
Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Zeichen und Einheiten	XIII
Abkürzungen	XVII
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 ΔG	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	Ausscheidungs Vorgänge	64
2.4.1	Allgemeines	64
2.4.2	Energiebilanz bei Ausscheidungs Vorgängen	67
2.5	Teilchenvergrößerung/Ostwald-Reifung	75
2.6	Gefügebedingte Volumenänderungen	85
3	Hochtemperaturfestigkeit und -verformung	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	Korngrenzgleiten	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	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 thermische Ermüdung	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 Oxiddeckschichtbildung	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 Oxiddeckschichten	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>Metal Dusting</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.....	351
6.4.3	Warmfeste Stähle.....	355
6.4.4	Hochwarmfeste Stähle.....	356
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.....	368
6.6.1	Allgemeines und Vergleich.....	368
6.6.2	Mikroseigerungsverhalten bei der Erstarrung.....	374
6.6.3	Phasen in Ni-Basislegierungen.....	378
6.6.3.1	Der γ -Mischkristall.....	378
6.6.3.2	Die γ' -Phase.....	380
6.6.3.3	Karbide.....	391

6.6.3.4	TCP-Phasen und Phaseninstabilitäten	393
6.6.3.5	Weitere Phasen	398
6.6.4	Wärmebehandlung γ' -gehärteter Ni-Basislegierungen	400
6.6.4.1	Allgemeines	400
6.6.4.2	Ausgangswärmebehandlung	401
6.6.4.3	Heiß-isostatisches Pressen (HIP)	415
6.6.4.4	Regenerierende Wärmebehandlung	417
6.6.5	Korrosionseigenschaften	417
6.7	Gerichtet erstarrte Superlegierungen	419
6.7.1	Allgemeines	419
6.7.2	Herstellung	420
6.7.2.1	Prinzip der gerichteten Erstarrung	420
6.7.2.2	Verfahrensparameter und Gefügefehler	423
6.7.3	Besondere Eigenschaften gerichtet erstarrter Legierungen ..	430
6.7.4	Rekristallisation gerichtet erstarrter Bauteile	435
6.8	Gerichtet rekristallisierte Dispersions-Superlegierungen	438
6.8.1	Allgemeines	438
6.8.2	Legierungstypen	440
6.8.3	Herstellung	440
6.8.4	Rekristallisation	442
6.8.5	Legierungsaufbau und besondere Eigenschaften	445
6.8.6	Blechlegierungen	446
6.8.7	Korrosions- und Beschichtungsverhalten	447
6.9	Hochschmelzende Legierungen	449
6.9.1	Allgemeines	449
6.9.2	Festigkeitssteigerung und Legierungsaufbau	452
6.10	Intermetallische Phasen als Konstruktionswerkstoffe	452
6.10.1	Allgemeines	452
6.10.2	Klassifizierung der intermetallischen Phasen	453
6.10.3	Besondere Eigenschaften der intermetallischen Phasen	457
6.10.4	Potenzielle intermetallische Konstruktionswerkstoffe	459
6.11	Edelmetalllegierungen	467
6.12	Verunreinigungen und Reinheitsgradverbesserung	468
6.12.1	Allgemeines	468
6.12.2	Einflüsse von Verunreinigungen auf die Eigenschaften	468
6.12.3	Maßnahmen zur Reinheitsgradverbesserung	472
6.13	Vergleich von Hochtemperaturwerkstoffen und Aspekte der Werkstoffwahl	474
7	Hochtemperaturbeschichtungen	483
7.1	Hochtemperatur-Korrosionsschutzschichten	483
7.1.1	Funktion	483
7.1.2	Beanspruchungen und Anforderungen	484
7.1.3	Aufbringverfahren	485

7.1.3.1	CVD-Verfahren	487
7.1.3.2	PVD-Verfahren	492
7.1.3.3	Thermische Spritzverfahren	493
7.1.3.4	Plattieren	497
7.1.4	Beschichtungsarten und Eigenschaften	497
7.1.4.1	Diffusionsschichten	498
7.1.4.2	Auflageschichten	500
7.1.5	Thermisch-mechanisches Verhalten beschichteter Bauteile	506
7.1.5.1	Wärmespannungen in Werkstoffverbunden	506
7.1.5.2	Physikalische und mechanische Eigenschaften von Beschichtungen	510
7.1.5.3	Thermozyklisches Verhalten	514
7.2	Wärmedämmschichten	518
7.2.1	Funktion	518
7.2.2	Anforderungen	523
7.2.3	Aufbringverfahren für Keramiksichten	524
7.2.4	Arten und Eigenschaften	524
7.2.4.1	Keramiksichten	525
7.2.4.2	Haftschichten	530
8	Maßnahmen an betriebsbeanspruchten Bauteilen	534
8.1	Zustandsbeurteilungen	534
8.2	Rekonditionierungsmaßnahmen	542
Literatur	545
Anhänge		
Anhang 1:	Berechnung von Volumenanteilen der γ' -Phase	561
Anhang 2:	Chemische Zusammensetzungen	565
Anhang 3:	Handelsnamen	572
Werkstoffverzeichnis	573
Sachwortverzeichnis	577