

Untersuchungen zum thermischen Fügen
von AHS-Stählen mit dem Fokus auf einer
ganzheitlichen Modellbildung für die
Wärmeeinflusszone

dem Fachbereich Mathematik, Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor Ingenieurs

eingereichte und genehmigte Dissertation
von Herrn Dipl.-Ing. Lars Aschermann
aus Northeim

Tag der mündlichen Prüfung
8. Februar 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
1.1	Zielsetzung	4
2	Stand des Schrifttums	6
2.1	Werkstoffe in der Verkehrstechnik	6
2.1.1	Überblick über das Werkstoffportfolio von Flachprodukten aus Stahlwerkstoff	7
2.1.2	Dual-Phasenstahl	11
2.1.3	Complexphasenstahl	15
2.2	Bake Hardening und Work Hardening	17
2.2.1	Bake Hardening und Work Hardening allgemeine Betrachtung	17
2.2.2	Bake Hardening bei Mehrphasenstählen	18
2.2.3	Bake-Hardening in Schweißnähten	21
2.3	Fügetechnik für AHS-Stähle	23
2.3.1	Fügen von Dual- und Complexphasenstählen	24
2.3.2	Beeinflussung des Werkstoffs durch den Fügeprozess	26
2.3.3	Austenitisierung in der Aufheizphase	31
2.3.4	Umwandlung des Austenits in der Abkühlphase	35
2.3.5	Phasenumwandlungen der untersuchten Stähle	36
2.3.6	STAZ Diagramme und FE Simulationsansätze	41
2.3.7	Ermittlung von S-ZTU-Schaubildern über die Schweißsimulation	45
2.4	Eigenspannungen und Verzug an Schweißnähten	48
2.4.1	Messkonzepte	57
3	Untersuchungen zur Werkstoffmodellbildung	59
3.1	Wärmebeeinflussung durch den Fügeprozess	62
3.1.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus	63
3.1.2	Ermittlung der Temperaturzeitverläufe bei unterschiedlichen Fügeprozessen	67
3.1.3	Ergebnisse der thermographischen Untersuchungen	71
3.2	Schweißsimulation zur Beschreibung der mechanisch technologischen Eigenschaften der Wärmeeinflusszone	72

3.2.1	Versuchsdurchführung	73
3.2.2	Ergebnisse der Werkstoffuntersuchung	82
3.2.3	Diskussion der Ergebnisse der Modellbildung	103
3.3	Einfluss der Prozessroute auf die Werkstoffeigenschaften der Wärmeeinflusszone	108
3.3.1	Versuchsaufbau	109
3.3.2	Ergebnisse der Untersuchungen des BH-Einflusses	112
3.3.3	Diskussion der Ergebnisse WH-/ BH-Untersuchungen	117
3.4	Eigenspannungen in den Fügeverbindungen	118
3.4.1	Entwicklung der Cut-Compliance Methode	118
3.4.2	Versuchsaufbau zur Messung mit der Cut-Compliance Methode	127
3.4.3	Ergebnisse von Messungen am I-Stoß	128
3.4.4	Global-Lokal Adaptierung	134
3.4.5	Diskussion der Ergebnisse der Eigenspannungsmessung	138
4	Validierung und Erweiterung des Modellverständnisses	141
4.1	Versuchsdurchführung	142
4.2	Verbindungseigenschaften	144
4.2.1	Ergebnisse des SZBS800	145
4.2.2	Ergebnisse des HCT780XD	150
4.3	Lokale Dehnungsentwicklung	152
4.3.1	Ergebnisse des SZBS800	154
4.3.2	Ergebnisse des HCT780XD	158
4.4	Abschließende Diskussion und Vergleich mit der Modellvor- stellung	159
5	Umsetzung und Anwendung der Modellbildung in FE-Rechnungen	164
5.1	Modellerstellung	165
5.2	Materialmodell für die Simulation	166
5.3	Simulationsergebnisse Querzugversuch	168
5.4	Simulationsergebnisse Längszugversuch	171
5.5	Abschließende Diskussion	173
6	Zusammenfassung und Ausblick	175

Abbildungsverzeichnis	XX
Tabellenverzeichnis	XXX
A Anhang	XXXI