

Thermomechanische Schweißsimulation unter Berücksichtigung von Gefügeumwandlungen

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

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Ralf Ossenbrink

geboren am 04.08.1969 in Oelde

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Viehweger

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

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Klaus Dilger

Tag der mündlichen Prüfung: 02.05.2008

Berichte des Lehrstuhls Fügetechnik der BTU Cottbus

Band 2

Ralf Ossenbrink

**Thermomechanische Schweißsimulation unter
Berücksichtigung von Gefügeumwandlungen**

Shaker Verlag
Aachen 2009

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, BTU, Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8131-1

ISSN 1867-4887

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

Danksagung

Dem Betreuer und ersten Gutachter dieser Arbeit, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. V. Michailov, Inhaber des Lehrstuhls Fügetechnik an der BTU Cottbus, gilt mein besonderer Dank für die fachliche und persönliche Unterstützung bei der Anfertigung dieser Promotionsarbeit. Seine wertvollen Anregungen und sein fachlicher Rat in zahlreichen Diskussionen während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter unter seiner Anleitung haben maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen.

Für die Übernahme des zweiten Gutachtens und die angenehme Zusammenarbeit im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „SST-Schweißsimulationstool - Werkzeug zur vollständigen numerischen Simulation des Schmelzschweißens“ danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. K. Dilger, Leiter des Instituts für Füge- und Schweißtechnik an der TU Braunschweig.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Viehweger, Inhaber des Lehrstuhls Konstruktion und Fertigung an der BTU Cottbus, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Die vorliegende Dissertation entstand während meinen Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Fügetechnik an der BTU Cottbus, am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik in Freiburg und am Institut für Füge- und Schweißtechnik an der TU Braunschweig. Meinen Dank möchte ich daher auch an alle Kolleginnen und Kollegen richten, die mich im Laufe der Zeit bei den zahlreichen Experimenten und durch fachlichen Rat tatkräftig unterstützt haben. An dieser Stelle danke ich ebenfalls den Studierenden, die als Hilfskräfte sowie mit Studien- und Diplomarbeiten an den Forschungsarbeiten mitwirkten.

Den Projektpartnern des BMBF-Verbundprojektes „SST-Schweißsimulationstool - Werkzeug zur vollständigen numerischen Simulation des Schmelzschweißens“ danke ich für die Bereitstellung von Probenmaterial, Software und Versuchsanlagen. Die gute Zusammenarbeit und ihre Unterstützung haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Zusammenfassung

Als wichtiges Fügeverfahren spielt das Schweißen in der Fertigungsprozesskette eine bedeutende Rolle. Die thermomechanische Schweißsimulation kann dazu beitragen, Eigenspannungen, Bauteilverzüge und mikrostrukturelle Veränderungen sowie resultierende Qualitätsmängel frühzeitig zu erkennen und deren Auswirkungen zu begrenzen.

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf die thermomechanische Schweißsimulation unter Berücksichtigung der Gefügeumwandlungen. Das Ziel besteht in der Vorstellung und Qualifizierung des Spitzentemperatur-Austenitisierungs-Abkühlzeit-Modells (STAAZ) für die numerische Schweißsimulation. Das Modell erfasst die für die Gefügeausbildung maßgebenden Temperaturzyklen durch seine drei so genannten STAAZ-Parameter: Spitzentemperatur, Austenitisierungs- und Abkühlzeit. Die Korrelation mit allen thermomechanischen gefügeabhängigen Werkstoffeigenschaften erfolgt auf Grundlage einer empirischen Datenbasis, die folgende Daten enthält:

- Wärmedehnungen,
- Spannungs-Dehnungsverhalten,
- Umwandlungsplastizität,
- Härte.

Die benötigten Werkstoffkennwerte werden in Versuchen unter Variation der STAAZ-Parameter bestimmt. Mit Hilfe der physikalischen Simulation findet die Ableitung der gefügeabhängigen Eigenschaften für alle Phasen der Temperaturzyklen an dem Werkstoff S355J2G3 statt.

Die Anwendung des STAAZ-Modells in FE-Simulationen erfolgt in mehreren Komplexitätsstufen. Zunächst demonstrieren Berechnungen an einem temperaturbeanspruchten Element die Funktionsweise des STAAZ-Modells. Simulationen des Laserstrahlschweißens von Platten identifizieren einzelne werkstoffkundliche Effekte auf die Eigenspannungs- und Verzugsausbildung. Eine anschließende Übertragung auf das Laserstrahlschweißen einer bauteilähnlichen Konstruktion weist die Eignung des STAAZ-Modells auch für praxisrelevante Problemstellungen nach. Alle thermomechanischen Schweißsimulationen werden durch instrumentierte experimentelle Untersuchungen begleitet. Der Vergleich von gemessenen mit berechneten Eigenspannungen und Verschiebungen erlaubt eine fundierte Bewertung der Ergebnisse.

Abstract

Welding is an important manufacturing process. Thermomechanical simulation of welding can recognize residual stresses, distortions, changes of the microstructure and resulting defects in an early stage of the development process.

The present study deals with thermomechanical welding simulations taking into account the microstructural transformations. The objective is to introduce the maximum temperature austenisation and cooling time model (STAAZ) and to prove its applicability for the numerical welding simulation. The STAAZ model describes the temperature cycles responsible for the microstructural transformations by its three parameters: peak temperature, austenisation and cooling time. The correlation between the STAAZ parameters and the thermomechanical material properties results from an experimental database that contains:

- Thermal expansion,
- Stress strain behaviour,
- Transformation plasticity,
- Hardness.

The material properties are identified in systematic experimental studies by variation of the STAAZ parameters. With the help of physical simulation they are determined for the material S355J2G3 as a function of the microstructure for all phases of the thermal cycles.

The STAAZ model is applied to the finite element analyses at several levels of complexity. Initially, numerical simulations of a single temperature influenced element demonstrate the functionality of the STAAZ model. As a result, the laser beam welding simulations of plates identify discrete effects on the development of residual stresses and distortions. Subsequently, the adequacy of the STAAZ model is proved by transferring it to laser beam welding of a component with practical relevance. In addition, all numerical simulations are supported by welding studies. The comparison of measured and calculated residual stresses as well as distortions enables a substantial evaluation of the results.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Kenntnisse	4
2.1	Wärmewirkung des Schweißens	4
2.1.1	Temperaturfelder	4
2.1.2	Werkstoffverhalten von Stählen beim Schweißen	6
2.1.2.1	Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit	6
2.1.2.2	Einfluss der Maximaltemperatur	8
2.1.2.3	Einfluss der Erwärmungsgeschwindigkeit und Austenitisierungszeit	9
2.2	Umwandlungsplastizität	12
2.3	Gefügeabhängige thermomechanische Eigenschaften	13
2.4	Thermomechanische Schweißsimulation	16
2.4.1	Temperaturfeldsimulation	19
2.4.2	Werkstoffsimulation	21
2.4.3	Eigenstress- und Verzugssimulation	24
2.5	Schlussfolgerungen und Zielsetzung	26
3	Spitzentemperatur-Austenitisierungs-Abkühlzeit-Modell	29
3.1	Grundlagen	29
3.2	Kopplung des STAAZ-Modells mit der FE-Analyse	32
3.3	Experimentelle Ermittlung der thermomechanischen Eigenschaften	35
3.3.1	Versuchswerkstoff	35
3.3.2	Wärmedehnung	36
3.3.3	Spannungs-Dehnungsverhalten	46
3.3.4	Umwandlungsplastizität	56
3.4	Härteberechnung beim Laserstrahlschweißen	58
3.5	Schlussfolgerungen	63
4	Erprobung des STAAZ-Modells mit 1-Elementrechnungen	65
4.1	Wärmedehnungen und Spannungen	67
4.2	Umwandlungsplastizität	71
4.3	Dehnratenabhängigkeit der Dehngrenze	75
4.4	Schlussfolgerungen	78

5 Anwendung des STAAZ-Modells für das Laserstrahlschweißen von Platten	79
5.1 Versuchsaufbau	79
5.2 FE-Simulation	83
5.2.1 Thermophysikalische Werkstoffkennwerte	83
5.2.2 Thermomechanische Werkstoffkennwerte	84
5.2.3 Temperaturfeld	85
5.2.3.1 Verifikation des Temperaturfeldes	87
5.2.3.2 STAAZ-Parameter	90
5.2.4 Eigenspannungen und Verzug	93
5.2.4.1 Einfluss der Verfestigungsart	93
5.2.4.2 Einfluss der Gefügeumwandlungen, Umwandlungsplastizität und Dehnrate	96
5.2.4.3 Vergleich der berechneten Eigenspannungen mit Messungen	102
5.2.4.4 Vergleich der berechneten Verschiebungen mit Messungen	106
5.3 Schlussfolgerungen	114
6 Anwendung des STAAZ-Modells für das Laserstrahlschweißen einer bauteilähnlichen Konstruktion	116
6.1 Versuchsaufbau	116
6.2 FE-Simulation	117
6.2.1 Thermophysikalische und -mechanische Werkstoffkennwerte	117
6.2.2 Temperaturfeld	123
6.2.2.1 Verifikation des Temperaturfeldes	123
6.2.3 Eigenspannungen und Verzug	126
6.2.3.1 Vergleich der berechneten Eigenspannungen mit Messungen	126
6.2.3.2 Vergleich der berechneten Verschiebungen mit Messungen	127
6.3 Schlussfolgerungen	133
7 Zusammenfassung	134
Literatur	137
Abbildungsverzeichnis	149
Tabellenverzeichnis	152

Liste der Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	MPa	Parameter vergleichbar mit der Dehngrenze
Ac_1	°C	Starttemperatur der $\alpha - \gamma$ -Umwandlung
Ac_{1b}	°C	Beginn der Umwandlung des Perlits zu Austenit
Ac_{1e}	°C	Ende der Umwandlung des Perlits zu Austenit
Ac_3	°C	Endtemperatur der $\alpha - \gamma$ -Umwandlung
A_0	mm ²	Ausgangsquerschnittsfläche
Ar_1	°C	Beginn der Umwandlung des Austenits zu Perlit
Ar_3	°C	Beginn der Umwandlung des Austenits zu Ferrit
Ar^a	°C	Anfang des Austenitzerfalls während der Abkühlung
Ar^e	°C	Ende des Austenitzerfalls während der Abkühlung
Ar_z	°C	Beginn der Umwandlung des Austenits zu Bainit bzw. Zwischenstufe
B	MPa	Parameter vergleichbar mit Tangentenmodul
c	J/(gK)	spezifische Wärmekapazität
C	%	Kohlenstoffgehalt
C	s ⁻¹	Parameter vergleichbar mit Dehnräte
C_0	W/(mm ² K ⁴)	Strahlungszahl
d_0	mm	Ausgangsdurchmesser
Δd	mm	Durchmesseränderung bei Querdehnungsmessung
dT_{Erw}/dt	°C/s	Erwärmungsrate
F	kN	Kraft
HV	HV	Vickershärte
k	-	Faktor der Umwandlungsplastizität
l_0	mm	Anfangsmesslänge
Δl	mm	Längenänderung
$m(T)$	-	Exponent für die Abhängigkeit der Dehngrenze von der Dehnräte
M_s	°C	Martensitstarttemperatur
n	-	Parameter für nichtlineare Verfestigung
P	kW	Laserstrahlleistung
P_{eqi}	-	Gleichgewichtszustand des Gefügebestandteiles
p_i	-	Volumenanteil des Gefügebestandteiles
q^*	J/(mm ² s)	Leistungsdichte
P_i	-	Gefügebestandteil
q_{fl}	W/mm ²	Wärmestromdichte
q_{flK}	W/mm ²	Wärmestromdichte der Konvektion
q_{flS}	W/mm ²	Wärmestromdichte der Strahlung
Q_v	J/mm ³	Volumenspezifische Wärmemenge
R_{eL}	MPa	Untere Streckgrenze
$R_{p0,1}$	MPa	0,1 %-Dehngrenze
$R_{p0,2}$	MPa	0,2 %-Dehngrenze
T	°C	Temperatur
t	s	Zeit

Zeichen	Einheit	Bedeutung
T_0	°C	Umgebungstemperatur
$t_{B/5}$	s	Abkühlzeit von 800 auf 500 °C
t_A	s	Austenitisierungszeit
t_{cF}	s	kritische Abkühlzeit für Bereichsbeginn Ferrit
t_{cM}	s	kritische Abkühlzeit für Bereichsende 100 % Martensit
T_{Max}	°C	Maximaltemperatur
v	m/min	Schweißgeschwindigkeit
X	-	Kennwert des Mischgefüges für Mischungsregel
X_i	-	Kennwerte des reinen Gefüges für Mischungsregel
X_j	-	Thermomechanischer Werkstoffkennwert für eine STAAZ-Parameterkombination j

Griechische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	K ⁻¹	Wärmeausdehnungskoeffizient
α	W/(mm ² K)	Wärmeübergangskoeffizient bei Konvektion und Strahlung
α_k	W/(mm ² K)	Wärmeübergangskoeffizient bei Konvektion
α_s	W/(mm ² K)	Wärmeabstrahlungszahl
δ	mm	Blechdicke
ε	-	Dehnung, Emissionszahl
ε_{ij}	-	Dehnungstensor
ε	-	Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	s ⁻¹	Dehnrage
ε_{th}	-	Wärmedehnung
$\dot{\varepsilon}_{pl}$	-	plastische Dehnrage
$\dot{\varepsilon}_0$	-	Referenzdehnrage
ε_{el}	-	elastische Dehnung
$\varepsilon_{pl,iso}$	-	plastische Stauchung für isotropes Verfestigungsmodell
$\varepsilon_{pl,kin}$	-	plastische Stauchung für kinematisches Verfestigungsmodell
λ	W/(mmK)	Wärmeleitfähigkeit
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ	g/mm ³	Dichte
σ	MPa	Spannung
σ_e	N/mm ²	Eigenspannung
σ_d	N/mm ²	Druckspannung
σ_F	MPa	Fließgrenze, Fließspannung
$\sigma_{F,D}$	MPa	Druckdehngrenze für kinematisches und isotropes Verfestigungsmodell
σ_{ij}	MPa	Spannungstensor
σ_{FZ}^{kin}	MPa	Zugdehngrenze für kinematisches Verfestigungsmodell
σ_{FZ}^{iso}	MPa	Zugdehngrenze für isotropes Verfestigungsmodell
σ_s	N/mm ²	Streckgrenze
σ_y	MPa	Dehngrenze
$\sigma_{y,0}$	MPa	Dehngrenze bei $\dot{\varepsilon}_0$
τ	s	Verzögerungszeit

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
A	Austenit
B	Bainit
F	Ferrit
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
GU	Gefügeumwandlungen
GW	Grundwerkstoff
M	Martensit
SN1	Schweißnaht 1
SN2	Schweißnaht 2
SN3	Schweißnaht 3
SN4	Schweißnaht 4
SST	Schweißsimulationstool
STAAZ	Spitztemperatur-Austenitisierungs-Abkühlzeit-Modell
STAZ	Spitztemperatur-Abkühlzeit-Schaubild
STAZ-E	Spitztemperatur-Abkühlzeit-Eigenschaftsdiagramm
S-ZTU	Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild
UP	Umwandlungsplastizität
WEZ	Wärmeeinflusszone
ZTA	Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Schaubild
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild
ZTU-E	Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Eigenschaftsdiagramm
Zw	Zwischenstufe