



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Füge- und
Schweißtechnik



Ann-Christin Hesse

Zur Bruchzähigkeit strahlgeschweißter hochfester Feinkornbaustähle

Forschungsberichte des Instituts für
Füge- und Schweißtechnik

Band 66

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger

Zur Bruchzähigkeit strahlgeschweißter hochfester Feinkornbaustähle

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

zur Erlangung der Würde

einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Ann-Christin Hesse
aus: Verl

eingereicht am: 12.05.2022

mündliche Prüfung am: 06.07.2022

Vorsitz: Prof. Dr. rer. nat. Joachim Rösler
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Klaus Dilger,
Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann

Forschungsberichte des Instituts für Füge- und Schweißtechnik

Band 66

Ann-Christin Hesse

**Zur Bruchzähigkeit strahlgeschweißter
hochfester Feinkornbaustähle**

Shaker Verlag
Düren 2023

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8896-0

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

Meiner Familie

Danksagung

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Füge- und Schweißtechnik der Technischen Universität Braunschweig entstanden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger danke ich herzlich für die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Arbeit, das in mich gesetzte Vertrauen sowie für die fachlichen Anregungen. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jean Pierre Bergmann bedanke ich mich ausdrücklich für die Übernahme des Koreferats. Überdies danke ich Prof. Dr.-Ing. Joachim Rösler für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Thomas Nitschke-Pagel für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit in der Abteilung Festigkeit und Bauteilverhalten. Für die großartige Zusammenarbeit in der Arbeitsgruppe und die vielfältigen fachlichen und fachfremden Diskussionen und Anregungen möchte ich mich bei meinen (ehemaligen) Kollegen Jakob Klassen, Jonas Hensel, Nico Hempel, Hamdollah Eslami-Chalandar und Paul Diekhoff bedanken.

Besonders hervorheben möchte ich die Unterstützung durch Sakari Pallaspuuro (University of Oulu), welcher die EBSD-Messungen sowie einen Teil der fraktographischen Untersuchungen durchgeführt hat und durch zahlreiche fachliche Diskussionen im Bereich der Bruchmechanik zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Teile der Schweißungen sind bei Industriepartnern im Rahmen zweier AiF-Projekte (IGF-Nr. 18.087 N und IGF-Nr. 20.350 N) angefertigt worden. Hierfür wird den Unternehmen TRUMPF GmbH & Co. KG, Ferro Umformtechnik GmbH & Co. KG sowie pro-beam GmbH & Co. KGaA gedankt.

Einen wichtigen Beitrag zur Arbeit haben auch die Mitarbeiter in der Technik und Verwaltung des Instituts beigetragen, ohne welche die nötige Infrastruktur, die Fertigung von Proben sowie die Untersuchung von Proben nicht möglich gewesen wäre. Vielen Dank euch allen!

Teile der Ergebnisse sind in studentischen Arbeiten von Thomas Seebach, Tim Engelke, Paula Clasen, Timo Timm, Fabian Walter, Jan Lewerenz, Ole Dietrich, Axel Dimpker, Hannes Klemm und Stanislav Barnash entstanden.

Während meiner Zeit am Institut bin ich durch die wissenschaftlichen Hilfskräfte Hannes Klemm, Thomas Seebach, Tim Engelke, Axel Dimpker, Ole Dietrich, Maximilian Hribsek, Simon Tscherning und Siegfried Weiß unterstützt worden. Ich danke ihnen für die gute Zusammenarbeit.

Abschließend danke ich meiner Familie, meinen Freunden und insbesondere meinem Mann Birk für die Unterstützung und Geduld in den vergangenen Jahren, die mir erst die Anfertigung dieser Arbeit ermöglicht haben. Ein besonderer Dank gilt Nora, die mich bei der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit eng begleitet hat.

Kurzfassung

Hochfeste Stähle finden zunehmend Verwendung, beispielsweise im Mobilkranbau. Um die strukturelle Integrität dieser Bauwerke auch bei niedrigen Temperaturen und dem Vorliegen mehrachsiger Spannungszustände zu gewährleisten, muss eine ausreichende Zähigkeit sichergestellt werden. Hierzu ist sowohl die Beschreibung der temperaturabhängigen Zähigkeitskennwerte, als auch ein Verständnis der Faktoren unabdingbar, welche die Zähigkeit bestimmen.

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Charakterisierung und einheitlichen Beschreibung der Zähigkeit strahlgeschweißter, hochfester Stähle. Hierzu werden Grundwerkstoffe mit Mindeststreckgrenzen zwischen 690 MPa und 1300 MPa in Blechdicken zwischen 8 mm und 30 mm mittels CO₂-Laserstrahlschweißen, Scheibenlaserschweißen und Elektronenstrahlschweißen gefügt. Die Charakterisierung der Zähigkeit im spröd-duktilen Übergangsbereich wird mittels Kerbschlagbiege- und Bruchmechanikversuchen durchgeführt.

Zu den wesentlichen Erkenntnissen im Bereich der Kerbschlagbiegeversuche zählt die Ermittlung eines einheitlichen Kurvenverlaufs im spröd-duktilen Übergangsbereich, welcher durch Normierung der Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven erreicht wird. Dieser einheitliche Verlauf kann genutzt werden, um die Sicherheit bei der Bestimmung charakteristischer Werte im spröd-duktilen Übergangsbereich zu erhöhen, insbesondere dann, wenn durch Rissauswandern nur wenig Werte in diesem Bereich zur Verfügung stehen.

Aus den Bruchmechanikversuchen lässt sich ebenfalls ein einheitlicher Verlauf der Bruchzähigkeit im spröd-duktilen Übergangsbereich ableiten, ähnlich, wie er auch von niedrigfesteren Stählen als Master Curve normiert ist. Allerdings ist hier für die hochfesten, strahlgeschweißten Stähle eine Anpassung der Steigung notwendig, sie verläuft flacher, als es für die niedrigfesteren Stähle bekannt ist. Die Berücksichtigung der angepassten Steigung verhindert eine Überschätzung der Zähigkeit im

Bereich von Temperaturen oberhalb der Referenztemperatur T_0 sowie eine Unterschätzung der Zähigkeit im Bereich von Temperaturen unterhalb von T_0 .

Darüber hinaus kann eine Korrelation zwischen der Übergangstemperatur aus dem Kerbschlagbiegeversuch, der T_{35J/cm^2} -Temperatur und der Referenztemperatur aus dem Bruchmechanikversuch, der T_0 -Temperatur aufgezeigt werden. Solche Korrelationen werden in einschlägigen Normen verwendet, um die Abschätzung der Bruchzähigkeit mit Hilfe von Ergebnissen des Kerbschlagbiegeversuchs zu ermöglichen. Die hier gefundene Korrelation bildet daher ein wichtiges Instrument, um hochfeste, strahlgeschweißte Stähle zukünftig normativ einfacher verankern zu können.

Ferner werden Faktoren identifiziert, welche sich auf die Zähigkeit auswirken. Es zeigt sich, dass das initiale Versagen von überdurchschnittlich großen Körnern ausgeht. Auch Untersuchungen mittels Elektronenrückstrahlbeugung bestätigen, dass ein feinkörnigeres Gefüge der wesentliche Grund für die bessere Zähigkeit ist, die bei einigen Schweißungen zu beobachten ist. Lässt sich also die Korngröße in Strahlschweißungen zukünftig kontrollieren, so ist dies ein probates Mittel, um die Zähigkeit dieser Schweißungen zu erhöhen.

Abstract

The use of high-strength steels in engineering practice has increased in the last decades, for example in mobile cranes. In order to ensure the structural integrity, even at low temperatures and multiaxial stresses, sufficient toughness is needed. Therefore, both, the description of the temperature-dependent toughness parameters and an understanding of the factors that determine the toughness are essential.

The present work is dedicated to the characterization and uniform description of the toughness of beam-welded, high-strength steels. For this purpose, base materials with nominal yield strengths between 690 MPa and 1300 MPa in sheet thicknesses between 8 mm and 30 mm are welded with CO₂ laser beam welding, disk laser welding and electron beam welding. To characterize the toughness in the ductile to brittle transition region, Charpy impact test as well as fracture mechanics tests were used.

One of the essential findings in the field of the Charpy impact tests is the determination of a uniform curve in the ductile to brittle transition region. This uniform curve increases the reliability of the determination of characteristic values in the ductile to brittle transition region. This is particularly helpful, if only few test results are available due to crack path deviation.

The fracture mechanics tests show a uniform course of the fracture toughness in the ductile to brittle transition region. For lower-strength steels, this uniform trend is known as the fracture mechanics Master Curve. However, for the high-strength beam-welded steels, an adjustment of the slope of this curve towards a flatter slope is necessary.

Taking the adjusted slope into account prevents the toughness from being overestimated in the high temperature range and from underestimating the toughness in the low temperature range.

With the help of the impact test results and the fracture mechanics results, a correlation between the transition temperature from the impact test and the reference

temperature from the fracture mechanics test is established, the T_0 - T_{35J/cm^2} -correlation. Such correlations contribute to relevant standards to enable estimation of the fracture toughness from Charpy impact test results. Therefore, the correlation is an important tool to incorporate high-strength, beam-welded steels in future standards.

Finally, microstructural factors are identified which affect the toughness. The initial failure originates from coarse grains with sizes clearly above the average grain size. Investigations using electron back-reflection also confirm that a finer grain is the main reason for the better toughness of some welds. If the grain size in beam welds can be controlled in the future, this seems to be a promising way to ensure a sufficient toughness in beam-welded joints made from high-strength steels.

Inhalt

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einleitung	1
2 Kenntnisstand.....	5
2.1 Höchst- und ultrahochfeste Feinkornbaustähle	5
2.1.1 Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle	8
2.1.2 Flüssigkeitsvergütete Feinkornbaustähle	9
2.1.3 Schweißen mittels Strahlverfahren.....	10
2.1.4 Schweißtechnische Verarbeitung von Feinkornbaustählen.....	12
2.1.5 Zähigkeit strahlgeschweißter hochfester Stähle	16
2.2 Bruchverhalten von Stählen	20
2.3 Charakterisierung durch Kerbschlagbiegeversuche.....	23
2.3.1 Mathematische Ausgleichsfunktionen.....	26
2.3.2 Untermaßproben.....	29
2.3.3 Rissauswandern	31
2.3.4 Splitting	34
2.4 Charakterisierung durch Bruchmechanikversuche	35
2.4.1 Linear-elastische Bruchmechanik	36
2.4.2 Elastisch-plastische Bruchmechanik	38
2.4.3 Praktische Erprobung der Bruchzähigkeit.....	40
2.4.4 Master Curve Konzept	42
2.5 Temperaturkorrelationen zur Bestimmung der T_0 -Temperatur	46
2.6 Forschungslücke.....	48
3 Zielstellung	55
4 Experimentelle Untersuchungen	57

4.1	Charakterisierung der Grundwerkstoffe	57
4.2	Anfertigung der Strahlschweißungen	59
4.3	Kerbschlagbiegeversuche	63
4.4	Bruchmechanikversuche	65
4.5	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	68
5	Darstellung der Versuchsergebnisse	71
5.1	Metallographische Charakterisierung der Schweißungen	71
5.2	Kerbschlagbiegeversuche	74
5.2.1	Ermittlung der Zähigkeit in der Tieflage	74
5.2.2	Kerbschlagbiegeversuche an Grundwerkstoffen	76
5.2.3	Einfluss der Probendicke	78
5.2.4	Kerbschlagbiegeversuche an geschweißten Proben	80
5.3	Bruchmechanikversuche	87
5.4	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	97
5.4.1	Untersuchungen der Gefüge	98
5.4.2	Untersuchungen der Korngröße	99
5.4.3	Untersuchungen der Bruchflächen	103
6	Diskussion	109
6.1	Metallographische Charakterisierung	109
6.2	Kerbschlagbiegeversuche	111
6.2.1	Tieflage der Kv-T-Kurve	111
6.2.2	Hochlage der Kv-T-Kurve	111
6.2.3	Einfluss der Probendicke auf die Kv-T-Kurve	112
6.2.4	Rissauswandern bei strahlgeschweißten Nähten	114
6.2.5	T_{35J/cm^2} -Übergangstemperatur	117

6.2.6	Überprüfung eines einheitlichen Kurvenverlaufs im spröd-duktilen Übergangsbereich	119
6.3	Bruchmechanikversuche	124
6.3.1	Referenztemperatur T_0	124
6.3.2	Temperaturabhängigkeit der Bruchzähigkeit im spröd-duktilen Übergangsbereich	125
6.4	Einflussfaktoren auf die Zähigkeit	130
6.5	Temperaturkorrelation	136
7	Fazit	141
8	Ausblick	147
9	Literaturangaben	149
10	Anhang	171

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
a_{KV}	-	Konstante zur Beschreibung der Ausgleichsfunktion nach SEP 1670; Definiert die Steigung des Übergangsbereichs
a	J/cm ²	Schnittpunkt mit der Ordinate bei Nutzung der exponentiellen Ausgleichfunktion
a_0	mm	Ausgangsrisslänge
A_V	J	Kerbschlagarbeit einer Charpy-V Normalmaßprobe
AW	-	Lichtbogenschweißverfahren
B	mm	Probendicke
BG	-	Bewertungsgruppe nach DIN EN ISO 13919-1
b	-	Steigung der Kurve bei Nutzung der exponentiellen Ausgleichfunktion
b_0	mm	Abstand von der Risspitze zur gegenüberliegenden Probenfläche bei einer Bruchmechanikprobe
B_0	mm	Probendicke einer Bruchmechanikprobe, welche zur Normierung genutzt wird, entspricht 25,4 mm
BMV	-	Bruchmechanikversuch
B_{UM}	mm	Probenbreite einer Untermaßprobe
c	-	Konstante in der Ausgleichsfunktion nach Oldfield
C	°C ⁻¹	Konstante zur Beschreibung der Master Curve
CET	%	Kohlenstoffäquivalent zur Abschätzung der Vorwärmtemperatur zur Vermeidung von wasserstoffunterstützten Kalt-rissen
C_{V-US}	J	Kerbschlagarbeit in der Hochlage
d	-	Konstante in der Ausgleichsfunktion nach SEP 1670
d_k	µm	Mittlerer Korndurchmesser
$d_{80\%}$	µm	Korndurchmesser bei 80% der kumulierten Häufigkeitsverteilung
$d_{90\%}$	µm	Korndurchmesser bei 90% der kumulierten Häufigkeitsverteilung
E	MPa	E-Modul
EB	-	Elektronenstrahlschweißen

Symbol	Einheit	Beschreibung
F	MPa	Kraft
g	-	Abstand vom Wendepunkt zur Hoch- bzw. Tieflage der sigmoidalen Kv-T-Kurve
GW	-	Grundwerkstoff
HL	-	Hochlage der Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurve
HD	ml/100g	Wasserstoffgehalt im Lichtbogenschweißgut
J	N/mm	J-Integral
KBV	-	Kerbschlagbiegeversuch
K ₀	MPa√m	Spannungsintensitätsfaktor bei einer kumulativen Versagenswahrscheinlichkeit von 63,2%
K _{IC}	MPa√m	Kritischer Spannungsintensitätsfaktor bei Modus I Belastung
K _{JC}	MPa√m	Spannungsintensitätsfaktor, welcher aus dem kritischen J-integral J _c berechnet wird
K _{JC(med)}	MPa√m	Medianwert der Bruchzähigkeit K _{JC}
K _{JC(0,xx)}	MPa√m	Bruchzähigkeit bei der Versagenswahrscheinlichkeit xx %
K _{V,HL}	J/cm ²	Wert für Kerbschlagzähigkeit in der Hochlage einer Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurve
K _{V,TL}	J/cm ²	Wert für Kerbschlagzähigkeit in der Tieflage einer Kerbschlagzähigkeits -Temperatur-Kurve
K _{V,HL/2}	J/cm ²	Wert für Kerbschlagzähigkeit am Wendepunkt einer Kerbschlagzähigkeits -Temperatur-Kurve
K _V	J/cm ²	Kerbschlagzähigkeit einer Charpy-V Normalmaßprobe bezogen auf die geringste Querschnittsfläche der Probe
K _{V-UM}	J/cm ²	Kerbschlagzähigkeit einer Charpy-V Untermaßprobe bezogen auf die geringste Querschnittsfläche der Probe
LB	-	Laserstrahlschweißen
LBHy	-	Laserhybridschweißen
m	-	Formparameter der Weibullverteilung zur Beschreibung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Bruchmechanikproben nach ASTM E 1921
M _{SN/GW}	-	Verhältnis von mittlerer Schweißnahthärte zu Grundwerkstoffhärte

Symbol	Einheit	Beschreibung
$M_{WEZ/GW}$	-	Verhältnis von minimaler Härte in der WEZ zu der Grundwerkstoffhärte
n	-	Anzahl, bspw. Proben einer Prüfreihe
Q	kJ/mm	Wärmeeinbringung beim Schweißen
R	-	Spannungsverhältnis
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
REM	-	Rasterelektronenmikroskop
R_e	MPa	Streckgrenze/ Dehngrenze
R_{eH}	MPa	Obere Streckgrenze
$R_{p0,2}$	MPa	Dehngrenze bei 0,2% plastischer Dehnung
R_m	MPa	Zugfestigkeit
S	mm	Auflagerabstand im Bruchmechanikversuch
s^2	-	Varianz einer Stichprobe
s_J	mm	Integrationsweg um die Rissspitze
SN	-	Schweißnaht
σ	-	Standardabweichung
t	mm	Blechdicke
TL	-	Tiefelage der Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurve
T_{nr}	°C	Temperatur, unterhalb der der verformte Austenit nicht kristallisiert
T_n	N	Spannungstensor
$T_{norm,100MPa/m}$	°C	Normierungstemperatur für Bruchmechanikversuche
$T_{norm,35J/cm^2}$	°C	Normierungstemperatur für Kerbschlagbiegeversuche
T_p	°C	Vorwärmtemperatur
T_x	°C	Temperatur am Wendepunkt der Tangens hyperbolicus Funktion nach Oldfield
T_{50}	°C	Temperatur am Wendepunkt der Tangens hyperbolicus Funktion nach Wallin
T_{27J}	°C	Temperatur, bei der eine Kerbschlagarbeit von 27 J vorliegt
T_{28J}	°C	Temperatur, bei der eine Kerbschlagarbeit von 28 J vorliegt
$T_{33,75J/cm^2}$	°C	Temperatur, bei der eine Kerbschlagzähigkeit von 33,75 J/cm ² vorliegt

Symbol	Einheit	Beschreibung
T_{35/cm^2}	°C	Temperatur, bei der eine Kerbschlagzähigkeit von 35 J/cm ² vorliegt
$T_{37,5/\text{cm}^2}$	°C	Temperatur, bei der eine Kerbschlagzähigkeit von 37,5 J/cm ² vorliegt
$T_{\dot{U}}$	°C	Übergangstemperatur vom Spaltbruch in Gleitbruch
U	J/m	Potentielle Energie
$\dot{U}B$	-	Übergangsbereich der Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurve
v	mm	Rissöffnung
v	-	Querkontraktionszahl
W	mm	Probenhöhe
WE	-	Wärmeeinbringung
WEZ	-	Wärmeeinflusszone
W_v	J/m ³	Verformungsenergiedichte
$\bar{x}$	-	Arithmetisches Mittel
XMed	-	Median
ZWS	-	Zusatzwerkstoff