

**Untersuchungen zum Einfluss von Cer auf
die Primärgefügeentwicklung von Stahl und
die Bestimmung der Warmrissneigung
mittels thermischer Analyse**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

M. Sc. Michel Wurlitzer

aus Winsen (Luhe)

genehmigt von der
Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften der
Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

am: 27.05.2019

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Verzeichnis verwendeter Variablen | IX |
| Verzeichnis verwendeter Abkürzungen und Indizes | XIII |
| 1 Einleitung und Problemstellung | 1 |
| 2 Die Kornfeinung des Primärgefüges | 3 |
| 2.1 Die Grundlagen der Erstarrung | 3 |
| 2.1.1 Keimbildung | 4 |
| 2.1.1.1 Homogene Keimbildung | 5 |
| 2.1.1.2 Homogene Keimbildung in Legierungen | 8 |
| 2.1.1.3 Heterogene Keimbildung | 8 |
| 2.1.2 Keimwachstum | 11 |
| 2.1.2.1 Unterkühlung | 15 |
| 2.1.2.2 Einfluss der Erstarrungsgeschwindigkeit | 19 |
| 2.1.2.3 Seigerungen | 20 |
| 2.1.2.4 Grenzflächenspannung | 23 |
| 2.1.3 Makrogefüge dendritischer Erstarrung | 27 |
| 2.1.3.1 Fein globulitisches Randgefüge | 28 |
| 2.1.3.2 Gerichtete Stängelkristalle | 28 |
| 2.1.3.3 Ungerichtetes Mittengefüge | 29 |
| 2.1.3.4 Dendritenkohärenzpunkt | 29 |
| 2.2 Einsatz von Cer in der Stahlherstellung | 31 |
| 2.2.1 Einsatz cerhaltiger Dispersoide zur Erhöhung der Keimzahl | 35 |
| 2.2.2 Einfluss einer Cerzugabe auf die Oberflächenspannung des flüssigen Stahls | 41 |
| 2.3 Versuchsaufbau und -durchführung | 49 |
| 2.3.1 Thermodynamische Simulationen | 50 |
| 2.3.2 Experimentelle Untersuchungen | 53 |
| 2.3.2.1 Einfluss und Anteil des gelösten Cers im Stahl | 53 |
| 2.3.2.2 Einfluss des Cergehalts auf die Erstarrung | 55 |
| 2.3.2.3 Einfluss der Erstarrungszeit auf die Kornfeinung | 57 |
| 2.3.2.4 Zugabe einer Cervorlegierung im kontinuierlichen Stranggussverfahren | 60 |
| 2.3.3 Phasensfeldsimulation | 62 |
| 2.3.4 Angewandte Analysemethoden | 65 |
| 2.3.4.1 Gefügeanalyse | 65 |
| 2.3.4.2 Phasenanalyse | 66 |
| 2.3.4.3 Funkenspektralanalyse | 66 |
| 2.3.4.4 ICP-OES, Verbrennungsanalyse und Trägergasheißextraktion | 67 |

| | | | |
|----------|--|---|------------|
| | 2.3.4.5 | Elektrolyse mit organischem Elektrolyt . . . | 67 |
| | 2.3.4.6 | Mechanische Prüfung | 70 |
| 2.4 | Ergebnisse | | 71 |
| | 2.4.1 | Thermodynamische Simulationen | 71 |
| | | 2.4.1.1 Desoxidation | 71 |
| | | 2.4.1.2 Stabile Dispersoide | 73 |
| | | 2.4.1.3 Oberflächenspannung bei der Keimbildung . | 79 |
| | | 2.4.1.4 Oberflächenspannung während der Erstarrung | 82 |
| | 2.4.2 | Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen | 89 |
| | | 2.4.2.1 Einfluss und Anteil des gelösten Cers im Stahl | 89 |
| | | 2.4.2.2 Einfluss des Cergehalts auf die Erstarrung . | 94 |
| | | 2.4.2.3 Einfluss der Erstarrungszeit auf die Kornfeinung | 99 |
| | | 2.4.2.4 Zugabe einer Cervorlegierung im kontinuierlichen Stranggussverfahren | 109 |
| | 2.4.3 | Phasenfeldsimulation | 113 |
| 3 | Thermische Analyse von Stahl und Bestimmung der Warmrissneigung | | 123 |
| | 3.1 | Grundlagen der thermischen Erstarrungsanalyse | 123 |
| | | 3.1.1 Thermophysikalische Eigenschaften von Metallen . . . | 124 |
| | | 3.1.1.1 Spezifische Wärmekapazität | 124 |
| | | 3.1.1.2 Wärmeleitfähigkeit | 125 |
| | | 3.1.1.3 Temperaturleitfähigkeit | 125 |
| | 3.1.2 | Messmethoden der thermischen Erstarrungsanalyse . . | 126 |
| | | 3.1.2.1 Einfache Temperaturmessungen | 126 |
| | | 3.1.2.2 Temperaturdifferenzmessungen | 126 |
| | | 3.1.2.2.1 Virtuelle Referenz | 126 |
| | | 3.1.2.2.2 Externe Referenzmessung | 128 |
| | | 3.1.2.2.3 Interne Referenzmessung | 128 |
| | | 3.1.2.3 Messungen mit drei Thermoelementen | 130 |
| | | 3.1.2.4 Kommerziell verwendete Tiegel | 131 |
| | | 3.1.2.5 Kenngrößen aus der thermischen Analyse . . | 132 |
| | | 3.1.2.5.1 Bestimmung von Liquidus- und Solidustemperatur | 134 |
| | | 3.1.2.5.2 Bestimmung des Festphasenanteils . | 137 |
| | | 3.1.2.6 Kornfeinungskriterium | 138 |
| | | 3.1.2.7 Bestehende Techniken zur Bestimmung des Dendritenkohärenzpunktes | 139 |
| | 3.2 | Warmrissneigung von Stahl | 143 |
| | | 3.2.1 Grundlagen der Warmrissentstehung | 143 |
| | | 3.2.2 Methoden zur experimentellen Bestimmung der Warmrissneigung | 147 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.3 | Versuchsaufbau und -durchführung | 149 |
| 3.3.1 | Thermische Analyse mit drei Thermoelementen | 149 |
| 3.3.1.1 | Verwendete Messtechnik und Dimensionierung der thermischen Analyse | 149 |
| 3.3.1.2 | Messwertaufbereitung | 152 |
| 3.3.1.3 | Untersuchte Stähle und experimentelles Vorgehen | 153 |
| 3.3.2 | Experimentelle Bestimmung der Warmrissneigung | 154 |
| 3.3.2.1 | Dimensionierung des Versuchsaufbaus | 154 |
| 3.3.2.2 | Untersuchte Stähle | 156 |
| 3.4 | Ergebnisse | 159 |
| 3.4.1 | Simulation | 159 |
| 3.4.2 | Bestimmung der Liquidustemperatur und des Erstarrungsbeginns | 163 |
| 3.4.3 | Bestimmung der Solidustemperatur und des Erstarrungsendes | 168 |
| 3.4.4 | Ermittlung des Festphasenanteils | 170 |
| 3.4.5 | Bestimmung des Dendritenkohärenzpunktes | 172 |
| 3.4.6 | Bestimmung der Warmrissneigung | 175 |
| 4 | Diskussion der Methodik | 179 |
| 4.1 | Einfluss von Cer auf das Primärgefüge von Stahl | 179 |
| 4.2 | Bestimmung der Warmrissneigung mittels thermischer Analyse | 180 |
| 5 | Zusammenfassung | 183 |
| | Abbildungsverzeichnis | 187 |
| | Tabellenverzeichnis | 195 |
| | Literaturverzeichnis | 197 |
| | Anhang | 215 |