
Metalle

Erhard Hornbogen · Hans Warlimont ·
Birgit Skrotzki

Metalle

Struktur und Eigenschaften der
Metalle und Legierungen

7., aktualisierte und überarbeitete Auflage

 Springer Vieweg

Erhard Hornbogen
Ruhr-Universität Bochum
Bochum, Deutschland

Hans Warlimont
Technische Universität Dresden
Dresden, Deutschland

Birgit Skrotzki
Bundesanstalt für Materialforschung und
-prüfung
Berlin, Deutschland

Trotz aller Sorgfalt bei der Verwendung der Bildrechte und deren Abdruck ist es bei der Fülle des hier wiedergegebenen historischen Bildmaterials nicht möglich, alle Urheber zweifelsfrei zu ermitteln. In Zweifelsfällen werden Rechteinhaber gebeten, sich mit dem Verlag in Verbindung zu setzen.

ISBN 978-3-662-57762-2

ISBN 978-3-662-57763-9 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57763-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

Ursprünglich erschienen unter dem Titel: Metallkunde, Aufbau und Eigenschaften von Metallen und Legierungen

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 1967, 1991, 1996, 2001, 2006, 2016, 2019
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur 7. Auflage

Die Metallkunde verbindet die physikalischen und die physikochemischen Grundlagen der Metalle mit ihren Werkstoffeigenschaften. Im vorliegenden, inzwischen bewährten Buch geben wir eine kompakte Einführung in dieses interdisziplinäre Fachgebiet.

Die metallische Bindung und die Eigenschaften der Metalle beruhen auf den Zuständen der freien Elektronen und ihrer hohen Beweglichkeit als Elektronengas zwischen den Atomrümpfen. Aus dem elektronischen Zustand lassen sich dementsprechend die kennzeichnenden Eigenschaften der Metalle ableiten, wie eine dichte Packung der Atome, die elektrische und thermische Leitfähigkeit, der Glanz, die plastische Verformbarkeit und auch die oft geringe chemische Beständigkeit und ihre Folgen, wie die Rostbildung, die Korrosion und die Verzunderung.

Ihre vielfältigen nützlichen Eigenschaften machen die Metalle zur wichtigsten Werkstoffgruppe. Dies gilt auch bei der gemeinsamen Behandlung aller Werkstoffe in der Werkstoffwissenschaft und bei der Werkstoffauswahl für die Anwendung. Der konstruierende Ingenieur wählt denjenigen Werkstoff aus, der für ein Bauteil oder als Funktionswerkstoff die günstigste Eigenschaft oder die optimale Kombination von Eigenschaften bietet. Auch für das grundlegende Verständnis ist eine vergleichende Betrachtung der verschiedenen Werkstoffgruppen oft nützlich. So tritt eine typische Metalleigenschaft wie z. B. die elektrische Leitfähigkeit auch in Polymeren und keramischen Werkstoffen auf, allerdings auf der Basis anderer Leitungsmechanismen. Analog wird Supraleitung nicht nur in Metallen, sondern auch in keramischen Stoffen wie Oxiden, Carbiden, Nitriden und Boriden angetroffen.

Die Metallkunde hat sich während des letzten Jahrhunderts zu einem eigenständigen Fachgebiet entwickelt. In Deutschland war Gustav Tammann, der 1903 bis 1937 in Göttingen lehrte, eine prägende Persönlichkeit. Sein Schüler Werner Köster, der 1935 bis 1969 Direktor des Max-Planck-Instituts für Metallforschung in Stuttgart war, hat uns 1964 zum Schreiben dieses Buches ermutigt.

Die Metallkunde ist nach wie vor ein wachsendes, lebendiges Fach im Rahmen der Werkstoffwissenschaft. Wir hoffen, dass diese grundlegende Darstellung des Aufbaus und der Eigenschaften der Metalle auch in ihrer 7. Auflage weiterhin vielen Lesern als Einführung in das Fach oder zur Auffrischung ihrer Kenntnisse nützlich sein wird.

Nach einer Einführung wird im zweiten Kapitel die Entstehung des festen Zustandes aus der Schmelze behandelt. Die folgenden drei Kapitel beschreiben die verschiedenen Aspekte des atomaren und des mikroskopischen Aufbaus. Darauf aufbauend werden in zwei Kapiteln die makroskopischen physikalischen und die mechanischen Eigenschaften abgeleitet. Zwei Kapitel beschäftigen sich mit Diffusion und Phasenumwandlungen, den Grundlagen der Wärmebehandlung. Das folgende Kapitel gibt eine Übersicht über experimentelle Untersuchungsmethoden mit einem Schwerpunkt bei den mikroskopischen und Beugungsverfahren. Der anschließende Teil des Buches besteht aus acht auf die Werkstoffgruppen und ihre Eigenschaften bezogenen Kapiteln. Nach den Herstellungsmethoden werden Gusslegierungen, Knetlegierungen und pulvermetallurgische Werkstoffe, nach Härtungsmechanismen aushärtbare Legierungen und Stähle dargestellt. Schließlich ist je ein Kapitel den metallischen Magnetwerkstoffen und den technisch bedeutsamen Oberflächeneigenschaften in Zusammenhang mit Korrosion, Reibung und Verschleiß gewidmet. Im letzten Kapitel werden kurz die nichtmetallischen Werkstoffgruppen charakterisiert und im Vergleich und Verbund mit Metallen behandelt.

Wir sind gern der Anregung aus dem Springer-Verlag gefolgt, aufgrund der nach wie vor regen Nachfrage nach diesem Buch eine weitere Auflage zu bearbeiten. Diese wurde gründlich überarbeitet und aktualisiert. Das Kapitel Mechanische Eigenschaften wurde um das mechanische Verhalten bei hoher Temperatur stark erweitert und die einschlägigen Normen der Werkstoffprüfung hinzugefügt. Das Kapitel Erstarrung wurde um die additive (generative) Fertigung ergänzt, die in den letzten Jahren als computerbasiertes Fertigungsverfahren Einzug in die Produktionstechnik gehalten hat.

Das Autorenteam wurde in der 7. Auflage um Prof. B. Skrotzki (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM, Berlin) erweitert.

Im Sommer 2018

Erhard Hornbogen
Hans Warlimont
Birgit Skrotzki

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeiner Überblick	1
1.1	Natur der Metalle	1
1.2	Geschichte und Zukunft der Metalle	4
1.3	Metalle als Werkstoffe	6
1.4	Aufgaben der Metallkunde	10
	Weiterführende Literatur	11
2	Übergang in den festen Zustand	13
2.1	Aggregatzustände	13
2.2	Übergang gasförmig zu kristallin	14
2.3	Übergang flüssig zu kristallin	15
2.4	Keimbildung	17
2.5	Heterogene Keimbildung	20
2.6	Stabile und instabile Grenzflächen	20
2.7	Erstarrung in einer Form	22
2.8	Einkristalle	23
	Weiterführende Literatur	25
3	Strukturen fester Phasen	27
3.1	Bindung und Koordination	27
3.2	Punkte, Richtungen und Ebenen	30
3.3	Stereografische Projektion	35
3.4	Intermetallische Phasen	40
3.5	Anisotropie	43
3.6	Quasikristalline Phasen und Gläser	44
3.7	Bezeichnungen der Kristallstrukturen	47
	Weiterführende Literatur	49
4	Phasengleichgewichte	51
4.1	Grundlagen der heterogenen Gleichgewichte	51
4.2	Mischkristalle, Ordnung, Phasengemische	54

4.3	Zweistoffsysteme	56
4.4	Mehrstoffsysteme	66
	Weiterführende Literatur	68
5	Gitterbaufehler und Gefüge	69
5.1	Überblick	69
5.2	Leerstellen	70
5.3	Versetzungen	72
5.4	Stapelfehler	76
5.5	Korngrenzen	78
5.6	Strahlendefekte und Ionenimplantation	81
5.7	Phasengrenzen, Oberflächen	86
5.8	Das Gefüge	88
5.9	Nanostruktur	90
	Weiterführende Literatur	93
6	Physikalische Eigenschaften	95
6.1	Elektronen in Metallen	95
6.2	Elektrische und thermische Leitfähigkeit	102
6.3	Supraleitung	105
6.4	Gitterschwingungen und spezifische Wärme	107
6.5	Thermische Ausdehnung	110
6.6	Kernphysikalische Eigenschaften	112
6.7	Vielkristalle, Phasengemische, Mischungsregeln	114
	Weiterführende Literatur	117
7	Mechanische Eigenschaften	119
7.1	Überblick	119
7.2	Elastizität	120
7.3	Zugversuch und Härtemessung	123
7.4	Spannungsrelaxation	126
7.5	Struktur und Plastizität	127
7.6	Plastizität von Ein- und Vielkristallen	132
7.7	Zwillingsbildung	136
7.8	Verformungstextur	137
7.9	Bruch	138
7.10	Wechselverformung und Ermüdung	141
7.11	Härtungsmechanismen	146
7.12	Mechanisches Verhalten bei hoher Temperatur	149
	Weiterführende Literatur	162

8	Diffusion und Ausheilreaktionen	165
8.1	Thermisch aktivierte Platzwechsel	165
8.2	Diffusion	168
8.3	Erholung	172
8.4	Rekristallisation	174
	Weiterführende Literatur	178
9	Strukturelle Phasenumwandlungen	181
9.1	Thermodynamische Grundlagen	181
9.2	Instabilität, Keimbildung, Wachstum, Vergrößerung	185
9.3	Umwandlungstypen	190
9.4	Diffusionsbestimmte Umwandlungen	191
9.5	Martensitische und bainitische Umwandlungen	203
	Weiterführende Literatur	210
10	Untersuchungsmethoden der Mikrostruktur	211
10.1	Übersicht	211
10.2	Lichtmikroskopie (LM)	213
10.3	Rasterelektronenmikroskopie (REM)	216
10.4	Fokussierter Ionenstrahl (Focused Ion Beam, FIB)	217
10.5	Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)	217
10.6	Feldionenmikroskopie (FIM) und Atomsondenspektroskopie	220
10.7	Beugung von Röntgenstrahlen (XRD)	222
10.8	Elektronenbeugung (SAD)	224
10.9	Chemische Analyse der Gefügebestandteile (EDX, WDX)	226
10.10	Raster-Tunnel-Mikroskopie (RTM)	227
10.11	Makroskopische Methoden	227
	Weiterführende Literatur	234
11	Erstarrung, Gusswerkstoffe	237
11.1	Metallschmelzen	237
11.2	Bildung von Mischkristallen	240
11.3	Eutektische Erstarrung	243
11.4	Seigerung	245
11.5	Gusslegierungen	246
11.6	Gießen und Schweißen	253
11.7	Metallische Gläser	256
11.8	Additive Fertigungsverfahren	257
	Weiterführende Literatur	260
12	Umformung, Knetlegierungen	263
12.1	Einflüsse von Gefüge, Temperatur und Geschwindigkeit der Verformungsvorgänge	263

12.2	Mechanik der Umformung	265
12.3	Umformverfahren	268
12.4	Knetlegierungen	273
	Weiterführende Literatur	275
13	Pulvermetallurgie	277
13.1	Pulvermetallurgische Verfahren	277
13.2	Sintertheorie	282
13.3	Pulvermetallurgische Werkstoffe	285
	Weiterführende Literatur	289
14	Teilchengehärtete Legierungen	291
14.1	Teilcheneffekte im nm-Bereich	291
14.2	Wechselwirkung von Versetzungen mit Teilchen	293
14.3	Ausscheidungsgefüge	298
14.4	Aushärtbare Aluminiumlegierungen	300
14.5	Weitere aushärtbare Nichteisenmetalllegierungen	301
14.6	Dispersionshärtung	303
14.7	Teilchenhärtung in warmfesten Legierungen	304
	Weiterführende Literatur	307
15	Stähle	309
15.1	Legierungsgruppen und Gleichgewichtssysteme	309
15.2	Umwandlungen, Gefüge, mechanische Eigenschaften	312
15.3	Stahlsorten	319
	Weiterführende Literatur	325
16	Magnetische Werkstoffe	327
16.1	Ferromagnetismus	327
16.2	Magnetisches Werkstoffverhalten	332
16.3	Weichmagnetische Werkstoffe	340
16.4	Hartmagnetische Werkstoffe	344
16.5	Besondere Werkstoffeigenschaften durch magnetische Anomalien	351
16.6	Fortschritte bei Eigenschaften von Magnetwerkstoffen	354
	Weiterführende Literatur	355
17	Korrosion, Verschleiß, Oberflächenbehandlung	357
17.1	Korrosion	357
17.2	Korrosionsschutz	364
17.3	Verzunderung	366
17.4	Reibung und Verschleiß	369
17.5	Oberflächenbehandlung	371
	Weiterführende Literatur	374

18 Werkstoffe im Vergleich und Verbund	375
18.1 Drei Werkstoffgruppen	375
18.2 Verbunde und komplexe Systeme	378
18.3 Simultane Fertigung eines metallischen Verbundwerkstoffs und daraus geformter Teile verbunden mit Recycling in einer kontinuierlichen Verfahrenskombination	382
18.4 Metallische und keramische Supraleiter	383
18.5 Metallische Gläser	390
18.6 Legierungen mit Formgedächtnis, magneto- und elektrostriktive Stoffe .	394
18.7 Seltene Erden	406
Weiterführende Literatur	407
Periodensystem	409
Sachverzeichnis	411