

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen

Grundlagen und Anwendungen

Dr.-Ing. Dieter Liedtke >

Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler

Dr.-Ing. Peter Sommer

Dr.-Ing. Hansjürg Stiele

Dr.-Ing. Egon Welsch

Prof. Dr.-Ing. Franz Wendl

7., völlig neu bearbeitete Auflage

Mit 321 Bildern und 30 Tabellen



Kontakt & Studium

Band 349

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Wilfried J. Bartz

Dipl.-Ing. Elmar Wippler

expertitlverlag

Inhaltsverzeichnis

Herausgeber-Vorwort

Autoren-Vorwort

?

1	Verhalten der Eisenwerkstoffe unter dem Einfluss der Zeit-Temperatur-Folge beim Wärmebehandeln	
	Olaf Kessler, Dieter Liedtke	
1.1	Aufbau und Gefüge der Eisenwerkstoffe	2
1.1.1	Reines Eisen	2
1.1.2	Eisenlegierungen	5
1.2	Das Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild	8
1.3	Einfluss der Erwärmungsgeschwindigkeit	17
1.3.1	Zeit-Temperatur-Austenitisier-(ZTA-)Schaubilder	18
1.4	Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit	20
1.4.1	Zeit-Temperatur-Umwandlungs-(ZTU-)Schaubilder	24
1.4.2	Einfluss der Legierungselemente auf das Umwandlungsverhalten	27
1.5	Literaturhinweise	28
2	Härten, Anlassen, Vergüten	29
	Dieter Liedtke	
2.1	Zweck des Wärmebehandelns allgemein	29
2.2	Ziel des Härten, Anlassens, Vergütens	30
2.3	Ablauf des Wärmebehandelns	30
2.3.1	Das Austenitisieren	32
2.3.2	Abkühlen und Abschrecken	33
2.3.2.1	Stetiger Abkühlverlauf	33
2.3.2.2	Gestuftes Abschrecken - Warmbadhärten	40
2.3.2.3	Abschrecken mit Gasen	41
2.3.2.4	Tiefkühlen	42
2.4	Eigenschaften gehärteter Werkstücke	43
2.4.1	Festigkeit und Härte	43
2.4.2	Werkstückform und Abmessung	44
2.4.3	Formänderungsvermögen - Zähigkeit	45
2.4.4	Eigenspannungen	46
2.5	Anlassen	47
2.5.1	Zweck des Anlassens - Begriffe	47
2.5.2	Der Anlassvorgang	47
2.5.3	Anlassverhalten der Stähle	48
2.5.4	Eigenschaften angelassener Werkstücke	51
2.5.5	Anlassversprödung	51

2.6	Hinweise für das praktische Durchführen des Härstens, Anlassens und Vergütens von Bauteilen und Werkzeugen	52
2.6.1	Vorbereiten und Vorbehandeln	52
2.6.1.1	Spannungsarmglühen	52
2.6.1.2	„Vorvergüten“	53
2.6.1.3	Vorbereiten der zu behandelnden Bauteile und Werkzeuge	53
2.6.2	Härten, Anlassen und Vergüten von Bauteilen	53
2.6.3	Härten, Anlassen und Vergüten von Werkzeugen	55
2.6.3.1	Werkzeuge aus unlegierten Werkzeugstählen	• 55
2.6.3.2	Werkzeuge aus legierten Kaltarbeitsstählen und Warmarbeitsstählen	56
2.6.3.3	Werkzeuge aus Schnellarbeitsstählen	58
2.6.4	Anlassen von Bauteilen und Werkzeugen	59
2.6.4.1	Anlassen gehärteter Bauteile	59
2.6.4.2	Anlassen gehärteter Werkzeuge	\ 59
2.7	Literaturhinweise	60
3	Bainitisieren	63
	Dieter Liedtke	
3.1	Ziel des Bainitisierens	63
3.2	Durchführung des Bainitisierens	* 63
3.3	Eigenschaften bainitisierter Bauteile	70
3.4	Literaturhinweise	71
4	Härtbarkeit -	
	Eignung der Eisenwerkstoffe zum Härten	73
	Dieter Liedtke	
4.1	Begriffsbestimmung	73
4.2	Ermitteln der Härtheit	76
4.3	Anwendung der Härtheit bei der Stahlauswahl	80
4.3.1	Stahlauswahl mittels der ZTU-Schaubilder	* 81
4.3.2	Stahlauswahl mit Hilfe der Stirnabschreckkurven	82
4.3.3	Indirekte Methode mittels Betriebsversuchen	84
4.4	Literaturhinweise	86
5	Randschichthärten	87
	Hansjürg Stiele	
5.1	Definition und Grundprinzip	87
5.2	Flammhärten	90
5.2.1	Prinzip des Flammhärtens	90
5.2.2	Anlagentechnik	92
5.2.3	Anwendungsbeispiele	" 93
5.3	Induktionshärten	94
5.3.1	Prinzip des Induktionserwärmens	94
5.3.2	Anlagentechnik	96

5.3.3	Energiequellen (Generatoren)		97
5.3.4	Werkzeuge	-	98
5.3.5	Führungsmaschine		100
5.3.6	Anwendungsbeispiele	ä v	100
5.4	Laserstrahlhärten		104
5.4.1	Prinzip des Laserstrahlhärtens		104
5.4.2	Anlagentechnik		106
5.4.2.1	CO ₂ -Laser	, n 1 0 7	
5.4.2.2	Festkörperlaser	n	108
5.4.2.3	Hochleistungs-Diodenlaser	- •	109
5.4.3	Anwendungsbeispiele	^ ^	111
5.5	Elektronenstrahlaser		113
5.5.1	Prinzip des Elektronenstrahllasers		113
5.5.2	Anlagentechnik		113
5.5.3	Anwendungsbeispiele		117
5.6	Abkühlmedien	N	117
5.7	Weitere Verfahren	.	118
5.8	Werkstofftechnische Aspekte		119
5.8.1	Das Kurzzeitaustenitisieren		119
5.8.2	Werkstoffe		121
5.9	Anlassen nach dem Randschichthärten	<	125
5.10	Angaben in Zeichnungen	i	125
5.11	Literaturhinweise		125

6 Aufkohlen, Carbonitrieren, Einsatzhärten - Grundlagen und praktische Durchführung 127

Dieter Liedtke

6.1	Zweck des Einsatzhärtens, Begriffe		127
6.2	Das Verhältnis Eisen - Kohlenstoff		127
6.3	Der Aufkohlungsvorgang		128
6.3.1	Die Kohlenstoffaktivität		128
6.3.2	Der Kohlenstoffpegel	•	129
6.3.3	Das Übertragen des Kohlenstoffs		131
6.3.4	Berechnen des Kohlenstoffprofils	°	135
6.3.5	Ermitteln der Aufkohlungstiefe At		136
6.4	Carbonitrieren		139
6.5	Härten der aufgekohlten Werkstücke	➤	140
6.5.1	Allgemeines		140
6.5.2	Direkthärten (Typ A)	,	142
6.5.3	Einfachhärten (Typ B)		143
6.5.4	Härten nach isothermischem Umwandeln (Typ C)		143
6.5.5	Doppelhärten (Typ D)		144
6.5.6	Warmbadhärten		144
6.6	Tiefkühlen		145
6.7	Anlassen einsatzgehärteter Werkstücke	-	146
6.8	Diffusionsbehandeln		147
6.9	Eigenschaften einsatzgehärteter Werkstücke		148
6.9.1	Struktur einsatzgehärteter Werkstücke		148

- 6.9.2 Härte und Härtetiefe
- 6.9.3 Formänderungsvermögen, Zähigkeit
- 6.9.4 Festigkeitsverhalten
- 6.9.5 Verschleißverhalten
- 6.10 Anwendungsbeispiele
- 6.11 Hinweise zum praktischen Durchführen des Einsatzhärtens
- 6.11.1 Vorbereiten und Vorbehandeln der Werkstücke
- 6.11.1.1 Vorangehende Wärmebehandlungen
- 6.11.1.2 Reinigen der Werkstücke
- 6.11.1.3 Vorbereiten für ein örtlich begrenztes Einsatzhärtens
- 6.11.2 Chargieren der Werkstücke
- 6.11.3 Erwärmen auf Behandlungstemperatur
- 6.11.4 Mittel zum Aufkohlen und Carbonitrieren
- 6.11.4.1 Pulver und Granulat
- 6.11.4.2 Salzschnmelzen
- 6.11.4.3 Gase
- 6.11.5 Messen und Regeln beim Aufkohlen
- 6.11.5.1 Pulver und Granulat
- 6.11.5.2 Salzschnmelzen
- 6.11.5.3 Gase
- 6.11.6.3.1 Ermitteln des C-Pegels über den Taupunkt
- 6.11.6.3.2 Ermitteln des C-Pegels über den CO₂-Gehalt
- 6.11.6.3.3 Ermitteln des C-Pegels über den Sauerstoffpartiäldruck
- 6.11.5.4 Allgemeines zum Festlegen des C-Pegels beim Gasaufkohlen und -carbonitrieren
- 6.11.6 Stähle zum Einsatzhärtens
- 6.12 Literaturhinweise

7 Nitrieren und Nitrocarburieren

Dieter Liedtke

- 7.1 Begriffsbestimmungen
- 7.2 Zweck des Nitrierens und Nitrocarburierens
- 7.3 Die Wechselwirkung zwischen Eisen und Stickstoff bzw. zwischen Eisen, Stickstoff und Kohlenstoff
- 7.4 Entstehung und Aufbau der Nitrier-/Nitrocarburierschichten
- 7.4.1 Allgemeines
- 7.4.2 Die Verbindungsschicht
- 7.4.3 Die Porosität der Verbindungsschicht
- 7.4.4 Die Diffusionsschicht
- 7.5 Härte der Nitrierschichten
- 7.5.1 Allgemeines
- 7.5.2 Oberflächenhärte
- 7.5.3 Härte der Verbindungsschicht
- 7.5.4 Härte der Diffusionsschicht - das Härteprofil
- 7.5.5 Nitrierhärte tiefe
- 7.6 Einfluss des Nitrierens/Nitrocarburierens auf die Werkstückgeometrie

7.6.1	Maß- und Formänderungen -	208
7.6.2	Oberflächenrauheit [^]	210
7.7	Eigenspannungen ^K	211
7.8	Formänderungsvermögen -Zähigkeit ^v	212
7.9	Festigkeitsverhalten	216
7.9.1	Statische Festigkeit	216
7.9.2	Schwingfestigkeit > ~	217
7.10	Verschleißverhalten ^{."}	220
7.10.1	Allgemeines	220
7.10.2	Das Verhalten der Verbindungsschicht	220
7.10.3	Das Verhalten der Diffusionsschicht	222
7.11	Korrosionsverhalten	223
7.12	Hinweise für das praktische Durchführen des Nitrierens und Nitrocarburierens	224
7.12.1	Vorbehandlungen	224
7.12.1.1	Vergüten	224
7.12.1.2	Rekristallisationsglühen	224
7.12.1.3	Spannungsarmglühen	224
7.12.2	Reinigen	225
7.12.3	Vorbereiten zum örtlich begrenzten Nitrieren/Nitrocarburieren	226
7.12.4	Mittel zum Nitrieren und Nitrocarburieren	226
7.12.5	Anwendungsbeispiele /	229
7.13	Literaturhinweise	233

8 Borieren und Chromieren : 237

Dieter Liedtke *

8.1	Zweck und Begriffsbestimmung	237
8.2	Borieren	237
8.2.1	Entstehung und Aufbau der Borierschicht	237
8.2.2	Eigenschaften der Boridschicht	240
8.2.2.1	Härte	240
8.2.2.2	Festigkeit	241
8.2.2.3	Formänderungsvermögen, Zähigkeit/Duktilität	242
8.2.2.4	Verschleißverhalten	242
8.2.2.5	Korrosionsverhalten ^{-^}	242
8.3	Hinweise für das praktische Anwenden des Borierens	243
8.3.1	Vorbehandlung	243
8.3.2	Werkstoffauswahl ["]	244
8.3.3	Durchführung des Borierens	244
8.3.4	Nachbehandeln und Nachbearbeiten	246
8.4	Chromieren	246
8.4.1	Entstehung und Aufbau der Chromierschicht	246
8.4.2	Eigenschaften chromierter Werkstücke	248
8.4.3	Hinweise für das Anwenden und Durchführen des Chromierens	249
8.5	Literaturhinweise	250

9 Glühen-
Grundlagen und praktische Durchführung
Franz Wendl

- 9.1 Einleitung
- 9.2 Dehydrieren
- 9.3 Spannungsarmglühen ^ , ,
- 9.4 Rekristallisationsglühen
- 9.5 Weichglühen
- 9.6 Glühen auf kugelige Carbide (GKZ-Glühen)
- 9.7 Normalglühen ~ ->
- 9.8 Diffusionsglühen
- 9.9 Literaturhinweise

10 Fehler nach dem Glühen, Härten, Anlassen
Peter Sommer

- 10.1 Einleitung
- 10.2 Fehlerbild: Schlechte Bearbeitbarkeit
- 10.2.1 Schlechte Bearbeitbarkeit durch wärmebehandlungsfremde Ursache
- 10.2.2 Schlechte Bearbeitbarkeit durch Wärmebehandlungsfehler
- 10.2.3 Schlechte Bearbeitbarkeit durch Kommunikationsfehler
- 10.3 Fehlerbild: Zu niedrige Härte
- 10.3.1 Zu geringe Härte durch wärmebehandlungsfremde Ursachen
- 10.3.2 Zu geringe Härte durch wärmebehandlungsbedingte Ursachen
- 10.3.2.1 Temperaturfehler
- 10.3.2.2 Zeitfehler
- 10.3.2.3 Atmosphärenfehler
- 10.3.2.4 Fehler beim Abschrecken
- 10.3.3 Zu niedrige Härte durch Kommunikationsfehler
- 10.4 Fehlerbild: Zu hohe Härte
- 10.4.1 Zu hohe Härte durch wärmebehandlungsfremde Ursachen
- 10.4.2 Zu hohe Härte durch wärmebehandlungsbedingte Ursachen
- 10.4.3 Zu hohe Härte durch Kommunikationsfehler
- 10.5 Fehlerbild: Verzug, Maßänderung, Rissbildung
- 10.5.1 Verzug, Maßänderung und Rissbildung durch wärmebehandlungsfremde Ursachen ^
- 10.5.2 Verzug, Maßänderung und Rissbildung durch wärmebehandlungsbedingte Ursachen
- 10.5.3 Verzug, Maßänderung und Rissbildung durch Kommunikationsfehler
- 10.6 Sonstige Fehlerbilder
- 10.7 Literaturhinweise

11	Fehler nach dem Einsatzhärten, Randschichthärten und Nitrieren	295
	Peter Sommer	
11.1	Einleitung	295
11.2	Fehler beim Einsatzhärten	295
11.2.1	Fehler bei der Auftragsplanung	295
11.2.2	Fehler bei der Auswahl der Prozessgrößen	297
11.2.3	Fehler bei der Vorbehandlung	299
11.2.4	Chargierfehler	300
11.2.5	Fehler beim; Messen der Prozessgrößen	301
11.2.6	Sonstige Fehler beim Einsatzhärten	302
11.3	Fehler beim Randschichthärten	304
11.4	Fehler beim Nitrieren und Nitrocarburieren	307
11.4.1	Fehler durch wärmebehandlungsfremde Ursachen	307
11.4.2	Fehler durch wärmebehandlungsbedingte Ursachen	310
11.5	Literaturhinweise	311
12	Prüfen des wärmebehandelten Zustands	313
	Egon Welsch, Dieter Liedtke	
12.1	Vorbemerkung	313
12.2	Sichtkontrolle	314
12.3	Härtemessung	314
12.3.1	Das Rockwell-Verfahren nach DIN EN ISO 6508-1	317
12.3.2	Das Vickers-Verfahren nach DIN EN ISO 6507-1	319
12.3.3	Das Brinell-Verfahren nach DIN EN ISO 6506-1	322
12.3.4	Das Knoop-Verfahren	326
12.3.5	Fehler beim Härtemessen mit Eindring-Prüfkörpern	326
12.4	Härtetiefe	327
12.4.1	Einhärtungs-Härtetiefe (SHD) nach DIN EN 10328	328
12.4.2	Einsatzhärtungs-Härtetiefe (CHD), nach DIN EN ISO 2639	329
12.4.3	Nitrier-Härtetiefe (Nht) nach DIN 50190-3	329
12.5	Messen von Schichtdicken	330
12.5.1	Dicke der Verbindungsschicht nach Nitrieren oder Nitrocarburieren	330
12.5.2	Dicke der Diffusionsschicht nach Nitrieren oder Nitrocarburieren	330
12.5.3	Aufkohlungstiefe (At)	331
12.6	Untersuchung des Gefügestands	331
12.7	Bruchprobe und Makroschliff	336
12.8	Literaturhinweise	336

13	Wärmebehandlungsangaben in Zeichnungen und Fertigungsunterlagen	337
	Dieter Liedtke	
13.1	Zweck der Wärmebehandlungsangaben	337
13.2	Was ist unter Wärmebehandlungsangaben zu verstehen?	337
13.3	Die Zeichnungsangaben.	339
13.3.1	Angabe des Wärmebehandlungszustands	339
13.3.2	Angabe der Härte	340
13.3.3	Angabe der Härtetiefe	343
13.3.3.1	Härtetiefe nach Randschichthärten	343
13.3.3.2	Härtetiefe nach dem Einsatzhärten	345
13.3.3.3	Härtetiefe nach dem Nitrieren oder Nitrocarburieren	347
13.3.4	Messstelle	348
13.3.5	Örtlich begrenztes Wärmebehandeln	349
13.3.6	Wärmebehandlungsbild	350
13.4	Angaben in Fertigungsunterlagen	351
13.5	Literaturhinweise	352
	 Sachregister	 355