasticity at large strains. *Archive of Applied Mechanics*, **80** (2010), Nr. 3, S. 229–253
- MAHNKEN, R., SAUERLAND, K.-H., SCHNEIDT, A., GOCKEL, F.-B.: Deformation and Damage Analysis of a Hybrid-Forming Tool under Thermal Shock Conditions. *PAMM* **8** (2008), Nr. 1, S. 10237–10238
- SCHNEIDT, A., MAHNKEN, R.: Modellierung der Umwandlungsplastizität und Viskoplastizität niedrig legierter Stähle. *PAMM* **8** (2008), Nr. 1, S. 10461–10462
- MAHNKEN, R., SCHNEIDT, A., ANTRETTER, T.: Macro Modeling and Homogenization for Iden-

tification of Material Parameters to Simulate Phase Transformations. Proc. 9th Int. Conf. on Computational Structures Technology, Civil-Comp Press (2008), S. 1–13

SAUERLAND, K., MAHNKEN, R., SCHNEIDT, A.: Influences of a hybrid-forming process on the forming tool and the work piece under thermal shock conditions. Proceedings of the 1st International Conference on Process Machine Interactions, 2008

SCHNEIDT, A., MAHNKEN, R.: Experimentelle Untersuchungen zum Thermoschock beim Hybridumformprozess. PAMM 7 (2007), Nr. 1, S. 4030013–4030014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Fertigung im Rahmen eines Hybridumformprozesses	1
1.2	Stand der Forschung	3
1.3	Ziele der Arbeit	5
1.4	Aufbau der Arbeit	6
2	Grundlagen der Phasenumwandlungen	7
2.1	Theoretische Grundlagen	7
2.1.1	Austenit	10
2.1.2	Martensit	11
2.1.3	Bainit	13
2.1.4	Das kristallographische Modell	15
2.1.5	Umwandlungsplastizität	17
2.2	Experimente zu Phasenumwandlungen	18
2.2.1	Versuchsstand	18
2.2.2	Experimentelle Ergebnisse der martensitischen Umwandlung	20
2.2.3	Experimentelle Ergebnisse der bainitischen Umwandlung	21
2.2.4	Mechanische Eigenschaften des unterkühlten Austenits	23
3	Phänomenologische Modellierung für kleine Deformationen	25
3.1	Konstitutive Gleichungen	25
3.1.1	Kinematik	25
3.1.2	Massen- und Volumenanteile der Phasen	26
3.1.3	Thermodynamisch konsistente Formulierung	28
3.2	Ein Prototypmodell für den Hybridumformprozess	30
3.2.1	Freie Helmholtz-Energie	30
3.2.2	Thermodynamische Kräfte	32
3.2.3	Verzerrungstensoren	33
3.2.4	Evolutionsgleichungen der Phasenumwandlungen	38
3.2.5	Thermodynamische Konsistenz	41
3.3	Numerische Implementierung	42
3.3.1	Implizites Integrationsschema	42
3.3.2	Lokale Iteration	43
3.3.3	Tangentenmodul	44
3.4	Parameteridentifikation	45
3.4.1	Phasenumwandlungen	46
3.4.2	Elasto-Viskoplastizität des unterkühlten Austenits	49

4	Phänomenologische Modellierung für große Deformationen	51
4.1	Thermodynamisch konsistente Formulierung	51
4.1.1	Kinematik	51
4.1.2	Volumenänderung infolge von Druck, Temperatur und Phasenanteilen	54
4.1.3	Thermodynamisches Konzept	56
4.1.4	Wärmeleitungsgleichung	57
4.2	Prototypmodell für den Hybridumformprozess	58
4.2.1	Freie Helmholtz-Energie	58
4.2.2	Thermodynamische Kräfte	59
4.2.3	Evolutionsgleichungen der Viskoplastizität und umwandlungsinduzierter Plastizität	59
4.2.4	Thermodynamische Konsistenz	61
4.2.5	Spezielle Form der Wärmeleitungsgleichung	61
4.2.6	Zusammenfassung der konstitutiven Gleichungen	62
4.3	Numerische Implementierung	63
4.3.1	Integrationschema	65
4.3.2	Spektralzerlegung	67
4.3.3	Lokale Iteration	67
4.3.4	Spektralzerlegung des Tangentenmoduls	68
4.4	Simulation des Hybridumformprozesses	69
4.4.1	Prozessbeschreibung	69
4.4.2	Simulation des Standardprozesses	70
4.4.3	Variation der Ausgangstemperatur	73
4.4.4	Variation der Prozessführung	75
5	Mehrskalenmodellierung	79
5.1	Konstitutive Gleichungen - Verallgemeinertes Modell	79
5.1.1	Thermodynamische Formulierung der Makroebene	79
5.1.2	Meso-Mikro-Ebene	80
5.1.3	Makro-Meso-Beziehung	81
5.1.4	Clausius-Duhem-Ungleichung	82
5.2	Konstitutive Gleichungen - Prototypmodell	83
5.2.1	Freie Helmholtz-Energie	83
5.2.2	Thermodynamische Kräfte	85
5.2.3	Evolutionsgleichungen der Phasentransformationen	86
5.2.4	Evolutionsgleichungen der Viskoplastizität	87
5.2.5	Thermodynamische Konsistenz	88
5.3	Numerische Implementierung	90
5.3.1	Formulierung der diskreten Zustandsgleichungen	90
5.3.2	Projizierte Newton-Iteration, Algorithmus I	92
5.3.3	Viskoplastizität, Algorithmus II	94
5.3.4	Der Tangentenmodul	96
5.4	Numerische Beispiele	96
5.4.1	Variantenselektion in einem Einzelkorn	98
5.4.2	Modellierung eines Polykristalls (RVE)	100
6	Zusammenfassung und Ausblick	105
	Literaturverzeichnis	109