

Hot rolling of twin roll cast strips

- insights into product quality and roll life -

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 **M. Sc.**
William Louis Kane García
aus Monterrey, Mexiko

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt
Univ.-Prof. Professor h.c. (CN) Dr.-Ing. Dr. h.c. (CZ) Dr.-Ing. Dieter Senk

Tag der mündlichen Prüfung: 09. November 2015

Umformtechnische Schriften

Band 179

William Louis Kane García

**Hot rolling of twin roll cast strips
– insights into product quality and roll life**

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

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

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4332-7

ISSN 1433-1551

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die Herstellung von Flachprodukten aus Stahl erfolgt heute typischerweise in einer Prozesskette aus Stranggießen, Warmwalzen und Kaltwalzen. Dabei wird bereits seit vielen Jahren das Ziel verfolgt, die Dicke des i.d.R. als Strang gegossenen Vormaterials für das Warmwalzen immer weiter zu reduzieren. Dies bietet einerseits ökonomische und ökologische Vorteile durch reduzierten Walzaufwand und ermöglicht außerdem höhere Erstarrungsgeschwindigkeiten mit ggf. positiven Auswirkungen auf die Gefügeausbildung. Das Dünnbandgießen nach dem sogenannten Zweirollenverfahren ermöglicht die Herstellung sehr dünner Warmbänder von 1 - 3 mm Dicke direkt aus der Schmelze. Entsprechende Anlagen verfügen meist über ein Inline-Warmwalzgerüst, mit dem das gegossene Warmband noch vor dem Aufcoilen gewalzt wird. Durch diesen Walzstich soll u.a. eventuell vorhandene Porosität beseitigt und die Oberfläche geglättet werden. Durch die direkte Kopplung mit dem Zweirollen-Bandgieß-Prozess weichen die Betriebszustände eines derartigen Inline-Warmwalzwerks deutlich von denen konventioneller Walzgerüste ab. Diese Unterschiede betreffen vor allem die Walzgeschwindigkeit, die beim konventionellen Warmwalzen in der Größenordnung von 10-20 m/s liegt, wohingegen in Verbindung mit dem Zweirollen-Bandgießen 0,5 - 2 m/s typisch sind. Dies führt bei ähnlichen bezogenen Höhenabnahmen zu wesentlich längeren Kontaktzeiten zwischen Walze und Walzgut mit entsprechenden thermischen Auswirkungen sowohl auf das Band als auch auf die Walze. Hierdurch wird auch die für die Wirtschaftlichkeit wesentliche Lebensdauer der Walzen beeinflusst. Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit, wie sich die Parameter des Inline-Walzstiches auf die Qualität des Flachproduktes auswirken und in welchem Umfang der Walzenverschleiß und die Walzkraft durch unterschiedliche Arten der Walzenschmierung beeinflusst werden können. Die Untersuchung basiert auf einer Vielzahl experimenteller Ergebnisse am Beispiel des Werkstoffs (X5CrNi 18 - 10) und auf der Auswertung betrieblicher Daten unter Nutzung eines Walzmodells auf Basis der numerischen Integration der von Kármánschen Differenzialgleichungen des Flachwalzens.

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bildsame Formgebung der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. G. Hirt, der mir die Möglichkeit zur Promotion gab, für die Betreuung, Unterstützung und Förderung dieser Arbeit, die eingehende Durchsicht und die Anregungen, mit denen er diese Arbeit begleitet hat. Ich danke auch Herrn Prof. Dr. D. Senk vom Institut für Eisenhüttenkunde für das fachliche Interesse, das er der Thematik und dieser Arbeit entgegengebracht hat, für die kritische Durchsicht und für die Übernahme der Berichterstattung. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. R. Conradt vom Institut für Gesteinshüttenkunde für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Die Arbeit wurde mit finanzieller Unterstützung des BMBF ermöglicht, wofür auch an dieser Stelle gedankt sei. Jene erlaubte u.a. viele für diese Arbeit notwendige Versuche. Ausdrücklich möchte ich mich bei ThyssenKrupp Steel Europe AG und der damaligen ThyssenKrupp Nirosta GmbH für die Förderung und das stetige Interesse am Dünnbandgießen bedanken.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Kollegen des Institutes für Bildsamen Formgebung für die stets gute Zusammenarbeit und für die freundliche Begleitung während meiner Zeit im Studium und als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Für die hervorragende und ausdauernde Mitarbeit, für hohes Engagement und Motivation sowie eine schöne Zeit (und das Floß) bedanke ich mich ganz herzlich bei den Bandgießern: Patricia Paesler, Dr. Oliver Bülters, Markus Daamen, Mike Dederichs, Armin Galle, Dr. Gerhard Gräf, Adem Karul, Joachim Sieprath, Hanno Wagner, Michael Walter und den vielen HiWis, Studien- und Diplomarbeitern. Besonders möchte ich mich bei Dr. Willi Schmitz für seine Hilfeleistung, Erklärungen und Handreichung bedanken.

Desde el principio hasta el final de todo, agradezco a mis padres, por todo.

Glückauf!

¡Ajúa!

Table of contents

Index of figures.....	V
Index of tables.....	X
1 Introduction.....	1
2 General objectives and procedure.....	5
2.1 Objectives.....	5
2.1.1 Objectives regarding the product (Chapter 6).....	5
2.1.2 Objectives regarding the process (Chapter 7).....	6
2.1.3 Objectives regarding process simulation (Chapter 8).....	7
2.2 Procedure.....	8
3 Twin roll strip casting and inline hot rolling.....	9
3.1 Twin roll strip casting of steel.....	9
3.1.1 Process description.....	9
3.1.2 Strip description.....	10
3.1.3 Inner defect: porosity.....	11
3.2 Hot rolling of as-cast strip.....	12
3.2.1 Process description.....	12
3.2.2 Process behavior: window of operation.....	13
3.2.3 Deterioration of hot rolling rolls.....	14
3.2.4 Roll bite lubrication.....	15
3.3 Mechanical properties.....	16
4 Theory and tribological effects of the hot rolling process.....	17
4.1 Introduction.....	17
4.2 Necessity of friction in hot rolling.....	17
4.3 Roll-strip interface.....	19
4.3.1 Rolling forces.....	19
4.3.2 Surfaces.....	21
4.4 Roll surface deterioration by wear.....	22
4.5 Roll gap lubrication.....	24
4.5.1 Introduction.....	24
4.5.2 Principle.....	25
4.5.3 Entrainment of the emulsion.....	25
4.5.4 Lubricant regimes.....	26
4.5.5 Interface environment	28
4.6 Determining the coefficient of friction during hot rolling.....	29

5 Strip production, materials and characterization methods.....	32
5.1 As-cast strip production processes.....	32
5.1.1 Process route TKN.....	32
5.1.1.1 Process overview.....	32
5.1.1.2 Twin roll caster.....	32
5.1.1.3 In-line hot rolling mill.....	33
5.1.2 Process route IBF.....	33
5.1.2.1 Process overview.....	33
5.1.2.2 Twin roll caster.....	35
5.1.2.3 In-line hot rolling mill.....	35
5.1.2.4 Off-line hot rolling mill.....	35
5.2 Materials.....	36
5.2.1 Strip material.....	36
5.2.2 Lubrication.....	37
5.2.2.1 Lubricants considered in this work.....	37
5.2.2.2 Lubricant application system at TKN.....	37
5.2.2.3 Lubricant application at IBF.....	38
5.3 Characterization methods.....	38
5.3.1 Chemical analysis.....	38
5.3.2 Surface structure inspection.....	39
5.3.3 Metallography.....	39
5.3.4 Roughness.....	40
5.3.5 Microhardness.....	42
5.3.6 Tensile test.....	42
6 Influence of the casting and hot rolling parameters on the product.....	44
6.1 Work program.....	44
6.2 Brief description of the microstructure of the as-cast strip used in this work.....	45
6.2.1 Eliminating internal porosity to obtain high quality hot rolled strip.....	46
6.3 Influence of the C-RSF on the as-cast product properties.....	50
6.3.1 Strip production.....	50
6.3.2 Chemical analysis.....	51
6.3.3 As-cast strip surface structure inspection.....	52
6.3.4 Microstructure analysis.....	52
6.3.5 Microhardness measurements.....	54
6.3.6 Tensile tests.....	55
6.4 Influence of the C-RSF on the hot rolled product properties.....	57

6.4.1 Hot rolling of as-cast strip.....	57
6.4.2 Microstructure analysis.....	58
6.4.3 Microhardness measurements.....	59
6.4.4 Tensile tests.....	60
6.5 Discussion.....	62
6.5.1 Elimination of internal porosity.....	62
6.5.2 Influence of the C-RSF on the mechanical properties of the product.....	62
6.5.2.1 As-cast strips.....	62
6.5.2.2 Hot rolled strips.....	64
7 Process observations: behavior, roll surface deterioration and roll bite lubrication.....	67
7.1 Work program.....	67
7.2 Behavior of the hot rolling process at TKN.....	68
7.2.1 Influence of the hot reduction on the RSF.....	68
7.2.2 Influence of the roll velocity on the RSF.....	68
7.2.3 Influence of the strip temperature on the RSF.....	69
7.3 Deterioration of the surface of hot rolling work rolls.....	70
7.3.1 Working conditions.....	70
7.3.2 Observations made on the roll.....	71
7.3.3 Observations made on the strip.....	74
7.4 Roll bite lubrication experiments.....	82
7.4.1 Off-line experiments.....	82
7.4.2 In-line experiments at IBF.....	85
7.4.3 In-line runs at TKN.....	85
7.4.4 The lubricant dosage factor.....	87
7.5 Discussion.....	92
7.5.1 Behavior of the hot rolling process.....	92
7.5.2 Deterioration of the surface of hot rolling work rolls.....	92
7.5.3 Roll bite lubrication.....	92
8 Simulating towards the characterization of the frictional situation at the roll gap.....	95
8.1 Work program.....	95
8.2 Hot rolling model.....	95
8.2.1 Elementary rolling theory.....	96
8.2.2 Finite Difference Method.....	97
8.2.3 Solution routine followed in the program.....	100
8.2.4 Input variables.....	101
8.2.5 Coefficient of friction.....	103

8.2.6 Roll flattening.....	103
8.2.7 Output variables.....	104
8.3 Validation.....	104
8.3.1 Literature.....	104
8.3.2 Laboratory.....	105
8.3.3 Industry.....	107
8.4 Calculation of RSF reduction through roll bite lubrication.....	109
8.4.1 Defining the term RSF reduction.....	109
8.4.2 Obtaining the coefficient of friction.....	110
8.4.3 Inversely modeled coefficient of friction in laboratory trials.....	111
8.4.4 Inversely modeled coefficient of friction in industrial trials.....	113
8.4.5 Relating the coefficient of friction to the lubricant dosage factor.....	114
8.4.6 Calculation of a coefficient of friction through a dimensionless group.....	116
8.4.7 Relating the coefficient of friction to the RSF reduction.....	117
8.5 Discussion.....	118
9 Summary and conclusions.....	122
9.1 Objective I.....	122
9.2 Objective II.....	124
9.3 Objective III.....	124
9.4 Objective IV.....	126
9.5 Objective V.....	128
9.6 Objective VI.....	129
9.7 Objective VII.....	130
10 Bibliography.....	132
Abstract.....	140
Kurzzusammenfassung.....	142
Lebenslauf.....	144