

Metallografie

Mit einer Einführung in die Keramografie

Herausgegeben von

Heinrich Oettel und Hermann Schumann t

15. überarbeitete und erweiterte Auflage



WILEY-
VCH

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Inhaltsverzeichnis

1	Strukturen anorganischer Werkstoffe (Metalle und Keramiken)	1
1.1	Klassifizierung und allgemeine Charakteristika anorganischer Werkstoffe	1
1.2	Grundeigenschaften der anorganischen Werkstoffe	4
1.2.1	Metallische Werkstoffe	4
1.2.2	Keramische Werkstoffe	7
1.3	Kristalliner Aufbau anorganischer Werkstoffe (Kristallografie)	7
1.3.1	Gitterpunkte	13
1.3.2	Gittergeraden	14
1.3.3	Netzebenen (Gitterebenen)	14
1.3.4	Elementarzellenvolumen	15
1.3.5	Kristallformen	15
1.4	Chemische Bindung und Koordination, typische Kristallstrukturen	16
1.4.1	Metallische Bindung und Strukturen metallischer Werkstoffe	16
1.4.1.1	Strukturen metallischer Elemente	16
1.4.1.2	Intermetallische Verbindungen	19
1.4.1.3	Einlagerungsphasen (Intermediäre Phasen)	23
1.4.2	Kovalente Bindung (Atombindung)	24
1.4.3	Ionenbindung	26
IAA	Mischbindungen	29
1.5	Mischkristalle und Überstrukturen	30
1.5.1	Metalle	30
1.5.1.1	Substitutionsmischkristalle	32
1.5.1.2	Einlagerungsmischkristalle	34
1.5.1.3	Subtraktionsmischkristalle	36
1.5.2	Keramische Werkstoffe	37
1.6	Polymorphie, Polytypie	37
1.7	Kristallbaufehler	39
1.7.1	Klassifizierung von Kristallbaufehlern	39
1.7.2	Punktdefekte	40
1.7.2.1	Leerstellen	40
1.7.2.2	Zwischengitteratome	42
1.7.2.3	Fremdatome	42

- 1.7.3 Versetzungen 42
- 1.7.4 Flächendefekte 46
 - 1.7.4.1 Stapelfehler 47
 - 1.7.4.2 Antiphasengrenzen 48
 - 1.7.4.3 Subkornengrenzen 49
- 1.7.5 Volumendefekte 49
 - 1.7.5.1 Ausscheidungen 49
 - 1.7.5.2 Mikroporen 50
- 1.8 Amorphe Materialien, Gläser 50
- 1.9 Gefüge von Werkstoffen 52
 - 1.9.1 Gefügebegriff, innere Grenzflächen 52
 - 1.9.2 Gefügebildende Prozesse 55
 - 1.9.3 Gefügeelemente, Gefügebestandteile und Gefügetypen 57
- 1.10 Kristallografische Beziehungen 60

- 2 Metallografische Arbeitsverfahren 62
 - 2.1 Ziel und Methoden metallografischer Untersuchungen 61
 - 2.2 Lichtmikroskopie 62
 - 2.2.1 Optische Grundlagen 62
 - 2.2.1.1 Polarisation 64
 - 2.2.1.2 Brechung 65
 - 2.2.1.3 Absorption und Reflexion 68
 - 2.2.1.4 Interferenz und Beugung 71
 - 2.2.1.5 Linsen 72
 - 2.2.2 Aufbau und Wirkungsweise von Auflichtmikroskopen 74
 - 2.2.2.1 Optische Elemente von Auflichtmikroskopen 74
 - 2.2.2.2 Zur Theorie der mikroskopischen Abbildung 79
 - 2.2.2.3 Abbildungsfehler 83
 - 2.2.3 Verfahren der Auflichtmikroskopie 85
 - 2.2.3.1 Hellfeldabbildung 86
 - 2.2.3.2 Dunkelfeldabbildung 87
 - 2.2.3.3 Phasenkontrastverfahren 89
 - 2.2.3.4 Polarisationsmikroskopie 90
 - 2.2.3.5 Interferenzmikroskopie 91
 - 2.2.3.6 Interferenzschichtenmikroskopie 94
 - 2.2.3.7 Mikroskopie mit konfokaler Abbildung 96
 - 2.2.3.8 Stereomikroskopie 101
 - 2.2.4 Dokumentation mikroskopischer Befunde 102
 - 2.2.4.1 Verfahrensauswahl 204
 - 2.2.4.2 Digitale Videografie 105
 - 2.3 Präparation 117
 - 2.3.1 Anschliffvorbereitung 129
 - 2.3.1.1 Probenahme 119
 - 2.3.1.2 Einfassen 128
 - 2.3.2 Anschliffherstellung 132

- 2.3.2.1 Allgemeines zu metallografischen Abtragsverfahren, zum Schleifen und mechanischen Polieren 132
- 2.3.2.2 Grundlagen der Mikrospanung 135
- 2.3.2.3 Schleifen 146
- 2.3.2.4 Mechanisches Polieren 162
- 2.3.2.5 Weitere spanende Abtragsverfahren 177
- 2.3.2.6 Chemisch-mechanisches Polieren 178
- 2.3.2.7 Elektrochemischer Metallabtrag 282
- 2.3.3 Auswahl der Präparationsmethoden 291
- 2.3.3.1 Methodenauswahl nach mechanischen Präparationseigenschaften 293
- 2.3.3.2 Vor-Ort-Metallografie 297
- 2.3.4 Kontrastierung 200
- 2.3.4.1 Chemisches und elektrochemisches Ätzen 203
- 2.3.4.2 Physikalische Kontrastierung 220
- 2.4 Besonderheiten bei der Präparation von keramischen Werkstoffen 224
- 2.4.1 Vorbemerkungen 224
- 2.4.2 Trennen 225
- 2.4.3 Einfassen 226
- 2.4.4 Anschliffherstellung 227
- 2.4.5 Kontrastieren 230
- 2.5 Quantitative Gefügeanalyse 233
- 2.5.1 Einleitung 233
- 2.5.2 Geometrische Gefügekenngößen 234
- 2.5.3 Methoden der Bildverarbeitung und -analyse 239
- 2.5.4 Kennwerte von Schnittprofilen 247
- 2.5.5 Messung der Grundparameter 252
- 2.5.6 Teilchengößenverteilungen 263
- 2.6 Röntgenverfahren 264
- 2.6.1 Raumgitterinterferenzen 264
- 2.6.2 Ein- und Vielkristallinterferenzen 267
- 2.6.3 Vielkristalldiffraktometrie 269
- 2.6.4 Anwendungen der Röntgendiffraktometrie 273
- 2.6.4.1 Röntgenografische Phasenanalyse 273
- 2.6.4.2 Röntgenografische Untersuchung von Mischkristallen 274
- 2.6.4.3 Röntgenografische Korngrößenbestimmung 275
- 2.6AA Ermittlung von Versetzungsdichten 277
- 2.6.4.5 Texturen 277
- 2.7 Rasterelektronenmikroskopie und Elektronenstrahlmikroanalyse 279
- 2.7.1 Wechselwirkung beschleunigter Elektronen mit Materie 279
- 2.7.2 Rasterelektronenmikroskopie 283
- 2.7.3 Elektronenstrahlmikroanalyse 286
- 2.8 Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) 290
- 2.8.1 Grundlagen der Transmissionselektronenmikroskopie 290
- 2.8.2 Elektronenbeugung 292
- 2.8.3 Elektronenmikroskopische Kontraste 294

- 2.8.4 Probenpräparation 297
- 2.8.5 Analytische TEM 299
- 2.9 Rastersondenmikroskopie 300
- 2.10 Gefügetomografie 302
 - 2.10.1 Einleitung 302
 - 2.10.2 Tomografische Verfahren in Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 301
 - 2.10.2.1 Durchstrahlende Verfahren 303
 - 2.10.2.2 Röntgentomografie 304
 - 2.10.2.3 Neutronentomografie 305
 - 2.10.2.4 Elektronentomografie 305
 - 2.10.2.5 Serienschmitttechniken 305
 - 2.10.2.6 Atomsondentomografie 306
 - 2.10.3 FIB-Gefügetomografie 307
 - 2.10.3.1 Der Sputterprozess im FIB 308
 - 2.10.3.2 Abbildung im FIB 308
 - 2.10.3.3 Zweistrahl-FIB/REM-Mikroskope 309
 - 2.10.3.4 Serienschmitttechnik im FIB-Mikroskop 309
 - 2.10.3.5 Probenvorbereitung für die FIB-Gefügetomografie 310
 - 2.10.3.6 Anwendungsbeispiele 311
- 2.11 Akustische Mikroskopie 315
- 2.12 Mikrohärte 327
 - 2.12.1 Konventionelle Mikrohärtemessung 318
 - 2.12.2 Registrierende Härtemessung 326
 - 2.12.3 Anwendungen der Mikrohärtemessungen 327
- 2.13 Gefügeuntersuchungen bei hohen Temperaturen 332

- 3 Phasengleichgewichte und Zustandsdiagramme 341
 - 3.1 Thermodynamische Grundlagen 341
 - 3.1.1 Legierungen, Phasen und Phasengleichgewichte 342
 - 3.1.2 Zur Thermodynamik von Mischkristallen 349
 - 3.1.3 Diffusion 353
 - 3.2 Grundvorstellungen zu Zustandsdiagrammen 358
 - 3.3 Einkomponentensysteme 363
 - 3.4 Zweikomponentensysteme (binäre Zustandsdiagramme) 365
 - 3.4.1 Legierungen mit unbegrenzter Löslichkeit im festen Zustand 365
 - 3.4.2 Legierungen mit Mischungslücken im festen Zustand 372
 - 3.4.2.1 Entmischung, Ordnung und Bildung intermetallischer Phasen in Mischkristallen 372
 - 3.4.2.2 Eutektische Systeme 374
 - 3.4.2.3 Peritektische Systeme 384
 - 3.4.2.4 Eutektoide und peritektoide Umwandlungen 388
 - 3.4.3 Mischungslücken im flüssigen Zustand 393
 - 3.4.4 Komplexe Zustandsdiagramme 398
 - 3.4.5 Zustandsdiagramme keramischer Systeme 402

- 3.5 Grundvorstellungen über Dreistofflegierungen (ternäre Systeme) 404
 - 3.5.1 Grafische Darstellung der Zusammensetzung von Dreistofflegierungen 404
 - 3.5.2 Hebelgesetz bei ternären Legierungen 406
 - 3.5.3 Ternäre Zustandsdiagramme 407
 - 3.5.4 Isotherme und Temperatur-Konzentrations-Schnitte 422
- 3.6 Arten und Kinetik von Phasenumwandlungen 428
 - 3.6.1 Systematik der Phasenumwandlungen 428
 - 3.6.2 Diffusionskontrollierte Phasenumwandlungen 420
 - 3.6.3 Martensitische Phasenumwandlungen 428
 - 3.6.4 Zeit-Temperatur-Diagramme 433
- 3.7 Verfahren zur Bestimmung von Zustandsdiagrammen 436
 - 3.7.1 Thermoanalyse 437
 - 3.7.2 Dilatometrie 441

- 4 Einfluss der Verarbeitung und Behandlung auf die Gefügeausbildung von Metallen und Legierungen 445
 - 4.1 Gießen von Metallen 445
 - 4.1.1 Zustand metallischer Schmelzen 445
 - 4.1.2 Erstarrungsprozess 446
 - 4.1.3 Gussgefüge 455
 - 4.1.4 Seigerungen 463
 - 4.1.5 Lunker 474
 - 4.1.6 Gasblasen 477
 - 4.1.7 Fremdeinschlüsse 480
 - 4.2 Plastische Formgebung und Rekristallisation von Metallen 482
 - 4.2.1 Kaltumformung 482
 - 4.2.1.1 Spannungs-Dehnungs-Diagramm 482
 - 4.2.1.2 Verformung durch Gleiten 484
 - 4.2.1.3 Verformung durch Zwillingsbildung 491
 - 4.2.1.4 Härtungsmechanismen 492
 - 4.2.1.5 Vergleich zwischen Einkristall- und Vielkristallplastizität 494
 - 4.2.1.6 Kornstreckung und Verformungstexturen 495
 - 4.2.1.7 Eigenschaftsänderungen durch Kaltumformung 497
 - 4.2.2 Entfestigungsvorgänge 497
 - 4.2.2.1 Kristallerholung 498
 - 4.2.2.2 Primäre Rekristallisation 498
 - 4.2.2.3 Kornwachstum 499
 - 4.2.2.4 Einfluss technischer Rekristallisationsvorgänge auf die Gefügebildung 500
 - 4.2.3 Warmumformung 505
 - 4.3 Oberflächenbehandlungen 516
 - 4.3.1 Grundlegende Verfahren zur Oberflächenbehandlung 526
 - 4.3.2 Beschichtungsverfahren 519

- 4.3.2.1 Beschichtungsverfahren mit atomarer Deposition des Beschichtungsmaterials 519
- 4.3.2.2 Beschichtungsverfahren mit makroskopischen Depositionen des Schichtmaterials 527
- 4.3.3 Schmelztauchen 527
- 4.3.4 Randschichtbehandlungen 530
 - 4.3.4.1 Chemisch-thermische Behandlungen 530
 - 4.3.4.2 Energetische Randschichtbehandlungen 540
- 5 Eisen und Eisenlegierungen 545
 - 5.1 Roheisen- und Stahlherstellung im Überblick 545
 - 5.2 Gefüge des reinen Eisens und der Eisenlegierungen 547
 - 5.2.1 Reines Eisen 549
 - 5.2.2 Eisen-Kohlenstoff-Legierungen 552
 - 5.3 Polymorphe Phasenumwandlungen 566
 - 5.3.1 Umwandlungen beim Erwärmen 566
 - 5.3.2 Umwandlungen beim Abkühlen 573
 - 5.3.2.1 Allgemeine Betrachtungen 573
 - 5.3.2.2 Erstarrung 574
 - 5.3.2.3 Perlitbildung 576
 - 5.3.2.4 Martensitbildung 590
 - 5.3.2.5 Bainitbildung 597
 - 5.4 Thermische Verfahren der Gefügebeeinflussung 601
 - 5.4.1 Fertigungsgerechte werkstoffunabhängige Verfahren 602
 - 5.4.1.1 Rekristallisierendes Glühen 602
 - 5.4.1.2 Sphäroidisierendes Glühen 606
 - 5.4.1.3 Grobkorn- und Diffusionsglühen 622
 - 5.4.2 Fertigungsgerechte werkstoffspezifische Verfahren 616
 - 5.4.2.1 Normalglühen 616
 - 5.4.2.2 Glühen auf bestimmte Eigenschaften 621
 - 5.4.3 Beanspruchungsgerechte Verfahren 623
 - 5.4.3.1 Vergüten und Bainitisieren 623
 - 5.4.3.2 Normalisierendes Umformen 640
 - 5.4.3.3 Thermomechanisches Umformen 641
 - 5.5 Technische Eisenlegierungen 642
 - 5.5.1 Schweißbare Baustähle 649
 - 5.5.2 Stähle höherer Festigkeit 662
 - 5.5.3 Stähle für tiefe Temperaturen 672
 - 5.5.4 Stähle für hohe Temperaturen 677
 - 5.5.5 Stähle mit besonderen Korrosionseigenschaften 685
 - 5.5.6 Stähle mit besonderen magnetischen Eigenschaften 698
 - 5.5.7 Stähle mit besonderen Verarbeitungseigenschaften 703
 - 5.5.8 Stähle mit besonderen Verschleißseigenschaften 717
 - 5.5.9 Gusseisen 732

6	Cefüge der technischen Nichteisenmetalle und ihrer Legierungen	749
6.1	Kupfer und seine Legierungen	749
6.1.1	Reines Kupfer	749
6.1.2	Kupfer-Zink-Legierungen	753
6.1.2.1	Gefüge der α -Legierungen	754
6.1.2.2	Gefüge der $(\alpha + \beta')$ -Legierungen	755
6.1.2.3	Gefüge der β' -Legierungen	756
6.1.2.4	Einfluss von Wärmebehandlungen auf die Gefüge von $(\alpha + \beta')$ -Legierungen	757
6.1.3	Mehrstofflegierungen	764
6.1.4	Kupfer-Zinn-Legierungen	770
6.1.5	Kupfer-Aluminium-Legierungen und Mehrstofflegierungen	775
6.1.5.1	Gefüge binärer Kupfer-Aluminium-Legierungen	775
6.1.5.2	Gefüge der Mehrstofflegierungen	778
6.1.6	Kupfer-Zinn-Blei-Legierungen	785
6.1.7	Kupfer-Nickel-Legierungen und Mehrstofflegierungen	787
6.2	Nickel und seine Legierungen	789
6.2.1	Reines Nickel	789
6.2.2	Nickellegierungen	790
6.2.2.1	Hochwarmfeste Legierungen	790
6.2.2.2	Hitze - und korrosionsbeständige Legierungen	798
6.2.2.3	Formgedächtnislegierungen	800
6.2.2.4	Spannungselastische Martensitumwandlung und Pseudoelastizität	802
6.2.2.5	Thermoelastische Martensitumwandlung und Formgedächtniseffekte	803
6.3	Cobalt und seine Legierungen	803
6.3.1	Reines Cobalt	803
6.3.2	Cobaltlegierungen	804
6.4	Zink und seine Legierungen	808
6.4.1	Reines Zink	808
6.4.2	Zinklegierungen	820
6.5	Aluminium und Aluminiumlegierungen	825
6.5.1	Reines Aluminium	825
6.5.2	Aluminium-Silicium-Legierungen	828
6.5.3	Aluminium-Magnesium-Legierungen und Aluminium-Mangan-Legierungen	823
6.5.3.1	Aluminium-Magnesium-Legierungen	823
6.5.3.2	Aluminium-Mangan-Legierungen	826
6.5.4	Weitere Mehrstofflegierungen	828
6.6	Magnesium und Magnesiumlegierungen	835
6.6.1	Reines Magnesium	835
6.6.2	Magnesiumlegierungen	836
6.6.2.1	Legierungssysteme Mg-Al und Mg-Al-Zn	836
6.6.2.2	Legierungssystem Mg-Al-Mn (AM-Legierungen)	840
6.6.2.3	Legierungssystem Mg-Y-SE-Zr (WE-Legierungen)	841
6.6.2.4	Legierungssysteme Mg-Li, Mg-Li-Al und Mg-Li-Al-SE	842

- 6.7 Titan und Titanlegierungen 843
 - 6.7.1 Reines Titan 843
 - 6.7.2 a- und near a-Legierungen 845
 - 6.7.3 (a + β)-Legierungen 848
 - 6.7.4 Metastabile β -Legierungen 850
 - 6.7.5 Stabile β -Legierungen 851
- 6.8 Weitere Nichteisenmetalllegierungen 851
 - 6.8.1 Lotwerkstoffe 851
 - 6.8.1.1 Weichlote 852
 - 6.8.1.2 Hartlote 857
 - 6.8.2 Gleitlagerwerkstoffe 860
 - 6.8.2.1 Kupferlegierungen 862
 - 6.8.2.2 Blei- und Zinn-Gusslegierungen für Verbundgleitlager 867
 - 6.8.2.3 Aluminiumlegierungen 871

7 Hochleistungskeramik 875

- 7.1 Arten der Hochleistungskeramik 875
- 7.2 Herstellung keramischer Werkstoffe 875
- 7.3 Mechanische Festigkeit keramischer Werkstoffe 878
- 7.4 Materialeigenschaften und Anwendungen 881
 - 7.4.1 Aluminiumoxid 882
 - 7.4.2 Zirkoniumoxid 883
 - 7.4.3 Siliciumcarbid 885
 - 7.4.4 Siliciumnitrid 886

Weiterführende Literatur 887

- Anhang I:** Atomare Parameter technisch wichtiger Metalle und Metalloide (Raumtemperatur) 891
- Anhang II:** Physikalische Eigenschaften technisch wichtiger Metalle und Metalloide 892
- Anhang III:** Angaben von Mengenanteilen (Konzentrationen) in Legierungen 894
- Anhang IV:** Ansetzen von prozentualen Lösungen 896
- Anhang V:** Metallografische Ätzmittel 897

Stichwortverzeichnis 915