

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort.....</b>	<b>V</b>
<b>Zeichen und Einheiten.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Abkürzungen.....</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Grundlagen.....</b>	<b>1</b>
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 $\Delta G$ .....	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 .....	23
1.3.3.2 Diffusion entlang von Korngrenzen .....	24
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.....	28
<b>2 Gefügestabilität.....</b>	<b>38</b>
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
<b>3</b>	<b>Hochtemperaturfestigkeit und -verformung</b>	<b>88</b>
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	Korngrenzengleiten	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	134
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 $\gamma$ -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	Kriechrissschädigung	158
3.10.2.2	Kriechrissschädigung	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 .....	179
3.15	Spannungsrelaxation .....	181
3.16	Kerbzeitstandverhalten .....	188
3.17	Entwicklung und Auswahl kriechfester Werkstoffe .....	195
<b>4</b>	<b>Zyklische Festigkeit und Verformung .....</b>	<b>201</b>
4.1	Begriffe und Einführung .....	201
4.2	Ermüdung bei tiefen Temperaturen .....	209
4.3	Ermüdung bei hohen Temperaturen .....	213
4.4	Schädigung und Bruch unter zyklischen Belastungen .....	222
4.5	Lebensdauerabschätzung für zyklische Belastungskollektive .....	223
4.6	Lebensdauerabschätzung für kombinierte Kriech- und Ermüdungsbeanspruchung .....	224
4.7	Thermische Ermüdung .....	231
4.7.1	Einführung und Definition .....	231
4.7.2	Wärmedehnungen und Wärmespannungen .....	234
4.7.3	Prüftechniken zur thermischen Ermüdung .....	245
4.7.4	Einflussgrößen auf die thermische Ermüdung .....	250
4.7.4.1	Wärmeausdehnungskoeffizient .....	250
4.7.4.2	Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit .....	250
4.7.4.3	Elastizitätsmodul .....	252
4.7.4.4	Korngröße .....	255
4.7.4.5	Mechanische Eigenschaften .....	255
4.7.4.6	Konstruktive und geometrische Einflüsse .....	256
4.7.4.7	Korrosionsbeständigkeit .....	257
4.7.4.8	Zusammenfassung der Einflussgrößen auf die thermische Ermüdung .....	257
<b>5</b>	<b>Hochtemperaturkorrosion .....</b>	<b>260</b>
5.1	Begriffe .....	260
5.2	Thermodynamik der Metall/Gas-Reaktionen .....	261
5.3	Oxidation .....	267
5.3.1	Einführung und Begriffe .....	267
5.3.2	Kinetik der Oxideckschichtbildung .....	267
5.3.3	Mechanismen des Deckschichtwachstums .....	273
5.3.4	Oxidation von Legierungen .....	278
5.3.5	Deckschichten auf Legierungen .....	280
5.3.6	Zyklisches Oxidationsverhalten .....	285
5.3.7	Haftung von Deckschichten und Aktivelementeffekte .....	288
5.3.8	Plastisches Verhalten von Oxideckschichten .....	291
5.3.9	Korngrenzenzerfall ( <i>Pest</i> ) .....	292

5.3.10	Zundergrenze.....	292
5.4	Aufkohlung.....	294
5.4.1	Allgemeines .....	294
5.4.2	Besondere Erscheinungsformen der Aufkohlung.....	298
5.4.2.1	<i>Metal Dusting</i> .....	298
5.4.2.2	Grünfäule .....	300
5.5	Entkohlung.....	301
5.6	Aufstickung .....	302
5.7	Aufschwefelung .....	304
5.8	Heißgaskorrosion.....	307
5.8.1	Begriffe und Einführung .....	307
5.8.2	Korrosive Substanzen bei Verbrennungsprozessen .....	309
5.8.3	Prüfmethoden .....	312
5.8.4	Mechanismen der Heißgaskorrosion.....	314
5.8.4.1	Allgemeines .....	314
5.8.4.2	Niedertemperatur- (Typ II-) Heißgaskorrosion .....	317
5.8.4.3	Hochtemperatur- (Typ I-) Heißgaskorrosion .....	321
5.8.4.4	Einflüsse weiterer Elemente.....	327
5.8.5	Zusammenfassung und Aspekte der Werkstoffwahl .....	329
5.9	Erosion-Korrosion-Wechselwirkungen .....	333
5.10	Korrosionsbedingte Volumenänderungen .....	334
5.11	Wechselwirkungen zwischen Korrosion und mechanischen Eigenschaften .....	335
<b>6</b>	<b>Hochtemperaturlegierungen.....</b>	<b>340</b>
6.1	Definition und Anwendungsgebiete .....	340
6.2	Beanspruchungen und Werkstoffanforderungen .....	340
6.3	Auswahlkriterien für Basiselemente und Übersicht über Hochtemperatur-Werkstoffgruppen .....	343
6.4	Hochtemperaturlegierungen auf Fe-Basis.....	348
6.4.1	Übersicht.....	348
6.4.2	Hitzebeständige Stähle.....	352
6.4.3	Warmfeste Stähle .....	356
6.4.4	Hochwarmfeste Stähle.....	357
6.5	Hochtemperaturlegierungen auf Co-Basis .....	363
6.5.1	Allgemeines und Vergleich .....	363
6.5.2	Legierungsaufbau, Gefüge und Eigenschaften .....	364
6.6	Hochtemperaturlegierungen auf Ni-Basis .....	369
6.6.1	Allgemeines und Vergleich .....	369
6.6.2	Mikroseigerungsverhalten bei der Erstarrung .....	375
6.6.3	Phasen in Ni-Basislegierungen.....	380
6.6.3.1	Der $\gamma$ -Mischkristall .....	380
6.6.3.2	Die $\gamma'$ -Phase.....	381
6.6.3.3	Karbide .....	392

6.6.3.4	TCP-Phasen und Phaseninstabilitäten .....	394
6.6.3.5	Weitere Phasen .....	399
6.6.4	Wärmebehandlung $\gamma$ -gehärteter Ni-Basislegierungen .....	401
6.6.4.1	Allgemeines .....	401
6.6.4.2	Ausgangswärmebehandlung .....	402
6.6.4.3	Heiß-isostatisches Pressen (HIP) .....	416
6.6.4.4	Regenerierende Wärmebehandlung .....	418
6.6.5	Korrosionseigenschaften .....	418
6.7	Gerichtet erstarrte Superlegierungen .....	420
6.7.1	Allgemeines .....	420
6.7.2	Herstellung .....	421
6.7.2.1	Prinzip der gerichteten Erstarrung .....	421
6.7.2.2	Verfahrensparameter und Gefügefehler .....	424
6.7.3	Besondere Eigenschaften gerichtet erstarrter Legierungen .....	431
6.7.4	Rekristallisation gerichtet erstarrter Bauteile .....	436
6.8	Gerichtet rekristallisierte Dispersions-Superlegierungen .....	439
6.8.1	Allgemeines .....	439
6.8.2	Legierungstypen .....	441
6.8.3	Herstellung .....	441
6.8.4	Rekristallisation .....	443
6.8.5	Legierungsaufbau und besondere Eigenschaften .....	446
6.8.6	Blechlegierungen .....	447
6.8.7	Korrosions- und Beschichtungsverhalten .....	448
6.9	Hochschmelzende Legierungen .....	450
6.9.1	Allgemeines .....	450
6.9.2	Festigkeitssteigerung und Legierungsaufbau .....	453
6.9.3	Aktuelle Entwicklungen .....	453
6.10	Intermetallische Phasen als Konstruktionswerkstoffe .....	455
6.10.1	Allgemeines .....	455
6.10.2	Klassifizierung der intermetallischen Phasen .....	456
6.10.3	Besondere Eigenschaften der intermetallischen Phasen .....	460
6.10.4	Potenzielle intermetallische Konstruktionswerkstoffe .....	462
6.11	Edelmetalllegierungen .....	469
6.12	Verunreinigungen und Reinheitsgradverbesserung .....	470
6.12.1	Allgemeines .....	470
6.12.2	Einflüsse von Verunreinigungen auf die Eigenschaften .....	471
6.12.3	Maßnahmen zur Reinheitsgradverbesserung .....	475
6.13	Vergleich von Hochtemperaturwerkstoffen und Aspekte der Werkstoffwahl .....	476
<b>7</b>	<b>Hochtemperaturbeschichtungen .....</b>	<b>485</b>
7.1	Hochtemperatur-Korrosionsschutzschichten .....	485
7.1.1	Funktion .....	485
7.1.2	Beanspruchungen und Anforderungen .....	486

7.1.3	Aufbringverfahren .....	487
7.1.3.1	CVD-Verfahren .....	489
7.1.3.2	PVD-Verfahren .....	494
7.1.3.3	Thermische Spritzverfahren .....	495
7.1.3.4	Plattieren .....	499
7.1.4	Beschichtungsarten und Eigenschaften .....	499
7.1.4.1	Diffusionsschichten .....	500
7.1.4.2	Auflageschichten .....	502
7.1.5	Thermisch-mechanisches Verhalten beschichteter Bauteile .....	508
7.1.5.1	Wärmespannungen in Werkstoffverbunden .....	508
7.1.5.2	Physikalische und mechanische Eigenschaften von Beschichtungen .....	512
7.1.5.3	Thermozyklisches Verhalten .....	516
7.2	Wärmedämmschichten .....	520
7.2.1	Funktion .....	520
7.2.2	Anforderungen .....	525
7.2.3	Aufbringverfahren für Keramikschichten .....	526
7.2.4	Arten und Eigenschaften .....	526
7.2.4.1	Keramikschichten .....	527
7.2.4.2	Haftschichten .....	532
<b>8</b>	<b>Maßnahmen an betriebsbeanspruchten Bauteilen .....</b>	<b>535</b>
8.1	Zustandsbeurteilungen .....	535
8.2	Rekonditionierungsmaßnahmen .....	543
	<b>Literatur .....</b>	<b>546</b>
	<b>Anhänge</b>	
	Anhang 1: Berechnung von Volumenanteilen der $\gamma$ -Phase .....	562
	Anhang 2: Chemische Zusammensetzungen .....	566
	Anhang 3: Handelsnamen .....	573
	<b>Werkstoffverzeichnis .....</b>	<b>574</b>
	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>578</b>