

Werkstoffe des Reaktorbaues

mit besonderer Berücksichtigung
der Metalle

Von

Karl Lintner

Dr. phil., a. o. Professor
II. Physikal. Institut der
Universität Wien

und

Erich Schmid

Dr. phil. Dr. mont. h. c., o. Professor
Ausw. wissenschaftl. Mitglied d. Max Planck-
Instituts für Metallforschung Stuttgart
Vorstand d. II. Physikal. Instituts der
Universität Wien

Mit 405 Abbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1962

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten
Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,
dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege
(Photokopie, Mikrokopie) oder auf andere Art zu vervielfältigen

ISBN 978-3-662-13421-4 ISBN 978-3-662-13420-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-13420-7

© by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1962

Ursprünglich erschienen bei Springer Verlag oHG Berlin Gottigen Heidelberg 1962

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1962

Library of Congress Catalog Card Number: 62-14 308

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw.
in diesem Buche berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der An-
nahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetz-
gebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften

Vorwort

Immer wieder wird von zuständigen Stellen betont, daß die Fortentwicklung des Spaltungsreaktors heute viel mehr von der Lösung der auftretenden schwierigen Werkstoffprobleme abhängt als von der Förderung kernphysikalischer Probleme, die heute im großen und ganzen überblickt werden. Für die Werkstoffkunde und Festkörperphysik sind durch die Forderungen, die der Bau von Spaltungsreaktoren mit sich bringt, zahlreiche, zum Teil völlig neuartige Aufgaben entstanden, deren Bearbeitung in regem Fluß aber noch keineswegs abgeschlossen ist. Bei dieser Sachlage erscheint der Wunsch des Verlages nach einer zusammenfassenden Darstellung der neuen Entwicklungslinien in der Werkstoffkunde und -physik durchaus verständlich. Die an uns gerichtete Einladung zur Abfassung einer solchen Darstellung begegnete sich mit unseren eigenen Absichten, die dahin gingen, die an der Universität Wien und an der Technischen Akademie, Bergisch Land, Wuppertal, gehaltenen Vorträge erweitert zu veröffentlichen und die Grundlagen eines eigenen Forschungsgebiets – der Strahlenbeeinflussung von Metallen – eingehender zu beschreiben. Der Umstand, daß bis dahin keine zusammenfassende Darstellung im deutschen Schrifttum bestand – inzwischen ist die „Werkstoffkunde der Kerntechnik“ von Professor Dr. W. EPPRECHT im Birkhäuser-Verlag erschienen –, bestärkte uns in unserem Vorhaben.

Da ein wichtiger neuer Gesichtspunkt bei der Beurteilung der Reaktorbaustoffe die Notwendigkeit der Berücksichtigung eines Bestrahlungseinflusses ist, wird der Beschreibung der Werkstoffe eine eingehende Darstellung des Einflusses von Korpuskalurbestrahlung auf Materie vorangestellt, wobei die theoretischen Grundlagen und das heute schon sehr breite Beobachtungsmaterial geschildert werden. Von den typischen Reaktorwerkstoffen sind die Brennstoffe die wichtigsten. Bei ihnen handelt es sich um die bisher nur wenig benutzten Metalle Uran und Thorium und um das nur künstlich herstellbare Plutonium. Die Verhüttung der Erze und die Verarbeitung der Metalle wird nur kurz behandelt, wohl aber erfahren ihre Eigenschaften, die wegen der niedrigen Kristallsymmetrie viele und neuartige Besonderheiten aufweisen, eine ausführliche Darlegung. Die Erörterung der weiteren Reaktorbaustoffe ist nach deren Verwendungsart im Reaktor gegliedert. Bei den Moderatoren wird eingehend

Graphit behandelt, aber auch das immer größere Bedeutung erlangende Beryllium wird gewürdigt. Während im Sinne der Neutronenökonomie bei den Moderatoren eine möglichst geringe Absorption thermischer Neutronen im Vordergrund steht, werden zur Herstellung der Regelstäbe umgekehrt besonders stark absorbierende Werkstoffe verwendet. Zur Abführung der Wärme bzw. zu ihrer Übertragung auf den Wärmeaustauscher werden gasförmige und flüssige Kühlmittel verwendet, an welche die mannigfaltigsten Anforderungen gestellt werden, wie günstiges Korrosionsverhalten gegenüber Brennstoff und Konstruktionsmaterial, gute Wärmeübertragung und geringe induzierte Radioaktivität. Für das Konstruktionsmaterial von Behältern, Leitungen usw. ging man zunächst von den bekannten Baustoffen des Maschinenbaus aus, wobei naturgemäß wieder die kernphysikalische Forderung nach geringer Neutronenabsorption im Vordergrund stand, weiterhin von Bedeutung sind günstiges Verhalten gegenüber Brennstoff und Kühlmittel, ausreichende Warmfestigkeit und geringe Aktivierung. Die Entwicklungslinien auf diesem Gebiet werden geschildert, auf neuartige Baustoffe wie Zirkonium und Niob wird des näheren eingegangen und die für die einzelnen Beanspruchungsfälle in Frage kommenden Werkstoffe werden aufgeführt. Das Material der Schutzwände wird nicht besonders behandelt, wohl aber wird fallweise auf die erforderliche Abschirmung der Wärme-, der Neutronen- und γ -Strahlung hingewiesen. In einem einleitenden Kapitel werden die benutzten kernphysikalischen Begriffe erläutert, keineswegs eine ausreichende Einführung in die Kernphysik, wofür auf Standardwerke verwiesen wird. Eine sich anschließende metallkundliche Übersicht bringt, um spätere Überlastungen des Textes zu vermeiden, wichtige Grundtatsachen der Metallkunde, ein Kapitel, das von Metallurgen wohl überschlagen werden kann.

Wenn auch eine vollständige Erfassung der heute kaum mehr übersehbaren Veröffentlichungen auf diesem Gebiet nicht möglich ist, so wurde doch versucht, für die neuen Entwicklungen ausreichende Literaturhinweise zu geben. Als wichtige Fundgruben erwiesen sich dabei außer den zuständigen Fachzeitschriften Berichte von Spezialtagungen, vor allem die der Internationalen Konferenzen für friedliche Verwertung der Atomenergie in Genf und die der amerikanischen Atomenergiekommision. Stets wurde Wert darauf gelegt, das Grundsätzliche und nicht technische Einzelheiten in den Vordergrund zu rücken. Unter den Werkstoffen sind die Metalle wegen ihrer Wichtigkeit besonders bevorzugt.

Das Buch wendet sich an alle an Reaktorfragen Interessierten, insbesondere an die mit der Weiterentwicklung von Reaktoren Beschäftigten, ferner an die Gruppe von Werkstoffachleuten, die auf dem schwierigen aber sehr zukunftsreichen Gebiet der Vervollkommnung der Reaktorwerkstoffe tätig sind.

Es ist uns eine angenehme Pflicht, Frau Professor Dr. B. KARLIK, von der der erste Anstoß zu unserer Beschäftigung mit Reaktorwerkstoffen ausging, hierfür und für zahlreiche fördernde Diskussionen herzlichst zu danken. Unser Dank gilt weiterhin dem Springer-Verlag, der nicht nur für die traditionsreiche gute Ausstattung des Buches gesorgt, sondern auch unseren Vorschlägen auf das freundlichste entsprochen hat.

Wien, im Februar 1962

Die Verfasser

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	1
I. Kernphysikalische Übersicht	1
A. Kernspaltung	2
B. Reaktoren	7
II. Metallkundliche Übersicht	12
A. Gitterbau und seine Auswirkungen	12
B. Plastizität	22
C. Legierungskunde	39
1. Einstoffsysteme	39
2. Zweistoffsysteme	40
3. Mehrstoffsysteme	49
D. Mechanische Technologie	52
E. Aushärtung und Härtung durch Einlagerungen	57
F. Korrosion und Erosion	63
III. Beeinflussung der Festkörpereigenschaften durch Bestrahlung	66
A. Theoretische Übersicht	67
1. Strahleneinwirkung als Stoßvorgang	67
1.1 Stoß von schweren geladenen Teilchen	70
1.2 Stoß von Neutronen	73
1.3 Stoß von schnellen Elektronen	75
1.4 Stoß von γ -Quanten	75
1.5 Stoß von Kernbruchstücken	75
2. Anzahl von FRENKEL-Defekten in bestrahlten Festkörpern	76
3. Störungsbereiche in bestrahlten Festkörpern	77
4. Fremdatomeinlagerung durch Kernreaktionen	80
5. Einfluß von FRENKEL-Defekten auf physikalische Eigenschaften	81
5.1 Elastische Eigenschaften	81
5.2 Spezifischer Widerstand	83
5.3 Neutronenstreuung	84
5.4 Schubfestigkeit von Translationssystemen	85
5.5 Übergangstemperatur zäher Bruch – spröder Bruch	85
6. Erholung	86

	Seite
B. Durchführung der Versuche	88
C. Ergebnisse	90
1. Gitterstruktur und Gefüge	90
1.1 Röntgenographischer Nachweis von Gitterdefekten	90
1.2 Ordnungszustand in Legierungen	95
1.3 Modifikationsänderungen	104
1.4 Aushärtung von Legierungen	107
1.5 Mikrostruktur	113
2. Physikalische und technologische Eigenschaften von Metallen und Legierungen	116
2.1 Dichte	116
2.2 Elastische Eigenschaften und Dämpfung	117
2.3 Spezifischer Widerstand	120
2.4 Weitere physikalische Eigenschaften	127
2.5 Translation	132
2.6 Technologische Eigenschaften	141
2.7 Korrosion und Oberflächenaktivität	150
3. Erholung von den Folgen der Bestrahlung	156
4. Widerstand von Halbleitern	165
5. Physikalische Eigenschaften von Ionenkristallen und Isolatoren ..	172
6. Festigkeitseigenschaften von Hochpolymeren	179
IV. Reaktorwerkstoffe	184
A. Brennstoffe	185
1. Uran	186
1.1 Vorkommen	186
1.2 Aufarbeitung der Erze; Reinigung des Metalls	188
1.3 Physikalische Eigenschaften	197
1.4 Plastizität von Einkristallen	208
1.5 Schmelzen und Gießen	217
1.6 Pulvermetallurgie	219
a) Uranformstücke	220
b) Keramische Stoffe	225
1.7 Spanlose Formung; Rekristallisation; Texturen	229
1.8 Technologische Eigenschaften von Halbzeug	244
1.9 Thermische Instabilität	258
1.10 Einwirkung von Reaktorstrahlung	274
1.11 Spanabhebende Bearbeitung	292
1.12 Verbindungsarbeiten	292
1.13 Metallographie	293
1.14 Aufbau von Legierungen und keramischen Systemen	298
a) Binäre Legierungen	298
b) Ternäre Legierungen	310
c) Oxydische und karbidische Systeme	314
1.15 Eigenschaften von Legierungen und keramischen Stoffen ...	316
2. Plutonium	339
2.1 Vorkommen	339
2.2 Extraktion aus Brennstoffelementen; Reinigung	340
2.3 Physikalische Eigenschaften	345

	Seite
2.4 Verarbeitung und technologische Eigenschaften	352
2.5 Aufbau von Legierungen und keramischen Systemen	354
2.6 Eigenschaften von Legierungen und keramischen Stoffen	362
3. Thorium	367
3.1 Vorkommen	367
3.2 Aufarbeitung der Erze; Reinigung	368
3.3 Physikalische Eigenschaften	369
3.4 Schmelzen und Gießen	370
3.5 Pulvermetallurgie	371
a) Thoriumformstücke	371
b) Keramische Stoffe	373
3.6 Spanlose Formung; Rekristallisation; Texturen	375
3.7 Technologische Festigkeitseigenschaften von Halbzeug	376
3.8 Spanabhebende Bearbeitung	381
3.9 Verbindungsarten	381
3.10 Aufbau von Legierungen und keramischen Systemen	381
a) Binäre Legierungen	383
b) Keramische Systeme	385
3.11 Eigenschaften von Legierungen und keramischen Systemen .	386
4. Verwendungsart der Brennstoffe im Reaktor	389
4.1 Fester Brennstoff	391
4.2 Flüssiger Brennstoff; metallische Schmelzen, Suspensionen in geschmolzenen Metallen	406
4.3 Flüssige Brennstoffe; wässrige Lösungen, Suspensionen in Wasser	409
B. Moderatoren und Reflektoren	410
1. Leichtes und schweres Wasser	413
2. Graphit	414
3. Beryllium und Berylliumoxyd	426
3.1 Beryllium	426
3.2 Berylliumoxyd	444
4. Organische Stoffe	448
C. Regelstäbe	450
D. Kühlmittel	459
E. Konstruktionswerkstoffe	468
1. Auswahl auf Grund der Neutronenabsorption	468
2. Hochwärmefeste Werkstoffe	495
3. Verträglichkeit mit dem Brennstoff	497
4. Verträglichkeit mit dem Kühlmittel	507
5. Strahlenfestigkeit und induzierte Radioaktivität	527
Literaturverzeichnis	544
Sachverzeichnis	575