

Handbuch Hochtemperatur- Werkstofftechnik

**Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen,
Hochtemperaturlegierungen**

Mit 246 Abbildungen und 65 Tabellen

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	V
Zeichen und Einheiten.....	XIII
Abkürzungen.....	XVI
1 Grundlagen.....	1
1.1 Einführung.....	1
1.2 Thermodynamische und kinetische Grundlagen.....	3
1.2.1 Temperatur und thermische Energie.....	3
1.2.2 Grundbegriffe der Thermodynamik und Kinetik von Reaktionen.....	5
1.2.3 Thermodynamische Triebkraft AG.....	5
1.2.4 Reaktionskinetik.....	9
1.3 Diffusion.....	11
1.3.1 Mechanismen und Gesetzmäßigkeiten.....	11
1.3.1.1 Interstitielle Diffusion.....	12
1.3.1.2 Reguläre Gitterdiffusion.....	15
1.3.2 Diffusion in Substitutionsmischkristallen.....	20
1.3.3 Diffusion entlang von Gitterfehlern.....	22
1.3.3.1 Diffusion entlang von Versetzungen.....	22
1.3.3.2 Diffusion entlang von Korngrenzen.....	23
1.3.4 Diffusion in geordneten Gittern.....	25
1.4 Grundlagen der Wärmeübertragung.....	26
1.4.1 Begriffe.....	26
1.4.2 Wärmedurchgang durch eine Wand.....	27
2 Gefügestabilität.....	38
2.1 Erholung.....	39
2.2 Rekristallisation.....	43
2.2.1 Allgemeines.....	43
2.2.2 Kinetik der Rekristallisation.....	44
2.2.3 Mechanismen und Gesetzmäßigkeiten der Rekristallisation ...	46
2.3 Kornvergrößerung.....	57

2.4	Ausscheidungsverfahren.....	64
2.4.1	Allgemeines.....	64
2.4.2	Energiebilanz bei Ausscheidungsverfahren.....	67
2.5	Teilchenvergrößerung/Ostwald-Reifung.....	75
2.6	Gefügebedingte Volumenänderungen.....	85
3	Statische Festigkeit und Verformung, Kriechen.....	88
3.1	Allgemeines.....	88
3.2	Grundlagen der Hochtemperaturverformung.....	89
3.3	Kriechen.....	94
3.3.1	Kriechkurve.....	95
3.3.2	Darstellungsformen der Kriech- und Zeitstanddaten und Aspekte der Bauteilauslegung.....	99
3.4	Versetzungskriechen.....	104
3.4.1	Mikrostrukturelle Interpretation.....	104
3.4.2	Gesetzmäßigkeiten des Versetzungskriechens.....	107
3.4.2.1	Spannungsabhängigkeit.....	107
3.4.2.2	Temperaturabhängigkeit.....	111
3.4.2.3	Abhängigkeiten von Werkstoffparametern.....	114
3.5	Kornrenzengleiten.....	118
3.6	Diffusionskriechen.....	121
3.7	Verformungsmechanismuskarten.....	126
3.8	Kriechen von Legierungen.....	130
3.8.1	Mischkristallhärtung.....	130
3.8.1.1	Direkte Wechselwirkungen Fremdatome/Versetzungen.....	131
3.8.1.2	Veränderung von Werkstoffparametern durch Fremdatome.....	135
3.8.2	Teilchenhärtung.....	136
3.8.2.1	Mechanismen und Gesetzmäßigkeiten.....	136
3.8.2.2	Besonderheiten dispersionsgehärteter Legierungen.....	145
3.8.2.3	Hoch γ' -haltige Ni-Basislegierungen.....	148
3.8.2.4	Kriechkurvenverlauf teilchengehärteter Legierungen.....	149
3.8.3	Kriechen geordneter intermetallischer Phasen.....	150
3.9	Bruchmechanismuskarten.....	151
3.10	Kriechschädigung und Kriechbruch.....	154
3.10.1	Transkristalline Kriechschädigung.....	155
3.10.2	Interkristalline Kriechschädigung.....	155
3.10.2.1	Kriechrissinitiierung.....	158
3.10.2.2	Kriechrisswachstum.....	166
3.10.3	Tertiäres Kriechen.....	169
3.11	Einfluss der Kornform auf die Zeitstandeigenschaften.....	170

3.12	Kriechverhalten von Einkristallen.....	173
3.13	Extrapolation von Zeitstandergebnissen.....	174
3.14	Zeitstandfestigkeitsnachweis bei veränderlichen Beanspruchungen..	180
3.15	Spannungsrelaxation.....	181
3.16	Kerbzeitstandverhalten.....	187
3.76	Entwicklung und Auswahl kriechfester Legierungen.....	195
4	Zyklische Festigkeit und Verformung, Ermüdung.....	201
4.1	Begriffe und Einführung.....	201
4.2	Ermüdung bei tiefen Temperaturen.....	209
4.3	Ermüdung bei hohen Temperaturen.....	214
4.4	Schädigung und Bruch unter zyklischen Belastungen.....	222
4.5	Lebensdauerabschätzung für zyklische Belastungskollektive.....	223
4.6	Lebensdauerabschätzung für kombinierte Kriech- und Ermüdungsbeanspruchung.....	225
4.7	Thermische Ermüdung.....	231
4.7.1	Einführung und Definition.....	231
4.7.2	Wärmedehnungen und Wärmespannungen.....	233
4.7.3	Prüftechniken zur thermischen Ermüdung.....	244
4.7.4	Einflussgrößen auf die Thermoermüdung.....	249
4.7.4.1	Wärmeausdehnungskoeffizient.....	249
4.7.4.2	Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit ...	250
4.7.4.3	Elastizitätsmodul.....	251
4.7.4.4	Korngröße.....	254
4.7.4.5	Mechanische Eigenschaften.....	254
4.7.4.6	Konstruktive und geometrische Einflüsse.....	255
4.7.4.7	Korrosionsbeständigkeit.....	256
4.7.4.8	Zusammenfassung der Einflussgrößen auf die thermische Ermüdung.....	256
5	Hochtemperaturkorrosion.....	259
5.1	Begriffe.....	259
5.2	Thermodynamik der Metall/Gas-Reaktionen.....	260
5.3	Oxidation.....	266
5.3.1	Einführung und Begriffe.....	266
5.3.2	Kinetik der Oxideckschichtbildung.....	266
5.3.3	Mechanismen des Deckschichtwachstums.....	272
5.3.4	Oxidation von Legierungen.....	277
5.3.5	Deckschichten auf Legierungen.....	279
5.3.6	Zyklisches Oxidationsverhalten.....	284
5.3.7	Haftung von Deckschichten und Aktivelementeffekte.....	287
5.3.8	Plastisches Verhalten von Oxideckschichten.....	290
5.3.9	Korngrenzenzerfall (<i>Pest</i>).....	291

5.3.10	Zundergrenze.....	291
5.4	Aufkohlung.....	293
5.4.1	Allgemeines.....	293
5.4.2	Besondere Erscheinungsformen der Aufkohlung.....	297
5.4.2.1	<i>MetalDusting</i>	297
5.4.2.2	Grünfäule.....	299
5.5	Entkohlung.....	300
5.6	Aufstickung.....	301
5.7	Aufschwefelung.....	303
5.8	Heißgaskorrosion.....	306
5.8.1	Begriffe und Einführung.....	306
5.8.2	Korrosive Substanzen bei Verbrennungsprozessen.....	308
5.8.3	Prüfmethoden.....	311
5.8.4	Mechanismen der Heißgaskorrosion.....	313
5.8.4.1	Allgemeines.....	313
5.8.4.2	Niedertemperatur- (Typ II-) Heißgaskorrosion.....	316
5.8.4.3	Hochtemperatur- (Typ I-) Heißgaskorrosion.....	320
5.8.4.4	Einflüsse weiterer Elemente.....	326
5.8.5	Zusammenfassung und Aspekte der Werkstoffwahl.....	328
5.9	Erosion-Korrosion-Wechselwirkungen.....	332
5.10	Korrosionsbedingte Volumenänderungen.....	332
5.11	Wechselwirkungen zwischen Korrosion und mechanischen Eigenschaften.....	333
6	Hochtemperaturlegierungen.....	339
6.1	Definition und Anwendungsgebiete.....	339
6.2	Beanspruchungen und Werkstoffanforderungen.....	339
6.3	Auswahlkriterien für Basiselemente und Übersicht über Hochtemperatur-Werkstoffgruppen.....	342
6.4	Hochtemperaturlegierungen auf Fe-Basis.....	347
6.4.1	Übersicht.....	347
6.4.2	Hitzebeständige Stähle.....	350
6.4.3	Warmfeste Stähle.....	354
6.4.4	Hochwarmfeste Stähle.....	355
6.5	Hochtemperaturlegierungen auf Co-Basis.....	362
6.5.1	Allgemeines und Vergleich.....	362
6.5.2	Legierungsaufbau, Gefüge und Eigenschaften.....	363
6.6	Hochtemperaturlegierungen auf Ni-Basis.....	367
6.6.1	Allgemeines und Vergleich.....	367
6.6.2	Phasen in Ni-Basislegierungen.....	373
6.6.2.1	Der γ -Mischkristall.....	373
6.6.2.2	Die γ' -Phase.....	374
6.6.2.3	Karbide.....	384
6.6.2.4	TCP-Phasen und Phaseninstabilitäten.....	385

6.6.2.5	Weitere Phasen.....	389
6.6.3	Wärmebehandlung /-gehärteter Ni-Basislegierungen.....	391
6.6.3.1	Allgemeines.....	391
6.6.3.2	Ausgangswärmebehandlung.....	392
6.6.3.3	Heiß-isostatisches Pressen (HIP).....	404
6.6.3.4	Regenerierende Wärmebehandlung.....	404
6.6.4	Korrosionseigenschaften.....	405
6.7	Gerichtet erstarrte Superlegierungen.....	405
6.7.1	Allgemeines.....	405
6.7.2	Herstellung.....	407
6.7.2.1	Prinzip der gerichteten Erstarrung.....	407
6.7.2.2	Verfahrensparameter und Gefügefehler.....	411
6.7.2.3	Mikroseigerungsverhalten bei der Erstarrung.....	416
6.7.3	Besondere Eigenschaften gerichtet erstarrter Legierungen.....	420
6.8	Gerichtet rekristallisierte Dispersions-Superlegierungen.....	425
6.8.1	Allgemeines.....	425
6.8.2	Legierungstypen.....	427
6.8.3	Herstellung.....	427
6.8.4	Rekristallisation.....	429
6.8.5	Legierungsaufbau und besondere Eigenschaften.....	432
6.8.6	Blechlegierungen.....	433
6.8.7	Korrosions- und Beschichtungsverhalten.....	434
6.9	Hochschmelzende Legierungen.....	436
6.9.1	Allgemeines.....	436
6.9.2	Festigkeitssteigerung und Legierungsaufbau.....	439
6.10	Intermetallische Phasen als Konstruktionswerkstoffe.....	439
6.10.1	Allgemeines.....	439
6.10.2	Klassifizierung der intermetallischen Phasen.....	440
6.10.3	Besondere Eigenschaften der intermetallischen Phasen.....	444
6.10.4	Potenzielle intermetallische Konstruktionswerkstoffe.....	446
6.11	Edelmetalllegierungen.....	452
6.12	Verunreinigungen und Reinheitsgradverbesserung.....	452
6.12.1	Allgemeines.....	452
6.12.2	Einflüsse von Verunreinigungen auf die Eigenschaften.....	453
6.12.3	Maßnahmen zur Reinheitsgradverbesserung.....	457
6.13	Vergleich von Hochtemperaturwerkstoffen und Aspekte der Werkstoffwahl.....	459
7	Hochtemperaturbeschichtungen.....	467
7.1	Hochtemperatur-Korrosionsschutzschichten.....	467
7.1.1	Funktion.....	467
7.1.2	Beanspruchungen und Anforderungen.....	468
7.1.3	Aufbringverfahren.....	469
7.1.3.1	CVD-Verfahren.....	471

7.1.3.2	PVD-Verfahren.....	476
7.1.3.3	Thermische Spritzverfahren.....	477
7.1.3.4	Plattieren.....	481
7.1.4	Beschichtungsarten und Eigenschaften.....	481
7.1.4.1	Diffusionsschichten.....	482
7.1.4.2	Auflageschichten.....	484
7.1.5	Thermisch-mechanisches Verhalten beschichteter Bauteile.....	490
7.1.5.1	Wärmespannungen in Werkstoffverbunden.....	490
7.1.5.2	Physikalische und mechanische Eigenschaften von Beschichtungen.....	494
7.1.5.3	Thermozyklisches Verhalten.....	498
7.2	Wärmedämmschichten.....	502
7.2.1	Funktion.....	502
7.2.2	Anforderungen.....	507
7.2.3	Aufbringverfahren für Keramikschichten.....	508
7.2.4	Arten und Eigenschaften.....	508
7.2.4.1	Keramikschichten.....	509
7.2.4.2	Haftschichten.....	514
8	Maßnahmen an betriebsbeanspruchten Bauteilen.....	518
8.1	Zustandsbeurteilungen.....	518
8.2	Rekonditionierungsmaßnahmen.....	526
	Literatur.....	529
	Anhang	
	Chemische Zusammensetzungen von Hochtemperaturlegierungen.....	543
	Handelsnamen.....	550
	Werkstoffverzeichnis.....	551
	Sachwortverzeichnis.....	555