

INHALT

| | |
|---|----|
| VORWORT | V |
| GELEITWORT | VI |
| 1. EINLEITUNG | 1 |
| 2. GRUNDLAGEN | 3 |
| 2.1 Induktive Energieübertragung | 3 |
| 2.2 Bauformen von Induktionsöfen | 4 |
| 2.3 Induktions-Tiegelofen | 5 |
| 2.3.1 Elektrischer Wirkungsgrad | 5 |
| 2.3.2 Feldverlauf | 7 |
| 2.3.3 Badbewegung | 8 |
| 2.3.3.1 Badüberhöhung | 8 |
| 2.3.3.2 Badströmung | 9 |
| 2.4 Induktions-Rinnenofen | 11 |
| 2.4.1 Wirkungsgrad | 11 |
| 2.4.2 Elektromagnetisches Feld und Schmelze- strömung | 12 |
| 3. AUFBAU DER TIEGELOFENANLAGE | 15 |
| 3.1 Ofenkörper | 16 |
| 3.1.1 Feuerfestauskleidung | 16 |
| 3.1.1.1 Quarzitische Trockenmassen | 17 |
| 3.1.1.2 Spinellbildende Trockenmassen | 20 |
| 3.1.1.3 Zustelltechnik | 21 |
| 3.1.2 Spule und Blechpakete | 24 |
| 3.1.3 Kippgestell und Ofendeckel | 26 |
| 3.2 Stromversorgng | 28 |
| 3.2.1 Netz- und Mittelfrequenzanschluss | 29 |
| 3.2.2 Parallel- und Serien-Schwingkreisumrichter | 31 |
| 3.2.3 Netzzrückwirkungen | 32 |
| 3.2.4 Optimierung der Leistungsnutzung durch Tandemanordnung | 34 |
| 3.2.5 Frequenzumschaltung | 35 |
| 3.2.6 Magnetische Streufelder | 36 |
| 3.3 Peripherie | 38 |
| 3.3.1 Rückkühleinrichtungen | 38 |
| 3.3.1.1 Ofenkühlkreis | 38 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.3.1.2 | Elektrikkühlkreis | 40 |
| 3.3.1.3 | Frostsicherheit und Wasserqualität | 41 |
| 3.3.1.4 | Abwärmenutzung | 42 |
| 3.3.2 | Chargiereinrichtungen | 43 |
| 3.3.3 | Abschlackeinrichtungen | 46 |
| 3.3.4 | Leitsysteme für die Prozesssteuerung | 48 |
| 3.4 | Gesamtanlage | 50 |
| 4. | AUFBAU DES INDUKTIONSRIINNENOFENS | 55 |
| 4.1 | Ofenkessel | 55 |
| 4.1.1 | Bauformen zum Warmhalten | 55 |
| 4.1.2 | Bauformen zum dosierten Gießen | 58 |
| 4.1.3 | Bauformen zum Schmelzen | 61 |
| 4.1.4 | Feuerfestauskleidung | 62 |
| 4.2 | Induktoren | 63 |
| 4.2.1 | Bauformen | 64 |
| 4.2.2 | Feuerfestzustellung | 67 |
| 4.3 | Stromversorgung | 68 |
| 4.3.1 | Netzfrequenz-Einspeisung | 68 |
| 4.3.2 | Umrichter-Stromversorgung | 69 |
| 4.4 | Kühleinrichtungen | 60 |
| 5. | ELEKTROMAGNETISCHE RÜHRER UND PUMPEN | 71 |
| 6. | OFENAUSLEGUNG UND ENERGIEAUFWAND | 73 |
| 6.1 | Kenndaten für das Schmelzen im Tiegelofen | 73 |
| 6.1.1 | Ofenleistung | 73 |
| 6.1.1.1 | Spezifische Enthalpie | 73 |
| 6.1.1.2 | Elektrische Verluste | 76 |
| 6.1.1.3 | Thermische Verluste | 77 |
| 6.1.1.4 | Ofenwirkungsgrad | 78 |
| 6.1.1.5 | Auslegung der Ofenleistung | 78 |
| 6.1.2 | Leistungsdichte und Ofengrenzleistung | 79 |
| 6.1.3 | Frequenz des Spulenstroms | 81 |
| 6.1.4 | Energiebedarf | 82 |
| 6.1.5 | Strompreisgestaltung und Lastmanagement | 84 |
| 6.2 | Kenndaten für den Rinnenofen | 86 |
| 6.2.1 | Schmelzen von NE-Metallen | 86 |
| 6.2.2 | Warmhalten und Überhitzen von Eisenschmelzen .. | 87 |

| | |
|---|------------|
| 7. SCHMELZMETALLURGIE VON EISEN- UND NICHT-EISEN-WERKSTOFFEN | 89 |
| 7.1 Gusseisen | 89 |
| 7.1.1 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm | 89 |
| 7.1.2 Eisenguss-Sorten | 92 |
| 7.1.3 Sauerstoffhaushalt der Schmelze und C/Si-Isothermen | 96 |
| 7.1.4 Impfung und Keimbildung | 100 |
| 7.1.5 Magnesiumbehandlung | 103 |
| 7.1.5.1 Überschütt- und Sandwichverfahren | 105 |
| 7.1.5.2 Cover-Tundish-Verfahren | 105 |
| 7.1.5.3 GF-Konverter-Verfahren | 106 |
| 7.1.5.4 Drahteinspul-Verfahren | 108 |
| 7.1.5.5 Inmold-Verfahren | 108 |
| 7.1.5.6 Weitere Mg-Behandlungsverfahren | 108 |
| 7.1.6 Entschwefelung | 109 |
| 7.1.7 Schmelzekontrolle | 110 |
| 7.1.7.1 Gießkeilprobe | 110 |
| 7.1.7.2 Thermische Analyse | 110 |
| 7.2 Stahlguss | 112 |
| 7.3 Aluminium | 114 |
| 7.3.1 Primär und Sekundäraluminium | 114 |
| 7.3.2 Guss- und Knetlegierungen | 116 |
| 7.3.3 Qualität der Aluminiumschmelze | 119 |
| 7.3.4 Schmelzebehandlung | 121 |
| 7.4 Kupferwerkstoffe | 122 |
| 7.4.1 Kupfergewinnung | 123 |
| 7.4.2 Kupfersorten und -legierungen | 123 |
| 7.4.3 Oxidierendes und reduzierendes Schmelzen | 125 |
| 8. BETRIEB VON INDUKTIONSANLAGEN IN EISENGIESSEREIEN | 129 |
| 8.1 Schmelzen im Induktionstiegelofen | 130 |
| 8.1.1 Verfahrenstechnische Merkmale | 130 |
| 8.1.2 Induktionsofen gegenüber Kupolofen | 131 |
| 8.1.3 Netzfrequenz (NF)- oder Mittelfrequenz (MF)-Tiegelofen | 133 |
| 8.1.4 Einsatzstoffe | 135 |
| 8.1.4.1 Stahlschrott | 135 |
| 8.1.4.2 Roheisen | 137 |
| 8.1.4.3 Kreislaufmaterial | 138 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 8.1.4.4 | Gussbruch | 138 |
| 8.1.4.5 | Späne | 138 |
| 8.1.4.6 | Zuschlagstoffe | 139 |
| 8.1.5 | Herstellen der Schmelze | 139 |
| 8.1.5.1 | Gattierung und Beschickung | 139 |
| 8.1.5.2 | Einstellen der Sollzusammensetzung der Schmelze | 141 |
| 8.1.5.3 | Heizen auf Abstichtemperatur | 143 |
| 8.1.5.4 | Prozessorgeführter Schmelzablauf | 143 |
| 8.1.5.5 | Ansatz- und Brückenbildung | 146 |
| 8.1.6 | Absaugen der Rauchgase | 147 |
| 8.1.7 | Schmelzen von zinkbeschichteten Blechen | 149 |
| 8.1.8 | Späneschmelzen | 152 |
| 8.1.8.1 | Einsatz von losen Spänen | 152 |
| 8.1.8.2 | Schmelzen von Spänebriketts | 154 |
| 8.1.9 | Schmelzen von Eisenschwamm | 154 |
| 8.1.9.1 | Herstellung | 154 |
| 8.1.9.2 | Charakteristische Eigenschaften | 155 |
| 8.1.9.3 | Schmelzverfahren | 156 |
| 8.1.9.4 | Wirtschaftlichkeit | 158 |
| 8.1.10 | Verfahrensweise während Stillstandzeiten | 159 |
| 8.1.11 | Feuerfestverhalten | 160 |
| 8.1.10.1 | Chemischer Abtrag | 160 |
| 8.1.10.2 | Infiltration über die Flüssig- oder Dampfphase | 161 |
| 8.1.10.3 | Tiegelüberwachung | 162 |
| 8.2 | Duplizieren, Warmhalten und Speicherschmelzen im Tiegelofen | 165 |
| 8.3 | Warmhalten im Rinnenofen | 168 |
| 8.3.1 | Einordnung in den Fertigungskreislauf | 168 |
| 8.3.2 | Charakteristische Merkmale des Rinnenofens | 170 |
| 8.3.3 | Ofenfahrweise | 172 |
| 8.3.3.1 | Inbetriebnahme | 172 |
| 8.3.3.2 | Betriebsablauf | 173 |
| 8.3.3.3 | Automatische Prozessüberwachung | 174 |
| 8.3.3.4 | Induktorwechsel | 175 |
| 8.3.3.5 | Vorgehen bei Störfällen | 175 |
| 8.3.4 | Induktorüberwachung | 176 |
| 8.3.5 | Verschleißverhalten der Feuerfestauskleidung | 179 |
| 8.3.5.1 | Auswaschen | 180 |
| 8.3.5.2 | Infiltration | 180 |
| 8.3.5.3 | Rissbildung | 181 |
| 8.3.5.4 | Ansatzbildung | 182 |
| 8.3.6 | Energieverbrauch und Wirtschaftlichkeit | 183 |

| | |
|--|-----|
| 8.4 Gießen mit druckbetätigten Gießöfen | 184 |
| 8.4.1 Varianten und Merkmale der Teapot-Gießeinrichtung | 184 |
| 8.4.2 Einsatz von beheizten und unbeheizten Gießeinrichtungen | 186 |
| 8.4.3 Gießen von Mg-behandelter Schmelze | 188 |
| 8.4.3.1 Ansatzbildung durch suspendierte Oxide | 189 |
| 8.4.3.2 Magnesiumverdampfung | 189 |
| 8.4.3.3 Magnesiumreaktionen mit Metalloxiden und Schwefel | 189 |
| 8.4.3.4 Betriebserfahrungen | 191 |
| 8.4.4 Gießen mit Zwischenpfannen | 194 |
| 8.4.5 Stopfeinrichtung für automatisches Gießen | 195 |
| 8.4.6 Gießen im geschlossenen Regelkreis | 195 |
| 8.4.7 Integriertes Impfen | 197 |
| 8.4.8 Prozesskontrolle | 199 |
| 8.5 Kontinuierliche Flüssigisenversorgung | 199 |
| 8.5.1 Schmelzyklus einer Tandemanlage | 200 |
| 8.5.2 Anlagenkonzepte für die kontinuierliche Flüssigisenversorgung | 200 |
| 8.5.2.1 Rinnenofen als Puffer | 201 |
| 8.5.2.2 Tandemanlage als Schmelz- und Pufferaggregat | 202 |
| 8.5.2.3 Gießofen als Puffer | 203 |
| 8.5.3 Optimierte Auslegung der Schmelz- und Gießanlage | 205 |
| 9. SCHMELZEN VON STAHLGUSS IM INDUKTIONSTIEGEL-OFEN | 207 |
| 9.1 Frequenz und Gasaufnahme | 208 |
| 9.2 Einstellen der Sollzusammensetzung | 209 |
| 10. INDUKTIONSTIEGELÖFEN IM MINISTAHLMWERK | 211 |
| 10.1 Der Induktionsofen im Vergleich zum Lichtbogenofen | 211 |
| 10.2 Aufgabenstellung für den Schmelzbetrieb | 212 |
| 10.3 Herstellung verschiedener Stahlsorten | 213 |
| 10.3.1 Erschmelzen von Baustahl | 213 |
| 10.3.2 Herstellen von legierten Stählen | 215 |
| 10.4 Beispiel einer Induktions-Schmelzanlage zur Produktion von Baustahlknüppeln | 216 |
| 10.4.1 Produktionszahlen | 216 |
| 10.4.2 Auslegung der Induktionsanlage | 216 |

| | |
|---|------------|
| 11. INDUKTIONSANLAGEN IN DER ALUMINIUM-INDUSTRIE | 219 |
| 11.1 Einsatz des Tiegelofens in Formgießereien | 219 |
| 11.1.1 Metallurgisch-verfahrenstechnische Vorteile | 220 |
| 11.1.2 Duplizieren im Tiegelofen | 221 |
| 11.1.3 Feuerfestverhalten | 221 |
| 11.2 Schmelzen von Aluminiumspänen | 222 |
| 11.3 Induktives Schmelzen in Halbzeugwerken | 225 |
| 11.3.1 Beispiele bewährter Produktionsanlagen | 226 |
| 11.3.2 Feuerfestverhalten der Induktoren | 228 |
| 12. INDUKTIONSANLAGEN FÜR KUPFERWERKSTOFFE | 231 |
| 12.1 Induktionsöfen in Kupfer-Formgießereien | 231 |
| 12.1.1 Schmelzen | 231 |
| 12.1.2 Gießen mit druckbetätigten Gießöfen | 232 |
| 12.2 Schmelzen in Halbzeugwerken | 233 |
| 12.2.1 Rinnenöfen mit Hochleistungsinduktoren | 233 |
| 12.2.2 Einsatz von Tiegelöfen | 236 |
| 12.2.2.1 Schmelzen von Messingspänen | 236 |
| 12.2.2.2 Recycling von Kabelabfällen | 238 |
| 12.2.2.3 Flexibles Erschmelzen von Kupferlegierungen | 239 |
| 13. INDUKTIONSANLAGEN FÜR ZINK | 241 |
| 13.1 Umschmelzen von Zinkkathoden | 241 |
| 13.2 Herstellen von Zinklegierungen | 243 |
| 13.3 Bandverzinken | 244 |
| LITERATUR | 245 |
| STICHWORTVERZEICHNIS | 255 |