

„Investigation of the heat transfer condition between mould and strand“

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von **M.Sc.**

Li Yang

aus Sichuan, China

Berichter:

apl. Professor Dr. rer. nat. Erwin Wosch

Univ.-Prof. Professor h.c. (CN) Dr. -Ing. Dr. h.c. (CZ) Dieter Georg Senk

Univ.-Prof. Dr. -Ing. Yanping Bao

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Januar 2016



**Berichte aus dem
Institut für Eisenhüttenkunde**

Li Yang

**Investigation of the heat transfer condition
between mould and strand**

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. W. Bleck
Prof. Dr.rer.nat. Dr.-Ing.e.h. W. Dahl
Prof. Dr.-Ing. H.W. Gudenhau
Prof. Dr.-Ing. D. Senk

Band 1/2016

Shaker Verlag

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, 2016)

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 978-3-8440-4297-9

ISSN 0943-4631

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

Acknowledgements

Firstly, I would like to express my great appreciation to apl. Prof. Dr. rer. nat. Erwin Wosch and Univ.-Prof. Dr. -Ing. Dieter Senk. It is appreciate to give me the chance for the PhD study in IEHK, RWTH Aachen university, and also for their valuable and constructive suggestions during the planning and development of my research work. I would like to express my gratitude to Prof. Yanping Bao for being my third advisor of dissertation.

Furthermore, thanks to the colleagues in department of Ferrous Metallurgy, I have great time during my PhD study. I am very grateful for the assistance given by the RWTH students Mr. Ding and Mr. Ayenampudi. They help me on the data collection during their study integrated thesis.

Meanwhile, I am appreciated to the IT group, who have given me lots of help when the computer and the software have problems.

I am very grateful for the China Scholarship Council (CSC). Thanks to the three years financial support, I can finally finish my study and research in RWTH Aachen University.

At last, I would like to thank all my family members, especially my husband Honggang Wang and my son Yishan Wang for supporting me during my doctoral study.

Contents

Acknowledgements	i
Contents	ii
Abbreviations	iv
Abstract	v
Zusammenfassung	vi
1 Introduction.....	1
2 Background.....	3
2.1 History of continuous casting	3
2.2 Continuous casting mould.....	7
2.3 Mould Flux powder.....	10
2.3.1 Chemical and physical properties of the mould flux.....	12
2.3.2 Flux Film behavior in the continuous casting mould	17
2.4 Heat transfer in the continuous casting mould.....	23
2.4.1 Solidification of the liquid steel in the mould	25
2.4.2 Heat transfer between mould and strand shell.....	28
2.4.3 Heat transfer through the mould plate into cooling water....	31
2.5 The problems and defects caused in the continuous casting mould	32
2.6 The researches to the heat transfer in casting mould.....	35
3 The thermal parameters in continuous casting moulds	40
3.1 The heat flux density	41
3.2 Strand shell thickness	45
3.3 The thermal resistance between mould and strand at meniscus..	49
3.4 The influence of casting conditions on the thermal parameters...	51
3.4.1 Temperature difference between input and output cooling water	52
3.4.2 The velocity of cooling water	54

3.4.3 The slab width	56
3.4.4 The superheat of the liquid steel.....	58
4 The FEM modelling method and parameters	61
4.1 Introduction to the modelling methods.....	61
4.2 The Heat transfer between mould and strand	68
4.3 The properties of the investigated materials.....	72
5 FEM modelling results and discussion	76
5.1 Validity of the 1D modelling method.....	77
5.1.1 The results of $q(x)$, $T_s(x)$, $T_m(x)$ and $d_s(x)$	78
5.1.2 The flux film distribution in the gap between strand and mould	82
5.2 The results of the 2D model for slab casting without air gap ...	84
5.2.1 Heat flux density in the mould	84
5.2.2 Gap thickness and liquid flux film thickness.....	87
5.2.3 Temperature distribution in mould and strand	92
5.3 The model considering air gap between mould and strand ...	102
5.3.1 Heat flux density in the mould	102
5.3.2 Gap thickness and liquid flux film thickness.....	105
5.3.3 The thickness and resistance of the air gap	107
5.3.4 Temperature distribution in mould and strand	112
5.4 Influence of breaking temperature of flux	117
5.4.1 Distribution of the flux film	117
5.4.2 The local heat flux density and strand shell surface temperature	122
6 Conclusions	126
7 Outlook	133
References.....	134
List of Figures	149
List of Tables	153
Appendix	154

Abbreviations

BF: Broad Face

CA: Computer Algebra

CAMM: Computer Algebra Mould Modelling

CC: Continuous Casting

CFD: Computational Fluid Dynamics

CHF: Copper Plate Hot Face

FDM: Finite Difference Method

FEM: Finite Element Method

LC: Low Carbon

LIT: Liquid Impenetrable Temperature

MC: Medium Carbon

MHF: Mould (Coating) Hot Face

NBO/T: Non-Bridging Oxygen per the number of Tetrahedral ions

NF: Narrow Face

OAT: Ones-at- A-Time Method

SEN: Submerged Entry Nozzle

TC: Thermocouple

UTS: Ultimate Tensile Strength

ZDT: Zero Ductility Temperature

ZST: Zero Strength Temperature

Abstract

The heat transfer in continuous casting mould is important, some defects and problems could be identified from the related thermal parameters, such as the local heat flux density, the temperature, and so on. However, it is still difficult or expansive to determine the thermal parameters in the mould during the production. With the well-developed computer technology, it is able to simulate the whole heat transfer states in the continuous casting mould.

Firstly, the results from literature and CAMM (computer algebra mould modelling) calculation have been analysed to investigate the influence of factors such as casting speed, temperature difference of cooling water, water velocity, slab width and the superheat of the liquid steel on the heat transfer parameters in continuous casting mould.

Furthermore, a thermal mechanical coupled model is created to calculate the variation of the local heat flux density and the flux film gap thickness in the continuous casting mould, mainly for the slab 1510 mm*225 mm with the casting speed 1 m/min. The simple 1D model is firstly created to prove the validity of the model, and then it is developed into the 2D model for the different casting conditions.

In the 2D calculations, the flux film behaviour and the local heat flux densities are compared between the models considering the air gap or not, which induced different thermal parameters after the ending of the liquid flux film. The reheating of the strand shell surface has been observed for the transient state heat transfer calculation in the strand.

According to the integral heat flux density, and also comparing with the temperatures of thermocouples collected from the steel plant, the results from the 2D model are proved to be reliable.

In the 2D model considering the air gap, the different breaking temperatures of flux cause the different distributions of liquid flux film, solid flux film and the air gap. The larger air gap thickness is obtained for the higher breaking temperature, and also earlier and higher reheating of the strand shell surface.

Zusammenfassung

Zu den wichtigen thermischen Parametern von Stranggießkokillen zählen die integrale Wärmestromdichte, die Strangoberflächentemperatur und die Strangschalendicke am Ende der Kokille sowie die Meniskuswerte von lokaler Wärmestromdichte, Wärmeübergangswiderstand im Gießspalt zwischen Kupferplatte und Strangschale und Heißseitentemperatur der Kupferplatte. Diese physikalischen Größen charakterisieren die thermischen Bedingungen in Stranggießkokillen und können zur Beurteilung des Gießprozesses, z.B. in Bezug auf Qualitätskriterien, herangezogen werden. Ihr vertieftes Verständnis ermöglicht weiterhin eine Verbesserung der Betriebsweise von Stranggießmaschinen.

Zunächst werden in der vorliegenden Dissertationsschrift die Ergebnisse aus Literaturrecherchen und den Berechnungen des Computeralgebra Mould Modelling (CAMM) analysiert. Sie liefern bereits Hinweise auf den Einfluß der Gießgeschwindigkeit, der Kühlwassererwärmung, der Wassergeschwindigkeit in den Kühlkanälen, der Brammenbreite und der Stahlüberhitzung auf die thermischen Parameter von Stranggießkokillen.

Weiterhin wird ein gekoppeltes thermisch-mechanisches Modell entwickelt, das zur Berechnung der lokalen Wärmestromdichte und des Wärmeübergangswiderstandes des Flux Films und des Luftspaltes herangezogen wird. Unter der Annahme einer konstanten Wärmeleitfähigkeit der Gießschlacke sind Rückschlüsse auf die Flux Film Dicke möglich. Dies erfolgt exemplarisch für eine 1510 mm x 225 mm Bramme bei 1 m/min Gießgeschwindigkeit. In Vorbereitung eines zweidimensionalen Modells wird zunächst ein eindimensionales Modell aufgestellt und auf seine Gültigkeit hin getestet. Anschließend wird dieses Modell erweitert, so daß ein 2D-Modell entsteht, mit dessen Hilfe die verschiedenen Gießbedingungen simulationstechnisch näher untersucht werden.

Im Rahmen der 2D-Rechnungen ist ein Vergleich des Verhaltens der lokalen Wärmestromdichte und des Flux Films für die Fälle mit und ohne Luftspalt möglich. Bei Abwesenheit einer flüssigen oder teilflüssigen Schlacke im unteren Bereich der Kokille resultieren differente thermische

Bedingungen, die zu einer Wiedererwärmung der Brammenoberfläche führen.

In Bezug auf die integrale Wärmestromdichte und die Thermoelementtemperaturen in der Kupferplatte zeigt sich für das 2D-Modell eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen Daten aus der Industrie und den Rechenergebnissen.

Für verschiedene Break-Temperaturen der Schlacke resultieren verschiedenen Verteilungen von flüssigem Flux Film und erstarrter Schlacke sowie verschiedene Luftspaltdicken. Je höher die Break-Temperatur, umso ausgeprägter ist die Luftspaltbildung und umso früher setzt die Wiedererwärmung der Brammenoberfläche ein. Höhere Break-Temperaturen können somit zu höheren Brammenoberflächentemperaturen am Ende der Kokille führen.