

Schließlich hängt die Stapelfehlerenergie von der Zusammensetzung ab, man spricht in diesem Fall von **chemischer Wechselwirkung**. Die Stapelfehlerenergie nimmt für gewöhnlich mit zunehmender Fremdkörperkonzentration ab. Mit abnehmender Stapelfehlerenergie erhöht sich die Aufspaltungsweite der Teilversetzungen, wodurch diese schwerer wieder zusammengeführt werden können, wenn die Versetzung durch den Kristall bewegt werden soll. Die Gesamtenergie verringert sich. Fremdatome wandern bevorzugt zu den Versetzungen, um durch Konzentrationserhöhung die Stapelfehlerenergie zu verringern.

### 13.2.1 Kritische Schubspannung bei Mischkristallverfestigung

Die Erhöhung der kritischen Schubspannung durch Mischkristallverfestigung ergibt sich wie folgt: Die rücktreibende Kraft  $F_{\max} = F_{\max}^p + F_{\max}^d$  muß durch eine Erhöhung der kritischen Schubspannung  $\tau_c$  kompensiert werden. Nach Peach-Koehler gilt:

$$F_{\max} = \Delta\tau_c \vec{b} l_F$$

$l_F$  - Fridel-Abstand, dies ist nicht einfach der mittlere Abstand der Fremdatome, sondern die Strecke, die eine Versetzung zwischen diesen Fremdatomen (=Haltepunkten) zurücklegt. Die Versetzungslinie ist keine Gerade, sondern verhält sich unter dem Einfluß einer äußeren Spannung flexibel und baucht aus. Dieses Ausbauchen ist von der Schubspannung abhängig und um so stärker ausgeprägt, je größer diese ist. Mit zunehmender Ausbauchung steigt aber auch die Wahrscheinlichkeit, auf dem Weg ein weiteres Fremdatom 'einzufangen'. Die Fridel-Länge beträgt:

$$l_F = \left( \frac{6G}{\Delta\tau_c x_F b} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13.7)$$

$x_F$  - Fremdatomkonzentration in der Gleitebene entlang der Versetzungslinie (=  $x b^2$ )  $x$  - Volumenkonzentration.

#### ZUM NACHDENKEN:

- Was sind die dielastische und parelastische Wechselwirkung?
- Wie verhalten sie diese beiden im Vergleich zueinander?
- Wie lautet die Peach-Köhler-Gleichung und welchen Zusammenhang beschreibt sie?

$$F_{\max} \stackrel{E^{\perp_{el}} = \frac{1}{2} G b^2}{=} \Delta\tau_c b \left( \frac{3G b^2}{\delta\tau_c x b^3} \right)^{\frac{1}{3}} = \Delta\tau_c^{\frac{2}{3}} b^{\frac{2}{3}} \left( \frac{3G}{x} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$F_{\max}^{\frac{3}{2}} = \Delta\tau_c b \sqrt{\frac{3G}{x}}$$

$$\Delta\tau_c = \frac{F_{\max}^{\frac{3}{2}} \sqrt{x}}{b \sqrt{3G}}$$

Der Anstieg der Scherspannung  $\Delta\tau_c$  durch Mischkristallhärtung ist proportional zu der Wurzel der Konzentration der Fremdatome

$$\Delta\tau_c \propto \sqrt{x} \quad (13.8)$$

Mit  $F_{\max} = F^p + F^d$  folgt:

$$\Delta\tau_c = \frac{(G b^2)^{\frac{3}{2}} \left( |\delta| + \frac{1}{20} |\eta| \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{x}}{b \sqrt{3G}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} G b^2 \sqrt{x} \left( |\delta| + \frac{1}{20} |\eta| \right)^{\frac{3}{2}}$$

Die Zunahme der Scherspannung mit der Wurzel der Konzentration der Fremdatome ist in Abbildung 13.5 für verschiedene substitutionelle Mischkristalle gezeigt.

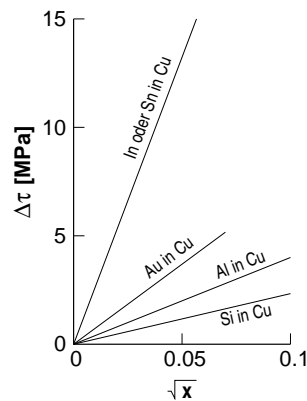


Abbildung 13.5: Scherspannung verschiedener substitutioneller Mischkristalle in Abhängigkeit von der Wurzel der Konzentration.

### 13.3 Dispersionshärtung

Enthält ein Metall nichtmetallische Einschlüsse, wie zum Beispiel Oxide, dann können diese festigkeitssteigernd wirken. Oxide werden oft auch bewußt der Schmelze zugesetzt, um eine Kornfeinung zu erreichen. Der Grund für die Festigkeitssteigerung ist die Verhinderung der Versetzungsbewegung durch die eingebetteten Partikel hindurch. Der einzige mögliche Verformungsmechanismus besteht darin, daß die Versetzungen die Hindernisse umgehen müssen.

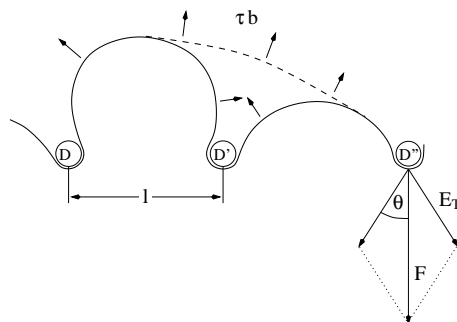


Abbildung 13.6: .

Ähnlich, wie bei der Frank-Read-Quelle wird hier ein Mechanismus entwickelt, bei dem ab einer bestimmten kritischen Spannung die Versetzung ein Hindernis überwinden kann. Gemäß Abbildung 13.6 sind D, D' und D'' Punkte, die die Versetzung festhalten. Es wirken zwei Kräfte, zum einen die Kraft des Hindernisses und zum zweiten diejenige, die mit der Linienenergie der Versetzung verbunden ist. Letztere ist als  $1/2Gb^2$  definiert. Gemäß Abbildung 13.6 berechnet sich die Linienenergie zu:

$$F = 2E_T \cos \Theta$$

Diese Kraft steht mit der von außen angelegten Spannung, die sich gemäß Peach-Koehler ( $F = \tau bl$ ) zu Folgendem ergibt:

$$F = 2E_T \cos \Theta = \tau bl$$

$l$  - mittlerer Abstand zwischen zwei Haltepunkten. Die maximale Kraft wird dann eintreten, wenn die Versetzungslinie zu Halbkreisen ausgebaucht ist ( $\cos \Theta = 0$ ). Wenn das Spannungsfeld größer wird, kann der Prozeß nicht mehr gestoppt werden, da die Krümmung der Versetzungslinie von nun an kleiner ist als in der Halbkreisconfiguration. Wie bei der Frank-Read-Quelle fallen die Versetzungslinien zusammen,

wodurch die Versetzung das Hindernis umgangen hat und einen Versetzungsring um das Hindernis zurück läßt. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 13.7 gezeigt.

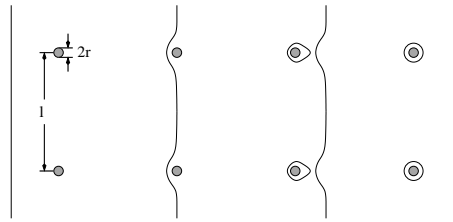


Abbildung 13.7: .

Die Spannung, die zur Erzeugung einer äquivalenten Frank-Read-Quelle benötigt wird, ist:

$$\tau_{\text{FR}} = \frac{2E_{\text{T}}}{bl} \cdot \frac{2Gb^2}{2bl} = \frac{Gb}{l}$$

Der Abstand der Haftzentren ist mit der Mikrostruktur verbunden. Die Versetzungsdichte ist über  $l \approx \frac{1}{\sqrt{\rho}}$  mit  $l$  verbunden. Durch feine, sowie fein verteilte Partikel der zweiten Phase kann eine hohe Festigkeitssteigerung erreicht werden.

$$\tau_{\text{OR}} = \frac{Gb}{l} \quad (13.9)$$

$\tau_{\text{OR}}$  wird als Orowanspannung für das Überwinden von Partikeln bezeichnet. Im Wesentlichen wird damit die Versetzungsbewegung durch den Partikelabstand bestimmt.

Dieser mittlere Abstand von Partikeln in der Gleitebene wird nun wie folgt bestimmt: Der Volumenanteil der Dispersoide beträgt:  $f = \frac{4}{3}\pi r^3 N$  mit  $N$  - Anzahl der Teilchen pro Einheitszelle;  $l$  - Abstand der Partikel in der Gleitebene  $l = \frac{1}{\sqrt{N_{\text{GF}}}}$ . Alle Teilchen, die im Band  $4r$  um diese Gleitebene liegen, werden von ihr geschnitten, wie es Abbildung 13.8 verdeutlicht.

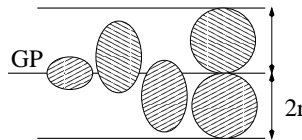


Abbildung 13.8: .

Also gilt:

$$N_{\text{GP}} = 4rN$$

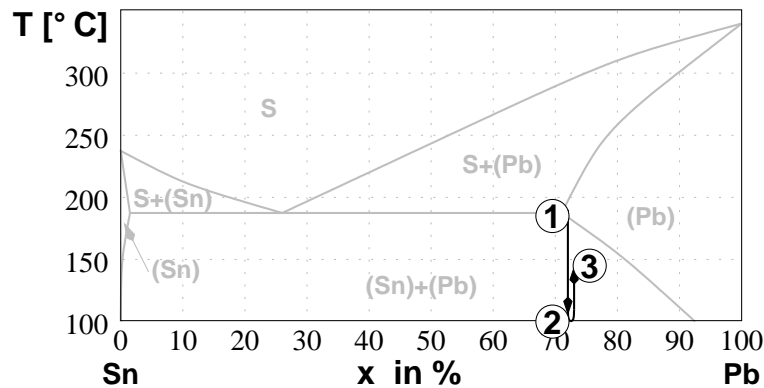
$$l = \frac{1}{\sqrt{4rN}} = \frac{1}{\sqrt{4r \cdot \frac{3f}{4\pi r^3}}} = \frac{r}{\sqrt{\frac{3f}{\pi}}} \approx \frac{r}{\sqrt{f}}$$

$$\tau_{\text{OR}} \approx \frac{Gb\sqrt{f}}{r} \quad (13.10)$$

Es ist leicht, den Partikeldurchmesser zu bestimmen und von der Probenherstellung kennt man den Anteil der Phase. Gemäß Gleichung 13.10 kann also der Verfestigungseffekt von Dispersoiden berechnet werden. Feine Dispersoide sind bei gegebenem Volumenanteil der Dispersoide effektiver bezüglich der Festigkeitssteigerung. Kaltverfestigung in Materialien, die Dispersoide enthalten, ist sehr viel effizienter, verglichen mit solchen, die keine Dispersoide enthalten, da durch die Versetzungsringe um die Dispersoide starke Spannungsfelder aufgebaut werden. Eine folgende Versetzung braucht damit eine höhere Spannung, um das Teilchen mit dem darum liegenden Versetzungsring zu umgehen, als die erste Versetzung.

## 13.4 Ausscheidungsverfestigung

Ausscheidungen entstehen, wenn ein homogener Mischkristall abgekühlt wird, wodurch der Zustand im Phasendiagramm eine Phasengrenzlinie überschreitet. Von nun an sollte der Kristall in einem zweiphasigen Zustand vorliegen. Gezielt werden Ausscheidungen hergestellt, indem der homogene Mischkristall zunächst abgeschreckt wird, wodurch er als homogener Mischkristall auch bei tieferen Temperaturen weiterhin vorliegt, obwohl das zugrunde liegende Phasendiagramm bei diesen tiefen Temperaturen eigentlich einen zweiphasigen Zustand vorgibt. Die Diffusion reicht an dieser Stelle nicht aus, um den Mischkristall zu entmischen. Bei einer anschließenden Wärmebehandlung bei mittleren Temperaturen ist die Diffusion erhöht und der Mischkristall kann in die beiden durch das Phasendiagramm vorgegebenen Phasen separieren. Die so entstandenen Ausscheidungen sind durch Phasengrenzen von der Matrix getrennt. In Abbildung 13.9 ist ein möglicher Weg gezeigt, um Ausscheidungen eines nominellen Sn – 70at. – %Pb Mischkristalls zu erzeugen.



**Abbildung 13.9:** Möglicher Weg einen Sn – 70at. – %Pb Mischkristall gezielt auszuscheiden. Bei (1) wird der Mischkristall homogenisiert und zu (2) abgeschreckt. Eine anschließende Wärmebehandlung bei (3) führt zur Ausscheidung einer Phase (hier (Sn) im (Pb)-Mischkristall).

Die Phasengrenze zwischen Ausscheidung und Matrix kann nun sowohl inkohärent, als auch semi-kohärent oder teilkohärent sein. Inkohärente Phasengrenzen wirken auf Versetzungen wie unüberwindbare Korngrenzen. Aus diesem Grund sind inkohärente Phasengrenzen in Hinblick auf die Festigkeitssteigerung genauso effektiv, wie Partikel oder Dispersoide. Allerdings sind in der Regel die bei hohen Temperaturen gebildeten Ausscheidungen sehr groß, wodurch sie zur Erzielung hoher Festigkeiten nicht geeignet sind. Kohärente, oder teilkohärente Phasengrenzen sind derart, daß Versetzungen sich durch sie hindurch bewegen können, da sich die kristallographischen Ebenen mit leichter Verzerrung über die Phasengrenze hinweg fortsetzen. Hierfür müssen Haltekräfte der Ausscheidungen, die auf die Versetzung wirken, überwunden werden. Dabei sind zunächst die bereits besprochenen parelastische und dielastische Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Die parelastische Wechselwirkung nimmt mit steigender Größe der Ausscheidungen zu. Es gilt:

$$F_{\max}^p = Gb|\delta|r ; \quad F_{\max}^d = Gb^2|\eta| \quad (13.11)$$

Bewegt sich eine Versetzung durch eine kohärente Ausscheidung, so wird das Teilchen abgeschert, weil die Versetzung die Atome auf der einen Seite der Gleitebene verschiebt. Dies ist in Abbildung 13.10 dargestellt.

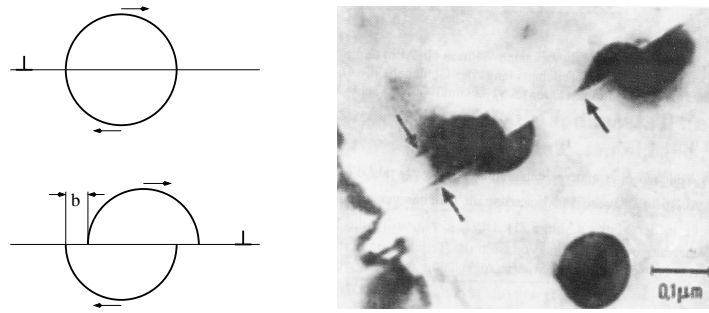


Abbildung 13.10: .

Durch das Abscheren entstehen zusätzliche Phasengrenzflächen, deren Energie beim Schneiden des Teilchens durch die angelegte Spannung aufgebracht werden muß. Die entsprechende Kraft auf die Versetzung ist mit der spezifischen Grenzflächenenergie  $\gamma_p$  gekoppelt durch:

$$F^s = \gamma_p r$$

wobei hier ein Geometriefaktor vernachlässigt wurde.

Ist das Teilchen geordnet, so wird beim Schneiden des Teilchens längs der Gleitebene die Ordnung zerstört, es entsteht eine Antiphasengrenze. Der Wechsel von Phasen- zu Antiphasengrenze durch Abscheren eines Teilchens ist in Abbildung 13.11 schematisch skizziert.

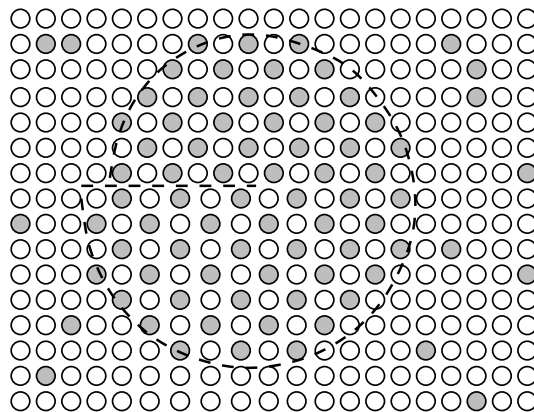


Abbildung 13.11: Entstehung einer Antiphasengrenze in einem geordneten Teilchen durch Abscheren.

Damit muß zum Abscheren des Teilchens zusätzlich die Energie der Antiphasengrenze  $\gamma_{APG}$  aufgebracht werden

$$F^{APG} = \gamma_{APG} r$$

Darüberhinaus hat das Teilchen in der Regel eine andere Stapelfehlerenergie als die Matrix. Damit ist die Aufspaltungswerte der Versetzung im Teilchen verschieden von der in der Matrix. Ist diese im Teilchen kleiner, so spaltet die Versetzung im Teilchen in Teilversetzungen auf. Beim Verlassen des Teilchens müssen diese wiederum zusammengeführt werden, was mit einem Mehraufwand an Energie verbunden ist. Im umgekehrten Fall muß eine zusätzliche Kraft aufgebracht werden, um die Versetzung überhaupt in das Teilchen hineinzubekommen.

Bei nicht geordneten Teilchen spielt die Antiphasengrenze keine Rolle, damit auch  $F^{APG}$ . Sieht man vom dielastischen Beitrag ab, so nehmen alle Kräfte mit der Ausscheidungsgröße zu. Daher kann man eine parelastische Kraft einführen, deren Proportionalitätskonstante eine Grenzflächenenergie ist.

$$Gb|\delta| = \gamma_0$$

### 13.4.1 Die kritische Scherspannung beim Schneiden von Teilchen

Da nun die wesentlichen Kräfte proportional zu  $r$  sind, kann man schreiben

$$F_{\max} = \tilde{\gamma} \cdot r$$

Andererseits kann diese Kraft auch gemäß der Peach-Koehler-Gleichung beschrieben werden

$$F_{\max} = \Delta\tau_c b l_F$$

⇒

$$\Delta\tau_c = \frac{F_{\max}}{b l_F} = \frac{\tilde{\gamma} r}{b l_F} = \frac{\tilde{\gamma}^{\frac{3}{2}}}{b} \frac{\sqrt{r f}}{\sqrt{6 E_{el}^{\perp}}} = \frac{\tilde{\gamma}^{\frac{3}{2}}}{b^2} \sqrt{\frac{r f}{3G}} \quad (13.12)$$

Die Spannung  $\Delta\tau_c$  zum Durchschneiden der Teilchen nimmt also mit  $\sqrt{f r}$  zu. Sie kann jedoch nicht größer als die Orowan Spannung werden, denn dann kann die Versetzung das Hindernis leichter umgehen, als schneiden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 13.12 dargestellt.

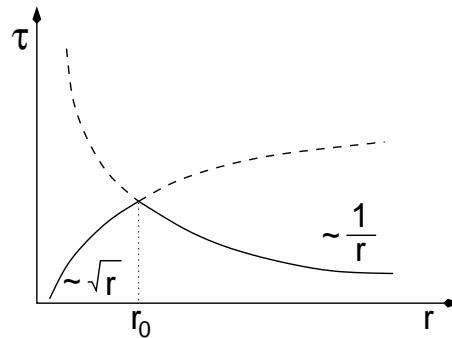


Abbildung 13.12: Veränderung der Festigkeit in Abhängigkeit von der Partikelgröße.

Es ist daher leicht einzusehen, daß es eine Teilchengröße  $r_0$  gibt, bei der eine maximale Festigkeit erzielt werden kann, nämlich

$$\Delta\tau_c = \tau_{OR}$$

Durch Vergleich von  $\Delta\tau_c = \frac{\tilde{\gamma}^{\frac{3}{2}}}{b^2} \sqrt{\frac{r f}{3G}}$  und  $\tau_{OR} = \frac{Gb\sqrt{f}}{r}$  erhält man

$$r_0 = \frac{Gb^2}{\tilde{\gamma}} \sqrt[3]{3} \quad (13.13)$$

Die Einstellung der Teilchengröße  $r_0$  ist das Ziel der Aushärtung. Es bleibt anzumerken, daß  $r_0$  nicht vom prozentualen Anteil der ausgeschiedenen Phase abhängt.

### 13.4.2 Aushärtung von Legierungen

Ein wichtiges Verhalten zur Festigkeitssteigerung ist das Aushärten von Legierungen. Die Grundlage der Festigkeitssteigerung durch Aushärten liegt in der durch Ausscheidung gewonnenen zweiten Phase. Bei der Ausscheidung ist das zugrundeliegende Phasendiagramm von besonderer Bedeutung. Generell gilt, daß man einen großen Festigkeitsanstieg durch eine hohe Auslagerungstemperatur erreicht. Bei niedrigeren Temperaturen steigt die Härte langsamer aber stetig an, bis ein Plateauwert erreicht wird. Es wird zunächst eine kohärente und später teilkohärente metastabile Phase ausgeschieden und nicht eine inkohärente Phase. Diese wird erst bei höheren Temperaturen ausgeschieden. Nach dem Plateauwert der Härte wird hierdurch ein weiterer Härteanstieg beobachtet, der ein Maximum zeigt. Bei noch höheren

Temperaturen werden Plateau und Maximum schneller erreicht, liegen aber bei geringeren Werten. Dieses Absinken der Härtewerte liegt darin begründet, daß die Anzahl der ausgeschiedenen Phasen geringer ist. Bleibt wegen der niedrigen Temperatur die Aushärtung auf die erste Stufe beschränkt, so spricht man von **Kaltaushärtung**. Erst bei höheren Temperaturen erhält man auch die zweite Stufe. Dies wird als **Warmmaushärtung** bezeichnet. Sie ist im Wesentlichen auf die Ausbildung der inkohärenten Ausscheidungsphase zurückzuführen.

Durch Vergrößerung der Ausscheidungen bei längeren Glühzeiten (Ostwald-Reifung) kommt es zur Vergrößerung der Teilchen, zu einer zahlenmäßigen Verringerung und zu einer Festigkeitsabnahme, weil die Ausscheidungen von den Versetzungen mit dem Orowan Mechanismus leichter umgangen werden können. Diesen Effekt nennt man **Überalterung**.

Der Härtungseffekt ist optimal, wenn der Teilchenabstand möglichst klein ist und die Ausscheidungen homogen im Kristall verteilt sind. Dies wird als kontinuierliche Ausscheidung bezeichnet. Im Gegensatz dazu werden inkohärente oder diskontinuierliche Ausscheidungen häufig an Gitterfehlern, wie Versetzungen, oder Korngrenzen gebildet. Bleibt die Ausscheidung auf die Gebiete um die Gitterfehler beschränkt, werden die mechanischen Eigenschaften oft nur unzureichend verbessert.

Damit können die vorgestellten Festigungsmechanismen zusammengefaßt werden:

Umformverfestigung	Versetzungsdichte	$\tau \propto \sqrt{\rho}$
Phasengrenzhärtung	Kornfeinung	$\tau \propto \frac{1}{D}$
Mischkristallverfestigung	Fremdatomkonzentrationserhöhung	$\tau \propto \sqrt{x}$
Ausscheidungs- und Dispersionsverfestigung	feine inkohärente Phasen	$\tau \propto \sqrt{r}$ oder $\tau \propto \frac{1}{r}$

### ZUM NACHDENKEN:

- Von welcher Größe hängt die für das Überwinden von Teilchen nötige Spannung ab?
- Wie groß ist die Schneidspannung?
- Welcher Parameter bestimmt, ob ein Teilchen umgangen, oder geschnitten wird?
- Wie ist die Partikelgröße zu wählen, um einen maximalen Beitrag zur Festigkeit aufgrund der Teilchenverfestigung zu bekommen?
- Welche festigkeitssteigernde Mechanismen gibt es und welches sind ihre wesentlichen Merkmale?