

Dipl.-Ing. Hans-Joachim Vogel, Stuttgart

Einfluß von Korngrenzen- diffusion und von Strömungen auf die Korngrenzen- furchung in metallischen Schmelzen

Reihe **5**: Grund- und Werkstoffe Nr. **187**

© VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987
Printed in Germany
Printed and bound by
VDI-Verlag, Düsseldorf

VDI-Verlag, Düsseldorf

VDI VERLAG

Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure · Düsseldorf



Dipl.-Ing. Hans-Joachim Vogel,

**Einfluß von Korngrenzen-
diffusion und von Stör-
gen auf die Korngrenzen-
furchung in metallischen
Schmelzen**

Reihe **5**: Grund- und Werkstoffkunde



VDI VERLAG

Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure · Düsseldorf

Vogel, Hans-Joachim

Einfluß von Korngrenzendiffusion und von Strömungen auf die Korngrenzenfurchung in metallischen Schmelzen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 5 Nr. 187. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990.
154 Seiten, 70 Bilder, 9 Tabellen.

Für die Dokumentation: Korngrenzenfurchung — Korngrenzendiffusion — Konvektive Diffusion — Konvektion — Monotektische Legierungen

In der vorliegenden Arbeit werden zwei Probleme, die bei der Untersuchung der Korngrenzenfurchung in Gegenwart einer Schmelze auftreten, theoretisch und experimentell zum ersten Mal untersucht. Im ersten Teil der Arbeit wird demonstriert, daß die Teilnahme der Korngrenze am Stofftransport zu Furchenprofilen führt, die sich gänzlich von denen unterscheiden, die nach den mittlerweile klassischen Theorien von Mullins zu erwarten sind. Bei Paarungen Al-Bikristall gegen eine In-Al-Schmelze treten „Instabilitäten“ der Korngrenzenfurchung auf, als deren Ursache sich Korngrenzendiffusion von In in Al-Korngrenzen erweist. Die Entwicklung der „Instabilitäten“ wird mit einem mathematischen Modell beschrieben. Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit wird der Prozeß der Korngrenzenfurchung unter dem Einfluß konvektiv-diffusiven Stofftransports theoretisch und experimentell untersucht. Es wird das Profil einer Korngrenzenfurchung und die Kinetik des Prozesses berechnet. Die Form des Profils reagiert empfindlich auf Konvektion. Die Furchentiefe, die physikalisch interessante Meßgröße, vergrößert sich gegenüber dem rein diffusiven Fall. Dieser Effekt ist meßbar, aber klein. Experimente zur Verifikation der Theorie wurden an Cu-Bikristallen in einer Pb-Cu-Schmelze durchgeführt.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit wurde am Max-Planck-Institut für Werkstoffwissenschaft, in Stuttgart durchgeführt.

Herrn Prof. Dr. H. Fischmeister danke ich für sein Interesse an meiner Tätigkeit als Hauptberichter.

Herrn Prof. Dr. B. Predel danke ich für die Übernahme

Mein besonderer Dank gilt Herrn Priv. Doz. Dr. L. Ratliff für seine wertvollen Diskussionen und für sein stetiges Interesse an dieser Arbeit.

Herrn M. Krause danke ich für die Probenherstellung und die graphische Präparation der Proben.

Darüber hinaus möchte ich allen Mitarbeitern des Max-Planck-Instituts mit Rat und Tat zur Seite stehen.

Die Reihen der FORTSCHRITT-BERICHTS VDI:

- | | |
|--|--|
| 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente | 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik |
| 2 Fertigungstechnik | 13 Fördertechnik |
| 3 Verfahrenstechnik | 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik |
| 4 Bauingenieurwesen | 15 Umwelttechnik |
| 5 Grund- und Werkstoffe | 16 Technik und Wirtschaft |
| 6 Energieerzeugung | 17 Biotechnik |
| 7 Strömungstechnik | 18 Mechanik/Bruchmechanik |
| 8 Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik | 19 Wärmetechnik/Kältetechnik |
| 9 Elektronik | 20 Rechnerunterstützte Verfahren
(CAD, CAM, CAE, CAP, CAQ, CIM,...) |
| 10 Informatik/Kommunikationstechnik | 21 Elektrotechnik |
| 11 Schwingungstechnik | |

Fachgebiet Werkstoffkunde

Technische Universität Darmstadt
Postfach 11 14 52, 64229 Darmstadt
Grafenstraße 2, 64283 Darmstadt

BÜ Inventar-Nr.:

6.1 1094

1256
D 93

© VDI-Verlag GmbH · Düsseldorf 1990

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-952X

ISBN 3-18-148705-8

VORWORT

Die vorliegende Arbeit wurde am Max-Planck-Institut für Metallforschung, Institut für Werkstoffwissenschaft, in Stuttgart durchgeführt.

Herrn Prof. Dr. H. Fischmeister danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und für seine Tätigkeit als Hauptberichter.

Herrn Prof. Dr. B. Predel danke ich für die Übernahme des Mitberichtes.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Priv. Doz. Dr. L. Ratke für zahlreiche, wissenschaftliche Diskussionen und für sein stetiges Interesse an dieser Arbeit.

Herrn M. Krause danke ich für die Probenherstellung und insbesondere für die metallographische Präparation der Proben.

Darüber hinaus möchte ich allen Mitarbeitern des Max-Planck-Institutes danken, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen.

1990.

Konvektive

ng der
und experi-
riert, daß
die sich
heorien von
hmelze
Korngrenzen-
ien" wird
genden
ktiv-diffu-
Profil einer
s Profils
ressante
kt ist
u-Bikristallen

chnik

chnik

en
(AQ, CIM,...)

ändigen Wiedergabe
ersetzung, vorbehalten.

INHALT

I.	Einleitung	1
II.	Überblick über die Korngrenzenfurchung bei rein diffusivem Stofftransport	3
II.1.	Die Theorie von Mullins	3
II.2.	Diskussion der Annahmen in der Mullins-Theorie	12
II.3.	Experimentelle Untersuchungen	17
II.4.	Andere Transportmechanismen	17
III.	Experimente zur Korngrenzenfurchung in den Systemen Al-In, Cu-Bi und Cu-Pb	19
III.1.	Prinzip der Experimente	19
III.2.	Untersuchte Materialien	22
III.3.	Probenherstellung	24
III.4.	Versuchsdurchführung	28
III.5.	Untersuchung und Metallographie	30
III.6.	Versuchsauswertung	32
IV.	Ergebnisse der Experimente in den Systemen Al-In und Cu-Bi	35
V.	Modell der Korngrenzenfurchung beim Auftreten von Korngrenzendiffusion und Diskussion der theoretischen und der experimentellen Ergebnisse in den Systemen Al-In und Cu-Bi	60
VI.	Theorie der Korngrenzenfurchung bei konvektiv-diffusivem Stofftransport	96

VII.	Diskussion der Theorie der Korngrenzenfurchung bei konvektiv-diffusivem Stofftransport - Vergleich der theoretischen und experimentellen Ergebnisse im System Cu-Pb	128
VIII.	Zusammenfassung	138
IX.	Verzeichnis der verwendeten Symbole	140
X.	Literaturverzeichnis	144

I. Einleitung

Die nähere Umgebung der Durchstoßlinie einer Kornfläche ist morphologisch instabil; es bildet sich eine Kornfläche, die durch die Kräfte bewirkt einen Stofftransport in der Umgebung der Kornfläche. Die Phasengrenzfläche kann gebildet werden aus einem aktiven Gas (z.B. ein Bikristall) und einem passiven Gas, einem Metaldampf, einem Metallgas. Als Transportprozesse bei der Ausbildung der Kornfläche sind die Diffusion der Bikristallatome, ihre Diffusion an der Phasengrenzfläche und die Diffusion durch das Volumen der über dem Bikristall liegenden Phase in Frage.

Theoretisch und experimentell wurde die Korngrenzenfurchung untersucht. Mullins berechnete die Kinetik der Korngrenzenfurchung für verschiedene Umgebungen der Bikristallgrenze. Die Transportprozesse /MULLINS 1957/, /MULLINS 1958/ sind die zeitliche Entwicklung der Korngrenzenfurchung kann durch die flächenspannung und Diffusionskoeffizienten bestimmt werden. Der Transportmechanismus identifiziert werden.

Allen bisherigen theoretischen Untersuchungen liegt die Annahme zugrunde, daß die Korngrenze selbst am Stofftransport nicht teilnimmt und der Stofftransport ausschließlich durch Diffusion an der Phasengrenzfläche erfolgt. Ist die umgebende Atmosphäre ein Gas oder eine Flüssigkeit, so ist die Konvektionsfreiheit im Erdlabor nur schwer zu erzwingen. In der vorliegenden Arbeit werden zwei Probleme, die bei der Korngrenzenfurchung in Gegenwart einer Schmelze auftreten, zum ersten Mal untersucht.

Im ersten Teil der Arbeit wird demonstriert, daß die Korngrenzenfurchung zu Furchenprofilen führt, die sich gänzlich von den mittlerweile klassischen Theorien von Mullins unterscheiden. In der zweiten Hälfte der Arbeit werden die Korngrenzenfurchungen Al-Bikristall gegen eine In-Al-Schmelze und die Korngrenzenfurchungen In-Al-Bikristall gegen eine Al-Schmelze untersucht. In beiden Fällen treten "Instabilitäten" der Korngrenzenfurchung auf. Die Korngrenzenfurchung in Gegenwart einer Schmelze tritt in der Korngrenzenfurchung von In in Al-Korngrenzen und Bi in Al-Korngrenzen auf.

I. Einleitung

Die nähere Umgebung der Durchstoßlinie einer Korngrenze mit einer Phasengrenzfläche ist morphologisch instabil; es bildet sich eine Korngrenzenfurchung aus. Kapillarkräfte bewirken einen Stofftransport in der Umgebung der Durchstoßlinie und so einen zeitabhängigen Umbau einer z.B. ursprünglich ebenen Grenzfläche eines Bikristalls. Die Phasengrenzfläche kann gebildet werden aus einem Festkörper (hier i. allg. ein Bikristall) und einem passiven Gas, einem Metaldampf, einer Schmelze oder einem Vakuum. Als Transportprozesse bei der Ausbildung der Furchung kommen Verdampfung und Kondensation der Bikristallatome, ihre Diffusion entlang der Phasengrenzfläche, die Diffusion durch das Volumen der über dem Bikristall liegenden Schmelze oder die Diffusion im Bikristall selbst in Frage.

Theoretisch und experimentell wurde die Korngrenzenfurchung schon mehrfach untersucht. Mullins berechnete die Kinetik der Korngrenzenfurchung in einer Reihe von Arbeiten für verschiedene Umgebungen der Bikristallgrenzfläche und für verschiedene Transportprozesse /MULLINS 1957/, /MULLINS 1958/, /MULLINS 1960/. Aus der zeitlichen Entwicklung der Korngrenzenfurchung kann sowohl das Produkt aus Grenzflächenspannung und Diffusionskoeffizienten bestimmt als auch der dominierende Transportmechanismus identifiziert werden.

Allen bisherigen theoretischen Untersuchungen liegt die Annahme zu Grunde, daß die Korngrenze selbst am Stofftransport nicht teilnimmt und daß der Stofftransport über der Phasengrenzfläche ausschließlich durch Diffusion und nicht durch Konvektion erfolgt. Ist die umgebende Atmosphäre ein Gas oder eine Schmelze, so ist die Forderung der Konvektionsfreiheit im Erdlabor nur schwer zu erfüllen, da Konvektionen fast zwangsläufig auftreten, z.B. durch lokale Dichte- oder Temperaturunterschiede. Zur Verringerung eines möglichen Konvektionseinflusses wurden Experimente unter Schwerelosigkeit durchgeführt /MINSTER et al. 1983/.

In der vorliegenden Arbeit werden zwei Probleme, die bei der Untersuchung der Korngrenzenfurchung in Gegenwart einer Schmelze auftreten, theoretisch und experimentell zum ersten Mal untersucht.

Im ersten Teil der Arbeit wird demonstriert, daß die Teilnahme der Korngrenze am Stofftransport zu Furchenprofilen führt, die sich gänzlich von denen unterscheiden, die nach den mittlerweile klassischen Theorien von Mullins zu erwarten sind. Bei Paarungen Al-Bikristall gegen eine In-Al-Schmelze und Cu-Bikristall gegen eine Bi-Cu-Schmelze treten "Instabilitäten" der Korngrenzenfurchung auf, als deren Ursache sich Korngrenzendiffusion von In in Al-Korngrenzen und Bi-Diffusion in Cu-Korngrenzen