Beitrag zur Verifizierung der Alterungsneigung laserstrahlgeschweißter Verbindungen bei unlegierten Baustählen

Von der Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Chemnitz
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Enrico Seliga
geboren am 23.07.1969 in Borna (bei Leipzig)

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Matthes
Prof. Dr.-Ing. habil. B. Wielage
Prof. Dr.-Ing. habil. H. Herold

Tag der mündlichen Prüfung und Verteidigung: 19. Juli 2002

Schriftenreihe Fügetechnik / Schweißtechnik

Band 1/2002

Enrico Seliga

Beitrag zur Verifizierung der Alterungsneigung laserstrahlgeschweißter Verbindungen bei unlegierten Baustählen

Shaker Verlag
Aachen 2002

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Seliga, Enrico:
Beitrag zur Verifizierung der Alterungsneigung laserstrahlgeschweißter Verbindungen bei unlegierten Baustählen / Enrico Seliga.
Aachen : Shaker, 2002
(Schriftenreihe Fügetechnik / Schweißtechnik ; Bd. 2002,1)
Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2002
ISBN 3-8322-0702-3

Copyright Shaker Verlag 2002
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-0702-3
ISSN 1434-7393

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Professur Schweißtechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Mein besonderer Dank, für die großzügige Unterstützung und Betreuung der Arbeit, gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Matthes, Lehrstuhlinhaber und Direktor des Instituts für Fertigungstechnik/Schweißtechnik.
Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. B. Wielage und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Herold für die kritische Durchsicht der Arbeit und die daraus erwachsene Diskussion und konstruktiven Hinweise.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. habil. E. Richter und Herrn Dr.-Ing. W. Uhlig für die zahlreichen Gespräche und Anregungen bedanken, die eine wichtige Grundlage für das Gelingen dieser Dissertation bildeten.

Nicht zuletzt gilt mein Dank allen Personen, die mich direkt oder indirekt während der Zeit meiner Promotion unterstützt haben.

Chemnitz, im August 2002

Enrico Seliga

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Abkürzungen, Symbole **IV**

1 Einleitung **1**

2 Grundlagen und Besonderheiten des Laserstrahlschweißprozesses **5**

2.1 Laserstrahlschweißeignung 6
2.1.1 Umwandlungsverhalten 6
2.1.2 Primärkristallisation des Schweißguts 7
2.1.3 Werkstoffliche Vorgänge in der Wärmeeinflusszone 8
2.1.4 Alterungserscheinungen in der Wärmeeinflusszone 10
2.1.4.1 Kohlenstoffbedingte Abschreckalterung 11
2.1.4.2 Kohlenstoffbedingte Reckalterung 16
2.1.4.3 Stickstoffbedingte Alterungserscheinungen 18
2.2 Laserstrahlschweißmöglichkeit 20
2.2.1 Tiefschweißeffekt 20
2.2.2 Vorbereitung der Werkstücke 21
2.2.3 Ausführung der Schweißarbeiten 22
2.2.4 Prüftechnik und -verfahren 27
2.2.4.1 Zerstörungsfreie Prüfung 28
2.2.4.2 Zerstörende Prüfung 30
2.3 Laserstrahlschweißsicherheit 35

3 Vorbetrachtungen – Modellbildung **37**

3.1 Grundwerkstoffe 37
3.2 Laserstrahlschweißverbindungen 38

4 Versuchsplanung, Versuchsdurchführung, Auswert- und Prüfmethoden **41**

4.1 Werkstoffe 41
4.2 Versuchsplanung 42
4.3 Laserstrahlschweißen 44
4.4 Auswert- und Prüfmethoden 45

4.4.1 Auslagerung / Alterung 45
4.4.2 Gefügeuntersuchungen 45
4.4.3 Härteprüfung 46
4.4.4 Zugversuch 46
4.4.5 Eigenspannungsuntersuchungen 47
4.4.6 Kerbschlagbiegeversuch 48
4.4.7 Mikroanalyse und Strukturuntersuchung 52
4.4.8 Schweißverfahrensprüfung 53

5 Alterungsneigung der Grundwerkstoffe 54
5.1 Gefüge 54
5.1.1 Untersuchungen in Anlehnung an SEW 012 54
5.1.2 Untersuchungen in Anlehnung an *DE FERRI* 54
5.2 Härte 56
5.3 Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den Vorbetrachtungen 57

6 Alterungsneigung der laserstrahlgeschweißten Verbindungen 58
6.1 Gefüge 58
6.2 Härte 62
6.3 Zugfestigkeit 66
6.4 Eigenspannungen 69
6.5 Kerbschlagzähigkeit 70
6.5.1 Kleinstproben 71
6.5.2 Untermaßproben 72
6.5.3 DMVK-Proben 73
6.6 Augerelektronenspektrometrie 76
6.7 Röntgendiffraktometrie 77
6.8 Schweißverfahrensprüfung 77
6.9 Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den Vorbetrachtungen 81
6.10 Ergänzende Betrachtungen zu ferritisch erstarrenden Schweißgütern 82

7 Vergleichende Untersuchungen an elektronenstrahl- und metallschutzgasgeschweißten Proben 84
7.1 Elektronenstrahlschweißen 84
7.1.1 Gefüge 85
7.1.2 Härte 86
7.1.3 Kerbschlagzähigkeit 87
7.2 Metallschutzgasschweißen 88
7.2.1 Gefüge 90
7.2.2 Härte 90
7.2.3 Kerbschlagzähigkeit 92

8 Zusammenfassung, Bewertung, Ausblick 93

9 Literaturverzeichnis 97

10 Abbildungsverzeichnis 115

11 Tabellenverzeichnis 121

Formelzeichen, Abkürzungen, Symbole

a	mm^2/s	Temperaturleitzahl
A	%	Bruchdehnung
AES	-	Augerelektronenspektrometrie
A_{c1}, A_{c3}	°C	Umwandlungspunkte bei Erwärmung
A_V	J	Kerbschlagarbeit
b	1/s	Wärmeaustauschzahl
$c\rho$	$J/(mm^3 \cdot K)$	spez. Wärme · Dichte
CE		Kohlenstoffäquivalent
d_N	mm	Nietdurchmesser
DSP	-	Digitale Speckle-Fotografie
GW	-	Grundwerkstoff
I	A	Strom
P_E	kW	Elektronenstrahlleistung
P_L	kW	Laserstrahlleistung
q	J/s	Wärmeleistung
Q_S	J/mm	Streckenenergie
R_e	MPa	Streckgrenze
R_m	MPa	Zugfestigkeit
S	mm·mrad	Strahlparameterprodukt
SEW	-	Stahl-Eisen-Werkstoffblatt
SG	-	Schweißgut
SZTU	-	Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlungs-(Schaubild)
t_t	s	Zeit
t	mm	Blechdicke
$t_{8/5}$	°C	Abkühlzeit von 800 °C auf 500 °C
t_h	min	Haltezeit
T	°C	Temperatur
T_{Liq}	°C	Liquidustemperatur
T_0	°C	Ausgangstemperatur
T_{Sol}	°C	Solidustemperatur
$T_{Ü1/2}$	°C	Mitte des Steilabfalls der Kerbschlagarbeit-Temperaturkurve
U	V	Spannung

v_S	m/min	Schweißgeschwindigkeit
WEZ	-	Wärmeeinflusszone
x, y	mm	Abstände vom Zentrum der Wärmequelle
η_W	-	Wärmewirkungsgrad
λ	J/(mm·s·K)	Wärmeleitzahl