

Verfestigungsmechanismen

Die Festigkeit eines metallischen Werkstoffes ist immer eng mit den darin enthaltenen Versetzungen verbunden. Es gilt die Bewegung der Versetzungen zu verhindern, um ein Material in seiner Festigkeit zu steigern. Die wichtigsten hierfür herangezogenen Möglichkeiten und Mechanismen werden im nun Folgenden dargestellt.

13.1 Verformung und Verfestigung von Polykristallen

Die Verformung von Vielkristallen ist insofern mit Einschränkungen gegenüber der Verformung von Einkristallen belegt, als daß der Vielkristall mit all seinen unterschiedlich orientierten Körnern sich als Ganzes verformen lassen muß und das, ohne daß er in seine einzelnen Kristallite zerfällt. Dadurch muß jedes Korn an der Verformung teilnehmen und jedes Korn wird dabei auch von den Nachbarkörnern beeinflusst. Aufgrund der unterschiedlichen Orientierungen der Körner werden bei Anlegen einer äußeren Spannung zunächst die Körner gleiten, die ein Gleitsystem mit einem hohen Schmidfaktor aufweisen. In anderen, weniger günstig orientierten Körnern ist die kritische Schubspannung noch nicht erreicht, es ist noch kein Gleitsystem aktiviert worden. Die Verformung eines einzelnen Kornes führt also zu einer Formänderung, die von der Umgebung nicht mit getragen wird, weswegen diese unterdrückt werden muß. Dies wiederum führt zu lokalen elastischen Spannungen wodurch schließlich die kritische Schubspannung auch in den Nachbarkörnern erreicht wird. Erst wenn alle Körner sich plastisch verformen ist die Streckgrenze erreicht. Damit kann sich ein Polykristall unter Einwirkung einer äußeren Spannung nur dann makroskopisch verformen, wenn jedes seiner Körner zu einer allgemeinen plastischen Formänderung in der Lage ist. R. von Mises hat erkannt, daß dies nur dann eintreten kann, wenn fünf unabhängige Gleitsysteme betätigt werden. Kubisch flächenzentrierte Metalle haben zwölf $\{111\} \langle 110 \rangle$ -Gleitsysteme, wovon in jeder Ebene aber nur zwei von drei Gleitrichtungen voneinander unabhängig sind. Im Zug wird dieser Fall, der fünf unabhängige Gleitsysteme aktiv hat durch einen allgemeinen Spannungszustand erzeugt, der auf dem Gleiten günstiger Körner und der Einwirkung anderer Körner auf diese Gleitebenen beruht. Die Aktivierung der fünf Gleitsysteme erfolgt also spannungskontrolliert.

An dieser Stelle sei noch einmal auf den Sachverhalt hingewiesen, daß die Körner unterschiedlicher Orientierungen und Schmidfaktoren sich gegenseitig beeinflussen. Es ist nicht möglich, nur ein Korn plastisch zu verformen, aber auch bei der Verformung vieler Körner gleichzeitig ist diese nicht homogen.

Damit der Kristall während der Verformung nicht zerbröselt, die Körner aber verschiedene Verformungen aufweisen dürfen, bedarf es sogenannter geometrisch notwendiger Versetzungen an den Korngrenzen. Dieser Begriff wurde von Ashby geprägt. Abbildung 13.1 verdeutlicht die Notwendigkeit dieser Versetzungen. Bei der Verformung eines Polykristalls muß es also geometrisch notwendige Versetzungen geben. Ein Polykristall steht unter Zugspannung, wodurch sich die einzelnen Körner mit verschiedenen aktiven Gleitsystemen unterschiedlich plastisch verformen. Im zweiten Teilbild werden die einzelnen Körner entsprechend ihren Orientierungen und Schmidfaktoren verformt, als ob sie nicht zusammenhängen würden. Hierdurch entstehen Löcher und Bereiche mit Überlapp. Erst die Einführung geometrisch notwendiger Versetzungsanordnungen an den Korngrenzen erlaubt es dann, den Polykristall nahtlos wieder zusammenzuführen. Es ist plausibel, daß die geometrisch notwendigen Versetzungen hauptsächlich in Korngrenznähe liegen, wo die Inkompatibilitätsspannungen wirken, während die nicht gezeigten statistisch gespeicherten Verset-

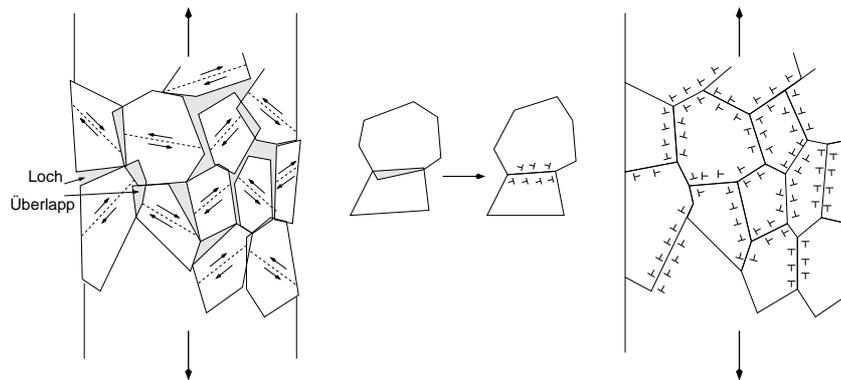


Abbildung 13.1: Veranschaulichung zur Notwendigkeit geometrisch notwendiger Versetzungen. Hypothetisch durch Rotation der Kristallite entstehende Löcher und Überlappungen müssen durch Versetzungen ausgeglichen werden.

zungen die Kristalle entsprechend ihren Orientierungen mehr oder weniger homogen erfüllen und dadurch härten.

Wird ein Gleitsystem aktiviert, so werden Versetzungen auf ihm generiert. Die Korngrenzen stellen für die Versetzungen aber unüberwindbare Hindernisse dar, da der Burgers Vektor ein Translationsvektor des Kristalls sein muß, was bei einer geänderten Orientierung des Kristallites nicht möglich ist. Die Fortsetzung der Abgleitung in das Nachbarkorn würde dieses zerstören, was aber nicht passiert. Die Versetzungen stauen sich an der Korngrenze auf. Die Versetzungen stoßen nachfolgende Versetzungen ab, wobei der Abstand der Versetzungen durch die abstoßende Kraft und die äußere Spannung bestimmt wird. Da die abstoßende Kraft mit zunehmender Anzahl von Versetzungen zunimmt, wird auch der Abstand der Versetzungen größer, je weiter diese sich von der Korngrenze entfernen. Die Aufstaulänge ist aber begrenzt und beträgt den halben Korndurchmesser $D/2$, da auf der entgegengesetzten Seite ebenfalls ein Aufstau entsteht.

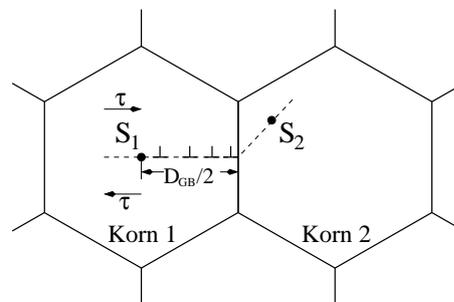


Abbildung 13.2: Erhöhung des Spannungszustandes an einer Korngrenze durch Aufreihung von Versetzungen und Einfluß auf das Nachbarkorn.

Für eine angelegte Schubspannung können eine maximale Anzahl von Versetzungen in der Länge $D/2$ aufgereiht werden von:

$$n = \frac{\pi(1-\nu) D}{Gb} \frac{\tau}{2}$$

Auf die vorderste Versetzung wirkt die äußere Spannung, sowie die Kraft der $(n-1)$ nachfolgenden Versetzungen $\tau_{lok} = n\tau$. Diese Spannung wirkt auch in das unverformte Nachbarkorn und erhöht damit die in diesem Korn wirksame Spannung in dessen Gleitsystem. Damit wird auch im zweiten Korn eine Schubspannung erzeugt, die größer ist als die kritische Schubspannung, wodurch es zu plastischer Verformung

kommt (wenn $\tau_{\text{lok}} \geq \tau_{\text{krit}}$)

$$\tau \geq \sqrt{\frac{\tau_{\text{krit}} G b}{D \pi (1 - \nu)}} = k'_y \frac{1}{\sqrt{D}} \quad (13.1)$$

13.1.1 Verfestigung durch Kornfeinung

Berücksichtigt man noch, daß für sehr große Körner zumindest die kritische Schubspannung τ_0 des Einkristalls für die Verformung erforderlich ist, so ergibt sich die **Hall-Petch-Beziehung** mit $\tau = S\sigma$:

$$\tau = \tau_0 + \frac{k'_y}{\sqrt{D}} \quad \sigma = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{D}} \quad (13.2)$$

Die Hall-Petch-Beziehung ist die Grundlage der Festigkeitssteigerung durch Kornfeinung und ist für viele Werkstoffe experimentell bestätigt. k_y - Hall-Petch-Konstante.

13.1.2 Umformverfestigung

Aus den Abschnitten über die Passier- und Schneidspannung von Versetzungen kennen wir den Zusammenhang der zur Verformung nötigen Spannung mit der Versetzungsdichte. Es gilt:

$$\tau_{\text{ps}} = \alpha_1 G b \sqrt{\rho_{\text{ps}}}$$

für die Passierspannung, sowie

$$\tau_{\text{s}} = \frac{1}{2} G b \sqrt{\rho_{\text{s}}}$$

für die Schneidspannung von Versetzungen. Wie schon erwähnt, wird die Verfestigung auf der Grundlage von Versetzungen durch die **Taylor-Formel** beschrieben, die sich aus der Addition der beiden oben Genannten ergibt:

$$\tau_0 = \alpha_1 G b \sqrt{\rho_{\text{ps}}} + \frac{1}{2} G b \sqrt{\rho_{\text{s}}} = \alpha G b \sqrt{\rho} \quad (13.3)$$

Durch Kaltverformung kann in einem Material ein deutlicher Zuwachs an Versetzungen erreicht werden, wodurch die Versetzungsdichte steigt. Das Material wird kaltverfestigt. Man bezeichnet dies auch als Umformverfestigung.

13.2 Mischkristallverfestigung

Wesentlich wirksamer in Hinblick auf die Festigkeitssteigerung als die Umformverfestigung oder die Verfestigung durch Kornfeinung ist die Mischkristallverfestigung. Wird eine lineare Überlagerung der Festigkeiten von zwei Elementen gemäß ihrer prozentualen Zusammensetzung angenommen, so wird im Experiment ein deutlich über dieser Linie liegender Verlauf der Festigkeit im Mischkristall in Abhängigkeit von der Konzentration beobachtet. In Abbildung 13.3 ist die kritische Schubspannung von Cu-Ni Einkristallen in Abhängigkeit von der Konzentration gezeigt.

ZUM NACHDENKEN:

- Wie lautet die Hall-Petch-Beziehung?
- Welches ist der dominierende Mechanismus bei der Umformverfestigung?

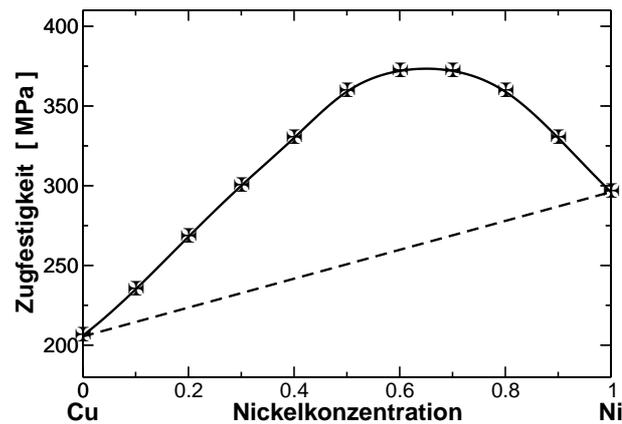


Abbildung 13.3: Kritische Schubspannung von Cu-Ni Einkristallen in Abhängigkeit von der Konzentration.

Das System Cu-Ni ist im gesamten Konzentrationsbereich vollständig mischbar (s. Abb. 4.16). Die Mischkristallverfestigung ist eine Folge der Wechselwirkung der Legierungsatome mit den Versetzungen, die zu der Behinderung der Versetzungsbewegung führt. Diese Wechselwirkung hat unterschiedliche Ursachen. Zunächst einmal gibt es den Einfluß der unterschiedlichen Ionenradien, beziehungsweise Gitterparameter der beteiligten Komponenten. Dieser Einfluß wird auch als **parelastische Wechselwirkung** bezeichnet. Der Einbau von Atomen mit einer anderen Größe in das Kristallgitter erzeugt Druck- oder Zugspannungen, je nachdem, ob das Fremdatom größer oder kleiner ist. Da es an einer Stufenversetzung geweitete und komprimierte Bereiche gibt, wie es in Abbildung 13.4 gezeigt ist, wird die mit der elastischen Verzerrung verbundene Energie der Fremdatome verringert, wenn diese sich an der Versetzung und nicht im ungestörten Gitter aufhalten.

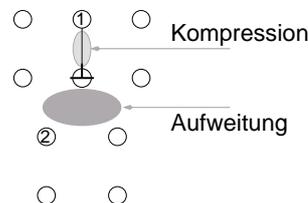


Abbildung 13.4: Kompressions- und Aufweitzungszone an einer Stufenversetzung.

Bei der Bewegung der Versetzung (plastische Verformung) müssen die Versetzungen von den Fremdatomen getrennt werden, was aber nur möglich ist, wenn die elastische Energie des Fremdatoms wieder erhöht wird, damit dies im ungestörten Gitter verbleiben kann. Dies wiederum führt zu einer rücktreibenden Kraft auf die Versetzung, die durch eine zusätzliche Spannung überwunden werden muß. Damit ist die kritische Schubspannung eines Mischkristalls gegenüber derjenigen der reinen Matrix erhöht. Diese Wechselwirkung kann wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{1}{3} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \\
 &= -\frac{Gb}{3\pi r} \frac{1+\nu}{1-\nu} \sin \Theta
 \end{aligned}$$

ΔV - Volumenänderung. $\Delta V = (a(1+\delta))^3 - a^3$, genähert: $\Delta V = 3\Omega\delta$ (wenn $\delta \ll 1$); a - Gitterparameter; $\delta = \frac{da}{dx} \frac{1}{a} = \frac{d \ln a}{dx}$ - Faktor der Gitteränderung; x - Konzentration; r - Abstand zwischen Fremdatom und Versetzung; Ω - Atomvolumen; Θ - Winkel zwischen der Normalen zwischen den Gleitebenen und der Richtung von der Versetzung zum Fremdatom. Damit gilt für die Wechselwirkungsenergie mit der Versetzung im Ursprung:

$$\Delta E^p = p \Delta V \left(3 \frac{1-\nu}{1+\nu} \right) \quad (13.4)$$

Hieraus berechnet sich die Wechselwirkungskraft F^p in karthesischen (x, y) - Koordinaten:

$$\begin{aligned}
 F^p &= -\frac{d\Delta E^p}{dx} = -\frac{d}{dx} \left(-\frac{Gb}{3\pi} \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{x}{x^2+y^2} \right) \Delta V \left(3 \frac{1-\nu}{1+\nu} \right) \\
 &= \frac{d}{dx} \left(\frac{Gb}{\pi} \Delta V \frac{x}{x^2+y^2} \right) \\
 &= \frac{Gb}{\pi} \Delta V \frac{d}{dx} \left(\frac{x}{x^2+y^2} \right) \quad \left| \frac{d}{dx} \left(\frac{x}{x^2+y^2} \right) = \frac{x^2+y^2-2x^2}{(x^2+y^2)^2} \right. \\
 &= \frac{Gb}{\pi} \Delta V \frac{y^2-x^2}{(x^2+y^2)^2} \tag{13.5}
 \end{aligned}$$

F^p ist am größten, wenn $x = y/\sqrt{3}$ ist, wobei $y = b/\sqrt{3}$ (halber Gleitebenenabstand im kfz-Gitter).

$$\begin{aligned}
 F_{\max}^p &= \frac{Gb}{\pi} \Delta V \frac{\frac{b^2}{3} - \frac{b^2}{9}}{\left(\frac{b^2}{9} + \frac{b^2}{3}\right)^2} \\
 &= \frac{9}{8} \frac{G}{b\pi} \Delta V
 \end{aligned}$$

ΔV läßt sich nun vereinfacht darstellen, wenn man berücksichtigt, daß das Gitter in alle Richtungen gleichermaßen gestaucht oder gedehnt wird: $\Delta V = a^3(1+\delta)^3 - a^3$

$$\begin{aligned}
 F_{\max}^p &= \frac{9}{8} \frac{G}{b\pi} [a^3(1+3\delta^2+3\delta+\delta^3) - a^3] \\
 &= \frac{9}{8} \frac{G}{b\pi} [a^3(3\delta^2+3\delta+\delta^3)] \\
 &= \frac{9}{8} \frac{G}{b\pi} [3a^3\delta^2+3a^3\delta+a^3\delta^3]
 \end{aligned}$$

da $\delta \ll 1$ und $b \sim a$ gilt folgt:

$$F_{\max}^p \simeq \frac{9}{8} \frac{G}{b\pi} 3\delta a^3 \simeq Gb^2|\delta|$$

An dieser Stelle sei noch angemerkt, daß für diese Wechselwirkung ein hydrostatisches Spannungsfeld der Versetzungen vorausgesetzt wird. Schraubenversetzungen haben kein solches Spannungsfeld und daher auch keine parelastische Wechselwirkung mit Fremdatomen. Nur im Fall von nicht isotropen Spannungsfeldern (wie z. B. in α -Fe, wo dieses Verzerrungsfeld tetragonal ist) tragen auch Schraubenversetzungen zur parelastischen Wechselwirkung bei.

Die Legierungselemente können darüberhinaus auch einen anderen Schermodul G als die Matrix aufweisen. Da die Energie einer Versetzung dem Schermodul proportional ist, gibt es eine weitere Ursache für die Wechselwirkung von Versetzungen mit Fremdatomen. In diesem Fall spricht man von **dielastischer Wechselwirkung** oder dem Schubmodul-Effekt. Durch den anderen Schubmodul trägt das Volumen, welches vom Fremdatom eingenommen wird, anders zur Gesamtenergie der Versetzung bei und erzeugt deshalb einen Energieunterschied zum reinen Metall. Diese Wechselwirkungsenergie der Linienenergie einer Schraubenversetzung beträgt (ohne Herleitung):

$$\Delta E^d = \frac{Gb^2}{8\pi^2 r^2} \Omega \eta \tag{13.6}$$

Ω - Atomvolumen, $\eta = \frac{\partial \ln G}{\partial x} (= \frac{1}{G} \frac{dG}{dx})$, x - Konzentration. Damit gilt für die maximale Kraft:

$$F_{\max}^d \simeq \frac{1}{20} Gb^2 |\eta|$$

Im Vergleich zum parelastischen Fall (E^p) fällt E^d schneller mit r ab. Dagegen ist $|\eta|$ häufig viel größer als $|\delta|$ ($E^p \propto 1/r$, $E^d \propto 1/r^2$).