

Gancho Genchev

Thermomechanische Finite Elemente
Analyse von Mehrlagenschweißungen
unter Berücksichtigung der lokalen
Gefügeumwandlungen

BERICHT E

Thermomechanische Finite Elemente Analyse von Mehrlagenschweißungen unter Berücksichtigung der lokalen Gefügewandlungen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme der
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg zur
Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Gancho Genchev

geboren am 27.06.1985 in Kazanlak (Bulgarien)

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Seidlitz

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Vesselin Michailov

Gutachterin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Sabine Weiß

Tag der mündlichen Prüfung: 22.11.2019

Berichte des Lehrstuhls Füge- und Schweißtechnik
der BTU Cottbus-Senftenberg

Band 13

Gancho Genchev

**Thermomechanische Finite Elemente Analyse von
Mehrlagenschweißungen unter Berücksichtigung
der lokalen Gefügewandlungen**

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Cottbus-Senftenberg, BTU, Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7335-5

ISSN 1867-4887

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Dem Betreuer und ersten Gutachter dieser Dissertation, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Vesselin Michailov, Inhaber des Lehrstuhls Füge- und Schweißtechnik der Brandenburgischen Technischen Universität (BTU) Cottbus-Senftenberg, gilt mein ganz besonderer Dank für die fachliche Anleitung und die persönliche Unterstützung bei der Durchführung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Seine fachlichen Anregungen in zahlreichen Diskussionen und sein organisatorischer Rat während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit unter seiner Leitung haben maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss dieser Promotion beigetragen.

Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Sabine Weiß, Leiterin des Fachgebiets Metallkunde und Werkstofftechnik der BTU Cottbus-Senftenberg danke ich sehr für die Übernahme des zweiten Gutachtens und die fachlichen Anregungen bei der Begutachtung der Dissertation.

Für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses und für die Zusammenarbeit an der BTU danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Seidlitz, Leiter des Fachgebiets Polymerbasierter Leichtbau.

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Füge- und Schweißtechnik in der Gruppe Simulation. Einen besonderen Dank möchte ich an Herrn Dr.-Ing. Nikolay Doynov (Gruppenleiter Simulation) und an Herrn Dr.-Ing. Ralf Ossenbrink (Gruppenleiter Prüfen) für die zahlreichen Diskussionen, den fachlichen Rat, die projektbezogene und auch die persönliche Unterstützung richten. Ich danke auch allen Mitarbeitern und Alumni des Lehrstuhls Füge- und Schweißtechnik für die erfolgreiche Zusammenarbeit.

An dieser Stelle danke ich ebenfalls allen Projektpartnern für die Zusammenarbeit, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Meiner Familie gilt mein besonders großer Dank für die ständige Unterstützung.

Zusammenfassung

Komplexe Konstruktionen werden oft mit mehrlagigen oder sich kreuzenden Schweißnähten gefügt. Die mehrfache Temperatureinwirkung beeinflusst lokale Bereiche der Schweißnaht und führt zu neuen Gefügeumwandlungen. Dies bewirkt eine Veränderung der thermomechanischen Eigenschaften des Gefüges und beeinflusst die Entstehung und Verteilung der Schweißspannungen.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Bereitstellung der Grundlagen für numerische Untersuchungen von mehrlagigen Lichtbogenschweißungen aus dem Baustahl S355J2+N. Den Schwerpunkt der Analysen bildet die Berücksichtigung der Gefügeumwandlungen und die daraus resultierenden Gefügeeigenschaften und Eigenspannungszustände aufgrund der mehrfachen Temperatureinwirkung. Für die Simulation wird ein neues Modell entwickelt, validiert und angewendet. Dieses erweiterte Mehrmalig-Spitzentemperatur Austenitisierungs- und Abkühlzeit (M-STAAZ) Modell beschreibt die resultierenden Gefügeeigenschaften als eine Funktion des Ausgangsgefüges sowie der vorliegenden Maximaltemperatur und der Abkühlzeit.

Die Bewertung des Einflusses der mehrfachen Erwärmung auf die Gefügeumwandlungen und auf die mechanischen Eigenschaften erfolgt durch systematische physikalische Simulationen des Schweißgefüges mit einer Gleeble®. Die ermittelten Zusammenhänge und gefügeabhängigen thermomechanischen Werkstoffkennwerte dienen der Kalibrierung des M-STAAZ Modells.

Die begleitenden experimentellen Untersuchungen an den Mehrlagenschweißungen liefern umfassende Messdaten für die Validierung der numerischen Simulationen. Aus den Messungen liegen Daten über Temperatur-Zeit-Verläufe, Härteverteilung und Schweißspannungen vor.

Mit dem entwickelten Modell lassen sich lokale Gefügeumwandlungen und -eigenschaften wie Härte und Dehngrenze in Abhängigkeit der lokal vorliegenden Temperaturzyklen vorhersagen. Der grundsätzliche Vorteil des M-STAAZ Modells zeigt sich in der Eigenspannungssimulation. Die Berücksichtigung der lokalen Gefügeeigenschaften führt zur signifikanten Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit. Als Haupteinflussfaktor für die Eigenspannungsbildung erweist sich die Änderung der Dehngrenze durch neue Austenitisierung und Anlasseffekte der nachfolgenden Schweißlagen.

Für die Validierung der entwickelten Simulationsvorgehensweise und Bewertung der Ergebnisgenauigkeit werden die gemessenen Eigenspannungen herangezogen.

Abstract

Complex welded structures consist of overlapping or multi-pass welds. As a result of the repeated heat treatment, the local areas of the Heat Affected Zone (HAZ) are subjected to cumulative thermo-mechanical influences. This affects in a complex way the local thermo-mechanical properties and thus the residual stresses formation.

This work draws attention to the development of a methodology for the numerical investigation of multi-pass arc welded S355J2+N steel joints. The study focuses on the microstructure transformations and the resulting residual stresses due to the multiple temperature effects. For the simulations, a new approach is developed, validated and applied. The multiple peak temperature austenitisation cooling time (abbreviated from German as M-STAAZ) model considers the change of the local material properties due to multiple reheating as a function of the initial microstructure, maximum temperature and cooling time.

To investigate the influence of multiple thermal treatment on the thermo-mechanical properties, the microstructure in the HAZ is reproduced by means of Gleeble® simulation. The determined material data and correlations for different microstructures are stored in a database and used for the calibration of the M-STAAZ model.

With the developed model another numerical study is done and calculations of the hardness distribution in the multi pass weldments are performed. The accuracy of the simulation results is estimated by comparison with hardness measurements in the cross section of the weldments.

Using the developed model, local microstructure transformations and properties such as hardness and yield strength can be predicted depending on the local temperature cycles. The results explain the influence of the welding thermal history on the resulting local thermo-mechanical properties in the heat-affected zone and, thus, on the residual stress distribution.

Taking into consideration the local microstructure properties in the welding simulation leads to a significant increase in the accuracy of the numerical results. The fundamental advantage of the M-STAAZ model is detected in the simulation of residual welding stresses. A major influence factor on the residual stress formation is the change in the interpass microstructure yield strength due to reaustenitisation and tempering effects.

An experimental stress study is carried out using a neutron diffraction method. The measured data are used for validation of the simulation results.

Inhaltsverzeichnis

Liste der Formelzeichen und Abkürzungen	I
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse	3
2.1 Thermophysikalische Wirkung des Schweißens	3
2.1.1 Bedeutung des Temperaturfeldes beim Schweißen	3
2.1.2 Grundlagen der Wärmeleitung beim Schweißen	4
2.1.3 Analytische Berechnung der Wärmeleitungsaufgabe	6
2.2 Schweißbedingtes Werkstoffverhalten der Stähle	9
2.2.1 Der Schweißtemperaturzyklus	9
2.2.2 Gefügebereiche in der WEZ von Mehrlagenschweißungen	11
2.2.3 Schweißtechnische Schaubilder	12
2.3 Thermomechanische Auswirkungen des Schweißens	15
2.3.1 Thermomechanische Gefügeeigenschaften	15
2.3.2 Entstehung von schweißbedingten Eigenspannungen	17
2.4 Numerische schweißtechnische Simulation	20
2.4.1 Schweißtechnische Temperaturfeldberechnung	21
2.4.2 Härte- und Gefügesimulation	23
2.4.3 Bestimmung von gefügeabhängigen Werkstoffdaten	26
2.4.4 Simulation von Schweißverzug und -eigenspannungen	28
2.5 Experimentelle Methoden zur Validierung der numerischen Schweißsimulation	34
2.5.1 Erfassung der Temperaturverläufe und der Härteverteilung	34
2.5.2 Messung der Schweißverzüge und Eigenspannungsverteilung	36
2.6 Zusammenfassung und Zielsetzung	38
3 Experimentelle Untersuchungen an mehrlagigen Schweißungen	42

3.1	Instrumentierte Schweißversuche	42
3.1.1	Grundwerkstoff und Schweißparameter	42
3.1.2	Versuchsaufbau und Instrumentierung	45
3.1.3	Ergebnisse der Schweißversuche	46
3.2	Metallografische Untersuchungen und Härteverteilung	48
3.3	Experimentelle Ermittlung der Schweißeigenspannungen	51
3.3.1	Eigenspannungsmessungen nach der Zerlegemethode.....	52
3.3.2	Gemessene Eigenspannungen mit der Neutronenbeugungsmethode	54
4	Numerische Temperaturfeldanalyse von Mehrlagenschweißungen.....	57
4.1	Kennlinien für die numerische Diskretisierung.....	57
4.2	Erstellung der FE-Modelle	63
4.3	Validierung der Temperaturfeldsimulationen	65
4.4	Maximaltemperaturen und Abkühlzeiten in der WEZ.....	70
4.5	Lokale Temperaturzyklen und -parameter in der WEZ.....	72
5	Simulationsmodell zur Berücksichtigung der lokalen Gefügeeigenschaften	74
5.1	Das Mehrmalig Spitzentemperatur Austenitisierung Abkühlzeit Modell.....	74
5.2	Parameter für die Gleeble-Simulation.....	77
5.3	Experimentelle Ermittlung der Gefügeeigenschaften.....	79
5.3.1	Dilatometerkurven bei mehrfacher Temperatureinwirkung	80
5.3.2	Aufstellung von Schweiß-ZTU Schaubildern	87
5.3.1	Spannungs-Dehnungskurven und Dehngrenze	89
5.4	Datenbasis und Interpolationsraum für das M-STAAZ Modell.....	93
6	Anwendung des M-STAAZ Modells an mehrlagigen Schweißungen	96
6.1	Härtensimulation mit dem M-STAAZ Modell und Validierung.....	96
6.2	Numerische Berechnungen der Eigenspannungsverteilung.....	98
6.2.1	Thermomechanische Schweißsimulationen	98
6.2.2	Ergebnisse der Eigenspannungssimulationen.....	99

6.2.3 Einfluss der mehrfachen Erwärmung auf die Simulationsergebnisse	102
6.3 Validierung der Eigenspannungsberechnungen	108
6.4 Schlussfolgerungen	113
7 Modellanwendung als Basis für eine anschließende Festigkeitsbewertung	114
7.1 Einfluss der Gefügeumwandlungen an 1-Elementmodell	114
7.2 Versuche an geschweißten Laborproben	118
7.3 Numerische Simulationen mit dem M-STAAZ Modell	119
7.3.1 Temperaturfeldberechnung und Validierung	119
7.3.2 Berechnete lokale Gefügeeigenschaften mit M-STAAZ	121
7.3.3 Ergebnisse der thermomechanischen Simulationen	123
8 Zusammenfassung	126
Literatur	129
Normen und Patente	138
Eigene Veröffentlichungen	139
Abbildungsverzeichnis	141
Tabellenverzeichnis	146