

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Geleitwort	VII
1. Einleitung	1
2. Grundlagen	3
2.1 Einführung in die Thermodynamik	4
2.1.1 Phasengesetz von Gibbs	4
2.1.2 Zustandsgrößen	4
2.1.3 Gleichgewichte	6
2.1.3.1 Phasenumwandlung	6
2.1.3.2 Phasenneubildung	8
2.1.3.3 Chemisches Gleichgewicht	9
2.1.3.4 Grenzflächenerscheinungen	18
2.1.3.5 Keimbildung	19
2.1.3.6 Sieden	20
2.1.4 Elektrochemie	21
2.1.4.1 Elektrolytische Leitung	21
2.1.4.2 Elektrochemisches Potenzial	22
2.1.4.3 Elektrokapillarität	22
2.2 Einführung in die Kinetik	24
2.2.1 Transportgrößen	24
2.2.2 Lösungen und Näherungen bei instationärer Diffusion	25
2.2.2.1 Differenzialgleichung	25
2.2.2.2 Diffusion in einen unendlichen Halbraum	26
2.2.2.3 Diffusion in begrenzten Körpern	26
2.2.2.4 Berechnung der mittleren Konzentration in begrenzten Körpern	28
2.2.3 Grenzschichten	30
2.2.3.1 Strömungsgrenzschicht	30
2.2.3.2 Diffusionsgrenzschicht	31
2.2.4 Stoffübergang	32
2.2.4.1 Stoffübergangskoeffizient	32
2.2.4.2 Stoffübergang in begrenzten Gefäßen	32

2.2.4.2.1	Auflösung einer ebenen Wand in eine begrenzte Schmelze hinein	32
2.2.4.2.2	Auflösung eines Stabs in eine begrenzte Schmelze hinein	33
2.2.4.3	Verdunstung und Verdampfung	35
2.2.5	Grenzflächenkonvektion	35
2.2.5.1	Kapillarströmung	35
2.2.5.2	Marangoni-Konvektion	36
2.2.6	Wärmeübertragung	36
2.2.6.1	Stationäre Wärmeübertragung	36
2.2.6.2	Instationäre Wärmeübertragung	37
2.3	Einführung in die Thermomechanik	39
2.3.1	Thermische Ausdehnung	39
2.3.2	Bruchmechanik	40
2.3.2.1	Linear-elastische Bruchmechanik (LEBM)	40
2.3.2.2	Nichtlinear-elastische Bruchmechanik (NLEBM)	41

3. Stahlherstellung 47

3.1	Vom Erz zum Stahl	48
3.1.1	Produktionsroute	48
3.1.2	Hochofen-Verfahren	49
3.1.2.1	Kohlenmonoxid-Bursting	50
3.1.2.2	Alkali-Bursting	51
3.1.2.3	Gestellverschleiß	52
3.1.3	Roisentransport	54
3.1.3.1	Entschwefelung	55
3.1.3.2	Roheisen-Emulsion in der Schlacke	55
3.1.4	LD-Verfahren (Linz-Donawitz)	57
3.1.4.1	Prallverschleiß	57
3.1.4.2	Metall-Schlacke-Emulsion im Konverter (OBM, AOD u. a.)	58
3.1.4.3	Back-attack-Mechanismus	60
3.1.4.4	MgO-Sättigung	60
3.1.4.5	Chemischer Verschleiß der Konverterzustellung	61
3.1.5	Elektrolichtbogenofen-Verfahren	62
3.1.5.1	Chemischer Verschleiß im Elektrolichtbogenofen	62
3.1.5.2	Strahlungsverschleiß	63
3.1.6	Sekundärmetallurgie	65
3.1.6.1	Schlacken	66
3.1.6.1.1	Chemische Basizität	66
3.1.6.1.2	pO-Wert als Basizitätsmaß	68
3.1.6.1.3	Optische Basizität	69

Inhaltsverzeichnis	XI
3.1.6.2	AOD-Verfahren 70
3.1.6.2.1	Entkohlung 70
3.1.6.2.2	Verschleiß durch Blasenrückschlag (back attack) 71
3.1.6.3	Pfannenofen-Verfahren 71
3.1.6.3.1	VOD-Verfahren 71
3.1.6.3.2	RH-Verfahren 72
3.1.6.3.2.1	Erosion 73
3.1.6.3.2.2	Kavitation 73
3.1.6.4	Reinheitsgrad 74
3.1.6.4.1	Desoxidation 75
3.1.6.4.2	Entschwefelung 78
3.1.6.5	Voreilender Verschleiß am Tauchguss 80
3.1.6.5.1	Experimente 80
3.1.6.5.2	Ergebnisse 80
3.1.6.5.3	Diskussion 80
3.1.6.6	Öffnungsrate beim Schieberverschluss 81
3.2	Vakuummetallurgie 82
3.2.1	Badbewegung 83
3.2.2	Infiltration 86
3.2.3	Erosion 87
3.2.4	Kavitation 87
3.3	Induktions-Rinnenofen 90
3.4	Verdunstung, Verdampfung 92
3.4.1	Metallschmelzen 92
3.4.2	Oxide 95
3.5	Kondensation 98
3.6	Gase im Vakuum 102
3.6.1	Wasserstoff 102
3.6.2	Sauerstoff 103
3.6.3	Wassergas 103
3.6.4	Kohlenmonoxid 104
3.6.5	Stickstoff 105
3.7	Messung der Leckrate 106

4. Reaktionen feuerfester Werkstoffe mit Stahl und Schlacke . 113

4.1	Vergleich der Prüfverfahren 114
4.1.1	Einführung 114
4.1.2	Versuchsergebnisse 115
4.1.3	Deutung 116

4.1.3.1	Tiegeltest	116
4.1.3.2	Trommelofentest	116
4.1.3.3	Induktionstiegeltest	116
4.2	Auflösung feuerfester Werkstoffe in begrenzten Gefäßen	116
4.2.1	Auflösung des Feuerfestmaterials im Tiegeltest (1.500 °C)	117
4.2.2	Auflösung eines Stabs aus Korund in einer Glasschmelze (1.500 °C)	118
4.2.3	Messung des Stoffübergangskoeffizienten bei der Auflösung von Graphit in flüssigem Eisen (1.600 °C)	119
4.2.4	Auflösung eines MgO-Stabs in einer CaO-Al ₂ O ₃ -Schlacke (1.650 °C)	121
4.3	Wechselwirkungen zwischen Kieselsäure und Tonerde in desoxidierten Eisenschmelzen bei 1.600 °C	122
4.3.1	Phasengleichgewichte nach Gibbs	122
4.3.2	Experimente	123
4.3.3	Ergebnisse und Diskussion	124
4.3.3.1	Desoxidation durch Kohlenstoff	124
4.3.3.2	Desoxidation durch Silicium	128
4.3.3.3	Desoxidation durch Aluminium	128
4.3.3.4	Desoxidation durch Mangan	131

5. Infiltration 135

5.1	Grundgleichungen	136
5.2	Schlackeninfiltration	137
5.3	Stahlinfiltration	138

6. Verschlackung von MgO 141

6.1	Einleitung	142
6.2	Experimente	142
6.2.1	Versuchsaufbau	142
6.2.2	Versuchsdurchführung	143
6.3	Ergebnisse und Diskussion	143
6.3.1	Zeitliche Gewichts- und Gefügeveränderung	143
6.3.2	Diskussion	145
6.3.2.1	Infiltration	145
6.3.2.2	Wechselwirkung mit MgO-gesättigter Kalkaluminat-Schlacke	145
6.3.2.2.1	Teilchendesintegration	145
6.3.2.2.2	Ostwald-Reifung	146
6.3.2.3	Wechselwirkung mit an MgO nicht gesättigter Kalk-Aluminat-Schlacke	148
6.3.2.3.1	Modell	148

6.3.2.3.2 Anwendung des Modells auf die Messergebnisse 154

6.3.2.3.3 Zerfallszeit 156

6.4 Zusammenfassung 157

7. Voreilender Verschleiß feuerfesten Materials als Folge der Marangoni-Konvektion 159

7.1 Einleitung 160

7.2 Geometrische Form der Korrosionsrinne 160

7.3 Geschwindigkeit der Marangoni-Strömung 163

7.4 Stoffübergang 163

7.5 Korrosionsgeschwindigkeit 163

7.6 Beispiele 164

7.6.1 Korrosion schmelzgegossenen α - β -Al₂O₃ (FAB) Feuerfestmaterials durch Behältergläser bei 1.400 und 1.500 °C 164

7.6.2 Auflösung eines Zylinders aus dicht gesintertem MgO in einer Kalk-Aluminat-Schlacke bei 1.650 °C 165

7.6.3 Korrosion der AMC-Zustellungen eines Labor-Induktionsofens (20 kg Stahl, 2 kg Schlacke, 10 kHz) bei 1.550–1.650 °C 166

7.7 Diskussion 171

7.8 Zusammenfassung 171

8. Bildung und Verhalten keramischer Einschlüsse 175

8.1 Bildung von Einschlüssen während der Erstarrung 176

8.2 Verhalten vorhandener Einschlüsse bei der Erstarrung 178

9. Elektrochemischer Korrosionsschutz 181

9.1 Elektrolyse in Schlacken 182

9.2 Korrosionsschutz in der Schlackenzone 184

9.3 Die Vermeidung des Cloggings im Tauchausguss 188

9.3.1 Verhinderung der Tonerdeausscheidung 188

9.3.2 Auflösung der Al₂O₃-Ausscheidung 190

9.4 Bestimmung des Sauerstoffgehaltes in Stahlschmelzen 190

9.4.1 Experimenteller Aufbau 190

9.4.2 Auswertung 193

9.5 Kapillarelektische Effekte 195

9.5.1 Grenzfläche Metallschmelze/Schlacke 195

9.5.2 Spannungsunterstützte Benetzung 197

10. Gefügeschädigungen 201

10.1 Phasenneubildung (Kristallisationsdruck) 202

10.1.1 CO-Zerfall bei 500 °C (CO-bursting) 203

10.1.2 Zerfall von Feuerbeton als Folge von Graphitbildung 206

10.1.3 Zerfall von Doloma (27 °C) 209

10.1.3.1 Bildung von Brucit (Mg(OH)₂) (27 °C) 209

10.1.3.2 Bildung von Portlandit (Ca(OH)₂) (27 °C) 210

10.1.4 Zerfall von Spinell bildendem Feuerfestmaterial (1.400 °C) 211

10.1.5 Zerfall feuerfesten Materials als Folge der Mullitbildung (1.400 °C) 211

10.1.6 Zerfall von Mullit als Folge der Bildung von Nephelin (1.400 °C) 212

10.1.7 Zerfall von Mullit als Folge der Bildung von Leucit (1.400 °C) 212

10.1.8 Zerfall von Feuerbeton als Folge der Bildung von β-Korund* (1.400 °C) ... 212

10.1.9 Oxidation von SiC durch Wasserdampf (1.100 °C) 212

10.1.10 Korrosion von SiC in geschmolzenem Salz bei 900 °C 213

10.1.11 Bildung von Spinell in Aluminiumöfen 214

10.2 Phasenumwandlung 215

10.2.1 Umwandlung der Kieselsäure 215

10.2.2 Zerfall von Dicalciumsilikat (2CaO · SiO₂) (620 → 500 °C) 215

10.3 Dehnungsrisse 216

10.4 Feuchtigkeit im Feuerfestmaterial 218

10.4.1 Dampfexplosion 218

10.4.2 Wasserstoffexplosion 219

10.4.2.1 Flüssiger Stahl 219

10.4.2.2 Flüssiges Aluminium 222

10.4.3 Entstehen von Eis beim Evakuieren 222

11. Trocknung von Feuerbeton 227

11.1 Einleitung 228

11.2 Basisinformationen 228

11.2.1 Feuerbeton 228

11.2.2 Stofftransport 230

11.2.2.1 Erste Trocknungsphase 230

11.2.2.2 Zweite Trocknungsphase 232

11.2.2.3 Dritte Trocknungsphase 233

11.2.3 Wärmetransport 233

11.2.4 Abplatzungen 235

11.3 Trocknungsmodell 236

12. Temperaturwechselbeständigkeit 241

12.1 Keilspaltmethode 242

12.2 Thermoschock-Gütwerte 244

12.2.1 Beispiel zur Berechnung von Schädigungs- und
 Schadenstoleranzparametern 248

12.3 Verbesserte Thermoschock-Gütwerte 249

12.3.1 Kritische Temperaturdifferenz 249

12.3.2 Zeitliche Änderung der Oberflächentemperatur 250

12.3.3 Schadenstoleranzparameter R''' 250

12.3.4 Beispiele zur Berechnung verbesserter Thermoschock-Gütwerte 251

13. Verhalten kohlenstoffhaltiger Feuerfestwerkstoffe 257

13.1 Schmelzmetallurgisches Verhalten 258

13.1.1 Experimente 258

13.1.2 Ergebnisse 258

13.1.3 Phasengleichgewichte im MgO-C-Werkstoff 260

13.1.4 Stabilität diverser Oxide in CO-Atmosphäre 263

13.1.4.1 Feste Oxide, (MgO) 263

13.1.4.2 Geschmolzene Schlacken, (SiO₂) 266

13.1.5 Lösungsgleichgewichte 268

13.1.5.1 Kohlenstoff in geschmolzenem Eisen 268

13.1.5.2 Kohlenstoff in geschmolzener Schlacke 269

13.1.5.3 MgO in geschmolzener Schlacke 271

13.1.5.4 Desoxidationsgleichgewichte 274

13.1.5.4.1 Eisen – Kohlenstoff (Vacher-Hamilton-Gleichgewicht) 275

13.1.5.4.2 Eisen – Aluminium, (Si) 276

13.1.5.4.3 Eisen – Magnesium, (Ca) 276

13.2 Benetzung, Infiltration und Keimbildung 277

13.2.1 Benetzung 277

13.2.2 Infiltration 278

13.2.2.1 Schlacke 278

13.2.2.2 Stahl 279

13.2.2.3 Keimbildung 279

13.3 Voreilender Verschleiß von MgO-C 280

13.3.1 Experiment 280

13.3.2 Auswertung und Diskussion 282

13.4 Oxidation von MgO-C 284

13.4.1 Experimente 284

13.4.2 Auswertung und Diskussion 284

13.5	Recycling von MgO-C-Al	287
13.5.1	Entwicklungsdruck des CH ₄	287
13.5.2	Erwärmung des MgO-C-Al ₄ C ₃ -Materials	288
13.6	Elasto-plastisches Verhalten von MgO-C	289
13.7	Zusammenfassung	289

14. Wärmeübertragung 293

14.1	Wärmeübergang	294
14.1.1	Strahlung	294
14.1.2	Konvektion	294
14.1.3	Strahlung und Konvektion	295
14.2	Lineare Wärmeleitung	295
14.3	Messung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Kalorimeterverfahren	296
14.4	Messung der Temperaturleitfähigkeit durch monotones Aufheizen	298
14.5	Berechnung der Wärmeleitfähigkeit feuerfester Werkstoffe	300

15. Mechanischer Verschleiß feuerfesten Materials 305

15.1	Reibverschleiß	306
15.2	Strahlverschleiß/Prallverschleiß	308

16. Sintern 313

16.1	Einführung	314
16.2	Einphasiges Feststoffsintern	315
16.2.1	Einfluss der Korngröße	315
16.2.2	Einfluss von Temperatur und Zeit	316
16.3	Zweiphasiges Feststoffsintern	317
16.3.1	Versuche und Ergebnisse	317
16.3.2	Auswertung und Diskussion	319
16.3.2.1	Berechnung der Matrixdichte ρ_m der Composite	319
16.3.2.2	Sterischer Einfluss der Fremdphase	322
16.4	Flüssigphasensintern	325

Stichwortverzeichnis 329

Inserentenverzeichnis	342
-----------------------------	-----