

HANSER



Leseprobe

zu

Beschichtungstechnologien für Spritzgießwerkzeuge

von Ruben Schlutter

Print-ISBN: 978-3-446-47512-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-47815-2

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446475120>
sowie im Buchhandel
© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

| | |
|--|-------------|
| Vorwort | .XV |
| Die Autorinnen und Autoren | XVII |
| Der Herausgeber | XVII |
| Die Mitverfasserinnen und Mitverfasser | XVIII |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| <i>Dr. Ruben Schlutter</i> | |
| 1.1 Mögliche Fehler an Formteilen..... | 2 |
| 1.2 Ableitung eines Lasten- und Pflichtenheftes..... | 4 |
| 1.3 Literatur | 7 |
| 2 Werkzeugstähle und deren Beschichtbarkeit | 9 |
| <i>Markus Pothmann</i> | |
| 2.1 Einführung in Werkzeugstähle..... | 9 |
| 2.1.1 Definition von Werkzeugstählen | 9 |
| 2.1.2 Entwicklung der Werkzeugstähle..... | 10 |
| 2.1.3 Arten von Werkzeugstählen | 10 |
| 2.1.4 Faktoren, die die Materialauswahl bei Spritzguss-Werkzeugstählen beeinflussen | 12 |
| 2.1.5 Herausforderungen bei der Auswahl von Spritzguss-Werkzeugstählen | 13 |
| 2.1.6 Zukünftige Entwicklung von Spritzguss-Werkzeugstählen..... | 13 |
| 2.2 Eigenschaften von Werkzeugstählen | 15 |
| 2.2.1 Einführung in Spritzguss-Werkzeugstähle | 15 |
| 2.2.2 Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen | 16 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.3 Zusammensetzung von Spritzguss-Werkzeugstählen | 17 |
| 2.2.4 Wärmebehandlung von Spritzguss-Werkzeugstählen | 20 |
| 2.2.5 Oberflächenbehandlung von Spritzguss-Werkzeugstählen | 22 |
| 2.2.6 Wartung und Pflege von Spritzguss-Werkzeugstählen | 23 |
| 2.3 Auswahl von Spritzguss-Werkzeugstählen | 25 |
| 2.4 Literatur | 28 |
| 3 Grundlagen der Beschichtungstechnologien | 29 |
| 3.1 Elektrolytisch abgeschiedene metallische Schichten und Hybridsysteme ... | 29 |
| <i>Dr. Orlaw Massler</i> | |
| 3.1.1 Hintergrund und Herausforderungen | 29 |
| 3.1.2 Galvanische Schichten..... | 30 |
| 3.1.2.1 Herausforderungen und Maßnahmen | 32 |
| 3.1.3 Außenstromlose Abscheidung | 34 |
| 3.1.3.1 Außenstromlose Beschichtung, chemisch Nickel | 34 |
| 3.1.3.2 Prinzip chemisch Vernickeln | 34 |
| 3.1.3.3 Chemisch Nickel-Schichten mit festen Zusätzen (Dispersion) .. | 35 |
| 3.1.3.4 Spezialfall Dispersionsschichten | 35 |
| 3.1.3.5 Reibwerterhöhende Schichten..... | 36 |
| 3.1.3.6 Sensor- und Indikatorsschichten | 36 |
| 3.1.4 Beladungstypen | 37 |
| 3.1.5 Beschichtungsgerechte Konstruktion | 37 |
| 3.1.6 Literatur | 39 |
| 3.2 Physikalische Gasphasenabscheidung | 41 |
| <i>Dr. Ruben Schlutter</i> | |
| 3.2.1 Einleitung | 41 |
| 3.2.2 Verfahrensvarianten | 41 |
| 3.2.2.1 Bedampfen..... | 42 |
| 3.2.2.2 Sputtern..... | 44 |
| 3.2.2.3 Ionenplattieren | 45 |
| 3.2.3 Schichtwachstum und Haftungsmechanismen bei PVD-Beschichtungen | 46 |
| 3.2.4 Mehrlagige Schichtsysteme | 50 |
| 3.2.5 Literatur | 51 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.3 | Chemische Gasphasenabscheidung..... | 53 |
| 3.3.1 | Metallorganische chemische Gasphasenabscheidung | 53 |
| | <i>Vanessa Frettlöh</i> | |
| 3.3.1.1 | Einordnung der Technologie | 53 |
| 3.3.1.2 | Abläufe während der MOCVD-Beschichtung..... | 54 |
| 3.3.1.3 | Anforderungen an metallorganische Precursoren | 56 |
| 3.3.1.4 | Aufbau einer MOCVD-Anlage | 58 |
| 3.3.1.5 | Spaltgängigkeit und 3D-Fähigkeit der Beschichtungen | 59 |
| 3.3.1.6 | Literatur..... | 63 |
| 3.3.2 | Feststoffbasierte chemische Gasphasenabscheidung..... | 65 |
| | <i>Dr. Ruben Schlutter</i> | |
| 3.3.2.1 | Grundlagen der CVD mit festen Precursoren | 65 |
| 3.3.2.2 | Förderung des festen Precursors | 69 |
| 3.3.2.3 | Literatur..... | 72 |
| 3.3.3 | Plasmabasierte chemische Gasphasenabscheidung..... | 74 |
| | <i>Patrick Engemann</i> | |
| 3.3.3.1 | Plasmen..... | 74 |
| 3.3.3.2 | Plasma Activated Chemical Vapor Deposition..... | 75 |
| 3.3.3.3 | Literatur..... | 77 |
| 3.3.4 | Precursoren – Moleküle als Vorstufen für Funktionswerkstoffe | 78 |
| | <i>Prof. Dr. Sanjay Mathur, Dr. Veronika Brune, Dr. Thomas Fischer</i> | |
| 3.3.4.1 | Chemische Strategien in der Materialsynthese..... | 81 |
| 3.3.4.2 | Ausblick..... | 92 |
| 3.3.4.3 | Danksagung | 94 |
| 3.3.4.4 | Literatur..... | 94 |
| 3.4 | Simulation der Schichtabscheidung..... | 99 |
| | <i>Ameya Kulkarni</i> | |
| 3.4.1 | Einleitung | 99 |
| 3.4.2 | Theoretische Grundlagen und Versuchsaufbau | 101 |
| 3.4.3 | Die Zustandsgleichungen | 104 |
| 3.4.4 | Versuchsdurchführung und -ergebnisse | 105 |
| 3.4.5 | Ergebnisse der Simulationen | 107 |
| 3.4.6 | Schlussfolgerung | 112 |
| 3.4.7 | Literatur | 113 |

| | |
|---|------------|
| 4 Messtechnik zur Schichtcharakterisierung..... | 115 |
| 4.1 Kalottenschliff | 115 |
| <i>Dr. Ruben Schlutter</i> | |
| 4.1.1 Bestimmung der Schichtdicke | 116 |
| 4.1.2 Bestimmung der Verschleißfestigkeit | 119 |
| 4.1.3 Literatur | 121 |
| 4.2 Rasterelektronenmikroskopie | 122 |
| <i>Dr. Ruben Schlutter</i> | |
| 4.2.1 Einleitung | 122 |
| 4.2.2 Geräteaufbau | 124 |
| 4.2.3 Vorbereitung der Probe | 129 |
| 4.2.4 Sensoren in einem Rasterelektronenmikroskop..... | 130 |
| 4.2.4.1 SE-Sensor..... | 130 |
| 4.2.4.2 UVD-Sensor..... | 131 |
| 4.2.4.3 BSE-Sensor | 132 |
| 4.2.4.4 EDX-Sensor | 136 |
| 4.2.5 Literatur | 141 |
| 4.3 Lasermikroskopie | 143 |
| <i>Dr. Stefan Svoboda</i> | |
| 4.3.1 Grundprinzip | 143 |
| 4.3.2 Aufnahme eines Bildes | 144 |
| 4.3.3 Anwendungsbeispiele | 150 |
| 4.3.3.1 Rissnetzwerk in Sol-Gel-Schicht | 150 |
| 4.3.3.2 Darstellung und Auswertung eines Kalottenschliffes..... | 152 |
| 4.3.3.3 Rauheitsmessung an einer Kunststoffprobe | 153 |
| 4.3.3.4 Auswertung Verschleißprüfung | 154 |
| 4.3.4 Literatur | 155 |
| 4.4 Weißlichtinterferometrie..... | 156 |
| <i>Dr. Andreas Balster</i> | |
| 4.4.1 Einleitung | 156 |
| 4.4.2 Rauheit als Messgröße..... | 157 |
| 4.4.3 Weißlichtinterferometrie | 160 |
| 4.4.3.1 Messprinzip der Weißlichtinterferometrie | 160 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.3.2 Anwendungen der Weißlichtinterferometrie | 163 |
| 4.4.3.3 Einschränkungen der Weißlichtinterferometrie | 165 |
| 4.4.4 Literatur | 165 |
| 4.5 Infrarotspektroskopie | 166 |
| <i>Dr. Andreas Balster</i> | |
| 4.5.1 Einleitung | 166 |
| 4.5.2 Physikalische Grundlagen..... | 166 |
| 4.5.3 Die Anwendung der FTIR-Spektroskopie bei Polymeren: Materialidentifizierung | 169 |
| 4.5.4 Identifizierung und Strukturaufklärung | 171 |
| 4.5.5 Quantifizierung von Komponenten | 174 |
| 4.5.6 Messtechnische Aspekte der FTIR-Spektroskopie | 175 |
| 4.5.7 ATR-FTIR-Spektroskopie | 176 |
| 4.5.8 Anwendungsbereich in der Werkzeugtechnik | 178 |
| 4.5.9 Literatur | 179 |
| 4.6 Röntgenfluoreszenzanalyse | 181 |
| <i>Dr. Martin Ciaston</i> | |
| 4.6.1 Einleitung | 181 |
| 4.6.2 Physikalische Grundlagen der Röntgenfluoreszenz..... | 181 |
| 4.6.3 Instrumentelle Aspekte der Röntgenfluoreszenzspektroskopie .. | 184 |
| 4.6.4 Anwendungen der Röntgenfluoreszenzspektroskopie in der Materialanalyse | 186 |
| 4.6.5 Quantitative Aspekte der Röntgenfluoreszenzspektroskopie .. | 187 |
| 4.6.6 Zusammenfassung und Ausblick | 189 |
| 4.6.7 Literatur | 191 |
| 4.7 Elektrochemische Impedanzspektroskopie..... | 192 |
| <i>Dr. Anatoliy Batmanov</i> | |
| 4.7.1 Einleitung | 192 |
| 4.7.2 Grundlagen der EIS | 194 |
| 4.7.3 Darstellung der EIS-Messergebnisse | 199 |
| 4.7.4 EIS-Untersuchung von Schutzschichten | 200 |
| 4.7.5 Der Versuchsaufbau für eine EIS-Messung..... | 205 |
| 4.7.6 Schlussfolgerung | 206 |
| 4.7.7 Literatur | 207 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 4.8 | Nanoindentation | 209 |
| | <i>Dr. Ruben Schlutter</i> | |
| 4.8.1 | Einleitung | 209 |
| 4.8.2 | Versuchsaufbau bei der Messung mittels Nanoindenter | 211 |
| 4.8.3 | Gängige Prüfverfahren | 215 |
| 4.8.3.1 | Bestimmung der Eindringhärte | 215 |
| 4.8.3.2 | Bestimmung des Eindringmoduls | 218 |
| 4.8.3.3 | Bestimmung des Eindringkriechens | 219 |
| 4.8.3.4 | Bestimmung der Eindringrelaxation | 220 |
| 4.8.3.5 | Bestimmung des plastischen und elastischen Anteils der Eindringarbeit | 220 |
| 4.8.4 | Prüfverfahren für Schichten | 221 |
| 4.8.4.1 | Eindringmodul der Schicht | 224 |
| 4.8.4.2 | Eindringhärte der Schicht | 225 |
| 4.8.5 | Literatur | 227 |
| 4.9 | Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Beschichtungen | 228 |
| | <i>Patrick Engemann</i> | |
| 4.9.1 | Einfluss der Werkzeugwandtemperatur auf den Spritzgussprozess .. | 228 |
| 4.9.2 | Kontakttemperatur | 229 |
| 4.9.3 | Time Domain Thermoreflectance (TDTR) | 230 |
| 4.9.4 | 3-Omega | 231 |
| 4.9.5 | Versuchsaufbau zur Messung der Kontakttemperatur | 233 |
| 4.9.6 | Versuchsdurchführung zur Messung der Kontakttemperatur | 234 |
| 4.9.7 | Literatur | 236 |
| 4.10 | Bestimmung der Entformungskraft beim Spritzgießen | 238 |
| | <i>Dr. Ruben Schlutter</i> | |
| 4.10.1 | Einleitung | 238 |
| 4.10.2 | Stand der Technik | 238 |
| 4.10.3 | Versuchsaufbau zur Bestimmung der Haft- und Gleitreibung | 240 |
| 4.10.3.1 | Versuchsaufbau | 241 |
| 4.10.3.2 | Versuchsdurchführung | 243 |
| 4.10.3.3 | Qualifizierung des Spritzgießwerkzeuges im Dauerversuch | 244 |
| 4.10.4 | Zusammenfassung | 246 |
| 4.10.5 | Literatur | 246 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.11 | Bestimmung der Emissionen in der Kunststoffverarbeitung | 248 |
| | <i>Dr. Andreas Balster, Matthias Korres</i> | |
| 4.11.1 | Einleitung | 248 |
| 4.11.2 | Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC/MS) | 248 |
| 4.11.3 | Emissionsbildung in der Kunststoffverarbeitung | 256 |
| 4.11.4 | Prozessabhängige Emissionsbildung | 257 |
| 4.11.4.1 | Materialtrocknung | 257 |
| 4.11.4.2 | Materialverarbeitung | 260 |
| 4.11.5 | Zusammenfassung | 265 |
| 4.11.6 | Literatur | 266 |
| 4.12 | Verschleißuntersuchungen in der Kunststoffverarbeitung | 267 |
| | <i>Marko Gehlen</i> | |
| 4.12.1 | Einleitung | 267 |
| 4.12.2 | Definition von Verschleiß | 267 |
| 4.12.3 | Die Bedeutung von Verschleiß für die Industrie | 268 |
| 4.12.4 | Stand der Technik und Messverfahren | 269 |
| 4.12.5 | Verschleiß beim Spritzguss und im Spritzgießwerkzeug | 271 |
| 4.12.6 | Untersuchung des Verschleißverhaltens im Spritzguss | 271 |
| 4.12.7 | Ausblick | 274 |
| 4.12.8 | Zusammenfassung | 275 |
| 4.12.9 | Literatur | 275 |
| 4.13 | Haftungsbewertung von Beschichtungen | 277 |
| | <i>Dr. Orlaw Massler</i> | |
| 4.13.1 | Rockwelltest, DIN EN ISO 4856 | 279 |
| 4.13.2 | Thermoschocktest | 280 |
| 4.13.3 | Feiltest | 281 |
| 4.13.4 | Querschliffmethode | 281 |
| 4.13.5 | Literatur | 282 |
| 5 | Anwendung funktioneller Schichten | 283 |
| 5.1 | Hartstoffsichten | 283 |
| | <i>Marko Gehlen</i> | |
| 5.1.1 | Einleitung | 283 |
| 5.1.2 | Definition und Eigenschaften einer Hartstoffschicht | 283 |
| 5.1.3 | Einsatzgebiete | 284 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 5.1.4 | Voraussetzungen und Schichtaufbau | 284 |
| 5.1.5 | Verfahren zum Aufbringen von Hartstoffschichten | 285 |
| 5.1.6 | Kennwerte zur Bewertung der Verschleißfestigkeit | 286 |
| 5.1.7 | Erzielte Abriebvergleichswerte und Härten | 287 |
| 5.1.8 | Zusammenfassung | 288 |
| 5.1.9 | Literatur | 289 |
| 5.2 | Tribologische Schichten und Verschleißschutzschichten | 290 |
| | <i>Dr. Orlaw Massler</i> | |
| 5.2.1 | Anforderungen an Verschleißschutz und Reibung | 290 |
| 5.2.1.1 | Abrasiver Verschleiß | 290 |
| 5.2.1.2 | Adhäsiver Verschleiß | 290 |
| 5.2.1.3 | Ermüdungsverschleiß | 290 |
| 5.2.1.4 | Tribooxidation | 291 |
| 5.2.1.5 | Reibungsreduktion | 291 |
| 5.2.2 | Galvanische Beschichtungen | 292 |
| 5.2.2.1 | Hartverchromung | 292 |
| 5.2.2.2 | Vernickelung | 294 |
| 5.2.3 | Chemisch Nickel und Dispersionsschichten | 294 |
| 5.2.3.1 | Dispersionsschichten | 295 |
| 5.2.3.2 | SiC-Dispersionsschichten | 295 |
| 5.2.3.3 | BC-Dispersionsschichten | 296 |
| 5.2.3.4 | hBN-Dispersionsschichten | 296 |
| 5.2.4 | Tribologische PVD- und PACVD-Beschichtungen | 296 |
| 5.2.5 | Hybridschichten | 297 |
| 5.2.5.1 | Ni-Cr-Hybrid | 298 |
| 5.2.5.2 | Plasmanitrieren - PVD - DLC | 299 |
| 5.2.5.3 | Chemisch Ni-DLC-Hybridschichten | 299 |
| 5.2.5.4 | Ni-SiC-DLC-Hybridschicht | 299 |
| 5.2.6 | Literatur | 299 |
| 5.3 | Korrosionsschutzschichten | 300 |
| | <i>Dr. Anatoliy Batmanov</i> | |
| 5.3.1 | Definition der Korrosion | 300 |
| 5.3.2 | Grundsätzliche Strategien zur Vermeidung der Korrosion | 302 |

| | |
|---|-----|
| 5.3.3 Anforderungen an Korrosionsschutzschichten | 303 |
| 5.3.4 Entwicklung einer Korrosionsschutzschicht gegen Heißgaskorrosion | 307 |
| 5.3.5 Entwicklung einer Korrosionsschutzschicht gegen wässrige Korrosion | 310 |
| 5.3.6 Literatur | 312 |
| 5.4 Thermische Barrièreschichten | 313 |
| <i>Vanessa Frettlöh</i> | |
| 5.4.1 Verständnis einer thermischen Barrièreschicht | 313 |
| 5.4.2 Einfluss der Temperatur im Spritzgussprozess | 313 |
| 5.4.3 Anwendung und Eigenschaften von thermischen Barrièreschichten | 316 |
| 5.4.4 Funktionsweise thermischer Barrièreschichten | 317 |
| 5.4.5 Anwendung thermischer Barrièreschichten im Spritzgießprozess | 319 |
| 5.4.6 Einsatz thermischer Barrièreschichten im Dünnwandspritzguss | 322 |
| 5.4.7 Literatur | 325 |
| 5.5 Beschichtungen zur Belagsreduzierung | 328 |
| <i>Mattias Korres</i> | |
| 5.5.1 Einführung | 328 |
| 5.5.2 Belag im Spritzgießwerkzeug | 329 |
| 5.5.3 Prozessoptimierung | 332 |
| 5.5.4 Optimierung des Spritzgießwerkzeuges | 334 |
| 5.5.5 Beschichtungen zur Belagsreduzierung | 335 |
| 5.5.6 Literatur | 337 |
| 5.6 Beschichtungen zur Entformungskraftreduzierung | 338 |
| <i>Dr. Ruben Schlutter</i> | |
| 5.6.1 Einleitung | 338 |
| 5.6.2 Stand der Technik | 338 |
| 5.6.3 Anwendungsmöglichkeiten und Potentiale | 343 |
| 5.6.3.1 Werkstoffauswahl des thermoplastischen Werkstoffs | 343 |
| 5.6.3.2 Zugaben von Additiven | 343 |
| 5.6.4 Modifizierung der Kavitätsoberfläche | 344 |
| 5.6.5 Zusammenfassung | 346 |
| 5.6.6 Literatur | 346 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| 5.7 | Dünnsschichtsensorik | 348 |
| | <i>Dr. Angelo Librizzi</i> | |
| 5.7.1 | Einleitung | 348 |
| 5.7.2 | Stand der Technik – Werkzeugsensorik | 349 |
| 5.7.2.1 | Druckmessung im Spritzgießwerkzeug | 349 |
| 5.7.2.2 | Temperaturmessung im Spritzgießwerkzeug | 351 |
| 5.7.3 | Messprinzip für temperatursensitive Dünnsschichten | 354 |
| 5.7.4 | Schichtaufbau | 355 |
| 5.7.5 | Schichtherstellung | 356 |
| 5.7.6 | Charakterisierung des thermoelektrischen Verhaltens der Dünnsschichtsensoren | 360 |
| 5.7.7 | Berechnung der Ansprechdynamik | 361 |
| 5.7.8 | Sensorintegration und Anwendung in einem Spritzgießwerkzeug .. | 362 |
| 5.7.9 | Zusammenfassung | 365 |
| 5.7.10 | Literatur | 366 |
| 5.8 | Heizschichten | 367 |
| | <i>Dr. Martin Ciaston</i> | |
| 5.8.1 | Einleitung | 367 |
| 5.8.2 | Grundlagen der konturnahen Heizschichten | 367 |
| 5.8.3 | Anforderungen an ein Schichtsystem für eine Anwendung als Heizleiter im Spritzgießverfahren | 369 |
| 5.8.4 | Anwendung von Heizschichten in Spritzgießprozessen | 369 |
| 5.8.5 | Zusammenfassung und Ausblick | 370 |
| 5.8.6 | Literatur | 371 |
| Index | 373 | |

Vorwort

Kunststoffformteile müssen zunehmend immer höhere Anforderungen erfüllen. Dabei ist es unerheblich, ob sich diese Anforderungen auf das Formteil selbst beziehen, wie bspw. eine geringere Wanddicke, eine erhöhte Fließweglänge oder das Kaschieren von Bindenähten oder auf den verwendeten Werkstoff, wie die Verwendung von Verstärkungsstoffen oder aggressiven Additiven oder den Spritzgießprozess, wie eine Reduzierung der Zykluszeit oder eine Steigerung der Losgröße. Zur Erfüllung dieser Anforderungen müssen auch die Spritzgießwerkzeuge immer weiter optimiert und ausgereizt werden. Neben der Verwendung hochqualitativer Werkstoffe stellen Beschichtungen eine Möglichkeit dar, um die notwendigen Funktionalisierungen zu erreichen.

Die Beschichtung von metallischen Werkstoffen kann dabei auf unterschiedliche Arten erfolgen und stellt eine Kernkompetenz der gemeinnützigen KIMW-Forschungs-GmbH dar. Problematisch ist dabei immer die Darstellung des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik. Ein tiefgreifendes Wissen über die Prozesstechnik zur Abscheidung von Beschichtungen, aber auch die zur Validierung der Schichteigenschaften ist notwendig, um hochwertige Beschichtungen zu erzeugen. Über mehrere Jahre mussten Erfahrungen gesammelt werden, welche Eigenschaften durch Beschichtungen realisierbar sind, wie geeignete Schichten appliziert und auch untersucht werden können. Dabei mussten die notwendigen Informationen oftmals aus vielen, häufig nicht öffentlich zugänglichen Fachartikeln gewonnen werden. Diese behandeln in der Regel spezielle Anwendungen, die nicht direkt auf die Werkzeugtechnik übertragbar sind. Die Autoren sind meistens Chemiker, Physiker oder Experten auf dem Bereich der Beschichtungstechnik, sodass die Fachartikel für Ingenieure zumeist schwer zu verstehen und nachzuvollziehen sind. Es fehlt ein Nachschlagewerk, welches die relevanten Beschichtungstechnologien für Spritzgießwerkzeuge und Untersuchungsverfahren zur Charakterisierung der Beschichtungen adäquat zusammenfasst.

Aus dieser Motivation heraus ist der Gedanke entstanden, dass bei der gemeinnützigen KIMW-Forschungs-GmbH vorhandene Wissen in einem Buch zu kanalisieren und in einem Grundlagenwerk zugänglich zu machen. Das Resultat ist ein Leit-

faden, der die relevanten Informationen der Beschichtungstechnologie in einem für Ingenieure verständlichen Umfang zusammenfasst.

Das Fachbuch schlägt einen Bogen über die verschiedenen Kapitel und behandelt die relevanten Aspekte der Beschichtungstechnologien. Zu Beginn werden die verschiedenen Möglichkeiten zum Abscheiden von Beschichtungen im Hinblick auf die Anwendung in Spritzgießwerkzeugen diskutiert. Die Möglichkeiten zur Charakterisierung der abgeschiedenen Beschichtungen schließen sich an. Dabei werden die verschiedenen Messverfahren explizit auf ihre Anwendungsmöglichkeiten zur Bewertung der Eigenschaften vergleichsweise dünner Beschichtungen im Umfeld des Werkzeug- und Formenbaus vorgestellt. Abgeschlossen wird das Buch mit verschiedenen Anwendungen funktioneller Beschichtungen in Spritzgießwerkzeugen und vermittelt dem Leser einen Eindruck über die Einsatzmöglichkeiten. Zudem wird der Leser in die Lage versetzt, die für seine Anwendung am besten geeignete Beschichtung und das daraus resultierende Abscheidungsverfahren auszuwählen.

Ich möchte mich herzlich bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen dieses Buches beigetragen haben, im Speziellen bei Rebecca Wehrmann und Dr. Mark Smith für die Übernahme des Lektorates und ihre Geduld bei der Erstellung des vorliegenden Buches.

Außerdem möchte ich mich allen Autoren für die Bereitstellung der jeweiligen Kapitel bedanken, die das vorliegende Fachbuch inhaltlich mit Leben füllen und die selbst die hochkomplexen Sachverhalte gut verständlich aufbereitet haben. Abschließend möchte ich mich für Ihre Geduld mit mir bedanken.

Lüdenscheid, 2023

Ruben Schlutter

Die Autorinnen und Autoren

■ Der Herausgeber

Dr. Ruben Schlutter



Dr. Ruben Schlutter ist als selbstständiger Dozent in der Aus- und Weiterbildung im Bereich der Kunststofftechnik und Simulation tätig. Er lehrt vorrangig die Fächer Spitzgießsimulation, strukturmechanische Simulation und Konstruieren mit Kunststoffen/Formteilauslegung. Nach seinem Maschinenbaustudium mit dem Schwerpunkt Produktentwicklung und Konstruktion an der Hochschule Schmalkalden promovierte er in einer kooperativen Promotion zwischen der Technischen Universität Chemnitz und der Hochschule Schmalkalden

bei Prof. Dr. Michael Gehde und Prof. Dr. Thomas Seul im Themengebiet der Druckverlustanalyse in der Spritzgießsimulation. Nach der Promotion wechselte er an das Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft in Lüdenscheid. Dort hat er verschiedene Forschungs- und Entwicklungsprojekte, wie die Internationalisierung des bestehenden Netzwerkes oder Spitzgießen im Umfeld der Industrie 4.0 (MONSOON) betreut. Im Jahr 2018 wechselte er in die gemeinnützige Forschungs-GmbH und betreute Projekte über die Herstellung und Verwendung biozider Nanopartikel und die Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zur qualitativen Beurteilung der Schaumstruktur von Kunststoffformteilen. Parallel engagierte sich Dr. Schlutter in den Weiterbildungsangeboten des Kunststoff-Instituts für die mittelständische Wirtschaft in den Schwerpunkten Form- und Lagetoleranzen, kunststoffgerechte Formteilauslegung und Kunststofftolerierung nach ISO 20 457. Seit 2022 ist er selbstständiger Dozent und Mitglied des Verbands deutscher Werkzeug- und Formenbauer (VDWF).

■ Die Mitverfasserinnen und Mitverfasser

Dr. Andreas Balster



Herr Dr. Andreas Balster promovierte 2001 an der Ruhr-Universität Bochum in organischer Chemie und arbeitete seit 2002 am Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft (KIMW NRW GmbH) in Lüdenscheid. Dort leitete er unter anderem die Abteilung für Material- und Schadensanalyse, das Polymer Training Centre (PTC) und das Deutsche Institut für Ringversuche (DIR), bevor er 2023 als Leiter des Analytiklabors zur pro3dure medical GmbH in Iserlohn wechselte. Dr. Balster ist seit 2008 freiberuflicher Dozent der FH Südwestfalen und lehrte 2020 und 2021 online an der Frankfurt University of Applied Sciences. Von 2015-2022 war er aktives Mitglied des DIN-Normenausschusses Kunststoffe (FNK), Fachbereich NA 054-01-03 AA Physikalische, rheologische und analytische Prüfungen.

Dr. Anatoliy Batmanov



Herr Dr.-Ing. Anatoliy Batmanov studierte Halbleitertechnologie an der Nationalen Universität „Lwiwer Polytechnika“ in der Ukraine. Anschließend promovierte er an der Universität Magdeburg zum Thema „Entwurf, Modellierung, Optimierung und Herstellung von Hochfrequenz mikroelektromechanischen Schaltern und koplanaren Filtern“. Herr Dr.-Ing. Batmanov ist seit 20 Jahren im Bereich der Abscheidungstechnologien von dünnen Schichten verschiedener Art mittels CVD und PVD tätig. Seit 2019 arbeitet er als Projektmanager in der KIMW Forschungs-GmbH in der Abteilung Beschichtungstechnik.

Gemeinnützige KIMW Forschungs-GmbH
Lutherstraße 7
58 507 Lüdenscheid



Dr. Veronika Brune

Frau Dr. Veronika Brune ist Post-Doktorandin und als wissenschaftliche Mitarbeiterin mit Lehrauftrag am Institut für Anorganische Chemie der Universität zu Köln am Lehrstuhl von Herrn Prof. Sanjay Mathur für Anorganische und Materialchemie angestellt. Sie ist für den Bereich der Synthese von molekularen Vorstufenmolekülen (Precursoren) für Gasphasenabscheidungen zuständig. Nach ihrem Chemiestudium an der Universität zu Köln promovierte sie unter der Leitung von Prof. Dr. Dr. (h.c.) Sanjay Mathur an der Universität zu Köln. Ihr Forschungsinteresse liegt in der durch chemisches spezielles Design metallocalkogenidischer Vorstufenmoleküle für Gasphasenmethoden zugänglich gemacht werden.



Institut für Anorganische Chemie
Universität zu Köln
Greinstr. 6
50 939 Köln



Dr. Martin Ciaston

Herr Dr. Martin Ciaston, geboren 1981, ist ein hochqualifizierter Wissenschaftler mit einem starken Hintergrund in der analytischen Chemie. Er ist derzeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der gemeinnützigen KIMW Forschungs-GmbH in der Projektleitung tätig. Herr Ciaston ist dort für die Entwicklung von Prozess- und Anlagentechnik in der MOCVD verantwortlich und hat innovative Beschichtungen für Spritzgießwerkzeuge entwickelt und charakterisiert. Er ist ein erfahrener Analytiker und hat bereits diverse Prüfmethoden entwickelt und validiert.

Herr Ciaston hat eine beeindruckende akademische Laufbahn absolviert, einschließlich seiner Promotion am Thünen-Institut in Braunschweig, wo er sich mit der katalytischen Derivatisierung von Itaconsäure für die Polyester-Synthese beschäftigte. Während seiner Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Thünen-Institut hat er chemisch-katalytische Verfahren zur Herstellung und Modifizierung biobasierter Monomere aus Fermentationsprodukten entwickelt und dabei heterogene Katalysatoren in kontinuierlich betriebenen Festbettreaktoren und absatzweise betriebenen Rührkesselreaktoren hergestellt und eingesetzt. Zu diesem Zweck hat er geeignete analytische Methoden entwickelt und anschließend Poly-

mere aus den hergestellten/modifizierten Monomeren synthetisiert und charakterisiert. Herr Ciaston hat einen Diplomabschluss in Chemie von der Technischen Universität Braunschweig und hat sich in seiner Diplomarbeit bei der Volkswagen AG mit der Eignung von Polymeren und amorphen Kohlenstoffen für die Implementierung in Lithium-Ionen-Zellen als Beschichtungsmaterial für Temperatur- und Drucksensorik beschäftigt.

Patrick Engemann



Herr Patrick Engemann absolvierte zunächst eine Ausbildung als Werkzeugmechaniker und studierte anschließend an der Fachhochschule Südwestfalen Fertigungstechnik. Nach Abschluss des Bachelor of Engineering an der Fachhochschule setzte Herr Engemann sein Studium an der Bergischen Universität Wuppertal im Bereich Maschinenbau fort. Seit 2017 ist Herr Engemann bei der Gemeinnützigen KIMW Forschungs-GmbH angestellt und beschäftigt sich dort schwerpunktmäßig mit der Weiterentwicklung der Werkzeugtemperierung für Spritzgusswerkzeuge und der CVD-Anlagentechnik auseinander.

Gemeinnützige KIMW Forschungs-GmbH
Lutherstraße 7
58 507 Lüdenscheid



Dr. Thomas Fischer



Herr Dr. Thomas Fischer ist akademischer Rat am Institut für Anorganische Chemie der Universität zu Köln und ist am Lehrstuhl für Anorganische und Materialchemie für die Gasphasenbeschichtungstechnologien verantwortlich. Nach seinem Chemiestudium der Chemie an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg promovierte er bei Prof. Dr. Dr. (h.c.) Sanjay Mathur an der Universität zu Köln. Sein Forschungssinteresse gilt der Entwicklung neuer Gasphasenbeschichtungsmethoden und in operando Untersuchungen der dabei auftretenden Gasphasen- und Oberflächenreaktionen. Zusammen mit Herrn Prof. Mathur gründete er das Steinbeis Technologietransferunternehmen „Materials Alliance Cologne“. Als Mitglied des Nachhaltigkeitsrates der Universität zu Köln ist Herr Dr. Fischer für

den Teilbereich Nachhaltige Forschung verantwortlich und er ist aktives Mitglied der American Ceramic Society (USA).

Institut für Anorganische Chemie
Universität zu Köln
Greinstr. 6
50 939 Köln



Vanessa Frettlöh, M. Sc.

Vanessa Frettlöh studierte Chemie in Siegen und ist seit 2013 in der gemeinnützigen KIMW Forschungs-GmbH im Bereich der Beschichtungstechnik tätig. Neben der Betreuung von Forschungsprojekten in der Werkzeug- und Beschichtungstechnik widmete sie sich auch der Weiterentwicklung der CVD-Technik in Lüdenscheid. Seit 2020 ist Sie Bereichsleiterin Oberflächentechnik-Werkzeuge und damit für die Beschichtungstechnik mit Schwerpunkt chemischer Gasphasenabscheidung verantwortlich.



Gemeinnützige KIMW Forschungs-GmbH
Lutherstraße 7
58 507 Lüdenscheid



Dipl.-Ing. Marko Gehlen

Herr Marko Gehlen studierte von 1990 bis 1996 Kunststofftechnik an der RWTH Aachen. Danach arbeitete er einige Jahre im Bereich der mechanischen Entwicklung von DECT-Telefonen bei der Siemens AG in Bocholt, bevor er die Leitung der Formenkonstruktion/NC-Programmierung bei der Gigaset Communications GmbH (vormals Siemens) übernahm. Schließlich leitete er für vier Jahre die Kunststoffverarbeitung.

2015 startete er am Kunststoff-Institut Lüdenscheid und war dort zunächst für die bereichsübergreifende Entwicklung von Verbundprojekten zuständig. Seit 2019 arbeitet Herr Gehlen in der Forschungsstelle des Kunststoff-Instituts Lüdenscheid, innerhalb derer ein Schwerpunkt die Entwicklung von funktionellen Werkzeugbeschichtungen ist. Hier verantwortet er u.a. den Bereich Strategie und Innovation.

Gemeinnützige KIMW Forschungs-GmbH
Lutherstraße 7
58 507 Lüdenscheid

**Matthias Korres, B. Eng.**

Herr Korres absolvierte 2010 seine Ausbildung zum Verfahrensmechaniker für Kunststoff- und Kautschuktechnik im Bereich Spritzguss. Von 2012 an studierte er Maschinenbau mit der Vertiefung Kunststofftechnik an der Fachhochschule Südwestfalen zu Iserlohn. Als Abschlussarbeit entwickelte und optimierte er 2015 einen Prüfstand zur Vermessung der Haft- und Gleiteigenschaften von Kunststoffen zum Entformungszeitpunkt am Kunststoff-Institut Lüdenscheid.

Nach erfolgreichem Abschluss arbeitete Herr Korres zunächst in der Forschungsabteilung des Kunststoff-Instituts Lüdenscheid an Projekten zur Substitution von Metallbauteilen im Bereich von Druckgasgeneratoren und hybriden Werkzeugmaterialkonzepten. Anschließend wechselte er in den Bereich der Anwendungs- und Werkzeugtechnik am Institut und entwickelte eine Aufnahmeeinheit zur Erfassung und Analyse von Emissionen im Spritzgussprozess. Er beschäftigt sich unter anderem mit der Bewertung von Beschichtungen hinsicht-

lich ihrer Effektivität zur Reduzierung von Haft- und Belagsproblemen in der kunststoffverarbeitenden Industrie. Des Weiteren leitet und koordiniert er seit 2021 den Bereich für additive Fertigung am Kunststoff-Institut Lüdenscheid.

Ameya Kulkarni, M. Sc.

Herr Kulkarni studierte Computational Mechanics an der Universität Duisburg-Essen. Anschließend arbeitete er bei der KIMW-F gGmbH in der Forschung und Entwicklung für Strömungssimulationen von CVD-Reaktoren und Multiphysik-FEM-Berechnungen in unterschiedlichen Forschungsprojekten. Seit 2022 ist er bei der Winora Group und arbeitet in die Entwicklungsabteilung als FEM-Ingenieur.



Winora Group

Max-Planck-Straße 6
97 526 Sennfeld

Dr. Angelo Librizzi

Herr Dr. Angelo Librizzi absolvierte zunächst eine Berufsausbildung zum Werkzeugmechaniker – Formentechnik. Anschließend studierte er Maschinenbau – Kunststofftechnik an der Fachhochschule Südwestfalen in Iserlohn und an der Universität Paderborn. Neben seiner Berufstätigkeit promovierte er 2015 auf dem Gebiet der Dünnschichtsensorik zur Temperaturmessung in Spritzgießwerkzeugen am KTP der Universität Paderborn. Von 2008–2015 war er als Projektengineer und als Bereichsleiter Oberflächentechnik an der Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH tätig. 2015 wechselte er in die Forschungsstelle des Kunststoff-Instituts (KIMW Forschungs-gGmbH). Dort verantwortet er aktuell den Bereich der Werkzeug- und Prozesstechnik und ist als Prokurist Mitglied in der Geschäftsleitung.

Gemeinnützige KIMW Forschungs-GmbH
Lutherstraße 7
58 507 Lüdenscheid



Dr. Orlaw Massler

Dr.-Ing. Orlaw Massler absolvierte zunächst ein Studium der Werkstoffwissenschaften an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen. Danach arbeitete er zunächst als Projekt- und Abteilungsleiter am Diamond Research Laboratory der De Beers Industrial Diamonds Division in Johannesburg, Südafrika. Seit 1999 war er dann bei der Balzers AG in Balzers, Liechtenstein (heute Oerlikon Surface Solutions) in verschiedenen Positionen, zuletzt als Entwicklungsleiter tätig. Von 2008 bis 2015 fungierte er in der Konzern-Forschung der Hilti AG in Liechtenstein als Tribologie-Experte. Seit 2015 ist Dr. Massler als Head of Research and Innovation der De Martin Gruppe mit Hauptsitz in der Schweiz tätig. Schwerpunkte sind sowohl innovative und hybride Funktions-Beschichtungen mit Elektrolyt-, PVD und PACVD Technologien, als auch disruptive Themen der Surface Technology.

De Martin AG Surface Technology
Froheggstrasse 34
CH 9545 Wängi

**Prof. Dr. Sanjay Mathur**

Prof. Dr. Dr. (h.c.) Sanjay Mathur ist Lehrstuhlinhaber und Direktor am Institut für Anorganische Chemie der Universität zu Köln in Deutschland. Darüber hinaus ist er Direktor des Instituts für „Renewable Energy Sources“ an der Xi'an Jiaotong Universität in China und ein herausragender Professor der Chonbuk Universität in Korea. Des Weiteren ist er Gastprofessor am Institut für „Global Innovation Research“ an der Tokyo Universität für „Agriculture and Technolog“ (TUAT) in Japan und Mitbestreiter des „Stimulating Peripheral Activity to Relieve Conditions“ (SPARC) am Indian Institute of Technology-Madras (IIT-Madras) in Indien. Seine Forschungsarbeiten beschäftigt sich mit der gezielten Anwendung von Nanomaterialien und zukunftsorientierten keramischen Materialien für Energietechnologien. Prof. Sanjay Mathur besitzt elf Patente und ist (Co)Autor von mehr als 500 wissenschaftlichen Publikationen (h-Index 71) und editierte eine Reihe an Büchern. Er ist Editor der wissenschaftlichen Journale Journal of Electroceramics und NanoEnergy. Prof. Mathur ist ein akademisches Mitglied der World Academy of Ceramics sowie der American Ceramic Society (ACerS) und ASM International.

2016 wurde Herr Prof. Sanjay Mathur mit einem Ehrendoktor der Vilnius Universität geehrt. Gegenwärtig ist er im Vorstand der European Materials Research Society (E-MRS). 2020 wurde er mit der R. C. Mehrotra Lifetime Achievement Preis der Indian Science Congress Association ausgezeichnet. Er wurde 2020 als Mitglied der European Academy of Science und 2021 als Mitglied der National Academy of Science, India ausgezeichnet. Darüber hinaus wurde er 2021 mit dem Woody White Preis der Material Research Society (MRS) geehrt und erhielt 2022 die Medallie der indischen Chemical Research Society. Im selben Jahr wurde ihm die Materials Frontiers Auszeichnung der International Union of Materials Research Society (IUMRS) zuteil. Aktuell ist er Präsident der American Ceramic Society (ACerS 2022-2023), USA und wurde für die Orton Jr. Lecture (2022/23) der American Ceramic Society berücksichtigt. Prof. Sanjay Mathur ist darüber hinaus Vorstandsmitglied der Deutschen Keramischen Gesellschaft (DKG) und gewähltes Mitglied des Prüfungsausschusses („Fachkollegiat“) der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Institut für Anorganische Chemie
Universität zu Köln
Greinstr. 6
50 939 Köln



Markus Pothmann

auf den Vertrieb von 3D gedruckten Bauteilen spezialisiert hat.

Markus Pothmann ist Absolvent der Fachhochschule Münster und verfügt über umfangreiche Erfahrung auf dem Gebiet der Werkstofftechnik. Während seiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Labor für Werkstofftechnik widmete er sich insbesondere der Entwicklung tribologischer Prüfstände. Seit 2021 ist er bei der gemeinnützigen KIMW Forschungs-GmbH tätig, wo er seine Expertise in innovative Forschungsprojekte einbringt. Neben seiner Haupttätigkeit engagiert sich Markus Pothmann als Inhaber eines Unternehmens, das sich

Gemeinnützige KIMW Forschungs-GmbH
Lutherstraße 7
58 507 Lüdenscheid



GEMEINNÜTZIGE KIMW FORSCHUNGS-GMBH

Dr. Stefan Svoboda

Herr Dr.-Ing. Stefan Svoboda studierte an der Technischen Universität Dresden Werkstoffwissenschaften und promovierte an der TU Ilmenau zum Thema „Nanostrukturierte Hartstoffsichten auf Sol-Gel-Basis zum Verschleißschutz“.

Er arbeitete einige Jahre in der Werkzeugindustrie in Schmalkalden und parallel dazu seit 1982 an der Ingenieurschule, ab 1990 Fachhochschule Schmalkalden. Neben der Leitung des Labors für Mikroskopie und Werkstoffanalytik lehrte er in der Fakultät Maschinenbau der Hochschule Schmalkalden Werkstofftechnik und Tribologie. Daneben lehrt er als Privatdozent an der Dualen Hochschule Eisenach Werkstofftechnik, Werkstoffprüfung und Instandhaltung.

1

Einleitung

Dr. Ruben Schlutter

Der deutsche Werkzeugbau gehört zu den am höchsten entwickelten weltweit und gehört zu den Allstars der Werkzeugmärkte. Die weiteren Allstars sind China, die USA, Japan, Südkorea. Diese zeichnen sich durch eine hohe Werkzeugkompetenz und ein großes Produktionsvolumen aus. Der deutsche Werkzeugmarkt zeichnet sich dabei durch die höchste Werkzeugbaukompetenz und den fünftgrößten Markt aus. Damit ist der deutsche Werkzeugbau der wichtigste in Europa. Im Jahr 2020 hatte der deutsche Werkzeugmarkt ein Marktvolumen von ca. 1,84 Mrd € für Spritzgießwerkzeuge und ca. 400 Mio € für Druckgusswerkzeuge. Besonders hochpreisige und komplexe Werkzeuge werden in Deutschland gefertigt. [BLK+22]

Ebenso wie die Qualität der Spritzgießwerkzeuge immer weiter steigt, steigen auch die Anforderungen an die produzierten Kunststoffformteile. Neben den Anforderungen an das Design und die Oberfläche des Kunststoffformteils spielt auch die Fertigung eine wesentliche Rolle im Anforderungsprofil. Die Spritzgießwerkzeuge müssen dafür immer größeren Belastungen standhalten, sei es durch den Einsatz abrasiver oder korrosionsfördernder Kunststoffe, Füll- und Verstärkungsstoffe oder Additive oder auch durch technologische Forderungen, wie das Erreichen eines bestimmten Fließweges oder das optische Kaschieren einer Bindenahrt. Innerhalb des Spritzgießprozesses können dabei vielfältige Fehler an den Formteilen und den Werkzeugen auftreten, die durch den Einsatz von Beschichtungen in den Werkzeugen gelöst oder minimiert werden können.

Das vorliegende Fachbuch fasst den gegenwärtigen Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich der Beschichtungstechnologie zusammen. Die Auswahl geeigneter Schichten ist dabei immer ein Zusammenspiel zwischen dem Werkzeugbauer, dem Fertiger der Kunststoffformteile, dem Abnehmer der Kunststoffformteile und dem Beschichter.

■ 1.1 Mögliche Fehler an Formteilen

Glanzunterschiede und Tigerlines

Der Glanz eines Formteils entsteht dadurch, dass auf das Formteil einfallendes Licht reflektiert wird. Je glatter und gleichmäßiger die Oberfläche des Formteils ist, desto gleichmäßiger wird das Licht reflektiert und desto kleiner ist der Streuwinkel des reflektierten Lichtes. Strukturierte Oberflächen im Werkzeug, aber auch eine unterschiedliche Abbildung der Formteilkavität durch den Kunststoff führen zu Unterschieden im Glanzgrad. Im Bereich von Kühlkanälen, Auswerfern oder Wanddickenunterschieden treten Glanzunterschiede häufig auf, da hier Unterschiede in der lokalen Werkzeugwandtemperatur bestehen, die zu einer anderen Abbildungsgenauigkeit der Werkzeugwand im Vergleich zur umliegenden Formteilkavität führen. Beschichtungen beeinflussen ebenfalls den Glanzgrad. Durch unterschiedliche Eigenschaften und Wirkungsweisen der Beschichtungen kann hier keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. [KI21]

Ein Spezialfall beim Auftreten von Glanzunterschieden sind Tigerlines. Sie treten vor allem bei der Verwendung von Blends oder Mehrphasensystemen auf. Durch die unterschiedliche Abformung der Formteilkavität durch die jeweilige Phase entstehen alternierende Glanzeindrücke, die zu einer optischen Streifenbildung führen. Hauptursachen für die Bildung von Tigerlines sind das partielle Ankristallisieren der Randschicht unter hohen Schubspannungen und Unterschiede in der Schmelzeelastizität. Auch die Änderung der Fließfrontgeschwindigkeit kann das Auftreten von Tigerlines begünstigen. [KI21]

Matte Stellen im Anschnittbereich

Im Anschnittbereich werden die Polymerketten der Schmelze stark gedehnt und orientiert. Da die Schmelze an der Werkzeugwand sofort einfriert, können diese Dehnungen und Orientierungen nicht durch Relaxation abgebaut werden. Die Bereiche hoher Orientierung weisen dabei schlechte mechanische Eigenschaften auf und sind sehr empfindlich gegenüber Rissen. Während die Schmelze unter der erstarrten Randschicht entlangfließt, reißt diese auf, sodass die Schmelze in die Risse strömen kann und wieder an der Werkzeugwand erstarrt. Es entstehen Mikrokerben, die zu einer stark gestreuten Lichtreflektion im Bereich des Anschnittes führen. [KI21]

Bindenähte

Wenn mehrere Fließfronten in der Kavität aufeinandertreffen, entsteht eine Bindenähre. Beim Zusammentreffen werden die Fließfronten abgeplattet, durchmischen sich teilweise und verkleben. An der Werkzeugwand entsteht eine Kerbe. Bei strukturierten Oberflächen können zusätzlich Glanzunterschiede auftreten. Diese stellen eine optische und mechanische Fehlstelle dar. [KI21]

Entformungsriefen

Entformungsriefen entstehen während des Ausstoßens des Formteils. Im Speziellen bei strukturierten Oberflächen und Formteilen mit großen Seitenflächen steigt die Entformungskraft stark an. Durch die Strukturierung oder die Oberflächenrauheit, die an den Seitenflächen quer zur Entformungsrichtung liegt, bilden sich mikroskopische Hinterschnitte, die zu Entformungsriefen führen können. [KI21]

Schallplatteneffekt

Schallplatteneffekte treten vor allem bei hochviskosen Kunststoffschmelzen in Verbindung mit einer niedrigen Einspritzgeschwindigkeit auf. Während des Einspritzens erstarrt die Randschicht hinter der Fließfront. Parallel kühlt der wandnahe Fließfrontbereich ebenfalls ab, wodurch der Quellstrom der Schmelze in Richtung der Werkzeugwand erschwert wird. Die nachströmende heiße Schmelze kann daher nicht bis zur Fließfront gefördert werden und sich an die Werkzeugwand anlegen. Stattdessen bewirkt sie eine Dehnung innerhalb des Strömungskanals. Wenn der Druck steigt, kommt die Fließfront wieder mit der Werkzeugwand in Berührung. Da diese Bereiche der Fließfront aber stark abgekühlt sind, kann sich kein vollständiger Kontakt mit der Werkzeugwand ausbilden. [KI21]

Raue Oberfläche durch Belagbildung

Belagbildung in der Werkzeugkavität kann vielfältige Ursachen haben. Zum einen neigen verschiedene Kunststoffe, wie unter anderem POM, PP, ABS, PC, PET und PBT, zu Bildung von Belegen. Darüber hinaus kann eine erhöhte Belagbildung bei der Verwendung von Flammhemmern, UV-Absorbern und Farbstoffen oder Gleitmitteln beobachtet werden. Bei der Verwendung der Additive ist die Belagbildung häufig auf eine Mischungsunverträglichkeit zwischen dem Polymer und dem Additiv zurückzuführen. Teilweise begünstigt der Einsatz der Additive auch chemische Reaktionen innerhalb des Polymers oder einen oxidativen Abbau der Polymerketten. [KI21]

Zum anderen kann eine ungünstige Werkzeugauslegung oder Prozessführung die Belagbildung begünstigen. Vor allem bei einer langen Verweilzeit oder hohen Scherung der Kunststoffschmelze kann eine Belagbildung in der Werkzeugkavität auftreten. Eine schlechte Werkzeugentlüftung kann dazu führen, dass die Luft und die Ausgasungen aus der Kunststoffschmelze nicht aus der Formteilkavität entweichen können. Der Einsatz von Schmier- und Trennmitteln führt ebenfalls zu einer Belagbildung. [KI21]

Deformation beim Entformen

Während der Entformung werden Kräfte durch das Entformungssystem auf das Kunststoffformteil aufgebracht. Das Kunststoffformteil kann durch diese Entfor-

mungskraft deformiert werden, weshalb die Entformungskraft kleingehalten werden muss. Die Schwindung wirkt sich dabei direkt auf die Entformungskraft aus und kann durch den Prozess günstig beeinflusst werden. Parallel neigen verschiedene Kunststoffe dazu, auf metallischen Oberflächen zu haften, was zu einer deutlichen Erhöhung der Entformungskraft führt. Auch der Einsatz einer variothermen Prozessführung kann, im Speziellen bei teilkristallinen Kunststoffen, zu einer Erhöhung der Entformungskraft führen, da die Werkzeugkavität detaillierter abgeformt werden kann. [KI21]

Auswerferabdrücke und Weißbrüche

Neben den Glanzunterschieden im Bereich von Auswerfern können auch sichtbare Abdrücke durch die Auswerfer im Formteil entstehen. Diese können unterschiedliche Ursachen haben, wie eine falsche Einpassung der Auswerferlängen oder einen Fehler bei der Dimensionierung des Entformungssystems. Prozessseitig können hohe Entformungskräfte oder ein frühzeitiges Entformen, aber auch hohe Temperaturdifferenzen innerhalb des Werkzeugs oder zwischen Werkzeug und Auswerfer zu Auswerferabdrücken führen. [KI21]

Weißbrüche entstehen durch das Überschreiten einer maximal zulässigen materialabhängigen Verformung. Durch den Weißbruch werden die eingebrachten Spannungen abgebaut. Weißbrüche treten häufig bei der Entformung unter Restdruck oder im Bereich von Auswerfern auf. Dabei werden die äußeren Schichten des Formteils durch die inneren gedehnt. [KI21]

Unvollständig gefüllte Formteile

Bei einem unvollständig gefüllten Formteil wird die Kavität nicht vollständig gefüllt. Dafür kann es verschiedene Ursachen geben. Neben einem zu geringen Dosievolumen und Entlüftungsschwierigkeiten ist häufig der Einspritzdruck nicht ausreichend oder die Fließweglänge zu hoch, sodass die Kunststoffsenschmelze einfriert, bevor sie das Ende des Fließweges erreicht. [KI21]

■ 1.2 Ableitung eines Lasten- und Pflichtenheftes

Im Umfeld der Produktentwicklung hat sich ein dreistufiger Entwicklungs- und Dokumentationsprozess, bestehend aus dem Lastenheft, dem Pflichtenheft und der Anforderungsliste, weitgehend durchgesetzt. Tabelle 1.1 beschreibt den Zweck, die Inhalte und die Abgrenzungen der Dokumente. [Con10, Ehr07, PBF+07]

Das Lastenheft wird zuerst vom Auftraggeber erstellt und beschreibt alle Anforderungen und Randbedingungen aus der Sicht des Auftraggebers. Es dient als Grundlage für die Ausschreibung und das Angebot.

Das Pflichtenheft wird vom Lieferanten erstellt. Es enthält das Pflichtenheft und beschreibt die Kundenvorgaben mit den entsprechenden Anforderungen und wie diese bearbeitet und gelöst werden sollen.

Die Anforderungsliste enthält eine systematische Zusammenstellung aller Daten und Informationen. Sie wird durch den Entwickler erstellt und wird zur exakten Klärung der Aufgabe genutzt. Nach der Genehmigung durch den Auftraggeber sind das Pflichtenheft und die Anforderungsliste bindende Dokumente. [Con10, Ehr07, PBF+07]

Tabelle 1.1 Die verschiedenen Dokumente zur Aufgabenklärung [Con08]

| | Lastenheft | Pflichtenheft | Anforderungsliste |
|------------|---|--|---|
| Definition | Die Anforderungen des Kunden werden als Liefer- und Leistungsumfang zusammengestellt. | Die Realisierung aller Anforderungen wird durch den Lieferanten beschrieben. | Die Zusammenstellung der Daten und Informationen durch den Entwickler für die Produktentwicklung. |
| Ersteller | Kunde | Lieferant | Konstrukteur/Entwickler |
| Aufgabe | Definition, was und wofür zu lösen ist. | Definition, wie und womit Anforderungen realisiert werden. | Definition von Zweck und Eigenschaften der Anforderungen. |
| Bemerkung | Das Lastenheft enthält alle Anforderungen und Randbedingungen. | Das Pflichtenheft enthält das Lastenheft mit den Realisierungen der Anforderungen. | Die Anforderungsliste entspricht einem erweiterten Pflichtenheft. |

Dieses Vorgehen lässt sich auch auf die Entwicklung von Beschichtungen übertragen, wobei die Fragestellungen aus den unterschiedlichen notwendigen Einzeldisziplinen (u.a. das später zu fertigende Formteil, das zu beschichtende Bauteil, der spätere Fertigungsprozess) definiert und beantwortet werden müssen. Daraus ergibt sich die prinzipielle Gliederung des Lasten- und Pflichtenheftes zur Auswahl und Entwicklung eines geeigneten Beschichtungsprozesses:

- Anforderungen an das Formteil
 - Bauteilgeometrie
 - Bauteiloberfläche und relevante Oberflächen
 - verwendeter Kunststoff

- Anforderungen an das Werkzeug
 - zu beschichtender Werkzeugwerkstoff
 - zu beschichtende Oberfläche (Rauheit, Narbung, ...)
 - infrage kommende Beschichtungstechnologien
 - prinzipielle Entwicklung der Schicht
- Anforderungen an die Funktionalität der Schicht
 - angestrebte Spritzgießparameter
 - Methoden zur Werkzeugreinigung
 - systemspezifische Vorgaben und Restriktionen
- Funktionsprüfungen
 - Mess- und Charakterisierungsverfahren
 - Versuche zur Prüfung der Schichtqualität und Schichthaftung
 - Anwendung im Produktionswerkzeug
 - Effizienzuntersuchungen

Aus dieser prinzipiellen Gliederung entwickelt sich die Methodik zur Entwicklung der Beschichtungen nach Bild 1.1. Dabei werden zuerst mögliche Abscheidungsprozesse simuliert, um das Prozessfenster und die Lage des zu beschichtenden Bauteils im Reaktor für die spätere Beschichtung abschätzen zu können. Im zweiten Schritt erfolgt dann die eigentliche Beschichtung. Neben dem zu beschichteten Bauteil werden dabei immer auch Metallmünzen an verschiedenen Stellen im Reaktor positioniert. An diesen Münzen werden die nachfolgenden Untersuchungen durchgeführt, um das Bauteil nicht zu beschädigen. Hier wird die Schichtdicke untersucht. Auch der Aufbau mehrlagiger Schichten, das Vorhandensein von Beschichtungsfehlern, die Haftung der Beschichtung auf dem Substrat oder die Härte der Schicht können an dieser Stelle untersucht werden. Eine Bewertung der Schichtoberfläche ist ebenfalls möglich. Je nach Zweck der applizierten Beschichtung werden weitere Untersuchungen durchgeführt, um die Eigenschaften der Beschichtung zu untersuchen und ihre Eignung in Hinblick auf die im Pflichtenheft und der Anforderungsliste definierten Anforderungen sicherzustellen. Die praktische Eignung der Beschichtung muss dann aber immer im realen Anwendungsfall erfolgen. Dabei werden die Beschichtungen im Neuzustand untersucht und nach der Anwendung der Beschichtung erneut, um ein Abtragen oder eine Beschädigung der Beschichtung charakterisieren zu können.

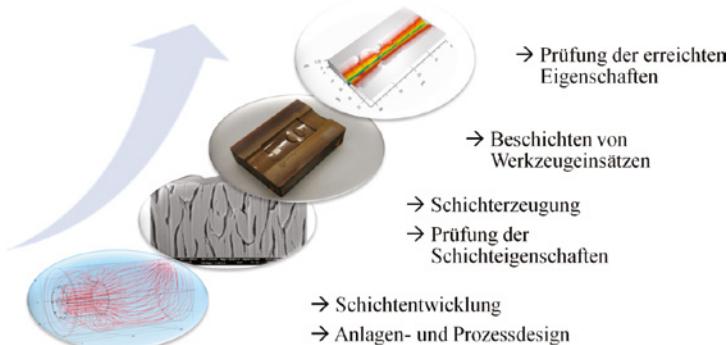


Bild 1.1 Vorgehensweise bei der Entwicklung von Beschichtungen (Bildquelle: KIMW-F)

■ 1.3 Literatur

- [BLK+22] Boos, W.; LUKAS, G.; KESSLER, N.; ET AL.: *World of Tooling 2022*. Studie der WBA Werkzeugbauakademie Aachen, 2022
- [Con10] CONRAD, K.: *Grundlagen der Konstruktionslehre*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2010, 5. Auflage
- [Ehr07] EHRLENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2007, 3. Auflage
- [KI21] N. N.: *Ratgeber Formteilefehler Thermoplast*. Firmenschrift der K.I.M.W. NRW GmbH, 2021, 14. Auflage
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTHE K.-H.: *Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007, 7. Auflage

2

Werkzeugstähle und deren Beschichtbarkeit

Markus Pothmann

■ 2.1 Einführung in Werkzeugstähle

2.1.1 Definition von Werkzeugstählen

Werkzeugstähle sind eine Gruppe hochfester, hochverschleißfester Stähle, die speziell für die Verwendung bei der Herstellung von Werkzeugen und anderen Komponenten entwickelt wurden, die wiederholten Stößen, Abrieb und hohen Belastungen ausgesetzt sind. Diese Stähle haben in der Regel eine hohe Härte, Zähigkeit und Verformungsbeständigkeit, wodurch sie sich ideal für den Einsatz in Anwendungen eignen, die eine hohe Präzision und lange Werkzeulebensdauer erfordern.

Die spezifischen Eigenschaften von Werkzeugstählen werden durch sorgfältiges Legieren und Wärmebehandeln erreicht. Legierungselemente wie Wolfram, Molybdän, Chrom und Vanadium werden dem Stahl zugesetzt, um seine Festigkeit, Verschleißfestigkeit und andere wichtige Eigenschaften zu verbessern. Die genaue Kombination dieser Elemente variiert je nach den spezifischen Anforderungen des herzustellenden Werkzeugs.

Werkzeugstähle werden aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften und ihres Verwendungszwecks typischerweise in mehrere Kategorien eingeteilt. Beispielsweise sind Schnellarbeitsstähle für den Einsatz in Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsanwendungen konzipiert, während Kaltarbeitsstähle für den Einsatz in Anwendungen konzipiert sind, bei denen das Werkzeug extrem niedrigen Temperaturen ausgesetzt ist. Andere Kategorien von Werkzeugstählen umfassen Warmarbeitsstähle, Stähle für Kunststoffformen und stoßfeste Stähle.

Die hohe Festigkeit und Verschleißfestigkeit von Werkzeugstählen machen sie zu einem idealen Material für den Einsatz in einer Vielzahl industrieller Anwendungen, einschließlich Spritzguss. Die Auswahl des geeigneten Werkzeugstahls für eine bestimmte Anwendung kann jedoch ein komplexer Prozess sein, der eine sorgfältige Berücksichtigung von Faktoren wie der Art des zu formenden Kunststoffs, der gewünschten Oberflächenbeschaffenheit und der erforderlichen Werkzeugstandzeit erfordert.

2.1.2 Entwicklung der Werkzeugstähle

Die Entwicklung von Werkzeugstählen wurde durch die Notwendigkeit vorangetrieben, die Leistung und Langlebigkeit von Werkzeugen zu verbessern, die in verschiedenen industriellen Anwendungen verwendet werden. Im Laufe der Zeit haben Fortschritte in der Metallurgie, Wärmebehandlung und Herstellungstechniken zur Schaffung einer breiten Palette von Werkzeugstählen mit unterschiedlichen Eigenschaften und Merkmalen geführt.

Ein wichtiger Meilenstein in der Entwicklung von Werkzeugstählen war die Erfindung des Tiegelstahls Mitte des 19. Jahrhunderts. Diese neue Stahlsorte wurde durch Schmelzen von Eisen und Hinzufügen verschiedener Legierungselemente hergestellt, um ein homogeneres und konsistenteres Material zu schaffen. Es war auch möglich, größere Mengen von Tiegelstahl als andere Stahlsorten herzustellen, was ihn für Hersteller zugänglicher machte.

Im späten 19. und frühen 20. Jahrhundert wurden Werkzeugstählen neue Legierungselemente hinzugefügt, darunter Wolfram, Molybdän, Chrom und Vanadium. Diese Elemente verbesserten die Festigkeit, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit von Werkzeugstählen erheblich und machten sie für anspruchsvolle industrielle Anwendungen besser geeignet.

Während des Zweiten Weltkriegs stieg die Nachfrage nach Werkzeugstählen dramatisch an, da sie in großem Umfang bei der Herstellung von Militärausrüstung verwendet wurden. Dies führte zu weiteren Fortschritten in der Werkzeugstahltechnologie, einschließlich der Entwicklung von Schnellarbeitsstählen, die den hohen Temperaturen widerstehen konnten, die durch die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung erzeugt werden.

Heute sind Werkzeugstähle nach wie vor ein wichtiger Werkstoff für eine Vielzahl von industriellen Anwendungen, einschließlich des Spritzgusses. Technologische Fortschritte erweitern weiterhin die Grenzen dessen, was mit Werkzeugstählen möglich ist, und es werden ständig neue Materialien und Fertigungstechniken entwickelt, um ihre Leistung und Zuverlässigkeit zu verbessern.

2.1.3 Arten von Werkzeugstählen

Werkzeugstähle werden aufgrund ihrer Eigenschaften und Verwendungszwecke in verschiedene Typen eingeteilt. Die Klassifizierung basiert typischerweise auf den Legierungselementen und der Wärmebehandlung, die erforderlich sind, um bestimmte Eigenschaften zu erreichen.

Kohlenstoff-Werkzeugstähle

Kohlenstoff-Werkzeugstähle wie etwa C75 oder C100S sind die älteste und einfachste Art von Werkzeugstahl. Sie haben einen Kohlenstoffgehalt von 0,6% bis 1,5%. Diese Stähle sind preiswert und einfach zu wärmebehandeln, was sie ideal für kleine Werkzeuge macht, die keine hohe Präzision erfordern. Kohlenstoff-Werkzeugstähle werden üblicherweise für Meißel, Messer und Handwerkzeuge verwendet.

Schnellarbeitsstähle

Schnellarbeitsstähle sind für Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsanwendungen ausgelegt, bei denen die Schnittgeschwindigkeit 50 Meter pro Minute übersteigt. Sie enthalten Wolfram, Molybdän und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Härte, Verschleißfestigkeit und Zähigkeit, was sie ideal für Schneid- und Bohrwerkzeuge macht. Schnellarbeitsstähle werden üblicherweise für Schneidwerkzeuge in der Automobil-, Luft- und Raumfahrt- und medizinischen Industrie verwendet.

Stoßfeste Werkzeugstähle

Stoßfeste Werkzeugstähle wie etwa 1.2714 oder 1.2355 sind darauf ausgelegt, Stoßbelastungen standzuhalten. Sie enthalten Chrom, Molybdän und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle werden für Anwendungen verwendet, die eine hohe Zähigkeit und Beständigkeit gegen Rissbildung erfordern, wie z.B. Kaltmeißel, Hämmer und andere handgeföhrte Werkzeuge.

Warmarbeitsstähle

Warmarbeitsstähle wie etwa 1.2343 oder 1.2344 sind für den Einsatz in Hochtemperaturanwendungen konzipiert, bei denen das Werkzeug hoher Beanspruchung und Verschleiß ausgesetzt ist. Sie enthalten Wolfram, Molybdän und Chrom als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Zähigkeit, Verschleißfestigkeit und thermischer Stabilität, wodurch sie ideal für den Einsatz in Schmiedewerkzeugen, Strangpresswerkzeugen und anderen Warmarbeitsanwendungen sind.

Kalarbeitsstähle

Kalarbeitsstähle wie etwa 1.2379 oder 1.2510 sind für den Einsatz in Kalarbeitsanwendungen konzipiert, bei denen das Werkzeug hoher Beanspruchung und Verschleiß ausgesetzt ist. Sie enthalten Wolfram, Molybdän und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Härte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit, was sie ideal für den Einsatz in Stanzwerkzeugen und anderen Kalarbeitsanwendungen macht.

Kunststoffformenstähle

Kunststoffformenstähle wie etwa 1.2311 oder 1.2738 sind für den Einsatz beim Spritzgießen und anderen Kunststoffformen bestimmt. Sie enthalten Chrom, Molybdän und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Härte, Verschleißfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit, was sie ideal für den Einsatz in Kunststoffformanwendungen macht.

Hochfeste niedriglegierte (HSLA-) Werkzeugstähle

HSLA-Werkzeugstähle wie etwa S700MC sind für den Einsatz in hochfesten Anwendungen konzipiert, bei denen das Werkzeug hoher Beanspruchung und Verschleiß ausgesetzt ist. Sie enthalten Molybdän, Chrom und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Härte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit, was sie ideal für den Einsatz in hochbelasteten Anwendungen wie Zahnrädern und Wellen macht [Tir17].

Pulvermetallurgische Werkzeugstähle

Pulvermetallurgische Werkzeugstähle werden durch Mischen und Pressen feiner Metallpulver hergestellt, die dann bei hohen Temperaturen gesintert werden. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Dichte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit, was sie ideal für den Einsatz in hochbelasteten Anwendungen wie Schneidwerkzeugen, Matrizen und anderen Präzisionskomponenten macht.

Hochlegierte Werkzeugstähle

Hochlegierte Werkzeugstähle wie etwa 1.3247 sind für den Einsatz in Anwendungen konzipiert, die eine hohe Festigkeit und Verschleißfestigkeit erfordern. Sie enthalten einen hohen Anteil an Legierungselementen wie Wolfram, Molybdän.

2.1.4 Faktoren, die die Materialauswahl bei Spritzguss-Werkzeugstählen beeinflussen

Die Auswahl des richtigen Werkstoffs für Spritzguss-Werkzeugstähle wird von mehreren Faktoren beeinflusst, darunter:

- **Formteilkomplexität:** Die Komplexität des zu formenden Teils kann sich auf die Auswahl des Werkzeugstahls auswirken. Zum Beispiel können Formteile mit komplizierten Designs einen Werkzeugstahl mit höherer Zähigkeit und Verschleißfestigkeit erfordern, um dem Formprozess standzuhalten.
- **Teilegröße:** Die Größe des zu formenden Teils kann sich auch auf die Auswahl des Werkzeugstahls auswirken. Größere Formteile erfordern möglicherweise einen Werkzeugstahl mit höherer Wärmeleitfähigkeit und besserer Wärmeab-

leitung, um ein Verziehen und Reißen während des Formprozesses zu verhindern.

- Produktionsvolumen: Auch das Volumen der produzierten Formteile kann die Materialauswahl beeinflussen. Die Massenproduktion kann einen Werkzeugstahl erfordern, der der hohen Hitze und Belastung des Dauereinsatzes standhalten kann, während die Produktion in geringeren Mengen die Verwendung von weniger teuren Werkzeugstählen ermöglichen kann.
- Formmaterial: Auch das Formmaterial kann die Auswahl des Werkzeugstahls beeinflussen. Unterschiedliche Materialien haben unterschiedliche Schmelzflusseigenschaften und thermische Eigenschaften, die die Verschleißfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Gesamtleistung des Werkzeugstahls beeinflussen können.

2.1.5 Herausforderungen bei der Auswahl von Spritzguss-Werkzeugstählen

Die Auswahl des richtigen Werkzeugstahls für den Spritzguss kann aufgrund der zahlreichen Faktoren, die sich auf die Materialauswahl auswirken können, eine Herausforderung darstellen. Einige der Herausforderungen umfassen:

- Abwägen von Leistung und Kosten: Hochleistungs-Werkzeugstähle haben oft einen höheren Preis, was es schwierig macht, die gewünschte Leistung mit den Materialkosten in Einklang zu bringen.
- Kompatibilität mit dem Spritzgussverfahren: Der Werkzeugstahl muss mit dem spezifischen Spritzgussverfahren kompatibel sein, das verwendet wird. Dazu gehört die Fähigkeit des Werkzeugstahls, den Temperatur- und Druckänderungen während des Formprozesses standzuhalten.
- Kundenspezifische Werkzeugstähle: In einigen Fällen können kundenspezifische Werkzeugstähle erforderlich sein, um die spezifischen Anforderungen der Anwendung zu erfüllen. Das kann die Komplexität und die Kosten des Werkzeugstahlauswahlprozesses erhöhen.

2.1.6 Zukünftige Entwicklung von Spritzguss-Werkzeugstählen

Da sich die Fertigungsindustrie ständig weiterentwickelt und die Anforderungen an höhere Qualität, Effizienz und Nachhaltigkeit steigen, wird der Bedarf an fortschrittlichen Materialien und Technologien im Spritzguss immer wichtiger. Die Entwicklung neuer und besserer Spritzguss-Werkzeugstähle ist unerlässlich, um den Anforderungen der Industrie gerecht zu werden.

In den letzten Jahren wurden erhebliche Fortschritte bei der Entwicklung von Werkzeugstählen für den Spritzguss erzielt, wobei der Schwerpunkt auf der Verbesserung von Eigenschaften wie Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit lag. Es gibt jedoch noch Raum für Verbesserungen, und die Zukunft der Spritzguss-Werkzeugstähle ist spannend.

Einer der Schlüsselbereiche der Entwicklung von Spritzguss-Werkzeugstählen ist die Einarbeitung fortschrittlicher Legierungselemente. Beispielsweise ist Bor dafür bekannt, die Zähigkeit und Verschleißfestigkeit von Werkzeugstählen zu verbessern, während Stickstoff die Korrosionsbeständigkeit und Ermüdungsfestigkeit verbessern kann. Andere Elemente wie Kupfer und Nickel können ebenfalls eingebracht werden, um spezifische Eigenschaften zu verbessern.

Neben neuen Legierungselementen werden auch Fortschritte in der Mikrostrukturtechnik erforscht. Der Einsatz fortschrittlicher Wärmebehandlungstechniken wie Abschrecken und Anlassen kann eine gleichmäßige Mikrostruktur erzeugen und die mechanischen Eigenschaften des Werkzeugstahls verbessern. Auch die Einarbeitung nanoskaliger Partikel wie Karbide kann die Verschleißfestigkeit des Werkzeugstahls erhöhen.

Ein weiterer Entwicklungsbereich ist die Verwendung von Oberflächenbeschichtungen oder -behandlungen zur Verbesserung der Leistung von Spritzgusswerkzeugen. Beispielsweise können Beschichtungen mit diamantähnlichem Kohlenstoff (DLC) die Verschleißfestigkeit des Werkzeugstahls erhöhen, während Oberflächenbehandlungen wie Nitrieren die Oberflächenhärte und Korrosionsbeständigkeit verbessern können.

Die zunehmende Forderung nach Nachhaltigkeit in der Fertigung treibt auch die Entwicklung umweltfreundlicherer Spritzguss-Werkzeugstähle voran. Die Verwendung von recycelten Materialien wie Stahlschrott und anderen Metallen wird untersucht, um Abfall zu reduzieren und die Umweltauswirkungen des Herstellungsprozesses zu minimieren.

Insgesamt konzentriert sich die Zukunft der Spritzguss-Werkzeugstähle darauf, die Eigenschaften und Leistung dieser Materialien zu verbessern, um den sich entwickelnden Anforderungen der Fertigungswirtschaft gerecht zu werden. Die Integration fortschrittlicher Legierungselemente, Mikrostrukturtechnik, Oberflächenbeschichtungen und Nachhaltigkeitsinitiativen werden alle eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung der nächsten Generation von Spritzguss-Werkzeugstählen spielen.

■ 2.2 Eigenschaften von Werkzeugstählen

2.2.1 Einführung in Spritzguss-Werkzeugstähle

Spritzgießen ist ein Herstellungsverfahren, das zur Herstellung einer breiten Palette von Kunststoffformteilen und -produkten verwendet wird. Beim Spritzgießen werden Kunststoffpellets oder -granulate geschmolzen und in einen Formhohlraum gespritzt, wo sie abkühlen und sich verfestigen, um das gewünschte Formteil zu bilden. Spritzgießen ist ein hocheffizientes und kostengünstiges Verfahren und damit eines der beliebtesten Verfahren zur Herstellung von Kunststoffformteilen.

Spritzgusswerkzeuge sind eine kritische Komponente des Spritzgussverfahrens. Die Werkzeuge müssen so konstruiert und hergestellt werden, dass sie den Belastungen des Formprozesses standhalten. Spritzguss-Werkzeugstähle sind speziell für die Verwendung in Spritzgusswerkzeugen konzipiert und müssen eine einzigartige Kombination von Eigenschaften besitzen, um den Belastungen des Formprozesses standzuhalten.

Werkzeugstähle sind eine Gruppe hochfester Stähle, die zum Schneiden, Umformen und Formen von Materialien verwendet werden. Sie sind bekannt für ihre hohe Härte, Verschleißfestigkeit und Zähigkeit. Spritzguss-Werkzeugstähle müssen ähnliche Eigenschaften wie Standard-Werkzeugstähle aufweisen, müssen aber auch spezifische Eigenschaften aufweisen, um den hohen Drücken, Temperaturen und dem Abrieb im Zusammenhang mit dem Spritzgussverfahren standzuhalten.

Die Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen werden durch ihre Zusammensetzung, Mikrostruktur und Wärmebehandlung beeinflusst. Die Zusammensetzung des Stahls ist entscheidend für die Bestimmung seiner mechanischen Eigenschaften, einschließlich Härte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit. Die Mikrostruktur des Stahls, die durch den Wärmebehandlungsprozess beeinflusst wird, spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des Stahls.

Die Auswahl des geeigneten Spritzguss-Werkzeugstahls für eine bestimmte Anwendung ist entscheidend für den Erfolg des Formprozesses. Zu den Faktoren, die bei der Auswahl eines Werkzeugstahls berücksichtigt werden müssen, gehören die Art des zu formenden Kunststoffs, das erwartete Produktionsvolumen und die erwartete Werkzeuglebensdauer.

Zusammenfassend sind Spritzguss-Werkzeugstähle eine kritische Komponente des Spritzgussprozesses. Sie müssen sorgfältig ausgewählt werden, um sicherzustellen, dass sie die notwendigen Eigenschaften besitzen, um den Belastungen des Formgebungsprozesses standzuhalten. Auf die spezifischen Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen und ihren Einfluss auf die Eignung für unterschiedliche Anwendungen wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

2.2.2 Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen

Spritzguss-Werkzeugstähle werden aufgrund ihrer Fähigkeit ausgewählt, den Belastungen des Spritzgussverfahrens standzuhalten. Sie müssen bestimmte Eigenschaften aufweisen, um sicherzustellen, dass sie dem hohen Druck, der hohen Temperatur und dem Abrieb im Zusammenhang mit dem Formgebungsprozess standhalten. In diesem Kapitel wird auf die wichtigen Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen eingegangen und wie diese ihre Eignung für den Einsatz im Spritzguss beeinflussen.

Härte

Die Härte von Spritzguss-Werkzeugstählen ist eine wichtige Eigenschaft, die ihre Beständigkeit gegen Verschleiß und Verformung bestimmt. Je härter der Werkzeugstahl ist, desto widerstandsfähiger ist er gegen Verschleiß und Verformung unter Hochdruckformbedingungen. Mit zunehmender Härte nimmt jedoch die Zähigkeit des Werkzeugstahls ab. Damit der Werkzeugstahl den Belastungen des Formgebungsprozesses standhält, muss ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Härte und Zähigkeit gefunden werden.

Zähigkeit

Zähigkeit ist die Fähigkeit eines Materials, Rissen oder Brüchen unter Bedingungen hoher Belastung zu widerstehen. Beim Spritzgießen werden Werkzeugstähle stark beansprucht und müssen eine hohe Zähigkeit aufweisen, um Risse oder Brüche zu vermeiden. Die Zähigkeit wird durch die Mikrostruktur des Werkzeugstahls sowie seine Legierungselemente und Wärmebehandlung beeinflusst.

Verschleißfestigkeit

Spritzguss-Werkzeugstähle müssen eine hohe Verschleißfestigkeit aufweisen, um eine Beschädigung der Werkzeugoberfläche zu vermeiden. Die Verschleißfestigkeit wird durch die Härte des Werkzeugstahls sowie dessen Gefüge und Legierungselemente beeinflusst. Werkzeugstähle mit hoher Verschleißfestigkeit werden typischerweise in Anwendungen eingesetzt, in denen die Werkzeugoberfläche einem hohen Grad an Abrieb ausgesetzt ist, wie z.B. bei der Herstellung von abrasiven Materialien oder Teilen mit rauen Oberflächen.

Korrosionsbeständigkeit

Korrosionsbeständigkeit ist eine wichtige Eigenschaft für Werkzeugstähle, die beim Spritzgießen verwendet werden, da der Spritzgussprozess korrosiv sein kann. Werkzeugstähle mit hoher Korrosionsbeständigkeit werden typischerweise in Anwendungen verwendet, in denen das Werkzeug korrosiven Materialien oder

Umgebungen ausgesetzt ist. Die Korrosionsbeständigkeit von Werkzeugstählen wird durch ihre Legierungselemente, insbesondere Chrom und Molybdän, beeinflusst.

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von Spritzguss-Werkzeugstählen ist wichtig, um eine gleichmäßige Temperatur im gesamten Werkzeug aufrechtzuerhalten. Werkzeugstähle mit hoher Wärmeleitfähigkeit sind besser in der Lage, Wärme von der Formteiloberfläche abzuleiten, reduzieren das Risiko von Hot Spots und verbessern die Gesamtqualität der Formteile. Die Wärmeleitfähigkeit von Werkzeugstählen wird durch ihre Legierungselemente, insbesondere Kupfer und Nickel, beeinflusst.

Bearbeitbarkeit

Die Bearbeitbarkeit ist eine wichtige Eigenschaft für Spritzguss-Werkzeugstähle, da sie maschinell bearbeitet werden müssen, um die für das Formen erforderlichen komplexen Formen zu erzeugen. Werkzeugstähle mit guter Zerspanbarkeit sind leichter zu bearbeiten und führen zu weniger Verschleiß an den Schneidwerkzeugen. Die Bearbeitbarkeit wird durch die Mikrostruktur des Werkzeugstahls sowie seine Legierungselemente und Wärmebehandlung beeinflusst [RM05].

Zusammenfassend spielen die Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung ihrer Eignung für verschiedene Anwendungen. Die in diesem Kapitel erörterten Eigenschaften, einschließlich Härte, Zähigkeit, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Bearbeitbarkeit, müssen bei der Auswahl eines Werkzeugstahls für den Spritzguss sorgfältig berücksichtigt werden. Im nächsten Kapitel gehen werden die verschiedenen Arten von Werkzeugstählen und ihre spezifischen Eigenschaften vorgestellt, die üblicherweise im Spritzguss verwendet werden.

2.2.3 Zusammensetzung von Spritzguss-Werkzeugstählen

Spritzguss-Werkzeugstähle wie 1.2344 oder 1.2311 sind Hochleistungswerkstoffe, die den extremen Bedingungen des Spritzgussverfahrens standhalten. Diese Stähle sind speziell formuliert, um eine hervorragende Festigkeit, Zähigkeit, Verschleißfestigkeit und thermische Stabilität zu bieten und eine lange Lebensdauer und konstante Leistung des Spritzgusswerkzeugs zu gewährleisten. Die Zusammensetzung von Spritzguss-Werkzeugstählen spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung ihrer Eigenschaften und Eignung für verschiedene Anwendungen. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Arten von Werkzeugstählen und ihre Zusammensetzung vorgestellt, die beim Spritzgießen verwendet werden.

Niedriglegierte Werkzeugstähle

Niedriglegierte Werkzeugstähle werden aufgrund ihrer hervorragenden Kombination aus Zähigkeit und Verschleißfestigkeit häufig bei der Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet. Diese Werkzeugstähle enthalten einen geringen Prozentsatz an Legierungselementen, typischerweise weniger als 5 %, darunter Chrom, Molybdän und Vanadium. Der Kohlenstoffgehalt in diesen Werkzeugstählen liegt zwischen 0,3 % und 0,6 % und sie werden oft wärmebehandelt, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

Hochlegierte Werkzeugstähle

Hochlegierte Werkzeugstähle sind so konzipiert, dass sie eine außergewöhnliche Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit bieten. Diese Werkzeugstähle enthalten einen höheren Anteil an Legierungselementen als niedriglegierte Werkzeugstähle, oft über 5 %. Chrom, Molybdän, Vanadium und Wolfram sind häufig verwendete Legierungselemente in hochlegierten Werkzeugstählen. Der Kohlenstoffgehalt in hochlegierten Werkzeugstählen liegt zwischen 0,7 % und 1,5 % und sie werden typischerweise wärmebehandelt, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

Schnellarbeitsstähle

Schnellarbeitsstähle werden zur Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet, die hohe Schnittgeschwindigkeiten und Temperaturen erfordern, wie sie beispielsweise für die Bearbeitung von duroplastischen Kunststoffen verwendet werden. Diese Werkzeugstähle enthalten typischerweise hohe Gehalte an Kohlenstoff, Wolfram, Molybdän und Chrom. Der hohe Kohlenstoffgehalt in Schnellarbeitsstählen reicht von 0,8 % bis 1,5 %, während die Legierungselemente typischerweise in Mengen von 7 % bis 20 % vorhanden sind. Schnellarbeitsstähle werden wärmebehandelt, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen, einschließlich hoher Härte, Verschleißfestigkeit und Zähigkeit.

Warmarbeitsstähle

Warmarbeitsstähle sind darauf ausgelegt, den hohen Temperaturen und Drücken beim Spritzgießen standzuhalten. Diese Werkzeugstähle enthalten typischerweise einen hohen Prozentsatz an Chrom, Molybdän und Vanadium sowie andere Legierungselemente wie Wolfram, Kobalt und Nickel. Der Kohlenstoffgehalt in Warmarbeitsstählen liegt zwischen 0,4 % und 1,4 %, und sie werden wärmebehandelt, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen, einschließlich hoher Härte, Zähigkeit und thermischer Stabilität.

Kaltarbeitsstähle

Kalarbeitsstähle werden zur Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet, die eine hohe Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und Maßhaltigkeit erfordern. Diese Werkzeugstähle enthalten typischerweise einen kleinen Prozentsatz an Legierungselementen, einschließlich Chrom, Molybdän, Vanadium und Wolfram. Der Kohlenstoffgehalt in Kalarbeitsstählen liegt zwischen 0,5% und 1,5%, und sie werden häufig wärmebehandelt, um ihre gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

Maraging-Werkzeugstähle

Maraging-Werkzeugstähle sind hochfeste, niedriglegierte Stähle, die üblicherweise bei der Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet werden. Diese Werkzeugstähle enthalten einen kleinen Prozentsatz an Kohlenstoff, typischerweise weniger als 0,03%, und einen hohen Prozentsatz an Nickel, Kobalt und Molybdän. Maraging-Werkzeugstähle werden wärmebehandelt, um ihre gewünschten Eigenschaften zu erreichen, zu denen hohe Festigkeit, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit gehören.

Pulvermetallurgische Werkzeugstähle

Pulvermetallurgische Werkzeugstähle werden durch ein Verfahren hergestellt, bei dem pulverförmiger Werkzeugstahl mit einem Bindemittel gemischt und die Mischung dann in eine gewünschte Form verdichtet wird. Diese Werkzeugstähle bieten eine hervorragende Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und Dimensionsstabilität, wodurch sie sich ideal für den Einsatz in Spritzgusswerkzeugen eignen. Pulvermetallurgische Werkzeugstähle enthalten typischerweise hohe Anteile an Legierungselementen wie Chrom, Molybdän und Vanadium, und ihr Kohlenstoffgehalt liegt im Bereich von 0,4% bis 2,5%. Sie werden wärmebehandelt, um ihre gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

Edelstähle

Edelstähle sind eine Gruppe korrosionsbeständiger Stähle, die üblicherweise bei der Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet werden. Diese Werkzeugstähle enthalten mindestens 10,5% Chrom, was eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit bietet. Sie enthalten auch unterschiedliche Mengen an anderen Legierungselementen wie Nickel und Molybdän, die ihre mechanischen Eigenschaften verbessern können. Rostfreie Stähle sind in mehreren verschiedenen Sorten erhältlich, jede mit ihrer eigenen einzigartigen Kombination von Eigenschaften, und sie werden oft wärmebehandelt, um ihre Festigkeit und Zähigkeit zu verbessern.

Index

Symbolle

3D-Fähigkeit 59
3D-Konformität 102
3-Omega 231

A

Abbildungartefakte 124
Abbildungstreue 164
Ablagerungsproblem 264
Abplatzten 284
Abprodukte 304
Abrasion 274
abrasive Füllstoffe 283
Abrasiver Verschleiß 290
Abrieb 268, 288
Abriebfestigkeit 271
Abriebvergleichswert 268, 287
Abscheidedauer 67
Abscheiderate 65, 68
Abscheidetemperatur 60, 305
Abscheidung
- elektrolytische 31
Abscheidungsprozess 46
Absorption 166, 167
Absorptionskoeffizienten 183
Absorptionsbanden 171
Absorptionsmuster 172
Abtragsrate 269
abzuformende Oberfläche 328
Aceton-Äquivalent 255
Acetylacetone 56
Adatom 43, 46

Additive 343
Adhäsion 339
Adhäsionstest 278
adhäsiver Verschleiß 290
Admittanz 198
Adsorption 250
amorphe Thermoplaste 349
Anfahrverhalten 364
Anforderungen an die Materialien 268
Anforderungsliste 5
Anionen 192
Anlassen 21
Anode 32, 75, 185, 300
anorganische Retrosynthese 81
Anregungspotential 195
Ansprechdynamik 361
Arbeitselektrode 205, 206
Aspektverhältnis 59, 284
Atomic Force Microscopy 190
ATR-FTIR-Spektroskopie 176
ATR-Kristall 177
Attenuated Total Reflection 176
Aufbereitung 257
Aufladung 131
Auflagekraft 115
Auflösungsvermögen 122, 157, 160
Aufnahme von Emissionen 261
Aufschubkraft 239
Aufwachsrate 42
Aufwölben 222
Ausscheidungsprozess 329
Außenstromlose Beschichtung 34
Austrittstiefe der Fluoreszenz 189

Auswahl von Spritzguss-Werkzeugstählen 25
Auswerfer 241, 343
Auswerferabdruck 4
Auswerfersystem 238
Avogadro-Konstante 183

Brechungsindex 122
Brinellärte 209, 210
Bruchstücke 253
BSE 124
BSE-Sensor 132
Bulk-Material-Synthese 90

B

Backgroundspektrum 178
Barrièreschutzschicht
– thermische 41
Bauteiloberfläche 314
Beanspruchungsprofil 274
Bearbeitbarkeit 17
Bedämpfen 42
Belag 308, 328, 335
Belagbildung 3, 256, 264, 329, 331, 337, 344
Belagsreduziert 336
Belastungsrate 211
Berkovich-Pyramide 212
Beschichtbare Werkstoffe 38
Beschichtung 291
Beschichtung der Oberfläche 285
Beschichtungsbad 30
Beschichtungsgerechte Konstruktion 37
Beschichtungsguidelines 39
Beschichtungstauglichkeit 37
Beschichtungszeit 69
Beschleunigungsspannung 124, 129
Bindenahrt 2, 314, 325, 367
Bindenahrtfestigkeit 325
Bindenahrtkerbe 314, 324
Bindung
– Ionen 49
– kovalente 49, 171, 178
– metallische 49, 178
– Physikalische 49
Bindungen in Polymeren 171, 174
Bindungsenergie 183, 341
Blasenbildungstemperatur 68
Blauversprödung 335
bleibende Verformung 215
Bode-Diagramm 199, 202

C

Center-Burst 161
Chemische Gasphasenabscheidung 53, 283, 285, 308, 310, 320, 342
– Feststoffbasierte 65
– Metallorganische 53
– Plasmabasierte 74
chemische Korrosion 300
chemisch Nickel 34, 294, 304
chemisch Nickel-Schichten 34
Chemosynthese 65
Chromatogramm 260
chromatographische Säule 250
Comptonstreuung 182
Constant Phase Element 198
Coulombsches Gesetz 253
Cube-Corner-Pyramide 212
CVD 53
CVD-Chakteristik 66
CVD-Reaktor 103

D

Dampfdruck 67, 80, 92
– Precursor 56
de-Broglie-Wellenlänge 123
Deformation 342
Deformation beim Entformen 3
Deformationsschwingungen 168
Dehnratensabhängigkeit 211
Dehnungsmodul 218
Delamination 49
Desorption 250
Desorptionsrörchen 262
Dichte 230
Dichtheit der Beschichtung 303
Dieseleffekt 335

Diffusion 55, 193, 301
Diffusionsvorgang 198
Dispersionskraft 340
Dispersionsschichten 35, 294
Dispersoide 35
Disproportionierung 65
DLC-Beschichtung 22, 76
Doppelschichtkapazität 200, 202
Dosiervorrichtung 71
Drehmoment 244
Dreielektrodenanordnung 205
Druckaufnehmer 351
Drucksensor 348
Dünnschichtsensor 355, 363
Dünnschichtsensorik 348
Dünnschichtthermoelement 356
dynamische Temperiertechnik 314, 370
dynamische Temperierverfahren 367

E

Edelstähle 19
EDX 129
EDX-Sensor 136
EDX-Spektrum 136, 138
Eigenabsorption 172
Eigenspannung 284
Einbringen von Ionen 45
Eindringarbeit 220
Eindringfläche 218
Eindringhärte 215
Eindringhärte der Schicht 225
Eindringkörper 212, 225
Eindringkörpergeometrie 216
Eindringkriechen 219
Eindringmodul 218
Eindringmodul der Schicht 224
Eindringrelaxation 220
Eindringtiefe 118, 209, 211, 216, 220, 223, 224
Eindringversuch 222
Einfriereffekt 332
eingefrorene Randschicht 322
einlagige Beschichtung 50
Einsinken 222

Einspritzgeschwindigkeit 313
Einzelschicht 221
Einzelwiderstand 194
elastischer Arbeit 220
elastische Verformung 211
elektrische Heizleiter 369
elektrische Passivierung 359
elektrischer Schwingkreis 203
elektrischer Strom 194
elektrischer Widerstand 201
elektrisches Ersatzschaltbild 203
elektrische Spannung 194
elektrochemische Doppelschicht 198, 200
elektrochemische Impedanzspektroskopie 192
Elektrode 205
Elektrolyse 31
Elektrolyt 205, 300
elektromagnetische Strahlung 166
Elektronen 74, 183
Elektronenmangel 300
Elektronenreflexionsvermögen 127
Elektronenschale 184
Elektronenstoß 128
Elektronenstrahl
– Verdampfen mittels 43
Elektronenstrahlen 187
Elektronentransfer 192
Elektronenübergang 184
Elektronenüberschuss 300
Elementanalyse 141
elementweise Aufschlüsselung 137
Emissionen 248, 260, 261, 328
Emissionsmessung 263, 265
Emissionswerkzeug 264
Empfindlichkeit 165
energiedispersive RFA 185
energiedispersives Spektrometer 128
Energieeffizienz 367
Energieübertragung 168
Energieverteilung 127
Entformung 338, 342, 352
Entformungskraft 238, 239, 341
Entformungsprozess 241

- Entformungsschräge 338
Entformungstemperatur 344
Entformungsverhalten 336, 343
Enthaftungseffekte 277
Entlastungsrate 211
Entlüftung 331, 334
Entlüftungskanal 262
Entlüftungsmöglichkeiten 334
Entlüftungsweg 334
Entstehungsbereiche der Elektronen 127
erhöhte Temperatur 324
Ermüdung 211
Ermüdungsprozess 269
Ermüdungsverschleiß 290
Ersatzschaltbild 201, 306
Erweichungstemperatur 314
Erzeugung der Röntgenstrahlung 129
- F**
- Faraday-Käfig 206
Fehlstelle 357
Feiltest 277, 281
Festkörperlaser 144
Feststoffförderer 70
Feststoffpartikel 69
Filterelement 261
Finite-Elemente-Methode 99
flache Bereiche 65
Flächenkorrosion 301
Flächenrauheit 134
Flanschtemperatur 333
Fließverhalten 323
Fließweg 256, 362
Fließwegende 352
Fließweglänge 228, 322
Flüchtigkeit 84, 85, 88
Fluoreszenzstrahlung 182
Flüssigkeitsregler 58
Fokusebene 144
Förderraten 71
Förderung des festen Precursors 69
Formteilqualität 371
Fourier-Transform-Technik 175
Fragmentmasse 253
- Frank-van-der-Merwe-Modell 47
Freistrahlpf Prüfstand 269
Frequenz 167
Frequenzbereich 193, 203
Frequenzganganalytator 205
FTIR-Absorptionsspektrum 173, 174
FTIR-Spektroskopie 166
FTIR-Spektrum 175
Füllstudie 350
funktionale Schicht 284
funktionelle Gruppen 171
- G**
- galvanische Beschichtung 304
galvanische Halbzelle 300
galvanische Schichten 30, 292
galvanisches Element 300
Galvanisieren 23
Galvanostat 205
Gaschromatographie 248, 261
Gasgemisch 255
Gasgeschwindigkeit
– Simulation 106
Gasphasenabscheidung
– chemische 53
– physikalische 41
Gefügestruktur 269
Gesamtbild 146
Gesamtwiderstand 194
Gestaltabweichung 157
Gitterfehler 47
Gittermuster 278
Gitterschnitt 277, 278
Glanzgrad 268, 315, 321
Glanzgradunterschiede 336
Glanzunterschiede 2, 328
Glasfasern 283
Glasübergangstemperatur 229, 319, 370
Gleichgewichtsdampfdruck 69
Gleichspannung 197
Gleichstromspittern 44
Gleitintegral 343
Gleitreibkoeffizient 240
Gleitreibmoment 243, 344

Glimmentladung 74
Glühen 21
gradierte Beschichtung 50
Grenzfläche 215

H

haftfeste Anbindung 369
Haftfestigkeit 304
Haftkräfte 338
Haftmoment 243, 343, 344
Haftribkoeffizient 240
Haftung 284
Haftungsbeurteilung 287
Haftungsbewertung 277
Haftungsmechanismen 46
Haftung von Beschichtungen 278
Härte 16, 283, 288
Härteeindruck 281
Härteindringprüfung 287
Härtemessung 287
Härten 21
Härteprüfverfahren 209
Härtetest nach Rockwell 279
Hartstoffschicht 76, 283
Hartverchromung 292
Hauptschubspannung 222
Heißgaskorrosion 301, 307, 335
Heißwandreaktor 53, 58
Heizelement 367
Heizschichten 367
Helmholtzschicht 200
Hinterschneidungen 59, 238, 284, 338, 342
hochfeste niedriglegierte Werkzeugstähle 12
Hochfrequenzbereich 197
Hochfrequenzputtern 45
Hochglanzoberflächen 343, 367
Hochglanzpolitur 241, 338
hochlegierte Werkzeugstähle 12, 18
Hochtemperaturoxidation 192
Höhenkartierung 164
Höhenprofil 135
Höhenunterschiede 144, 157

homogene Beschichtung 59
Hybridschichten 297
Hydroxidschicht 192

I

Identifizierung des Polymers 171
Impedanz 196
Impedanzspektroskopie 192, 205, 306
Impedanzspektrum 205
Impulsübertragung 44
Indentation Size Effect 214
Indikatorelemente 36
Indikatororschicht 36
Induktivität 197
infraroter Spektralbereich 166
Infrarotspektroskopie 166, 170, 178
Infrarotstrahl 177
Innenbeschichtung 59
innenliegende Bereiche 65
Intensität 185, 189
Intensitätsmuster 162
Intensitätsverteilung 146, 151
Interferenzmuster 162
Interferogramm 176
Interferometer 160
Ionen 74
Ionenbindung 49
Ionenplattieren 45
Ionisation 253
Isolationsvermögen 356

K

Kalibrierstandard 188
Kalottendurchmesser 118
Kalottenschliff 115, 152, 189, 287
Kaltarbeitsstähle 11, 19
Kaltwandreaktor 53
Kapazität 197
Katalysator 65
Kathode 31, 75, 185, 300
Kationen 192
Kavitätsoberfläche 343
Keimwachstum 47

kinetische Energie 46
Kippschwingungen 168
Kleinlast-Vickers-Prüfgerät 281
kohärentes Licht 162
Kohlenstoff-Werkzeugstähle 11
Kombination einzelner Schichten 50
Komplexität
– Precursor 81
Kondensator 197, 200
konfokales Messprinzip 143
Konizität 338
konstantes Phasenelement 198
konstruktive Interferenz 163
Kontaktfläche 339
Kontakttemperatur 229, 317
Kontakttiefe 215, 218
Kontaminierung 342
konturnahe Heizleiter 367
Konvektion 55
Konzentration 189
Korngrenze 302
Korngröße 281
Korrasion 274, 300, 335, 342
Korrosionsanfälligkeit 308
Korrosionsbeständigkeit 16, 192, 297, 307
Korrosionsneigung 302
Korrosionsprobleme 265
Korrosionsprodukte 303
Korrosionsprozess 192
Korrosionsschutz 203, 302
Korrosionsschutzschichten 300, 304
Korrosionsursache 302
Korrosionsverhalten 310
Korrosionsvorgang 198
Korrosionswiderstand 200
korrosive Nebenprodukte 92
kovalente Bindung 49, 171, 178
Kraftaufnehmer 351
Kraft-Eindringtiefe-Messung 213
Kraftrücknahmekurve 215
Kratzstab 278
Kratztest 277, 278
Kreiden 330
Kriecheigenschaften 211

kristalline Strukturen 46
Kunststoffformenstähle 12

L

Lambert-Beer-Gesetz 182
laminare Strömung 104
Laser 161
Lasermikroskopie 143
Laserstrahl 143, 231
– Verdampfen mittels 43
Lastenheft 5
Lebensdauer 291
Leerstelle 183
Lichtbogen
– Verdampfen mittels 43
Lichtgeschwindigkeit 167
Lichtintensitätsverteilung 148
Lichtquelle 161
Lichtwellen 160
Liganden 83, 93
Linienmessung 159
Linienspektrum 184
Lochblende 143
Lochkorrasion 301
Löslichkeit 47, 84
Losreißkraft 239, 339
Lösungsdruck 300
Lösungsmittel 56, 58, 84, 249, 260

M

Magnetronputtern 45
Maraging-Werkzeugstähle 19
Masse-Ladungs-Verhältnis 253
Massenflussregler 59
Massenschwächungskoeffizienten 183
Massenspektrometrie 248, 252
Massenspektrum 252, 253, 254
Massetemperatur 313, 332
Materialabbau 256
Materialabtrag 268
Materialidentifizierung 169
Materialtrocknung 257

Materialversagen 275
Matrixmaterial 35
matte Stellen 2
mechanische Adhäsion 339
Mehrkomponentensysteme 82
mehrlagige Schichtsysteme 50
Messgeschwindigkeit 165
Messgröße 348
Messstrecke 158
Metallgitter 49
metallische Bindung 49
Metallkorrosion 198
metallorganische chemische Gasphasenabscheidung 53, 305, 311, 321
Metallprobe 206
Michelson-Interferometer 161, 175
Mikrobrechen 269
mikrophysikalische Effekte 214
Mikroröntgenfluoreszenzanalyse 190
Mikrospanen 269
Mikrostrukturen 215, 304
Mikrowelle 75
Mischelemente 70
Mitlaufprobe 277
Mittenrauwert 158
mittlere freie Weglänge 43
mittlerer Infrarotbereich 166
MOCVD 54
MOCVD-Anlage 59
Modellbildung 99
molekulare Vorstufen 78
Moleküleigenschaften 79
Molekülschwingungen 168
Morphologie 79
MS-Signalintensität 264
Multilagenschicht 321
Multi-Source-Precursor 82

N

naher Infrarotbereich 166
Nanoindentation 209
Nanolayerschichten 50
Nanotechnologie 163
Nasskorrosion 300

Navier-Stokes-Gleichungen 104
Nebenprodukte 80
Nebenreaktion 55
Neigungswinkel 338
nichtwässrige Korrosion 303
Niederfrequenz 205
Niederschlag 256
niedriglegierte Werkzeugstähle 18
Niedrigvakuum-REM 124
Nitrieren 22
Normalschwingungen 168
numerische Apertur 122
Nyquist-Diagramm 199, 202

O

Oberflächenbeschaffenheit 192
Oberflächenergie 340
Oberflächenfehler 367
Oberflächengeometrie 304
Oberflächengüte 271
Oberflächenmodifikation 241
oberflächennahe Beheizung 368
Oberflächennormale 281
Oberflächenprofil 160
Oberflächenqualität 351
Oberflächenrauheit 116, 134, 215, 223, 245, 272, 339, 341
Oberflächenstruktur 149, 238, 283, 345
Oberflächenzerrüttung 269
Ohmscher Widerstand 194
Opferanode 303
Ordnungszahl 126
organische Moleküle 178
organische Verbindungen 253
Oxidation 369
Oxidationsreaktion 193
Oxidschicht 192, 303

P

Paarbildung 182
PACVD 75, 296
Pendelschwingungen 168
Permittivität 203

- Pflichtenheft 5
 Phasenumwandlung 304, 316
 Phasenverschiebung 194, 196
 Photoeffekt 182
 Photon 128, 182
 physikalische Adhäsionskräfte 340
 physikalische Bindung 49
 physikalische Gasphasenabscheidung 41, 283, 296, 308, 311, 320, 342, 356, 359, 369
 piezoelektrischer Effekt 351
 Pinhole 356
 plasmabasierte chemische Gasphasenabscheidung 74
 Plasmanitrieren 299
 Plasmen 74
 Plastifizierparameter 333
 Plastifizierung 257
 plastische Eigenschaften 222
 plastische Verformung 211, 221
 plastische Verformungsarbeit 220
 Plate-out-Effekt 329
 Polarisationswiderstand 192
 Pop-in-Verhalten 214
 Porenfüllung 193
 Porenwiderstand 203
 Postprocessor 99
 Potentiostat 205
 Präparation 122
 Precursoren 53, 58, 62, 65, 78, 285, 318
 - feste 71, 72
 - flüssige 58
 - kommerziell erhältlich 84
 Preprocessor 99
 Primärelektronen 126
 Primärintensität 183
 Probendicke 186
 Probenoberfläche 233
 Probenpräparation 170, 186
 Probenzuführung 249
 Produktidentifizierung 36
 Profil
 - topologisches 134
 Prozessdruck 60
 Prozessemisionen 258
 Prozessparameter 87
 Prozesstemperatur 67, 75
 Prüfkraft 211, 224
 Prüfoberfläche 241
 Pull-off Scherfestigkeitstest 277
 pulvermetallurgische Werkzeugstähle 12, 19
 Pulverpartikel 65
 PVD 41
 - Verfahrensvarianten 41
 PVD-Beschichtung 22
 Pyrolyse 65
- Q**
- Quantifizierung von Komponenten 174
 Querschliffmethode 277, 281
- R**
- Randles Cell 200
 Rasterelektronenmikroskop 122, 308
 Raua Oberfläche 3
 Rauheit 157, 159, 164, 321
 - des Substrates 48
 Rauheitsänderung 273
 Rauheitsmessung 153
 Rautiefe 158
 Rautiefenprofil 281
 Rayleighstreuung 182
 Reaktand 78
 Reaktion
 - chemische 55
 Reaktionsprodukte 65, 255, 303
 Reaktivität 79
 Reaktor 53
 Reaktortemperatur 65
 Reaktortyp 58
 Reduktion der Reibung 291
 Reduktion des Belages 335
 Referenzelektrode 205
 Reflexionseigenschaften 162
 Reflexion von Licht 156
 Reibbeiwert 341
 Reibkraft 342

Reibpartner 239, 243
Reibung 291
Reibungsreduktion 291
Reibungsverhalten 296
Reibverhalten 35
Reibwerterhöhende Schichten 36
Reibzustände 346
Reinheit 181
Reinigungsritzel 71
Relaxationsvorgang 220
REM 124
Resistiv beheizte Oberfläche 368
Resonanzfrequenz 168
Restfeuchte 330
Retentionszeit 250, 251, 260
RFA 181
Risse 281, 309
Risskorrosion 301
Rissnetzwerk 150
Rissstruktur 292
Rockwellhärte 209, 210
Rockwell-Härteprüfung 287
Rockwell-Test 277, 279
Röntgenanalyse 181
Röntgendiffraktometrie 190
Röntgenfluoreszenzanalyse 181
Röntgenstrahlen 124, 128
Röntgenstrahlung 182, 184, 185
rückgestreute Elektronen 124
RückstreuElektronen 126, 133

S

Sättigung des Träergases 66
Sättigungsdampfdruck 68
Sauerstoffgehalt 303
Säulenkopf 249
Schallplatteneffekt 3
Schattenmaske 357
Schäumen 333
Scherfestigkeitstest 279
Schichtabscheidung 53
Schichtaufbau 309, 321
Schichtbestandteile 188
Schichtcharakterisierung 115

Schichtdicke 61, 116, 183, 185, 188, 189, 203, 284, 304, 308, 309, 311, 321
- PVD 41
Schichtgrenzen 50
Schichthaftung 53, 281, 286
Schichthärte 284
Schichtstruktur 65
Schichtsysteme 50, 284, 305
Schichtversagen 309
Schichtwachstum 41, 46, 55
Schichtwachstumsrate
- Simulation 105
Schichtzonenmodell 48
Schmelzefront 350
Schmelztemperatur 319
Schmiermittel 330
Schneckengröße 333
Schneckenzuführung 70
Schnellarbeitsstähle 11, 18
Schrittweite 145
Schutzschicht 192
Schwindung 241
Schwingungsformen im Molekülen 168
Schwingungsspektrum 173
Scratchtest 277, 279
Scratchtester 287
SE 124
Seebeck-Effekt 354
Sekundärelektronen 124, 126, 131
Sensorcharakterisierung 360
Sensorkalibrierung 360
Sensoroberfläche 364
Sensorschicht 36
Sensorträgheit 349
SE-Sensor 130
Siegpunkt 350
Simulation der Schichtabscheidung 99
Single-Source-Precursoren 83
Solver 99
Solvothermal Reaktion 90
Spaltgängigkeit 59, 305
Spaltinnenwand 62
Spannungsanregung 306
Spektralbereich 166
Spektrenauswertung 179

Spektrometer 176
 spezialisierte Werkzeugstähle 20
 spezifische Adhäsion 339
 spezifischer Widerstand 369
 spezifische Wärmekapazität 230
 Spitzenverrundung 222
 Splitverhältnis 249
 Spreizschwingungen 168
 Sprudler 68
 Spurenanalytik 175
 Sputtern 44
 Standardwasserstoffelektrode 205
 Stoffgemisch 249
 Stofftransport innerhalb des Reaktors 66
 stoßfeste Werkzeugstähle 11
 Stranski-Krastanov-Modell 47
 Strategien in der Materialsynthese 81
 Stromantwort 195
 Stromdichtepotentialmessung 305
 Strömungssimulation 99
 Strömungsverhalten 101
 Strömungsweg 107
 Strukturierte Oberfläche 321
 Sublimationsdruck 47
 Sublimationstemperatur 86
 Substrat 41, 118, 284
 Substratoberfläche 55, 65, 77

T

Target 44
 teilkristalline Thermoplaste 349
 Temperaturabfall 233
 Temperaturamplitude 232
 Temperaturänderung 233
 Temperaturausgleich 234
 Temperaturleitfähigkeit von
 Beschichtungen 228
 Temperaturmessung 364
 Temperaturschwankungen 280
 temperatursensitive Dünnschichten 354
 Temperatursensor 348, 351, 355
 Temperaturverlauf 353

Tempern 257
 Tetraethylorthosilikat 57
 thermische Ausdehnung 316
 thermische Barriereforschicht 313, 316,
 319, 321
 thermische CVD 53
 thermische Eigenschaften 305
 thermische Leitfähigkeit 232, 321
 thermischer Ausdehnungskoeffizient 319
 thermisch isolierende Werkstoffe 228
 Thermodesorptionsrörchen 261,
 262, 264
 thermodynamische Adhäsions-
 theorie 341
 Thermoelemente 349, 353, 355,
 357, 360
 Thermoschock 277
 Thermoschocktest 280
 Tiefenschärfe 125
 Tigerlines 2
 Time Domain Thermoreflectance 230
 Topcoat 294
 Topografie 150
 topografische Darstellung 147
 topografisches Bild 144
 Torsionsschwingungen 168
 Trägergas 250, 251
 Trägergasstrom 54
 Trennmittel 330, 342
 Trennschärfe 251
 Trennverhalten 251
 tribologischer Zustand 243
 tribologische Schichten 290
 Tribooxidation 291
 Trockenkorrosion 300

U

Ultra-Variable-Pressure-Detektor 131
 Unebenheiten 157
 unvollständig gefüllte Formteile 4
 UVD-Sensor 131

V

Vakuumpumpe 55
Valenzschwingungen 168, 172
Verarbeitung 257
Verbundwerte 223
Verdampfer 54
Verdampfungstemperatur 42
Verformungen 211, 212, 281
Vergleich des Infrarotspektrums 171
Vergleichsstelle 354
Verklumpen 70
Vernickeln 34, 294
Versagen der Beschichtung 309
Verschleiß 267, 271, 274, 275, 283, 288
Verschleißbeinsatz 272
Verschleißermittlung 273
Verschleißerscheinungen 164
verschleißfest 296
Verschleißfestigkeit 16, 119, 286, 292
Verschleißprüfung 154
Verschleißrate 120
Verschleißschutzschichten 41, 290
Verschleißtopf-Prüfstand 269
Verschleißuntersuchung 267
Verschleißverhalten 271
Verschleißvolumen 119
Verwirbelung des Pulvers 70
Vickershärte 209, 210
Vollmaterial 221
Volmer-Weber-Modell 47
Vorbehandlung des Substrates 49
Vorbereitung der Probe 129
Vorläuferverbindung 53
Vorlauftemperatur 228, 353, 364
Vortrocknung 257

W

Wanddicke 272, 323
Warburg-Impedanz 198
Warmarbeitsstähle 11, 18
Wärmeableitung 361
Wärmebehandlung 20
Wärmeeindringfähigkeit 317

Wärmeeindringkoeffizient 230, 235
Wärmeerzeugung 369
Wärmeisolationsschicht 233
Wärmeleitfähigkeit 17, 230, 233, 313
Wärmeleitfähigkeitsdetektor 251
Wärmeleitung
– dünner Schichten 230
Wärmeschockbeständigkeit 316
Wärmeübertragungsanalyse 111
Wärmezufuhr 353
Wartung 23
Wasseraufnahme 198
Wasserstoffbrücke 340
Wasserstoffversprödung 32
wässrige Korrosion 192, 310
Wechselstrom 194
Wechselstromkreis 196
Wechselwirkung 160, 181
Wechselwirkungsquerschnitt 182
Weglänge
– mittlere freie 43
Weiβbruch 4
Weiβlichtinterferometer 272
Weiβlichtinterferometrie 156, 160
Wellenlänge 167
Wellenlänge des Laserlichts 144
wellenlängendiffusive RFA 185
Wellenzüge pro Zentimeter 167
Welligkeit 157
Werkstoffhärte 269
Werkzeugbelag 178
Werkzeugbeschichtung 345
Werkzeuginnendruck 348
Werkzeuginnendruckverlauf 349
Werkzeugoberfläche 241, 289, 344, 367
Werkzeugstahl 9
Werkzeugtemperatur 367
Werkzeugtemperierung 364
Werkzeugwand 352, 361, 364
Werkzeugwandtemperatur 228, 313, 317,
344, 348, 361, 364
Werkzeugwandtemperaturverlauf 352
Werkzeug zur Emissionsaufnahme 262
Widerstand
– elektrischer 192, 231

Z

Zähigkeit *16*
Z-Ebenen *146*
Zeitverschiebung *195*
Zersetzung *56*

Zersetzungstemperatur *92*
Zusammensetzung *181, 186*
Zustandsgleichungen *104*
Zwischenschicht *50*
Zykluszeit *228*