

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen I

Grundlagen und Anwendungen

Dr.-Ing. Dieter Liedtke

Dr.-Ing. Martin Hoferer
Prof. Dr.-Ing. Karl Heinz Illgner
Dipl.-Ing. Norbert Pirzl
Dr.-Ing. Hansjürg Stiele

10., aktualisierte Auflage

Mit 455 Bildern und 30 Tabellen

TAE

Kontakt & Studium
Band 349

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Wilfried J. Bartz
Dipl.-Ing. Hans-Joachim Mesenholl
Dipl.-Ing. Elmar Wippler

Inhaltsverzeichnis

Herausgeber-Vorwort

Autoren-Vorwort

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Verhalten der Eisenwerkstoffe unter dem Einfluss der Zeit-Temperatur-Folge beim Wärmebehandeln | 1 |
| | Dieter Liedtke | |
| 1.1 | Aufbau und Gefüge der Eisenwerkstoffe | 1 |
| 1.1.1 | Reines Eisen | 1 |
| 1.1.2 | Eisenlegierungen | 4 |
| 1.2 | Das Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild | 7 |
| 1.2.1 | Einfluss der Legierungselemente auf das Fe-C-Zustandsschaubild | 15 |
| 1.2.2 | Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit auf das Fe-C-Zustands-Schaubild ... | 17 |
| 1.3 | Schaubilder für die Praxis des Wärmebehandelns | 18 |
| 1.3.1 | Das Zeit-Temperatur-Austenitisier-(ZTA-)Schaubild | 18 |
| 1.3.2 | Das Zeit-Temperatur-Umwandlungs-(ZTU-)Schaubild | 20 |
| 1.4 | Einfluss der Legierungselemente auf das Umwandlungsverhalten | 26 |
| 1.5 | Literatur | 27 |
| 2 | Härten, Anlassen, Vergüten | 29 |
| | Dieter Liedtke | |
| 2.1 | Zweck des Wärmebehandelns allgemein | 29 |
| 2.2 | Ziel des Härtens, Anlassens, Vergütens | 30 |
| 2.3 | Ablauf des Wärmebehandelns | 30 |
| 2.3.1 | Das Austenitisieren | 31 |
| 2.3.2 | Abkühlen bzw. Abschrecken | 33 |
| 2.3.2.1 | Stetiger Abkühlverlauf | 33 |
| 2.3.2.2 | Gestuftes Abschrecken – Warmbadhärtens | 44 |
| 2.3.2.3 | Abschrecken mit Gasen | 46 |
| 2.3.2.4 | Tiefkühlen | 47 |
| 2.4 | Eigenschaften gehärteter Werkstücke | 49 |
| 2.4.1 | Festigkeit und Härte | 49 |
| 2.4.2 | Werkstückform und -abmessung | 50 |
| 2.4.3 | Formänderungsvermögen – Zähigkeit | 51 |
| 2.4.4 | Eigenspannungen | 52 |
| 2.5 | Anlassen | 52 |
| 2.5.1 | Zweck des Anlassens – Begriffe | 52 |
| 2.5.2 | Der Anlassvorgang | 53 |
| 2.5.3 | Anlassverhalten der Stähle | 54 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.5.4 | Eigenschaften angelassener Werkstücke | 58 |
| 2.5.5 | Anlassversprödung | 62 |
| 2.6 | Hinweise für das praktische Durchführen des Härten, Anlassens und Vergütens von Bauteilen und Werkzeugen | 63 |
| 2.6.1 | Vorbereiten und Vorbehandeln | 63 |
| 2.6.1.1 | Spannungsarmglühen | 63 |
| 2.6.1.2 | „Vorvergüten“ | 63 |
| 2.6.1.3 | Vorbereiten der zu härtenden Bauteile und Werkzeuge | 64 |
| 2.6.2 | Härten, Anlassen und Vergüten von Bauteilen | 64 |
| 2.6.3 | Härten, Anlassen und Vergüten von Werkzeugen | 66 |
| 2.6.3.1 | Werkzeuge aus unlegierten Werkzeugstählen | 66 |
| 2.6.3.2 | Werkzeuge aus legierten Kaltarbeitsstählen und Warmarbeitsstählen | 67 |
| 2.6.3.3 | Werkzeuge aus Schnellarbeitsstählen | 69 |
| 2.6.4 | Anlassen von Bauteilen und Werkzeugen | 70 |
| 2.6.4.1 | Anlassen gehärteter Bauteile | 70 |
| 2.6.4.2 | Anlassen gehärteter Werkzeuge | 70 |
| 2.7 | Literatur | 71 |
| 3 | Bainitisieren | 72 |
| | Dieter Liedtke | |
| 3.1 | Ziel des Bainitisierens | 72 |
| 3.2 | Durchführung des Bainitisierens | 72 |
| 3.3 | Eigenschaften bainitischer Zustände | 82 |
| 3.4 | Literatur | 83 |
| 4 | Härtbarkeit – Eignung der Eisenwerkstoffe zum Härten.... | 84 |
| | Dieter Liedtke | |
| 4.1 | Begriffsbestimmung | 84 |
| 4.2 | Ermitteln der Härtebarkeit | 89 |
| 4.3 | Anwendung der Härtebarkeit bei der Stahlauswahl | 93 |
| 4.3.1 | Stahlauswahl mittels der ZTU-Schaubilder | 93 |
| 4.3.2 | Stahlauswahl mit Hilfe der Stirnabschreckkurven | 95 |
| 4.3.3 | Indirekte Methode mittels Betriebsversuchen | 97 |
| 4.4 | Literatur | 98 |
| 5 | Randschichthärten | 100 |
| | Hansjürg Stiele | |
| 5.1 | Definition und Grundprinzip | 100 |
| 5.2 | Flammhärten | 103 |
| 5.2.1 | Prinzip des Flammhärtens | 103 |
| 5.2.2 | Anlagentechnik | 104 |
| 5.2.3 | Anwendungsbeispiele | 106 |
| 5.3 | Induktionshärten | 107 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 5.3.1 | Prinzip des Induktionserwärmens | 107 |
| 5.3.2 | Anlagentechnik | 110 |
| 5.3.3 | Energiequellen (Generatoren) | 110 |
| 5.3.4 | Werkzeuge | 112 |
| 5.3.5 | Führungsmaschine | 113 |
| 5.3.6 | Anwendungsbeispiele | 115 |
| 5.4 | Laserstrahlhärten | 117 |
| 5.4.1 | Prinzip des Laserstrahlhärtens | 117 |
| 5.4.2 | Anlagentechnik | 119 |
| 5.4.2.1 | Lasertypen | 120 |
| 5.4.2.1.1 | C02-Laser | 120 |
| 5.4.2.1.2 | Festkörperlaser | 121 |
| 5.4.2.1.3 | Hochleistungs-Diodenlaser | 123 |
| 5.4.2.2 | Führungsmaschinen | 123 |
| 5.4.3 | Anwendungsbeispiele | 124 |
| 5.5 | Elektronenstrahl | 125 |
| 5.5.1 | Prinzip des Elektronenstrahlerwärmens | 125 |
| 5.5.2 | Anlagentechnik | 127 |
| 5.5.3 | Anwendungsbeispiele | 129 |
| 5.6 | Weitere Verfahren | 130 |
| 5.7 | Eigenschaften randschichtgehärteter Werkstücke | 131 |
| 5.7.1 | Härte und Härteprofil – Einhärtungs-Härtetiefe | 131 |
| 5.7.2 | Festigkeitsverhalten | 132 |
| 5.7.3 | Verschleißverhalten | 132 |
| 5.8 | Hinweise zur Anwendung des Randschichthärtens | 133 |
| 5.8.1 | Wärmebehandlungsgerechte Anordnung der Härtezonen | 133 |
| 5.8.2 | Werkstofftechnische Aspekte | 134 |
| 5.8.2.1 | Das Kurzzeitaustenitisieren | 134 |
| 5.8.2.2 | Werkstoffwahl | 136 |
| 5.8.2.3 | Werkstoffzustand | 136 |
| 5.8.3 | Vorbehandeln und Vorbereiten der Werkstücke | 140 |
| 5.8.4 | Abschrecken | 140 |
| 5.8.5 | Nachbehandeln nach dem Randschichthärten | 141 |
| 5.8.5.1 | Reinigen | 141 |
| 5.8.5.2 | Anlassen | 142 |
| 5.8.5.3 | Richten | 142 |
| 5.9 | Literatur | 142 |

6 Aufkohlen, Carbonitrieren, Einsatzhärten – Grundlagen und praktische Durchführung **144**

Dieter Liedtke

| | | |
|-------|------------------------------------|-----|
| 6.1 | Zweck des Einsatzhärtens, Begriffe | 144 |
| 6.2 | Das Verhältnis Eisen – Kohlenstoff | 144 |
| 6.3 | Der Aufkohlungsvorgang | 145 |
| 6.3.1 | Die Kohlenstoffaktivität | 145 |
| 6.3.2 | Der Kohlenstoffpegel | 146 |
| 6.3.3 | Das Übertragen des Kohlenstoffs | 148 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 6.3.4 | Berechnen des Kohlenstoffprofils | 153 |
| 6.3.5 | Ermitteln der Aufkohlungstiefe At | 154 |
| 6.4 | Carbonitrieren | 156 |
| 6.5 | Härten der aufgekohlten Werkstücke | 160 |
| 6.5.1 | Allgemeines | 160 |
| 6.5.2 | Direkthärten (Typ A) | 162 |
| 6.5.3 | Einfachhärten (Typ B) | 163 |
| 6.5.4 | Härten nach isothermischem Umwandeln (Typ C) | 163 |
| 6.5.5 | Doppelhärten (Typ D) | 163 |
| 6.5.6 | Warmbadhärten | 164 |
| 6.6 | Tiefkühlen | 165 |
| 6.7 | Anlassen einsatzgehärteter Werkstücke | 166 |
| 6.8 | Diffusionsbehandeln | 166 |
| 6.9 | Eigenschaften einsatzgehärteter Werkstücke | 167 |
| 6.9.1 | Struktur einsatzgehärteter Werkstücke | 167 |
| 6.9.2 | Härte und Härtetiefe | 172 |
| 6.9.3 | Formänderungsvermögen, Zähigkeit | 174 |
| 6.9.4 | Festigkeitsverhalten | 175 |
| 6.9.5 | Verschleißverhalten | 181 |
| 6.10 | Anwendungsbeispiele | 182 |
| 6.11 | Hinweise zum praktischen Durchführen des Einsatzhärtens | 184 |
| 6.11.1 | Vorbereiten und Vorbehandeln der Werkstücke | 184 |
| 6.11.1.1 | Vorangehende Wärmebehandlungen | 184 |
| 6.11.1.2 | Reinigen der Werkstücke | 184 |
| 6.11.1.3 | Vorbereiten für ein örtlich begrenztes Einsatzhärten | 185 |
| 6.11.2 | Chargieren der Werkstücke | 185 |
| 6.11.3 | Erwärmen auf Behandlungstemperatur | 187 |
| 6.11.4 | Mittel zum Aufkohlen und Carbonitrieren | 187 |
| 6.11.4.1 | Pulver und Granulat | 187 |
| 6.11.4.2 | Salzschmelzen | 188 |
| 6.11.4.3 | Gase | 188 |
| 6.11.5 | Messen und Regeln beim Aufkohlen | 193 |
| 6.11.5.1 | Pulver und Granulat | 193 |
| 6.11.5.2 | Salzschmelzen | 194 |
| 6.11.5.3 | Gase | 194 |
| 6.11.5.4 | Ermitteln des C-Pegels über den Taupunkt | 194 |
| 6.11.5.5 | Ermitteln des C-Pegels über den CO ₂ -Gehalt | 196 |
| 6.11.5.6 | Ermitteln des C-Pegels über den Sauerstoffpartialdruck | 198 |
| 6.11.6 | Prozessablauf beim Einsatzhärten | 200 |
| 6.11.7 | Hinweise zum Festlegen des C-Pegels beim Gasaufkohlen und -carbonitrieren | 202 |
| 6.11.8 | Stähle zum Einsatzhärten | 203 |
| 6.12 | Literatur | 203 |

Dieter Liedtke

| | | |
|----------|--|-----|
| 7.1 | Begriffsbestimmungen | 207 |
| 7.2 | Zweck des Nitrierens und Nitrocarburierens | 208 |
| 7.3 | Die Wechselwirkung zwischen Eisen und Stickstoff bzw. zwischen Eisen, Stickstoff und Kohlenstoff | 209 |
| 7.4 | Entstehung und Aufbau der Nitrier-/Nitrocarburierschichten | 211 |
| 7.4.1 | Allgemeines | 211 |
| 7.4.2 | Die Verbindungsschicht | 215 |
| 7.4.3 | Die Porosität der Verbindungsschicht | 218 |
| 7.4.4 | Die Diffusionsschicht | 222 |
| 7.5 | Härte der Nitrierschichten | 227 |
| 7.5.1 | Allgemeines | 227 |
| 7.5.2 | Oberflächenhärte | 228 |
| 7.5.3 | Härte der Verbindungsschicht | 230 |
| 7.5.4 | Härte der Diffusionsschicht - das Härteprofil | 231 |
| 7.5.5 | Nitrierhärte tiefe | 236 |
| 7.6 | Einfluss des Nitrierens/Nitrocarburierens auf die Werkstückgeometrie | 237 |
| 7.6.1 | Maß- und Formänderungen | 237 |
| 7.6.2 | Oberflächenrauheit | 239 |
| 7.7 | Eigenspannungen | 241 |
| 7.8 | Formänderungsvermögen -Zähigkeit | 241 |
| 7.9 | Festigkeitsverhalten | 245 |
| 7.9.1 | Statische Festigkeit | 245 |
| 7.9.2 | Schwingfestigkeit | 246 |
| 7.10 | Verschleißverhalten | 248 |
| 7.10.1 | Allgemeines | 248 |
| 7.10.2 | Das Verschleißverhalten der Verbindungsschicht | 249 |
| 7.10.3 | Das Verschleißverhalten der Diffusionsschicht | 251 |
| 7.11 | Korrosionsverhalten | 251 |
| 7.12 | Hinweise für das praktische Durchführen des Nitrierens und Nitrocarburierens | 253 |
| 7.12.1 | Vorbehandlungen | 253 |
| 7.12.1.1 | Vergüten | 253 |
| 7.12.1.2 | Rekristallisationsglühen | 253 |
| 7.12.1.3 | Spannungsarmglühen | 253 |
| 7.12.2 | Reinigen | 254 |
| 7.12.3 | Vorbereiten zum örtlich begrenzten Nitrieren/Nitrocarburieren | 255 |
| 7.13 | Mittel zum Nitrieren und Nitrocarburieren | 256 |
| 7.14 | Öfen zum Nitrieren und Nitrocarburieren | 258 |
| 7.14.1 | Salzbadnitrocarburieren | 258 |
| 7.14.2 | Öfen zum Gasnitrieren und -nitrocarburieren | 259 |
| 7.14.3 | Öfen zum Plasmanitrieren und -nitrocarburieren | 261 |
| 7.15 | Anwendungsbeispiele | 262 |
| 7.16 | Literatur | 266 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 8 | Borieren und Chromieren | 271 |
| | Dieter Liedtke | |
| 8.1 | Zweck und Begriffsbestimmung | 271 |
| 8.2 | Borieren | 271 |
| 8.2.1 | Entstehung und Aufbau der Borierschicht | 271 |
| 8.2.2 | Eigenschaften der Boridschicht | 275 |
| 8.2.2.1 | Härte | 275 |
| 8.2.2.2 | Festigkeit | 275 |
| 8.2.2.3 | Formänderungsvermögen, Zähigkeit/Duktilität | 275 |
| 8.2.2.4 | Verschleißverhalten | 276 |
| 8.2.2.5 | Korrosionsverhalten | 276 |
| 8.3 | Hinweise für das praktische Anwenden des Borierens | 277 |
| 8.3.1 | Vorbehandlung | 277 |
| 8.3.2 | Werkstoffauswahl | 278 |
| 8.3.3 | Durchführung des Borierens | 278 |
| 8.3.4 | Nachbehandeln und Nachbearbeiten | 279 |
| 8.4 | Chromieren | 280 |
| 8.4.1 | Entstehung und Aufbau der Chromierschicht | 280 |
| 8.4.2 | Eigenschaften chromierter Werkstücke | 282 |
| 8.4.3 | Hinweise für das Anwenden und Durchführen des Chromierens | 282 |
| 8.5 | Literatur | 283 |
| | | |
| 9 | Glühen – Grundlagen und praktische Durchführung | 284 |
| | K. H. Illgner | |
| 9.1 | Kriterien für die Auswahl von Glüh-Verfahren | 284 |
| 9.2 | Glühverfahren mit Phasenumwandlungen nach einem Austenitisieren.. | 289 |
| 9.2.1 | Normalglühen = Normalisieren | 289 |
| 9.2.2 | FP-Glühen (frühere Bezeichnung: BG-Glühen) | 296 |
| 9.2.3 | Grobkornglühen | 297 |
| 9.2.4 | Diffusionsglühen | 298 |
| 9.2.5 | Lösungsglühen | 299 |
| 9.3 | Glühen mit Temperaturen unter Ac3 bzw. um oder unter Ac1 | 299 |
| 9.3.1 | Weichglühen | 299 |
| 9.3.2 | Glühen auf kugelige Carbide - GKZ-Glühen | 300 |
| 9.3.3 | Rekristallisationsglühen | 306 |
| 9.3.4 | Spannungsarmglühen | 311 |
| 9.3.5 | Wasserstoffarmglühen – Dehydrieren | 313 |
| 9.4 | Literatur | 317 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 10 | Beanstandungen an wärmebehandelten Bauteilen – Allgemeine Aspekte | 318 |
| | Norbert Pirzl | |
| 10.1 | Einleitung | 318 |
| 10.2 | Beanstandungsgründe bei wärmebehandelten Bauteilen | 318 |
| 10.3 | Die Rolle der Schadensanalyse in der Wärmebehandlung | 319 |
| 10.4 | Recht haben und Recht bekommen – Das Dilemma der Schuldfrage.... | 323 |
| 10.5 | Grundlegende Aspekte für Fehlervermeidung, richtige Fehlerreaktion... | 325 |
| 10.5.1 | Fehlerreaktion und -Vermeidung aus Sicht des Wärmebehandlungsbetriebs | 326 |
| 10.5.2 | Fehlerreaktion und -Vermeidung aus Sicht des Konstrukteurs und der Fertigung | 327 |
| 10.6 | Literatur | 332 |
| | | |
| 11 | Beanstandungen an wärmebehandelten Bauteilen – Fallbeispiele | 334 |
| | Norbert Pirzl | |
| 11.1 | Einleitung | 334 |
| 11.2 | Fehlerbeispiele – Glühen | 334 |
| 11.3 | Fehlerbeispiele – Härten und Vergüten | 337 |
| 11.4 | Fehlerbeispiele – Einsatzhärten | 359 |
| 11.5 | Fehlerbeispiele – Randschichthärten | 370 |
| 11.6 | Fehlerbeispiele – Nitrieren und Nitrocarburieren | 374 |
| 11.7 | Literatur | 384 |
| | | |
| 12 | Prüfen des wärmebehandelten Zustands | 386 |
| | Manfred Hoferer | |
| 12.1 | Vorbemerkung | 386 |
| 12.2 | Sichtkontrolle | 387 |
| 12.3 | Härteprüfung | 387 |
| 12.3.1 | Das Brinell-Verfahren nach DIN EN ISO 6506 | 390 |
| 12.3.2 | Das Vickers-Verfahren nach DIN EN ISO 6507 | 393 |
| 12.3.3 | Das Rockwell-Verfahren nach DIN EN ISO 6508 | 396 |
| 12.3.4 | Das Knoop-Verfahren | 399 |
| 12.3.5 | Fehler beim Prüfen der Härte mit Eindringprüfkörpern | 399 |
| 12.4 | Härtetiefe | 400 |
| 12.4.1 | Einsatzhärtungs-Härtetiefe (CHD) nach DIN EN ISO 2639 | 403 |
| 12.4.2 | Einhärtungs-Härtetiefe (SHD) nach DIN EN 10328 | 403 |
| 12.4.3 | Nitrier-Härtetiefe (NHD) nach DIN 50190-3 | 403 |
| 12.5 | Messen von Schichtdicken | 404 |
| 12.5.1 | Bestimmung der Dicke der Verbindungsschicht nach Nitrieren oder Nitrocarburieren nach DIN 30902 | 404 |
| 12.5.2 | Dicke der Diffusionsschicht nach Nitrieren oder Nitrocarburieren | 405 |
| 12.5.3 | Aufkohlungstiefe | 406 |

| | | |
|-------|-------------------------------|-----|
| 12.6 | Untersuchung des Gefügestands | 406 |
| 12.7 | Bruchprobe und Makroschliff | 413 |
| 12.8 | Mechanische Prüfungen | 414 |
| 12.9 | Eigen Spannungsmessungen | 416 |
| 12.10 | Literaturhinweise | 417 |

13 Wärmebehandlungsangaben in Zeichnungen und Fertigungsunterlagen **418**

Dieter Liedtke

| | | |
|----------|---|-----|
| 13.1 | Zweck der Wärmebehandlungsangaben | 418 |
| 13.2 | Was ist unter Wärmebehandlungsangaben zu verstehen? | 418 |
| 13.3 | Darstellung und Angaben in Zeichnungen | 420 |
| 13.3.1 | Angabe des Wärmebehandlungszustands | 420 |
| 13.3.2 | Kennzeichnen der Prüfstelle | 420 |
| 13.3.3 | Angabe der Härte | 421 |
| 13.3.4 | Kennzeichnung örtlich begrenzter Wärmebehandlung | 424 |
| 13.3.5 | Angabe der Härtetiefe | 425 |
| 13.3.5.1 | Härtetiefe nach dem Randschichthärten | 425 |
| 13.3.5.2 | Härtetiefe nach dem Einsatzhärten | 427 |
| 13.3.5.3 | Härtetiefe nach dem Nitrieren oder Nitrocarburieren | 428 |
| 13.3.6 | Wärmebehandlungsbild | 430 |
| 13.4 | Angaben in Fertigungsunterlagen | 430 |
| 13.5 | Literatur | 431 |

Sachwortverzeichnis **433**

Autorenverzeichnis **440**