„Charakterisierung des Umformverhaltens dreier ternärer Hochmanganstähle“

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der

Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Genehmigte Dissertation

Vorgelegt von Dipl.-Ing.

Burkhard Wietbrock

aus Hannover

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Juni 2016

Umformtechnische Schriften

Band 182

Burkhard Wietbrock

Charakterisierung des Umformverhaltens dreier ternärer Hochmanganstähle

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

Herausgeber:

Univ. Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt
Institut für Bildsame Formgebung der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Professor Dr.-Ing. Dierk Raabe
Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, Düsseldorf

Professor em. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Dr.-Ing. E.h. Reiner Kopp
Institut für Bildsame Formgebung der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Copyright Shaker Verlag 2016
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4953-4
ISSN 1433-1551

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

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird das Umformverhalten von drei ternären hochmanganhaltigen Stählen zwischen Raumtemperatur und 1200 °C beschrieben sowie die für eine (Labor-) Fertigung relevanten prozess- und umformtechnischen Aspekte untersucht.

Hochmanganhaltige Stähle bieten eine herausragende Kombination aus hoher Bruchdehnung und hoher Bruchfestigkeit – bei gleichzeitiger erheblicher Verfestigung während der Umformung. Verantwortlich für diese Eigenschaften sind die abhängig von der jeweiligen Stapelfehlerenergie auftretenden Verformungsmechanismen wie Twinning-Induced-Plasticity (TWIP – verformungsinduzierte Zwillingsbildung) und Transformation-Induced-Plasticity (TRIP – verformungsinduzierte Martensitbildung).

Während die genannten Verformungsmechanismen bereits umfangreich in der Literatur beschrieben wurden, waren zum Ausgangspunkt der Arbeit die Charakterisierung des Umformverhaltens in einem weiten Temperaturbereich sowie die bei der Fertigung entstehenden Herausforderungen wie z.B. Seigerungen/ Homogenität, Verzunderung/Oberflächenbeschaffenheit sowie Umformkräfte/maximale Umformgrade wenig oder überhaupt nicht dokumentiert.

Diese Lücke in der Charakterisierung wurde durch umfangreiche Zylinderstauchversuche im Bereich zwischen Raumtemperatur und 1200 °C unter Variation der Umformgeschwindigkeit, -Temperatur und der chemischen Zusammensetzung (Drei Stähle: Fe23Mn0,3C, Fe23Mn0,6C und Fe28Mn0,3) vermindert.

Die wesentlichen Ergebnisse der Zylinderstauchversuche sind:

- Bis etwa 500 °C treten die Verformungsmechanismen TRIP und TWIP auf, welche eine sehr starke Verfestigung bei geringer anfänglicher Streckgrenze bewirken und die Erzeugung und Weiterverarbeitung hochmanganhaltiger Stähle erschweren. In diesem Temperaturbereich kann ein merklicher Einfluss der chemischen Zusammensetzung und auch Umformtemperatur beobachtet werden. Bei Raumtemperatur zeigt zunächst der Stahl Fe23Mn0,3C Anzeichen für TRIP während die beiden anderen Stähle Fe23Mn0,6C und Fe28Mn0,3 TWIP aufweisen.

- Oberhalb von 500 °C wird Versetzungsgleiten beobachtet und über 700 °C ist der Einfluss der chemischen Zusammensetzung vernachlässigbar. Ein Anstieg der Umformgeschwindigkeit von 0,1/s auf 10/s kann mehr als eine Verdopplung der Fließspannung zur Folge haben.
- Bei Temperaturen oberhalb von 800 °C zeigen die betrachteten hochmanganhaltigen Stähle ein dem Chrom-Nickel-Stahl 1.4301 ähnliches Umformverhalten, so dass die Warmumformung in derzeitigen technologischen Prozessen möglich erscheint.
- Für die Beschreibung der Verfestigung bis 500 °C sind aufgrund des Auftretens von TRIP und TWIP neuartige Modellansätze erforderliche.
- Die bei Temperaturen oberhalb von 900 °C auftretende dynamische Rekristallisation kann bei den untersuchten ternären hochmanganhaltigen Stählen anhand bekannter Modelle von Luton und Sellars beschrieben werden. Die entsprechenden Kenngrößen wie z.B. die Aktivierungsenergie, die mittlere Korngröße oder der Zener Hollomon Parameter wurden bestimmt. Während die in dieser Arbeit variierte chemische Zusammensetzung einen deutlichen Einfluss auf die Eigenschaften bei Raumtemperatur und unterhalb von 500 °C hat, zeigen sich in hohen Temperaturbereichen nur noch geringe Einflüsse. Der Ablauf der dynamischen Rekristallisation der betrachteten Stähle verläuft folglich recht ähnlich.

Die umform- und fertigungstechnischen Herausforderungen wurden an im Vakuum erschmolzenen Gussblöcken mit einem maximalen Gewicht von 100 kg untersucht. Dazu wurde eine Route zur Erzeugung von technisch homogenem Warm- und Kaltband unter Auflösung der im Gußzustand vorliegenden Seigerungen des Mangangehalts entwickelt. Dazu wurden ein mehrstichiger Schmiedeprozess, ein Glühprozess und ein mehrstichiger Warmwalzprozess kombiniert. Ein Vergleich dieser Route zu anderen Fertigungsverfahren zeigt, dass ein Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren keinen den Mehraufwand rechtfertigenden Vorteil hinsichtlich der Ausbildung der Seigerungen bietet. Ganz im Gegenteil dazu kann die Seigerungslänge durch die Rascherstarrung während eines Dünnbandgusses erheblich verkürzt werden. Neben dieser Erleichterung der Homogenisierung werden auch die nach dem Blockguss, Schmieden, Glühen und Walzen beobachtete Verzunderung und Entkohlung der Randschicht reduziert.

Abstract

The presented work describes the forming behavior of three ternary high-manganese steels between room temperature and 1200 °C and investigates relevant process and forming related aspects of (laboratory scale) production of such steels.

High-manganese steels offer an outstanding combination of high fatigue stress and strain – in combination with enormous strengthening during forming. These properties are linked with two mechanisms which occur mainly in dependence of the stacking fault energy: Twinning-Induced-Plasticity (TWIP) and und Transformation-Induced-Plasticity (TRIP, martensitic transformation). While the named mechanism are well described in literature already, at starting point of this work neither the characterization of the forming properties of these steels in a wide range of temperature nor the challenges e.g. segregation/homogeneity, oxidation/surface quality and forming forces/forming limits were weak or not yet documented.

The gap of characterization was reduced by a large number of isothermal compression test on cylindrical samples between room temperature and 1200 °C under variation of strain rate, forming temperature and chemical composition (three steels Fe23Mn0,3C, Fe23Mn0,6C und Fe28Mn0,3). The relevant results are:

- Up to 500 °C TRIP and TWIP can be observed, leading to high strengthening while yield strength is rather low. This strengthening limits forming of these high-manganese steels due to the occurring high stresses. In this temperature range the influence of chemical composition as well as forming temperature is prominent. At room temperature the steel Fe23Mn0,3C shows TRIP as dominant forming mechanism while the other steels Fe23Mn0,6C and Fe28Mn0,3 present TWIP.
- Above 500 °C SLIP (sliding of dislocation) is recognizes as dominant forming mechanism. At temperatures higher than 700 °C the influence of chemical composition becomes insignificant. At these temperatures the impact of strain rate increases: Rising the strain rate from 0.1/s to 10/s doubles the flow stress.
- At temperature higher than 800 °C the investigated high-manganese steels show forming behavior comparable to the commercial chromium nickel steel

1.4301. This means the hot forming of such high-manganese steels can be done using common commercial routes and processes e.g. forging and rolling.

- For the description of the strengthening of high-manganese steels at temperatures below 500 °C due to occurring TRIP und TWIP new models are necessary.
- The modeling of the dynamic recrystallization (observed at temperatures above 900 ° C) is feasible using common models presented by Luton und Sellars. The respective values e.g. activation energy, average grain size and Zener Hollomon parameter were determined. While the three different chemical compositions significantly impacted the forming properties below 500 ° C, the influence at higher temperature was low as dynamic recrystallization of all investigated steels was happening rather similar.

The forming and production related challenges were studied on vacuum casted blocks with maximum weight of 100 kg. A route to create technical homogeneous (including dissolving of the manganese segregations after casting) hot and cold strip was developed. Therefore multistage forging, annealing and multistage rolling steps were combined. By comparing the mentioned route with the electro slag remelting process, it can be concluded that the high effort of the remelting process is not justified by the only poor benefit on segregation. By contrast thin strip casting can reduce the segregation width enormously due to the achieved high solidification rates. This smaller segregation width facilitates homogenization and in addition scaling and decarburization of the surface layer occurring during forging, annealing and rolling can be reduced by avoiding or shortening these processes.

I Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Stand der Technik **2**

2.1 Eigenschaften hochmanganhaltiger Stähle *2*

2.2 Verformungsmechanismen *3*

2.2.1 SLIP – Versetzungsbewegung 4

2.2.2 TRIP – verformungsinduzierte Martensitbildung 5

2.2.3 TWIP – verformungsinduzierte Zwillingsbildung 5

2.3 Einfluss der Stapelfehlerenergie *6*

2.3.1 Stapelfehlerenergie 6

2.3.2 Einfluss der Stapelfehlerenergie auf den Verformungsmechanismus 6

2.3.3 Bestimmung der Stapelfehlerenergie 7

2.3.4 Einflussgrößen auf die Stapelfehlerenergie 8

2.4 Entfestigungsmechanismen *9*

2.4.1 Arten der Rekristallisation 10

2.4.2 Mechanismus der Rekristallisation 10

2.5 Beschreibung des Werkstoffverhaltens ternärer hochmanganhaltiger Stähle während der Umformung in der Fachliteratur *11*

3 Zielsetzung **14**

4 Erzeugung von Halbzeug **15**

4.1 Ausgangsituation – Blockguss mit Seigerungen *15*

4.2 Entwicklung der Prozesskette *17*

4.2.1 Schmieden 17

4.2.2 Walzen 18

4.3 Ergebnisse der Homogenisierung *20*

4.4 Erhöhung der Reinheit durch ESU *21*

4.4.1 Durchführung des Umschmelzens und der Warmumformung 21

4.4.2 Ergebnisse der Homogenisierung durch ESU 22

4.5 Entkohlung und Verzunderung *23*

4.5.1 Verzunderung 23

4.5.2 Entkohlung und Elementverarmung der Randschicht 27
4.6 Alternative Erzeugung über Dünnbandgießen *29*
4.7 Weiterverarbeitung durch Kaltwalzen *35*
4.7.1 Versuchsaufbau 36
4.7.2 Untersuchung der maximalen Umformbarkeit beim Kaltwalzen 36
4.7.3 Walzen unter Anwendung von Bandzügen und Schmiermitteln 39
4.7.4 Anwendung von Zwischenglühungen 41
4.7.5 Oberfläche des Kaltbandes 43
4.7.6 Walzen bei moderater Erhöhung der Umformtemperatur 43

5 Charakterisierung des Umformverhaltens 51
5.1 Prinzip der Zylinderstauchversuche *51*
5.1.1 Berechnung der Fließspannung und des Umformgrads 51
5.1.2 Umformgeschwindigkeit 52
5.1.3 Einfluss der Reibung 53
5.1.4 Einfluss der Temperatur 55
5.1.5 Rechnerische Temperaturkompensation der Fließspannung 57
5.2 Durchführung der Zylinderstauchversuche *58*
5.2.1 Probenherstellung: 58
5.2.2 Auswahl der Versuchsparameter: 58
5.2.3 Anlagenbeschreibung 60
5.3 Auswertungsmethode der Zylinderstauchversuche *60*
5.4 Ergebnisse *63*
5.4.1 Fließverhalten bei RT (25°C) 63
5.4.2 Fließverhalten bei 100 °C 66
5.4.3 Fließverhalten bei 200 °C 67
5.4.4 Fließverhalten bei 300 °C 69
5.4.5 Fließverhalten bei 400°C 70
5.4.6 Fließverhalten bei 500 °C 72
5.4.7 Fließverhalten bei 600 °C 74
5.4.8 Fließverhalten bei 700 °C 76
5.4.9 Fließverhalten bei 800 °C 78

5.4.10 Fließverhalten bei 900 °C 79
5.4.11 Fließverhalten bei 1000 °C 80
5.4.12 Fließverhalten bei 1100 °C 82
5.4.13 Fließverhalten bei 1200 °C 84
5.4.14 Zusammenfassung des Temperatureinflusses 85
5.5 Einfluss der chemischen Zusammensetzung *86*
5.5.1 Einfluss des Mangangehalts 87
5.5.2 Einfluss des Kohlenstoffgehalts 87
5.6 Einfluss der Umformgeschwindigkeit *88*
5.7 Vergleich zum austenitischen Stahl 1.4301 *88*

6 Modellbasierte Beschreibung des Umformverhaltens 93
6.1 Beschreibung der Verfestigung *93*
6.1.1 Beschreibung des Verfestigungsverhaltens der Zwillingsbildung durch einen versetzungsdichtebasierten Ansatz 94
6.2 Beschreibung der Entfestigung *97*
6.2.1 Ansatz nach Luton und Sellars 99
6.2.2 Modellumsetzung für die numerische Simulation 100
6.2.3 Experimentelle Durchführung 102
6.2.4 Identifikation der Modellparameter 102
6.2.5 Implementierung und Validierung der Modellparameter 109
6.2.6 Einfluss der chemischen Zusammensetzung 116

7 Zusammenfassung 120

8 Literaturverzeichnis 121