



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Füge- und
Schweißtechnik



Nico Hempel

Zum Einfluss zyklischer Plastizität auf die Eigenspannungsentstehung beim Schweißen hochlegierter Stähle

Forschungsberichte des Instituts für
Füge- und Schweißtechnik

Band 61

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger

Zum Einfluss zyklischer Plastizität auf die Eigenspannungsentstehung beim Schweißen hochlegierter Stähle

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Nico Daniel Hempel
geboren in: Leonberg

eingereicht am: 08.09.2021
mündliche Prüfung am: 06.12.2021

Vorsitz:	Prof. Dr.-Ing.	Markus Böl
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing.	Klaus Dilger
	Prof. Dr. rer. nat.	Christoph Genzel
	Dr.-Ing.	Thomas Nitschke-Pagel

2022

Forschungsberichte des Instituts für Füge- und Schweißtechnik

Band 61

Nico Hempel

**Zum Einfluss zyklischer Plastizität
auf die Eigenspannungsentstehung
beim Schweißen hochlegierter Stähle**

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8432-0

ISSN 1614-4783

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

Vorwort und Danksagung

Diese Arbeit entstand auf Basis meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs) der Technischen Universität Braunschweig. Dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger, gilt mein tiefer Dank für die Ermöglichung und Unterstützung meiner Arbeiten sowie für die Erstbegutachtung. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Christoph Genzel danke ich herzlich für die tatkräftige Unterstützung bei den Messungen am BESSY II, die ausführliche Diskussion der Ergebnisse und nicht zuletzt für die Übernahme des Koreferats. Herrn Dr.-Ing. Thomas Nitschke-Pagel bin ich sehr dankbar für die Anregung zu diesem Forschungsthema, für die vielen fachlichen (und außerfachlichen) Diskussionen, die sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, sowie für seine Tätigkeit als weiterer Prüfer. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Böhl bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und das Interesse an meiner Arbeit.

Auch den weiteren MitarbeiterInnen des ifs danke ich für die Unterstützung und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Insbesondere gilt dies für die Mitglieder der Arbeitsgruppe *Festigkeit und Bauteilverhalten*, mit denen ich auch außerhalb des Institutsgebäudes viel Zeit verbracht habe, sowie die technischen MitarbeiterInnen, die z.B. in Metallographie- und Schweißlabor einen wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Hervorzuheben ist hierbei die Unterstützung von Georg Thomas bei allen prüf- und messtechnischen Herausforderungen. Meinen langjährigen HiWis Daniel Welz und Morteza Dadkhah bin ich äußerst dankbar für die Erledigung unzähliger anspruchsvoller (und manchmal auch niederer) Tätigkeiten, ohne die diese Arbeit nicht hätte gelingen können. Des Weiteren flossen viele Erkenntnisse aus studentischen Arbeiten in diese Dissertation ein.

Für die Finanzierung des dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsvorhabens bin ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft zu Dank verpflichtet. Weitere Unterstützung in Form von Messzeit oder Reiseförderung erhielt das Projekt vonseiten des Helmholtz-Zentrums Berlin für Materialien und Energie (HZB), des Heinz Maier-Leibnitz Zentrums (MLZ), des Helmholtz-Zentrums Geesthacht / Hereon, des National Institute of Materials Physics (Rumänien) sowie des Central European Research Infrastructure Consortium (CERIC). Bei den dortigen Messaufenthalten konnte ich mich auf die Unterstützung von Dr. Daniel Apel, Dr. Mirko Boin, Dr. Corneliu Ghica, Dr. Manuela Klaus, Dr. Joana Rebelo Kornmeier, Guido Wagner sowie Dr. Robert Wimpory verlassen.

Der Rückhalt meiner Familie hat mir die Anfertigung dieser Arbeit erst ermöglicht. Ein kaum in Worte zu fassender Dank gilt meiner Frau Corinna für ihre motivierenden Worte und die fortwährende Unterstützung, insbesondere auch in der Schreibphase während des Corona-Lockdowns daheim mit zwei kleinen Kindern. Diesen danke ich für ihr zumindest halbwegs ausgeprägtes Verständnis dafür, dass „Papa sein Buch schreiben“ musste.

Abstract

Residual stresses can affect the behavior and performance of materials and components in several ways. Therefore, it is of high importance to determine them accurately. While experimental methods can reliably yield the residual stress state resulting from welding, they are often costly and only deliver partial information. In contrast, numerical methods, such as the finite element method, allow for an analysis at any specific point in space and time. However, the accuracy of such computations largely depends on the anticipated material behavior and on the parameters of the models that are used.

In welding simulation, modeling cyclic plasticity is of particular importance. Due to the inhomogeneous temperature field during fusion welding and the resulting constraint of thermal strains, the base material near the molten zone experiences a plastic compression-tension cycle. Different assumptions on how to deal with the associated work hardening at reversal of loading significantly affect the computation results, i.e. the local yield stress and thereby the magnitude and distribution of the computed residual stresses. Comparing them to experimental results has so far yielded inconsistent evidence on the question which plasticity model is the most accurate one for describing the work hardening during welding. Therefore, this question must still be considered as unresolved. Moreover, it is unclear which parameters are to be used for materials testing and its analysis in order to calibrate the plasticity or hardening models.

This work specifically addresses these deficits. Based on an extensive characterization of the unidirectional and cyclic material behavior, welding simulations are performed using different hardening models. In doing so, the effect of the choice of parameters for materials testing and its analysis on the results of the numerical computations is determined as well. The models are evaluated on the basis of an in-depth analysis of experimental weldments, including not only residual stresses, but also, for the first time, microstructural hardening effects. To this end, microindentation testing and diffraction line profile analysis are used after being proved on samples with given hardening state.

None of the plasticity models yields results that completely match the experimental ones. Testing reveals the significance of isotropic hardening, which is independent of the loading direction, but the assumption of purely isotropic behavior results in a partial overestimation of residual stresses.

However, as these are non-conservatively underestimated by other models, this work shows that a purely isotropic hardening model should be used for simulations of single-layer welds.

The observed deviations can be explained by the differences between the thermomechanical loading during welding on the one hand and the conditions of the experiments used for model calibration on the other hand. Therefore, it should be investigated in the future if the plasticity models used for welding simulations can be refined by taking multiaxial effects, locally varying strain amplitudes and the correct handover of accumulated hardening with changing temperature into account. In contrast, other parameters of the tests used for model calibration only have a minor effect on the computation results.

Kurzfassung

Eigenstressungen können das Werkstoff- und Bauteilverhalten in vielfältiger Weise beeinflussen. Eine genaue Bestimmung des aus der schweißtechnischen Fertigung resultierenden Eigenstressungszustands ist daher von großem Interesse. Zwar ist dies mit experimentellen Methoden zuverlässig möglich, jedoch sind diese teils mit hohen Kosten verbunden und liefern stets nur Teilm Informationen. Mit numerischen Verfahren wie der Finite-Elemente-Methode kann hingegen eine Analyse an beliebigen Punkten in Ort und Zeit erfolgen. Allerdings hängt die Genauigkeit solcher Berechnungen in hohem Maße von den getroffenen Annahmen hinsichtlich des Werkstoffverhaltens sowie den Parametern der verwendeten Modelle ab.

Bei der Schweißstruktursimulation kommt der Modellierung zyklischer Plastizität eine besondere Bedeutung zu. Aufgrund der inhomogenen Temperatureinwirkung beim Schmelzschweißen und der damit verbundenen Dehnungsbehinderung kommt es im schweißnahtnahen Grundwerkstoff zu einem plastischen Druck-Zug-Zyklus. Verschiedene Annahmen zum Umgang mit der dabei erzielten mechanischen Verfestigung bei Beanspruchungsrichtungsumkehr beeinflussen die Berechnungsergebnisse, d.h. die lokale Dehngrenze und damit auch die Höhe und Verteilung der berechneten Eigenstressungen, signifikant. Vergleiche mit experimentell ermittelten Eigenstressungen führten bislang zu widersprüchlichen Aussagen hinsichtlich eines geeigneten Wechsellastplastizitätsmodells für die korrekte Beschreibung der Verfestigungsvorgänge beim Schweißen, sodass diese Fragestellung nach wie vor als ungeklärt einzustufen ist. Zudem ist offen, welche Versuchs- und Auswerteparameter für die Kalibrierung entsprechender Modelle verwendet werden sollten.

Die vorliegende Arbeit wendet sich diesen Defiziten gezielt zu. Auf Basis einer umfangreichen Charakterisierung des einsinnigen und zyklischen Werkstoffverhaltens werden Schweißstruktursimulationen mit Modellen unterschiedlichen Verfestigungsverhaltens durchgeführt. Dabei wird auch der Einfluss der für die Kalibrierung verwendeten Versuchs- und Auswerteparameter auf die Berechnungsergebnisse untersucht. Eine Bewertung der Modelle erfolgt anhand einer eingehenden experimentellen Analyse von Versuchsschweißungen, die neben den Eigenstressungen erstmals auch mikrostrukturelle Verfestigungseffekte umfasst. Hierzu werden Mikroindentie-

rungsversuche und die Interferenzlinienprofilanalyse eingesetzt, die zunächst an Proben mit bekanntem Verfestigungszustand erprobt werden.

Mit keinem der verwendeten Wechsellastmodellen wird eine vollständige Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen erzielt. Die experimentelle Charakterisierung zeigt die Bedeutung isotroper, d.h. richtungsunabhängiger Verfestigungseffekte auf, jedoch führt deren alleinige Annahme teilweise zu einer Überschätzung der Eigenspannungen. Da diese mit anderen Modellen jedoch unterschätzt werden, wird auf Basis der vorliegenden Informationen die Verwendung eines rein isotropen Verfestigungsmodells bei Simulationen einlagiger Schweißungen empfohlen.

Als mögliche Gründe für die beobachteten Abweichungen werden die Unterschiede zwischen den thermomechanischen Vorgängen beim Schweißen einerseits und den den Modellen zugrundeliegenden Versuchen zur Werkstoffcharakterisierung andererseits identifiziert. Es ist daher zu prüfen, ob die Verfestigungsmodelle durch die Berücksichtigung mehrachsiger Effekte, lokal unterschiedlicher Dehnungsamplituden und die korrekte Übergabe bereits erzielter Verfestigungen bei Temperaturänderung verbessert werden können. Der Einfluss anderer Parameter der Versuche zur Werkstoffcharakterisierung ist dagegen als gering zu bewerten.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	I
English abstract	III
Kurzfassung	V
Abkürzungsverzeichnis	XII
Verzeichnis lateinischer Symbole	XIV
Verzeichnis griechischer Symbole	XVIII
1 Einleitung	1
2 Kenntnisstand	3
2.1 Eigenspannungen	3
2.1.1 Definition von Eigenspannungen	3
2.1.2 Entstehung von Schweiß eigenspannungen	4
2.1.3 Wirkung von Eigenspannungen	9
2.1.4 Experimentelle Eigenspannungsbestimmung	11
2.1.4.1 Überblick über bestehende Verfahren	11
2.1.4.2 Röntgendiffraktion	12
2.1.4.3 Synchrotronröntgenbeugung	15
2.1.4.4 Neutronendiffraktion	18
2.2 Mechanische Verfestigung	19
2.2.1 Verfestigung bei einsinniger Verformung	20
2.2.2 Zyklische Verfestigung bei uniaxialer Beanspruchung	21
2.2.3 Kontinuumsmechanische Beschreibung	23
2.2.3.1 Isotrope Verfestigung	24
2.2.3.2 Kinematische Verfestigung	25
2.2.3.3 Isotrop-kinematisches Verfestigungsverhalten	28
2.2.4 Mikrostrukturelle Vorgänge	28
2.2.4.1 Plastische Verformung	28
2.2.4.2 Ursachen der mechanischen Verfestigung	30
2.2.4.3 Zyklische Verfestigung	33

2.2.5	Experimentelle Charakterisierung des Verfestigungszustands	37
2.2.5.1	Instrumentierte Eindringprüfung	37
2.2.5.2	Interferenzlinienprofilanalyse	41
2.2.5.3	Transmissionselektronenmikroskopie	52
2.3	Numerische Schweißsimulation	53
2.3.1	Begriffsdefinitionen	53
2.3.2	Schweißstruktursimulation	55
2.4	Einfluss des Verfestigungsmodells in der Schweißstruktursimulation	56
2.4.1	Plastische Verformung beim Schweißen	56
2.4.2	Bisherige Untersuchungen zum Einfluss des Verfestigungsmodells	58
2.4.2.1	IIW-Ringversuch	59
2.4.2.2	NeT	60
2.4.2.3	Weitere Untersuchungen	62
2.4.2.4	Zusammenfassung	63
3	Ziel der Arbeit und Lösungsweg	65
4	Experimentelle Untersuchungen	67
4.1	Charakterisierung der verwendeten Werkstoffe	67
4.1.1	Hochlegierter austenitischer Stahl X2CrNi18-9	67
4.1.2	Hochlegierter ferritischer Stahl X6Cr17	69
4.2	Probenherstellung	72
4.2.1	Proben mit bekanntem Verfestigungszustand	72
4.2.2	Schweißproben	73
4.3	Charakterisierung des Verfestigungszustands	76
4.3.1	Indentierungsversuche	76
4.3.2	Interferenzlinienprofilanalyse	77
4.3.2.1	Einlinienverfahren	77
4.3.2.2	Mehrlinienverfahren	78
4.3.2.3	Durchgeführte Untersuchungen	81
4.3.3	Transmissionselektronenmikroskopie	82
4.4	Experimentelle Spannungsanalyse	84
4.4.1	In-situ-Bestimmung transienter Spannungen beim Schweißen	84
4.4.2	Röntgenographische Eigenspannungsanalyse	86

4.4.3	Neutronographische Eigenspannungsanalyse	89
4.5	Ermittlung temperaturabhängiger Werkstoffkennwerte	90
4.5.1	Zugversuche	90
4.5.2	Zyklische Versuche	92
5	Schweißsimulation und Werkstoffmodellierung	93
5.1	Schweißstruktursimulation	93
5.1.1	Finite-Elemente-Modellierung	93
5.1.2	Thermische Simulation	94
5.1.3	Mechanische Simulation	97
5.2	Modellierung des Verfestigungsverhaltens	98
5.2.1	Auswertung der Warmzugversuche	98
5.2.2	Auswertung der zyklischen Versuche	102
5.2.2.1	Kinematische Verfestigung	102
5.2.2.2	Isotrope Verfestigung	104
5.2.3	Verifizierung und Validierung an uniaxialen Versuchen	105
5.2.4	Anmerkung zu temperaturabhängigen Parametern . .	109
5.3	Untersuchte Modelle und Größen	109
6	Versuchsergebnisse	112
6.1	Verfestigungszustand gezielt verformter Proben	112
6.1.1	Ergebnisse der Indentierungsversuche	112
6.1.2	Diskussion der Ergebnisse der Indentierungsversuche	115
6.1.3	Ergebnisse der Linienprofilanalyse	118
6.1.3.1	Synchrotronröntgenbeugung	118
6.1.3.2	Röntgenbeugung	119
6.1.3.3	Neutronenbeugung	120
6.1.4	Diskussion der Ergebnisse der Linienprofilanalyse . . .	123
6.1.5	Bewertung der Methoden zur Verfestigungscharakteri- sierung	125
6.2	Verfestigungszustand geschweißter Proben	127
6.2.1	Entwicklung während des Schweißens	127
6.2.2	Verfestigung an der Probenoberfläche	129
6.2.3	Verfestigung in tieferliegenden Bereichen	130
6.2.4	Ergebnisse der TEM-Untersuchungen	133
6.3	Eigenspannungszustand geschweißter Proben	138
6.3.1	Transiente Spannungen während des Schweißens . . .	138
6.3.2	Eigenspannungen nach vollständiger Abkühlung . . .	139

7	Simulationsergebnisse	143
7.1	Einfluss des Verfestigungsmodells	143
7.1.1	Verfestigungszustand	143
7.1.1.1	Entwicklung während des Schweißens	143
7.1.1.2	Verfestigung nach vollständiger Abkühlung	145
7.1.2	Eigenspannungszustand	149
7.1.2.1	Transiente Spannungen während des Schweißens	149
7.1.2.2	Eigenspannungen nach vollständiger Abkühlung	150
7.2	Einfluss der Dehnrate	153
7.3	Einfluss des Dehnungsoffsets	155
7.4	Einfluss des Temperaturpfads	156
8	Diskussion der Ergebnisse	158
8.1	Konsistenz und Aussagekraft der Versuchsergebnisse	158
8.1.1	Verfestigungszustand	158
8.1.1.1	Konsistenz von In- und Ex-situ-Messungen	158
8.1.1.2	Konsistenz von Linienprofilanalyse und Mikroindentation	160
8.1.1.3	Konsistenz von Linienprofilanalyse und TEM-Untersuchungen	162
8.1.2	Eigenspannungszustand	164
8.1.2.1	Konsistenz von In- und Ex-situ-Messungen	164
8.1.2.2	Konsistenz der Messungen mit verschiedenen Beugungsverfahren	167
8.2	Verfestigungseinfluss auf den Eigenspannungszustand	171
8.2.1	Vorgänge beim Schweißen	171
8.2.2	Finaler Verfestigungs- und Eigenspannungszustand	172
8.2.3	Schlussfolgerungen	176
8.3	Einflüsse auf die Simulationsergebnisse	178
8.3.1	Einfluss des Verfestigungsmodells	178
8.3.1.1	Isotrope vs. kinematische Verfestigung	180
8.3.1.2	Gemischte vs. rein isotrope / kinematische Verfestigung	182
8.3.1.3	Einflüsse auf die Modellierung gemischter Verfestigung	183

8.3.2	Einfluss der Dehnrates	185
8.3.3	Einfluss des Dehnungsoffsets	187
8.3.4	Einfluss der Temperaturabhängigkeit von γ_i	188
8.3.5	Schlussfolgerungen	189
8.4	Konsistenz numerischer und experimenteller Ergebnisse	191
8.4.1	Verfestigungszustand	191
8.4.2	Eigenspannungszustand	195
8.4.3	Werkstoffmechanische Deutung der Ergebnisse	201
8.4.4	Einordnung der Ergebnisse in das Schrifttum	206
8.4.5	Schlussfolgerungen	209
9	Zusammenfassung und Ausblick	211
	Literaturverzeichnis	215
	Anhang A: Werkstoffdaten X2CrNi18-9	235
	Anhang B: Werkstoffdaten X6Cr17	245

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AISI	American Iron and Steel Institute
BER II	Berliner Experimentier-Reaktor II
DEK	diffraktionselastische Konstante
DMS	Dehnungsmessstreifen
ED	energie dispersiv
EVA	Einlinien-Voigt-Analyse
Fa.	Firma
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FRM II	Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz / Forschungsreaktor München II
Gl.	Gleichung
HWB	Halbwertsbreite
IB	Integralbreite
ifs	Institut für Füge- und Schweißtechnik
IIW	International Institute of Welding
iso.	isotrop
kfz	kubisch flächenzentriert
kin.	kinematisch
krz	kubisch raumzentriert
Lab.	Labor
LR	Längsrichtung
m.r.d.	multiples of random distribution (Vielfache der zufälligen Verteilung)
MVA	Modifizierte Voigt-Analyse
MWH	Modifizierte Williamson-Hall(-Methode)

Abkürzung	Beschreibung
NeT	European Network on Neutron Techniques Standardization for Structural Integrity
NIST	National Institute of Standards and Technology
NR	Normalenrichtung
PLC	Portevin-Le-Chatelier
QR	Querrichtung
RSA	Röntgenographische Spannungsanalyse
SFE	Stapelfehlerenergie
Tab.	Tabelle
TCH	Thompson, Cox & Hastings
TEM	Transmissionselektronenmikroskop(ie)
TG	Task Group
WEZ	Wärmeeinflusszone
WIG	Wolfram-Inert-Gas
WR	Walzrichtung

Verzeichnis lateinischer Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	1	Bruchdehnung
a	nm	Gitterparameter
a_0	nm	Gitterparameter im spannungsfreien Zustand
a_{ψ}^{hkl}	nm	normierter Gitterparameter der $\{100\}$ -Ebenen, berechnet aus d^{hkl} in ψ -Richtung
A_i	1	elastische Anisotropie
B	1	Zonenachse
b	nm	Burgersvektor
b_k	1	k -te Größenänderungsrate der Fließfläche
C	1	Versetzungskontrastfaktor
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
c_{11}, c_{12}, c_{44}	MPa	Elastizitätsmoduln des kubischen Einkristalls
C_B	N/mm ²	Krümmung der Eindringkurve bei Belastung
C_k	MPa	k -ter kinematischer Verfestigungsmodul
c_w	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität
D	nm	Domänengröße
d	nm	Dicke von TEM-Proben
d^{hkl}	nm	Abstand zwischen Netzebenen $\{hkl\}$
d_0^{hkl}	nm	Abstand zwischen Netzebenen $\{hkl\}$ im spannungsfreien Zustand
E	MPa	Elastizitätsmodul
E^*	MPa	reduzierter Elastizitätsmodul
E_{in}	MPa	Elastizitätsmodul des Indenters
E^{hkl}	MPa	Elastizitätsmodul der Netzebenen $\{hkl\}$
E_{λ}	keV	Energie
e	1	Mikrodehnung

Symbol	Einheit	Beschreibung
F	N	Kraft
F_{\max}	N	maximale Kraft
F_k, G_k, H_k	a.u.	k-ter Fourier-Koeffizient von $f(x), g(x), h(x)$
$f(x)$	a.u.	physikalisches Profil
f_q	1	Faktor für Flächenwärmestrom
$f_{\text{St}}, f_{\text{Schr}}$	1	Anteil der Stufen- bzw. Schraubenversetzungen
G	MPa	Schubmodul
g	1	reziproker Gittervektor
$g(x)$	a.u.	instrumentelles Profil
H^2	1	Orientierungsfaktor im kubischen Kristallsystem
h	μm	Eindringtiefe
h_{Konv}	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
h_λ	J s	PLANCKsches Wirkungsquantum
h_{\max}	μm	maximale Eindringtiefe
h_p	μm	plastische Eindringtiefe
h_s	J/kg	spezifische Schmelzenthalpie
$h(x)$	a.u.	gemessenes Profil
hkl	1	LAUE-Indizes
I	a.u.	Intensität
I_s	A	Schweißstrom
K	1/nm	Betrag des Beugungsvektors
ΔK	1/nm	Breite des Linienprofils
k_V	1	Konstante für mechanische Verfestigung
l	mm	Länge
Δl	mm	Längenänderung
M	1	Taylorfaktor
M_V	1	Parameter zur Beschreibung der Versetzungsverteilung

Symbol	Einheit	Beschreibung
N	1	Anzahl
n	1	Verfestigungsexponent
P	keV ²	Anpassungsparameter bei der TCH-Methode
Q_k	MPa	k -ter Faktor zur Änderung der Fließflächengröße
q	1	Faktor zur Bestimmung des Versetzungs-kontrast-faktors
\dot{q}_s	J/(s mm ²)	Flächenwärmestrom aufgrund des Schweißens
R_e	m	effektiver äußerer Abschneideradius einer Ver- setzung
R_m	MPa	Zugfestigkeit
r_s	mm	Radius der äquivalenten Wärmequelle
s_1^{hkl}	10 ⁻⁶ mm ² /N	diffractionselastische Konstante der Netzebenen { hkl }
$\frac{1}{2}s_2^{hkl}$	10 ⁻⁶ mm ² /N	diffractionselastische Konstante der Netzebenen { hkl }
T	°C bzw. K	Temperatur
ΔT	°C bzw. K	Temperaturdifferenz
T_{liquidus}	°C bzw. K	Liquidustemperatur
T_{max}	°C bzw. K	maximale Temperatur
T_s	°C bzw. K	Schmelztemperatur
T_{solidus}	°C bzw. K	Solidustemperatur
t	s	Zeit
U	1	Anpassungsparameter bei der TCH-Methode
U_s	V	Schweißspannung
$u_{x/y/z}$	mm	Verschiebung in x -, y - bzw. z -Richtung
V	1	relative Verfestigung
v_s	cm/min	Schweißgeschwindigkeit
X	keV	Anpassungsparameter bei der TCH-Methode

Symbol	Einheit	Beschreibung
x	mm	Koordinate, transversaler Abstand von der Schweißnahtmitte
Y	1	Anpassungsparameter bei der TCH-Methode
y	mm	Koordinate in Schweißrichtung, beginnend ab Probenkante
z	mm	Koordinate, Abstand von der Probenoberfläche

Verzeichnis griechischer Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
α	MPa	uniaxiale Komponente des Rückspannungstensors
$\boldsymbol{\alpha}$	MPa	gesamter Rückspannungstensor
α_k	MPa	k -te Komponente des Rückspannungstensors
$\boldsymbol{\alpha}'$	MPa	deviatorischer Anteil des Rückspannungstensors
α_T	1/K	Wärmeausdehnungskoeffizient
β	° bzw. keV	Integralbreite
β_L, β_G	° bzw. keV	Lorentz- bzw. Gauß-Anteil der Integralbreite
β_D, β_e	° bzw. keV	Anteile der Integralbreite durch Einflüsse von Domänengröße bzw. Mikrodehnung
Γ	° bzw. keV	Halbwertsbreite
Γ_L, Γ_G	° bzw. keV	Lorentz- bzw. Gauß-Anteil der Halbwertsbreite
Γ_D, Γ_e	° bzw. keV	Anteile der Halbwertsbreite durch Einflüsse von Domänengröße bzw. Mikrodehnung
γ_k	1	k -ter kinematischer Verfestigungsexponent
ε	1	wahre Dehnung
$\Delta\varepsilon$	1	Dehnungsschwingbreite
ε_e	1	elastische Dehnung
ε_m	1	mittlere Dehnung
ε_n	1	nominelle Dehnung
ε_p	1	plastische Dehnung
$\boldsymbol{\varepsilon}_p$	1	plastischer Dehnungstensor
$\varepsilon_{p,eq}$	1	äquivalente plastische Dehnung
ε^{hkl}	1	Gitterdehnung der Netzebenen $\{hkl\}$
ε_r^{hkl}	1	relative Gitterdehnung
ε_{Rad}	1	Emissionsfaktor

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\varepsilon_{\varphi,\psi}$	1	Dehnung in φ - und ψ -Richtung
$\dot{\varepsilon}$	s ⁻¹	Dehnrate
η	1	Lorentzparameter der Pseudo-Voigt-Funktion
η_s	1	thermischer Wirkungsgrad beim Schweißen
θ	°	Beugungswinkel
λ	Å	Wellenlänge
λ_w	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
ν	1	Querkontraktionszahl
ν_{in}	1	Querkontraktionszahl des Indenters
ν^{hkl}	1	Querkontraktionszahl der Netzebenen $\{hkl\}$
ρ	1/m ²	Versetzungsdichte
σ	MPa	wahre Spannung
$\boldsymbol{\sigma}$	MPa	Spannungstensor
$\boldsymbol{\sigma}'$	MPa	deviatorischer Spannungstensor
$\sigma_{0,01\%}$	MPa	Dehngrenze mit 0,01 % plastischer Dehnung
$\sigma_{0,1\%}$	MPa	Dehngrenze mit 0,1 % plastischer Dehnung
$\sigma_{0,2\%}$	MPa	Dehngrenze mit 0,2 % plastischer Dehnung
$\sigma_{3,3\%}$	MPa	Dehngrenze mit 3,3 % plastischer Dehnung
σ_I^{ES}	MPa	Eigenspannung I. Art
σ_{II}^{ES}	MPa	Eigenspannung II. Art
σ_{III}^{ES}	MPa	Eigenspannung III. Art
$\sigma_{1/2/3}$	MPa	1./2./3. Hauptspannung
σ_F	MPa	Fließflächengröße
$\Delta\sigma_F$	MPa	Fließflächengrößenänderung, d.h. isotrope Verfestigung
σ_{F0}	MPa	Ausgangsfließflächengröße
$\sigma_{F,max}$	MPa	maximale Fließflächengröße
σ_f	MPa	Fließspannung

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\Delta\sigma_f$	MPa	mechanische Verfestigung
σ_{f0}	MPa	Ausgangsfliessspannung
$\sigma_{f,D}$	MPa	Fließdruckspannung
$\sigma_{f,eq}$	MPa	äquivalente Fließspannung
$\sigma_{f,Z}$	MPa	Fließzugspannung
σ_1^{ES}	MPa	Längseigenspannung
σ_n	MPa	nominelle Spannung
σ_q^{ES}	MPa	Quereigenspannung
σ_{vM}	MPa	Vergleichsspannung nach VON MISES
$\sigma_{ }$	MPa	mittlere oberflächenparallele Spannung
σ_φ	MPa	Normalspannung in φ -Richtung
Φ	1	Funktion für Fließkriterium
φ	°	Azimutwinkel
ψ	°	Distanzwinkel gegenüber Oberflächenlot