

„Numerische Entwicklung eines mikrolegierten Einsatzstahls für die  
Hochtemperatur-Aufkohlung“

Von der Fakultät der Georessourcen und Materialtechnik  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation  
vorgelegt von **M.Sc.**

**Sergey Konovalov**

aus Tscherepowetz, Russland

**Berichter:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck  
Univ.-Prof. Professor h.c.(CN) Dr.-Ing. Dr. h.c. (CZ) Dieter Georg Senk

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Februar 2014

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Literaturübersicht</b>	<b>3</b>
2.1	Einsatzstähle . . . . .	3
2.2	Verfahren zur Verbesserung des Reinheitsgrades . . . . .	5
2.3	Stand der Technik des Einsatzhärtens . . . . .	9
2.3.1	Pulver- und Salzbadtaufkohlen . . . . .	9
2.3.2	Gasaufkohlen . . . . .	10
2.3.2.1	Aufkohlen beim Atmosphärendruck . . . . .	10
2.3.2.2	Niederdruckaufkohlen . . . . .	12
2.4	Hochtemperatur-Aufkohlen . . . . .	15
2.5	Sicherstellung der Feinkornbeständigkeit . . . . .	17
2.6	Mikroregierungselemente . . . . .	20
2.6.1	Al . . . . .	20
2.6.2	Nb . . . . .	23
2.6.3	Ti . . . . .	26
2.7	Seigerung von Mikroregierungselementen und Stranggießbarkeit . . . . .	27
2.8	Modellierung der Ausscheidungs- und Seigerungsentwicklung . . . . .	31
2.8.1	CALPHAD-Methode . . . . .	31
2.8.2	Modell der beweglichen Phasengrenze . . . . .	32
2.8.3	Mehrpartikel-Ausscheidungsmodell . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Werkstoffe</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>Versuchseinrichtungen</b>	<b>39</b>
4.1	Dilatometer . . . . .	39
4.2	Muffelofen . . . . .	40
4.3	TEM . . . . .	41
4.4	REM . . . . .	42

4.5	Anlage zum Stirnabschreckversuch . . . . .	43
4.6	Hochtemperaturzerreimaschine . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Versuchsdurchfhrung</b>	<b>47</b>
5.1	Optimierung der Referenz-Prozesskette . . . . .	47
5.1.1	Untersuchung der Feinkornbeständigkeit . . . . .	47
5.1.2	Untersuchung des Ausscheidungszustandes . . . . .	48
5.1.3	Thermodynamische und kinetische Berechnungen . . . . .	50
5.1.3.1	Gleichgewichtsberechnung . . . . .	50
5.1.3.2	Berechnung der Ausscheidungsentwicklung . . . . .	51
5.2	Werkstoffoptimierung . . . . .	55
5.2.1	Herstellung einer Laborschmelze und Warmumformung zu einem Block . . . . .	55
5.2.2	Untersuchung zur Vergiebarkeit . . . . .	56
5.2.3	Metallographische Untersuchungen . . . . .	57
5.2.3.1	Untersuchung des mikroskopischen Reinheitsgrades . . . . .	57
5.2.3.2	Feinkornbeständigkeit . . . . .	58
5.2.4	Untersuchung des Ausscheidungszustandes . . . . .	61
5.2.5	Untersuchungen zur Warmumformbarkeit . . . . .	62
5.2.6	Untersuchungen zur Werkstoffumwandlung . . . . .	63
5.2.7	Thermodynamische und kinetische Berechnungen . . . . .	65
5.2.7.1	Gleichgewichtsberechnung . . . . .	65
5.2.7.2	Berechnung des Verhaltens von Niob während der Erstar- rung . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der experimentellen Untersuchung</b>	<b>71</b>
6.1	Optimierung der Referenz-Prozesskette . . . . .	71
6.1.1	Feinkornbeständigkeit . . . . .	71
6.1.2	Ausscheidungsentwicklung . . . . .	73
6.2	Werkstoffoptimierung . . . . .	83

---

6.2.1	Stranggießbarkeit . . . . .	83
6.2.2	Mikroskopischer Reinheitsgrad . . . . .	86
6.2.3	Warmumformbarkeit . . . . .	88
6.2.4	Feinkornbeständigkeit . . . . .	90
6.2.5	Jominy-Test . . . . .	94
6.2.6	Ausscheidungszustand . . . . .	94
<b>7</b>	<b>Ergebnisse der numerischen Untersuchung</b>	<b>99</b>
7.1	Optimierung der Referenz-Prozesskette . . . . .	99
7.1.1	Stabilität von mikrolegierten Phasen im Gleichgewicht . . . . .	99
7.1.2	Ausscheidungsentwicklung entlang der Prozesskette . . . . .	101
7.1.2.1	Referenz-Prozesskette . . . . .	101
7.1.2.2	Variation der Prozessparameter und -ketten . . . . .	105
7.2	Werkstoffoptimierung . . . . .	109
7.2.1	Substitution von Al durch Nb im Einsatzstahl . . . . .	109
7.2.2	Seigerungsverhalten von Nb . . . . .	117
<b>8</b>	<b>Diskussion</b>	<b>137</b>
8.1	Prozessoptimierung zu einer Bauteilherstellung aus dem (Al,Nb,Ti)- mikrolegierten Stahl 25MoCr4 . . . . .	137
8.2	Werkstoffoptimierung eines Al-reduzierten Stahls 25MoCr4 . . . . .	139
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>147</b>