



**Berichte aus dem  
Institut für Eisenhüttenkunde**

**Patrick Abd el-Rahman Mahmoud Fayek**

---

**Legierungs- und Prozessdesign zur  
ressourceneffizienten Herstellung  
von Getriebekomponenten für die  
Hochtemperaturaufkohlung**

---

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. W. Bleck  
Prof. Dr.-Ing. U. Krupp  
Prof. Dr.-Ing. S. Münstermann  
Prof. Dr.-Ing. D. Senk

---

Band 5/2020

Shaker Verlag

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1	Einsatzstähle . . . . .	7
2.2	Herstellung . . . . .	8
2.3	Heißduktilität . . . . .	9
2.4	Seigerungsneigung einiger Elemente . . . . .	12
2.5	Cer in Einsatzstählen . . . . .	13
2.6	Einsatzhärtung . . . . .	18
2.6.1	Hochtemperaturaufkohlung . . . . .	22
2.6.2	Zener-Theorie . . . . .	24
2.7	Mikrolegierungselemente zur Ausscheidungsbildung . . . . .	28
2.7.1	Aluminium . . . . .	28
2.7.2	Niob . . . . .	32
2.7.3	Vanadium . . . . .	35
2.7.4	Titan . . . . .	37
2.8	Bedeutung der Hauptlegierungselemente . . . . .	40
2.8.1	Kohlenstoff . . . . .	40
2.8.2	Silizium . . . . .	41
2.8.3	Mangan . . . . .	42
2.8.4	Chrom . . . . .	43
2.8.5	Nickel . . . . .	44
2.8.6	Molybdän . . . . .	45
2.9	Methoden zur numerischen Legierungsberechnung . . . . .	46
2.9.1	Berechnung der $M_s$ -Temperatur . . . . .	47
2.9.2	Berechnung der $A_{c1}$ - und $A_{c3}$ -Temperaturen . . . . .	47
2.9.3	Berechnung der Härtebarkeit . . . . .	47
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung und methodische Vorgehensweise</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>Werkstoffe</b>	<b>53</b>
4.1	Teil 1: Substitutionslegierung - Versuchswerkstoffe . . . . .	53
4.2	Teil 2: Mikrolegierung - Versuchswerkstoffe . . . . .	54
4.3	Teil 3: Einsatz von Cer - Versuchswerkstoffe . . . . .	57

<b>5</b>	<b>Untersuchungsmethoden</b>	<b>59</b>
5.1	Numerische Untersuchungsmethoden . . . . .	59
5.1.1	Thermo-Calc . . . . .	59
5.1.2	DICTRA . . . . .	59
5.1.3	MatCalc . . . . .	61
5.2	Experimentelle Untersuchungsmethoden . . . . .	62
5.2.1	Lichtoptische Metallographie . . . . .	62
5.2.2	Feinkornstabilitätsuntersuchungen . . . . .	62
5.2.3	Zugversuch . . . . .	64
5.2.4	Heißzugversuch nach partiellem Aufschmelzen . . . . .	65
5.2.5	Kerbschlagbiegeversuch . . . . .	67
5.2.6	Schwingfestigkeitsuntersuchung . . . . .	68
5.2.7	Stirnabschreckversuch . . . . .	69
5.2.8	Dilatometrie . . . . .	70
5.2.9	Niederdruckaufkohlung . . . . .	72
5.2.10	Rasterelektronenmikroskopie . . . . .	74
5.2.11	Transmissionselektronenmikroskopie . . . . .	74
<b>6</b>	<b>Teil 1: Substitutionslegierung - Ergebnisse</b>	<b>77</b>
6.1	Berechnung der Härtebarkeit . . . . .	78
6.2	Berechnung von $M_s$ - und $A_c$ -Temperaturen . . . . .	80
6.3	Chemie der Laborschmelzen . . . . .	81
6.4	Umwandlungsverhalten . . . . .	81
6.5	Härtebarkeit . . . . .	84
6.6	Mechanische Eigenschaften . . . . .	85
6.6.1	Statische Eigenschaften . . . . .	85
6.6.2	Zyklische Eigenschaften . . . . .	86
6.6.3	Zähigkeit . . . . .	87
6.7	Aufkohlungsverhalten . . . . .	88
6.8	Diskussion . . . . .	89
<b>7</b>	<b>Teil 2: Mikrolegierung - Ergebnisse</b>	<b>93</b>
7.1	Lösungstemperaturen der Ausscheidungsphasen . . . . .	94
7.2	Partikelvolumen der Ausscheidungsphasen . . . . .	96
7.3	Kinetik der Partikelauflösung beim Wiedererwärmen . . . . .	100
7.4	Kinetik der Partikelausscheidung . . . . .	101
7.4.1	Kinetik der AlN-Bildung . . . . .	102
7.4.2	Kinetik der NbC- und Nb(C,N)-Bildung . . . . .	107
7.4.3	Kinetik der V(C,N)-Bildung . . . . .	108

7.5	Korrelation zwischen Feinkornstabilität und Pinning . . . . .	109
7.5.1	Einfluss der Heizrate auf die Kornstabilität . . . . .	114
7.5.2	Einfluss einer Vorwärmbehandlung im Austenit auf die Kornstabilität . . . . .	116
7.6	Untersuchung der maximalen Haltezeit . . . . .	121
7.6.1	Korrelation mit dem Feinkornkriterium . . . . .	123
7.7	Feinkornstabilitäten unterschiedlicher Laborschmelzen . . . . .	125
7.7.1	Prozessabwandlung für Al-Mikrolegierungsvarianten . . . . .	130
7.7.2	Prozessabwandlung für AlNb-Mikrolegierungsvarianten . . . . .	132
7.7.3	Prozessabwandlung für V-Mikrolegierungsvarianten . . . . .	134
7.7.4	Prozessabwandlung für Nb-Mikrolegierungsvarianten . . . . .	135
7.8	Feinkornstabilitäten der Industrieschmelzen . . . . .	136
7.9	Aufkohlung bei 1075 °C und 1100 °C . . . . .	140
7.10	Diskussion . . . . .	144
<b>8</b>	<b>Teil 3: Einsatz von Cer - Ergebnisse</b>	<b>159</b>
8.1	Heißduktilität . . . . .	159
8.2	Einschlussmodifikation und Primärausscheidung . . . . .	163
8.3	Ausscheidungszustand und Feinkornstabilität . . . . .	166
8.4	Erstarrungssimulationen in DICTRA . . . . .	171
8.5	Umwandlungsverhalten . . . . .	173
8.6	Härtbarkeit . . . . .	174
8.7	Mechanische Eigenschaften . . . . .	175
8.7.1	Statische Eigenschaften . . . . .	175
8.7.2	Zähigkeit . . . . .	176
8.8	Aufkohlungsverhalten . . . . .	177
8.9	Diskussion . . . . .	178
<b>9</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>183</b>
9.1	Teil 1: Substitutionslegierung - Schlussfolgerungen . . . . .	183
9.2	Teil 2: Mikrolegierung - Schlussfolgerungen . . . . .	184
9.3	Teil 3: Einsatz von Cer - Schlussfolgerungen . . . . .	189
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>191</b>