

Wärmebehandlung

Grundlagen und Anwendungen für Eisenwerkstoffe

Dr.-Ing. Dieter Liedtke
Ing. (grad.) Rolf Jönsson

3., durchgesehene Auflage

Mit 421 Bildern, 92 Tabellen und 516 Literaturstellen



Kontakt & Studium
Band 349

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Wilfried J. Bartz
Technische Akademie Esslingen
Weiterbildungszentrum
DI Elmar Wippler
expert verlag

expert  verlag

Inhaltsverzeichnis

Herausgeber-Vorwort

Autoren-Vorwort

1	Verhalten der Eisenwerkstoffe unter dem Einfluß der Zeit-Temperatur-Folge beim Wärmebehandeln	1
	D. Liedtke	
1.1	Aufbau und Gefüge der Eisenwerkstoffe	1
1.1.1	Reines Eisen	1
1.1.2	Eisenlegierungen	4
1.2	Definitionen der Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	6
1.3	Das Eisen-Kohlenstoff-Zustands-Schaubild	7
1.4	Einfluß der Legierungselemente auf die Umwandlungsvorgänge	13
1.5	Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit	14
1.6	Schaubilder zur Beschreibung technischer Wärmebehandlungen	16
1.6.1	Das Zeit-Temperatur-Austenitisier(ZTA)-Schaubild	16
1.6.2	Das Zeit-Temperatur-Umwandlungs(ZTU)-Schaubild	18
1.6.3	Einfluß der Legierungselemente auf das Umwandlungsverhalten	23
1.7	Literaturhinweise	24
2	Härten, Anlassen, Vergüten, Bainitisieren	25
	D. Liedtke	
2.1	Zweck des Härten, Begriffsbestimmung	25
2.2	Allgemeines zum Verfahrensablauf	26
2.2.1	Austenitisieren	26
2.2.2	Abkühlen/Abschrecken	28
2.2.3	Tiefkühlen	34
2.3	Eigenschaften im gehärteten Zustand	35
2.3.1	Härte	35
2.3.2	Festigkeit	36
2.3.3	Formänderungsvermögen	36
2.3.4	Maß- und Formänderungsverhalten	37

2.4	Anlassen und Vergüten	39
2.4.1	Zweck des Anlassens/Vergütens	39
2.4.2	Der Anlaßvorgang	40
2.4.3	Vom Anlassen bewirkte Eigenschaftsänderungen	40
2.4.4	Anlaßverhalten	42
2.5	Bainitisieren	44
2.5.1	Vorgänge im Werkstoff	44
2.5.2	Eigenschaften bainitisierter Bauteile	45
2.6	Literaturhinweise	46
3	Härtbarkeit – Beurteilung der Eignung zum Härten	47
	D. Liedtke	
3.1	Begriffsbestimmung	47
3.2	Ermitteln der Härbarkeit	49
3.3	Bedeutung der Härbarkeit für die Stahlauswahl	52
3.4	Anwendung der Ergebnisse des Stirnabschreckversuchs auf Bauteile	53
3.5	Anwendung der Stirnabschreckkurven zur Stahlauswahl	56
3.5.1	Direkte Methode	56
3.5.2	Indirekte Methode mittels Betriebsversuchen	58
3.6	Beurteilung der Härbarkeit mittels ZTU-Schaubildern	59
3.7	Übersicht über die Härbarkeit verschiedener Stähle	60
3.8	Hinweise zum Vergüten	61
3.9	Literaturhinweise	62
4	Praktische Hinweise zum Härten, Anlassen und Vergüten von Bauteilen und Werkzeugen	63
	R. Jönsson	
4.1	Vorbehandlung	63
4.1.1	Abbau von Spannungen	63
4.1.2	Verbessern des Ausgangsgefüges durch Härten und Anlassen	63
4.1.3	Rekristallisationsglühen	64
4.1.4	Vorbereiten der Oberfläche	64
4.2	Härten	65
4.2.1	Härteanlagen und Wärmemittel	65
4.2.2	Überprüfung des Härtegutes vor dem Härten	69
4.2.3	Vorbereiten zum Härten	70
4.2.4	Austenitisieren	70
4.2.5	Abschrecken	73

4.3	Anlassen	76
4.4	Besondere Hinweise für die Wärmebehandlung der verschiedenen Stahlsorten	77
4.4.1	Vergütungsstähle	77
4.4.2	Unlegierte Werkzeugstähle	79
4.4.3	Legierte Werkzeugstähle mit geringer Härbarkeit	79
4.4.4	Wälzlager- und Kaltarbeitsstähle mit 1,0–1,5 % Chrom	79
4.4.5	Legierte Kaltarbeitsstähle mit Härtetemperaturen über 900°C	80
4.4.6	Warmarbeitsstähle mit Härtetemperaturen über 900°C	81
4.4.7	Schnellarbeitsstähle	84
4.5	Literaturhinweise	85
5	Randschichthärten	86
	R. Jönsson	
5.1	Allgemeines	86
5.2	Übersicht über die Methoden zum Erwärmen	86
5.3	Das Abschrecken	89
5.4	Verfahrensbeschreibung	89
5.4.1	Induktionshärten	89
5.4.2	Flammhärten	94
5.4.3	Plasmastrahlhärten	94
5.4.4	Tauchhärten	94
5.4.5	Strahlhärten	95
5.4.5.1	Laserstrahlhärten	95
5.4.5.2	Elektronenstrahlhärten	95
5.4.6	Reibhärten	96
5.5	Bedeutung der verschiedenen Verfahren in der Praxis	96
5.6	Werkstoffzustand nach dem Randschichthärten	97
5.7	Hinweise zur Werkstoffauswahl	99
5.8	Arbeitsweise beim Flamm- und Induktionshärten	100
5.8.1	Vorschubhärten	100
5.8.2	Umlaufvorschubhärten	101
5.8.3	Umlaufhärten	103
5.8.4	Vorschubschlupfhärten	105
5.8.5	Aufsetzhärten	106
5.8.6	Randschichthärten von Zahnrädern	107
5.8.6.1	Umlaufhärten	107
5.8.6.2	Zahnlückenhärten	108
5.8.6.3	Einzelzahnhärtung	108
5.9	Temperaturmessung	109
5.10	Härtemaschinen	109

5.11	Brenner und Induktoren	109
5.11.1	Induktoren	109
5.11.2	Brenner	112
5.12	Zeichnungsangaben	115
5.13	Literaturhinweise	115
6	Glühen von Eisenwerkstoffen	117
	D. Liedtke	
6.1	Einleitung	117
6.2	Glühverfahren mit einer Umwandlung nach Austenitisieren	120
6.2.1	Normalglühen oder Normalisieren	120
6.2.2	Grobkornglühen	123
6.2.3	Diffusionsglühen und Diffusionsbehandeln	124
6.2.4	Stabilglühen	124
6.2.5	Tempern	125
6.3	Glühen mit Temperaturen unterhalb Ac_3 bzw. um Ac_1	125
6.3.1	Weichglühen und Glühen auf kugelige Carbide (GKZ-Glühen)	125
6.3.2	Rekristallisationsglühen, Erholungsglühen	131
6.3.3	Spannungsarmglühen	136
6.3.4	Dehydrieren	137
6.4	Literaturhinweise	137
7	Aufkohlen, Carbonitrieren, Einsatzhärten	139
	D. Liedtke	
7.1	Zweck und Begriffsbestimmung	139
7.2	Aufkohlen	139
7.2.1	Der Aufkohlungsvorgang	139
7.2.2	Aufkohlungsmittel	143
7.2.2.1	Feste Aufkohlungsmittel	143
7.2.2.2	Salzschmelzen	145
7.2.2.3	Gase	147
7.2.2.3.1	Allgemeines	147
7.2.3	Berechnung der Aufkohlungstiefe bzw. -dauer	149
7.2.4	Regelung des Aufkohlungsvorgangs	152
7.2.4.1	Pulver und Granulat	152
7.2.4.2	Salzschmelzen	153
7.2.4.3	Gase	153
7.2.4.3.1	Zusammenhang zwischen Gaszusammensetzung und C-Pegel	153

7.2.4.3.2	Messen des Taupunktes	154
7.2.4.3.3	Messen des CO ₂ -Gehaltes	155
7.2.4.3.4	Messen des Sauerstoffgehaltes	156
7.2.4.3.5	Hinweise zur Aufkohlungsregelung	157
7.3	Carbonitrieren	158
7.4	Härten	159
7.4.1	Direkthärten	161
7.4.2	Einfachhärten	161
7.4.3	Härten nach isothermischem Umwandeln in der Perlitstufe	161
7.4.4	Doppelhärten	162
7.4.5	Warmbadhärten	162
7.5	Tiefkühlen	163
7.6	Anlassen einsatzgehärteter Werkstücke	164
7.7	Eigenschaften einsatzgehärteter Werkstücke	164
7.7.1	Härte und Härteverlauf	164
7.7.2	Festigkeitsverhalten	166
7.7.3	Verschleißverhalten	168
7.7.4	Formänderungsvermögen, Zähigkeit	168
7.7.5	Maß- und Formänderungen	169
7.8	Möglichkeiten zum örtlich begrenzten Einsatzhärten	169
7.9	Literaturhinweise	170
8	Nitrieren und Nitrocarburieren	171
	D. Liedtke	
8.1	Zweck und Begriffsbestimmung	171
8.2	Die Wechselwirkung zwischen Eisen, Stickstoff und Kohlenstoff	172
8.3	Nitrier- und Nitrocarburiermittel	173
8.3.1	Nitriermittel	173
8.3.2	Nitrocarburiermittel	175
8.3.2.1	Gase zum Nitrocarburieren	175
8.3.2.2	Salzschmelzen zum Nitrocarburieren	175
8.3.2.3	Pulver zum Nitrocarburieren	176
8.3.2.4	Plasmanitrocarburieren	176
8.4	Wirkung der Aufstickung auf das Gefüge	176
8.5	Aufbau und Zusammensetzung der Nitrierschicht	177
8.5.1	Die Verbindungsschicht	177
8.5.2	Die Diffusionsschicht	182
8.6	Eigenschaften nitrierter und nitrocarburierter Werkstoffe	186
8.6.1	Härte	186
8.6.2	Festigkeit	192
8.6.3	Verschleißverhalten	193

8.6.4	Korrosionsverhalten	195
8.7	Hinweise für die Anwendung des Nitrierens und Nitrocarburierens von Bauteilen und Werkzeugen	196
8.7.1	Formänderungsvermögen – Zähigkeit/Duktilität	196
8.7.2	Maß- und Formänderungen	197
8.7.3	Änderung der Oberflächenrauheit	198
8.7.4	Wärmebehandlung vor dem Nitrieren/Nitrocarburieren	199
8.7.5	Sauberkeit der Oberfläche	200
8.7.6	Behandlungsparameter	200
8.7.7	Örtlich begrenztes Nitrieren/Nitrocarburieren	201
8.8	Anwendungsbeispiele	202
8.9	Literaturhinweise	205
9	Borieren und Chromieren	206
	D. Liedtke	
9.1	Zweck und Begriffsbestimmung	206
9.2	Allgemeines zur Durchführung der thermochemischen Behandlung	206
9.3	Borieren	207
9.3.1	Aufbau und Wachstum der Borierschicht	207
9.3.2	Härte der Boridschicht	210
9.3.3	Eigenschaften borierter Werkstücke	211
9.3.3.1	Festigkeit	211
9.3.3.2	Formänderungsvermögen, Zähigkeit/Duktilität	211
9.3.3.3	Verschleißverhalten	212
9.3.3.4	Korrosionsverhalten	212
9.3.4	Hinweise für die Anwendung des Borierens	213
9.3.4.1	Vorbehandlung	213
9.3.4.2	Werkstoffauswahl	214
9.3.5	Durchführung des Borierens	214
9.3.6	Nachbehandlung/Nachbearbeitung	216
9.4	Chromieren	217
9.4.1	Schichtaufbau und Schichtwachstum	217
9.4.2	Eigenschaften chromierter Werkstücke	218
9.4.3	Hinweise für die Anwendung und Durchführung des Chromierens	219
9.5	Literaturhinweise	220

10	Prüfen des wärmebehandelten Zustands	221
	D. Liedtke	
10.1	Vorbemerkung	221
10.2	Die Härtemessung	221
10.2.1	Das Rockwell-Verfahren nach DIN 50 103	224
10.2.2	Das Vickers-Verfahren nach DIN 50 133	226
10.2.3	Das Brinell-Verfahren nach DIN 50 351	229
10.2.4	Das Knoop-Verfahren	233
10.2.5	Fehler bei Härtemessungen mit Eindringprüfkörpern	233
10.3	Härtetiefe	233
10.3.1	Einsatzhärtungstiefe (Eht)	234
10.3.2	Einhärtungstiefe (Rht)	235
10.3.3	Nitrierhärtetiefe (Nht)	235
10.4	Schichtdickenmessung	236
10.4.1	Verbindungsschichtdicke	236
10.4.2	Diffusionsschichtdicke	237
10.4.3	Aufkohlungstiefe	237
10.5	Untersuchung des Gefügestands	238
10.6	Bruchprobe und Makroschliff	241
10.7	Sichtkontrolle	242
10.8	Literaturhinweise	242
11	Wärmebehandlungsangaben in Zeichnungen und Fertigungsplänen	243
	Gehärtete, vergütete, bainitisierte, geglühte Werkstücke	
	D. Liedtke	
11.1	Zweck der Wärmebehandlungsangaben	243
11.2	Woraus bestehen die Wärmebehandlungsangaben?	243
11.3	Die Zeichnungsangaben	244
11.3.1	Angabe des Wärmebehandlungszustands	245
11.3.2	Angabe der Härte	245
11.3.3	Meßstelle	246
11.3.4	Örtlich begrenztes Wärmebehandeln	246
11.3.5	Wärmebehandlungsbild	247
11.4	Angaben in Fertigungsunterlagen	247
11.5	Literaturhinweise	248

12	Wärmebehandlungsangaben in Zeichnungen und Fertigungsplänen	249
	Randschichtgehärtete, einsatzgehärtete, nitrierte oder nitrocarburierete Werkstücke	
	D. Liedtke	
12.1	Zweck der Wärmebehandlungsangaben	249
12.2	Woraus bestehen die Wärmebehandlungsangaben?	249
12.3	Die Zeichnungsangaben	251
12.3.1	Angabe des Wärmebehandlungszustands	251
12.3.2	Angabe der Härte	252
12.3.3	Härtetiefe	253
12.3.3.1	Härtetiefe nach Randschichthärten	253
12.3.3.2	Härtetiefe nach Einsatzhärten	259
12.3.3.3	Härtetiefe nach Nitrieren oder Nitrocarburieren	260
12.3.4	Prüfstelle	262
12.3.5	Örtlich begrenztes Wärmebehandeln	263
12.3.6	Wärmebehandlungsbild	264
12.4	Angaben in Fertigungsunterlagen	264
12.5	Literaturhinweise	265
13	Hinweise zum Erkennen von Fehlern und Vermeiden von Ausschuß	266
	Härten und Anlassen von Bauteilen und Werkzeugen	
	R. Jönsson	
13.1	Allgemeines	266
13.2	Fehler: Ungenügende Härte	266
13.2.1	Das ganze Werkstück ist zu weich	267
13.2.1.1	Stahlverwechslung	267
13.2.1.2	Härtetemperatur zu niedrig oder zu hoch	268
13.2.1.3	Austenitisierdauer zu kurz	269
13.2.1.4	Abkühlgeschwindigkeit zu gering	269
13.2.1.5	Legierungsfehler bei der Stahlerzeugung	269
13.2.1.6	Schmiede- und Glühfehler	270
13.2.1.7	Nach dem Härten zu hoch oder zu lange angelassen	271
13.2.2	Weichhaut	271
13.2.2.1	Guß-, Walz-, Schmiede-, Ziehhaut ungenügend abgearbeitet	271
13.2.2.2	Nach der Bearbeitung bei der Wärmebehandlung entkohlt	271
13.2.2.3	Restaustenit in der Randschicht	272
13.2.2.4	Perlit- oder Bainitanteile in der Randschicht	272
13.2.2.5	Randoxidation	273

13.2.2.6	Schleifbrand	273
13.2.3	Weichfleckigkeit	273
13.2.3.1	Zieh-, Walz- oder Schmiedehaut ungenügend abgearbeitet	273
13.2.3.2	Dampfblasenbildung beim Abschrecken	274
13.2.3.3	Störung des Abkühlverlaufes durch die Härtevorrichtung	274
13.2.3.4	Thermische Richtstellen	274
13.2.3.5	Lokaler Schleifbrand	274
13.2.3.6	Stahlfehler	274
13.3	Risse	276
13.3.1	Übersicht	276
13.3.2	Einflußgrößen durch die Konstruktion	277
13.3.2.1	Stahlauswahl	277
13.3.2.1.1	Kohlenstoffgehalt	
13.3.2.1.2	Sonstige Legierungselemente	278
13.3.2.1.3	Werkstoffgüte	279
13.3.2.2	Formgestaltung	279
13.3.3	Einflußgrößen aus der Härterei	281
13.3.3.1	Wärmgeschwindigkeit	281
13.3.3.2	Wärmemittel	281
13.3.3.3	Härtetemperatur und Haltedauer	282
13.3.3.4	Abschrecken, Abkühlmittel	282
13.3.3.5	Anlassen	283
13.3.4	Einflüsse der Bearbeitung	283
13.3.4.1	Zerspanende Bearbeitung (vor dem Härten)	284
13.3.4.2	Richten	284
13.3.4.3	Schleifen	284
13.3.4.4	Funkenerosive Bearbeitung	285
13.4	Zusammenfassung	286
13.5	Literaturhinweise	287
14	Hinweise zum Erkennen von Fehlern und Vermeiden von Ausschuß	288
	Randschichthärten, Einsatzhärten, Nitrieren und Nitrocarburieren	
	R. Jönsson	
14.1	Allgemeines	288
14.2	Fehler an randschichtgehärteten Werkstücken	288
14.2.1	Ungenügende Härte, Weichfleckigkeit	288
14.2.2	Einhärtungstiefe Rht außerhalb des zulässigen Streubereichs	290
14.2.3	Risse	290
14.2.4	Brüche im Zeitfestigkeitsbereich	293
14.2.5	Zu große Maß- und Formänderungen – Verzug	294

14.2.6	Fehlerhafte Oberfläche	294
14.3	Fehler an einsatzgehärteten Werkstücken	294
14.3.1	Zu niedrige Härte – Weichhaut – Weichfleckigkeit	294
14.3.2	Zu hohe Härte in nicht aufgekohlten Bereichen	300
14.3.3	Einsatzhärtungstiefe außerhalb des zulässigen Streubereichs	301
14.3.4	Risse	302
14.3.5	Zu niedrige Festigkeit	304
14.3.6	Zu große Maß- und Formänderungen – Verzug	305
14.3.7	Fehlerhafte Oberfläche	306
14.4	Fehler an nitrierten/nitrocarburierten Werkstücken	307
14.4.1	Zu niedrige Härte	307
14.4.2	Zu geringe Zähigkeit – Risse	309
14.4.3	Zu große Maß- und Formänderungen – Verzug	310
14.4.4	Oberflächen- und Randschichtfehler	311
14.5	Literaturhinweise	313

Sachregister

Autorenverzeichnis