

Untersuchung zur Flüssigmetallversprödung beim
Widerstandspunktschweißen von
hochmanganhaltigen Stählen

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Jan Barthelmie
aus Goslar

genehmigt von der
Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
30. Juni 2017

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	V
Formelzeichen und Abkürzungen	VIII
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung	2
3 Stand der Technik und Forschung	3
3.1 Widerstandspunktschweißen.....	3
3.1.1 Physikalische Grundlagen.....	3
3.1.2 Verfahrensablauf.....	5
3.1.3 Elektrodenkappen.....	7
3.1.4 Schweißstrombereich und Versagensarten.....	9
3.1.5 Metallurgische Vorgänge in Schweißlinse und WEZ.....	12
3.1.6 Schweißfehler.....	14
3.2 Hochmanganhaltige Stähle.....	19
3.2.1 Verformungsmechanismen.....	19
3.2.2 Wirkung von unterschiedlichen Legierungselementen.....	22
3.2.3 Schweißseignung.....	25
3.2.4 Herstellung und industrielle Entwicklung.....	28
3.3 Grundlagen der Flüssigmetallversprödung.....	30
3.3.1 Geschichte.....	30
3.3.2 Schadensfälle.....	31
3.3.3 Prüfmethode.....	32
3.3.4 Bruchmodus.....	32
3.3.5 Kontaktvorgang.....	33
3.3.6 Festes Material.....	34
3.3.7 Temperatur.....	34

3.3.8	Belastung	34
3.3.9	Einwirkzeit	35
3.3.10	Versprödung des Stahls durch Zink	35
3.3.11	Modelle	36
4	Versuchswerkstoffe	39
5	Versuchsanlagen	41
5.1	Widerstandspunktschweißanlage	41
5.2	Schweißsimulator	42
5.3	Warmzuanlage	43
6	Probengeometrien	44
7	Untersuchungen	46
7.1	Grundlegende Charakterisierung der Grundwerkstoffe	46
7.1.1	Bestimmung der Verformungsmechanismen	48
7.1.2	Bestimmung der Fließkurven	58
7.1.3	Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit	60
7.1.4	Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität	61
7.1.5	Bestimmung der Dichte	63
7.1.6	Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten	64
7.1.7	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	65
7.1.8	Bestimmung des Schmelzintervalls	66
7.1.9	Zugversuche unter erhöhter Temperatur	66
7.2	Widerstandspunktschweißversuche	74
7.2.1	Schweißbereichsermittlung	74
7.2.2	Temperaturfeldmessungen	77
7.2.3	Fügen unverzinkter Mischverbindungen	79
7.2.4	Fügen oberflächenveredelter Mischverbindungen	79
7.2.5	Einfluss der Elektrodenkappengeometrie auf die LME-Rissanfälligkeit	98
7.3	Numerische Simulation	101

7.4	Tragfestigkeitsuntersuchung.....	104
7.4.1	Scherzug unter quasistatischer Last.....	105
7.4.2	Scherzug unter zyklischer Last.....	107
7.5	Schweißprozessunabhängige Untersuchungen.....	109
7.5.1	Schweißsimulationsversuche	109
7.5.2	Warmzugsimulationsversuche.....	115
7.5.3	Rasterelektronenmikroskopische Bruchflächenuntersuchung.....	118
8	Einbringen einer Diffusionssperrschicht.....	122
8.1	Theoretischer Ansatz.....	122
8.2	Untersuchungen	123
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	126
Literaturverzeichnis.....		i
Abbildungsverzeichnis.....		xviii
Tabellenverzeichnis.....		xxviii
Anhang		xxix
Lebenslauf.....		lii