

Abb. 1.27 Drei Stapelfehler in Ni_3Al -Ausscheidungen einer einkristallinen Nickelbasissuperlegierung für Turbinenschaufeln nach einer plastischen Verformung bei $950\text{ }^\circ\text{C}$. (a) Die Stapelfehler sind durch die flächigen Streifenmuster in der Aufnahme des Transmissionselektronenmikroskops erkennbar (TEM, Einstrahlrichtung [001], Beugungskontrast). Die Partialversetzung, die den Stapelfehler oben links verursacht hat, ist auf einer (111)-Ebene in die Ausscheidung eingedrungen, hat dann die Gleitebene gewechselt und die Ni_3Al -Ausscheidung über eine ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)-Ebene wieder verlassen. Die Partialversetzung, die den Stapelfehler unten rechts hinterlassen hat, ist komplett auf einer ($1\bar{1}\bar{1}$)-Ebene durch die Ausscheidung durchgelaufen und hat einen entsprechend großen Stapelfehler hinterlassen. Die Partialversetzung unten links ist noch innerhalb der Ni_3Al -Ausscheidung sichtbar. Sie befindet sich auf der Gleitebene ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$) und erzeugt gerade einen Stapelfehler. Damit sind alle vier Gleitebenen an der plastischen Verformung bei dieser hohen Temperatur beteiligt. (b) In dieser Aufnahme wurde die Probe so gekippt, dass der Elektronenstrahl parallel zur [011]-Richtung liegt und somit zwei der vier Gleitebenen, nämlich ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$) und ($1\bar{1}\bar{1}$), und damit auch die auf diesen Gleitebenen liegenden Stapelfehler (unten links und unten rechts) auf Kante stehen. So konnten alle vier Gleitebenen vom Typ {111} eindeutig identifiziert werden.

mung, bevor die Legierung durch Abkühlen wieder in den martensitischen Zustand übergeht. Die Legierung hat sich an ihre ursprüngliche Form vor der plastischen Verformung „erinnert“.

Bei hohen Temperaturen wird die plastische Verformung verstärkt durch Diffusion. Dabei diffundieren die Atome und nehmen neue Plätze ein, um der äußeren mechanischen Spannung auszuweichen. Die Diffusion erfolgt sehr stark entlang der Korngrenzen, wo eine größere Unordnung als im Kristallgitter und damit mehr Platz für die Atome vorliegt. Das ist der Grund, warum im heißen Bereich einer Flugzeug- oder Gasturbine direkt hinter der Brennkammer einkristalline Turbinenschaufeln ohne Korngrenzen verwendet werden.

1.5.3 Zusammenhang zwischen Kristallstruktur und plastischer Verformbarkeit

Metalle mit der Gitterstruktur kfz (Gold, Silber, Aluminium, Kupfer, Blei, austenitischer Stahl) sind plastisch am leichtesten verformbar. Sie haben eine sehr hohe Packungsdichte. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine der vier Gleitebenen und damit eines der zwölf Gleitsysteme entsprechend dem Schmid'schen Schubspannungsgesetz günstig zur Lastachse orientiert ist und unter hoher Schubspannung steht, ist sehr hoch.

Metalle mit der Gitterstruktur krz (ferritischer Stahl, Wolfram, Chrom, Molybdän) haben zwar auch viele Gleitebenen und Gleitsysteme, aber eine geringere Packungsdichte. Sie sind plastisch etwas schwieriger zu verformen und damit fester als kfz Metalle, aber insgesamt immer noch recht gut umformbar.

Metalle mit der Gitterstruktur hdp (Magnesium, Zink, Titan) besitzen zwar wie kfz Metalle ebenfalls die größtmögliche Packungsdichte, haben aber nur eine Gleitebene. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Gleitebene günstig (45°) zur Lastachse orientiert ist und dort hohe Schubspannungen wirken können, ist statistisch sehr gering. Daher sind hdp Metalle unter normalen Umständen sehr fest und plastisch nur kaltumformbar (Tab. 1.1). Bei hohen Temperaturen können unter gewissen Umständen noch weitere Gleitsysteme in hdp Metallen aktiviert werden. Dadurch verbessert sich die plastische Verformbarkeit.

1.6 Verfestigung von Metallen durch Kristallbaudefekte

Da jeder Kristallbaufehler ein Hindernis für eine Versetzung darstellt, können diese Gitterfehler gezielt in Werkstoffe eingebracht werden, um die Festigkeit, d. h. die Widerstandsfähigkeit gegen plastische Verformung, zu erhöhen. Die Verfestigungsmechanismen lassen sich gemäß der Art der eingebrachten Gitterdefekte klassifizieren (Tab. 1.2).

1.6.1 0D: Mischkristallverfestigung

Innere Gitterverspannungen durch Fremdatome sind Hindernisse für das Versetzungsgleiten (Abb. 1.28). Je größer die Konzentration der Fremdatome, desto größer die Mischkristallverfestigung. Die Mischkristallverfestigung steigt mit zunehmender Atomradiendifferenz zwischen Austauschatomen und Wirtsgitteratomen, da so auch die Gitterverzerrungen zunehmen.

Kleine Einlagerungsatome (z. B. gelöster Kohlenstoff oder Stickstoff im Stahl) führen zu einem noch höheren Festigkeitsanstieg als Austauschatom.

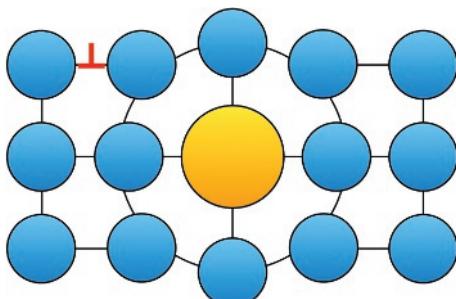
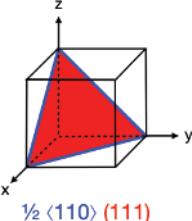
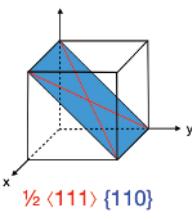
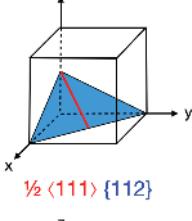
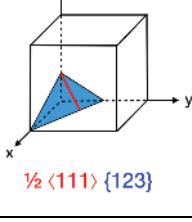
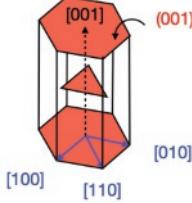


Abb. 1.28 Gitterverzerrung durch das Spannungsfeld eines Austauschatoms. Die Versetzung (rot) wird bei ihrem Gleitvorgang behindert.

Tab. 1.1 Gleitsysteme in kfz, krz und hdp Metallen.

Gittertyp	Beispiele	Gleitsystem exemplarisch	Gleitebenen		Gleitrichtungen		Gleit-systeme total
			Typ	Anzahl	Typ	Anzahl pro Gleitebene	
kfz	Al, Cu, Ni, Au, Ag, Pt, Pb, α -Fe, δ -Fe		{111}	4	$\frac{1}{2} \langle 110 \rangle$	3	12
krz	γ -Fe, Cr, Mo, W, Ta, Nb, V, β -Ti		{110}	6	$\frac{1}{2} \langle 111 \rangle$	2	12
			{112}	12	$\frac{1}{2} \langle 111 \rangle$	1	12
			{123}	24	$\frac{1}{2} \langle 111 \rangle$	1	24
hdp	Mg, Zn, Cd (α -Ti, Be, Zr)		(001)	1	[100] [010] [110]	3	3

Tab. 1.2 Überblick über die typischsten Verfestigungsmechanismen.

Dimension	Versetzungshindernis	Verfestigungsmechanismus	Festigkeitsanstieg
0	Gelöste Fremdatome im Mischkristall mit Konzentration c	Mischkristallverfestigung	$\Delta R_{p0.2} \sim c^{1/2}$
1	Versetzungen mit der Versetzungsdichte N	Kaltverfestigung	$\Delta R_{p0.2} \sim N^{1/2}$
2	Korngrenzen bei einer mittleren Korngröße d	Feinkornverfestigung	$\Delta R_{p0.2} \sim d^{-1/2}$
3	Kohärente Ausscheidungen der Größe D (sowie teil- und inkohärente Ausscheidungen oder Fremdpartikel)	Ausscheidungshärtung (Dispersionsverfestigung)	$\Delta R_{p0.2} \sim D^{1/2}$

1.6.2 1D: Kaltverfestigung

Werden bei der plastischen Verformung zu viele Versetzungen generiert, behindern und blockieren diese sich gegenseitig beim Gleiten (Abb. 1.29).

Passiert die massive Neubildung und gegenseitige Behinderung der Versetzungen bei der plastischen Verformung unterhalb der Rekristallisationstemperatur, kommt es zur Kaltverfestigung. Der Vorgang ist vergleichbar mit einer Rushhour im Stadtverkehr. Auf den Straßen (Gleitebenen) fahren zu viele Automobile (Versetzung) und es kommen nach Büro- oder Ladenschluss immer weitere hinzu (Versetzungneubildung durch die plastische Verformung). An den Kreuzungen und anderen Hindernissen geht es wegen der ge-

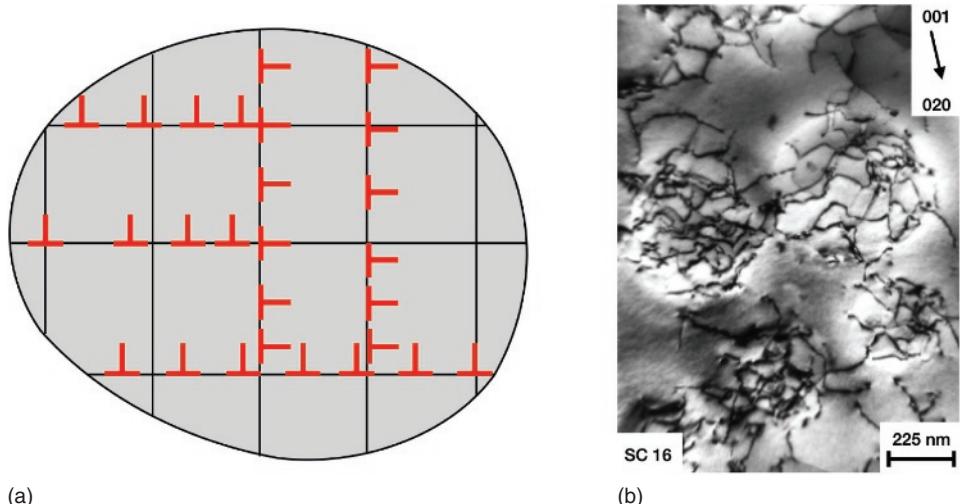


Abb. 1.29 (a) Schematische Darstellung der gegenseitigen Behinderung von Versetzungen an Kreuzungspunkten von Gleitebenen. (b) Probe mit plastischer Verformung und sich behindernden Versetzungen (schwarze Linien) auf verschiedenen Gleitebenen unter dem Transmissionselektronenmikroskop (TEM). Die Neubildung und gegenseitige Blockierung von Versetzungen auf verschiedenen Gleitebenen führt unterhalb der Rekristallisationstemperatur zu einer Kaltverfestigung der Metalle.

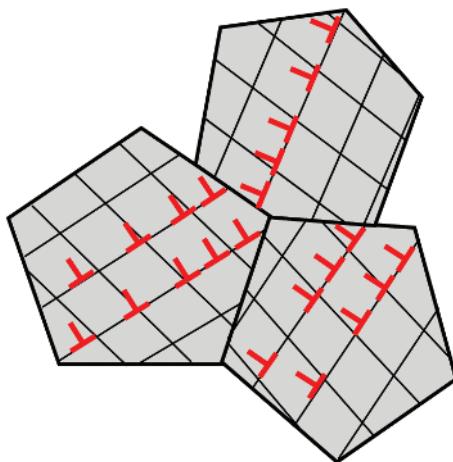


Abb. 1.30 Schematische Darstellung des Versetzungsaufstau an Korngrenzen.

genseitigen Behinderung (Stau) bald gar nicht mehr voran (Versetzungsaufstau bei sich kreuzenden Gleitebenen). Die Fortbewegung der Autos (Versetzungsgleiten) wird immer schwieriger, und schließlich kommt der Stadtverkehr (die plastische Verformung im Metall) zum Erliegen (vollständige Kaltverfestigung). Bei einer Warmumformung oberhalb der Rekristallisationstemperatur (Neubildung des Gefüges) oder bei einer Glühbehandlung des Metalls können die Versetzungen wieder ausheilen. Im Stadtverkehr sind diese Mittel zur Stauauflösung („die Autos lösen sich durch Zufuhr thermischer Energie einfach auf“) nicht verfügbar.

1.6.3 2D: Feinkornverfestigung

Versetzungen stauen sich an Korngrenzen „wie an einer Wand“, die sie durch Gleiten nicht überwinden können, da dort die Gleitebenen nicht mehr weiterlaufen (Abb. 1.30). Feinkorngefüge haben viele Korngrenzen und damit viele Gleithindernisse (Feinkornhärtung). Versetzungen auf derselben Gleitebene mit demselben Burgers-Vektor können sich aufgrund ihrer Verzerrungsfelder, die sich gegenseitig abstoßen, nicht beliebig nah kommen.

Die Feinkornverfestigung führt nicht zu einer so großen Versprödung wie die Kaltverfestigung oder die anderen Verfestigungsmechanismen. Sie resultiert in einer hohen Festigkeit bei gleichzeitig guter Zähigkeit. Allerdings ist die Feinkornhärtung (wie auch die Kaltverfestigung) nicht geeignet für Anwendungen bei hohen Temperaturen, weil durch Diffusionsprozesse Rekristallisation und Kornwachstum einsetzt und die Versetzungen ausheilen.

1.6.4 3D: Ausscheidungshärtung

Auf den ersten Blick sind Phasengrenzflächen von Ausscheidungen zweidimensionale Defekte. Die Versetzungen stauen sich zunächst wie an einer Korngrenze (Abb. 1.31). Liegen diese Ausscheidungen jedoch mitten in einem Korn, wie dies bei vielen ausscheidungsgehärteten Legierungen der Fall ist, so sind Versetzungen in der Lage, die Ausscheidungen durch Umschnürung (Orowan-Mechanismus), Schneiden (bei kohärenten Ausscheidungen) oder Klettern zu überwinden. Das funktioniert bei Korngrenzen in der Regel nicht.



(a)

(b)

Abb. 1.31 Versetzungsaufstau an (a) einer Ausscheidung schematisch und (b) an einer Ni_3Al -Ausscheidung in einer Superlegierung für Turbinenschaufeln (TEM-Aufnahme).

Entsteht die zweite Phase durch intrinsische metallurgische Prozesse (Wärmebehandlung des Gefüges etc.), handelt es sich um eine Ausscheidungshärtung. Werden durch externe Zugabe zusätzliche Partikel einer keramischen Phase als Versetzungshindernisse ins Gefüge eingebaut, spricht man von Dispersionsverfestigung.

Der Festigkeitsanstieg ist abhängig von der Anzahl, Größe und Kohärenz der Ausscheidungen. Kohärente Ausscheidungen führen zu starken Gitterverzerrungen und zu einem großen Festigkeitsanstieg.

1.7 Aufgaben

Aufgabe 1.1

Wie hängen E -Modul, Bindungsenergie und thermischer Ausdehnungskoeffizient qualitativ zusammen?

Aufgabe 1.2

Worauf beruht die plastische Verformung von Metallen bei Raumtemperatur?

Aufgabe 1.3

In Geschirrspülern bestehen die Seitenwände häufig aus rostfreiem ferritischen Chrom-Stahl (kubisch-raumzentriert, krz). Für den Boden, der bei der Herstellung sehr großen plastischen Verformungen unterworfen wird, fällt die Wahl in der Regel auf einen rostfreien austenitischen Chrom-Nickel-Stahl (kubisch-flächenzentriert, kfz). Erklären Sie die Materialwahl für den Boden des Bottichs, argumentieren Sie dabei bitte über die Kristallstruktur.

Aufgabe 1.4

Warum sind die kfz und krz Metalle besser plastisch verformbar als das hexagonal dichtest gepackte Titan?

Aufgabe 1.5

Die Festigkeit von Metallen lässt sich erhöhen, indem den Versetzungen gezielt Hindernisse in Form von Gitterfehlern „in den Weg gelegt“ werden. Nennen Sie vier Gitterfehler und die durch sie verursachten Verfestigungsmechanismen. Ordnen Sie diese nach der Dimension der Gitterfehler (null- bis dreidimensional).

Aufgabe 1.6

Federelemente in mechanischen Uhrwerken (Stellhebelfedern, metallische Spiralfedern) sind in der Regel kaltgewalzt. Warum?

Aufgabe 1.7

Nennen und erläutern Sie bitte drei Faktoren, die die Mischkristallhärtung entscheidend beeinflussen.

Aufgabe 1.8

Elektrobleche für Transformatoren bestehen aus krz Eisen mit 2–4 % Si (Mischkristall, Unterdrückung der Wirbelströme). Diese Bleche haben häufig eine Goss-Textur, d. h. die $\langle 100 \rangle$ -Richtungen der Kristalle liegen bevorzugt in Walzrichtung und die $\{110\}$ -Ebenen parallel zur Blechoberfläche.

- Zeichnen Sie bitte eine krz Elementarzelle.
- Zeichnen Sie in diese Elementarzelle ein Elektroblech mit Goss-Textur in der korrekten Orientierung ein und kennzeichnen Sie in dieser Ebene vom Typ $\{110\}$ die Walzrichtung vom Typ $\langle 100 \rangle$.

Aufgabe 1.9

Gezogenen Kupferdrähte besitzen eine (111)-Fasertextur, d. h., Ebenen vom Typ $\{111\}$ sind senkrecht zur Drahtachse bzw. Zugrichtung des Drahts orientiert.

- Zeichnen Sie eine kfz Elementarzelle.
- Zeichnen Sie in die kfz Elementarzelle eine Ebene vom Typ $\{111\}$ sowie die Richtung der Drahtachse bzw. die Zugrichtung des Drahts vom Typ $\langle 111 \rangle$ senkrecht dazu ein.

Zusammenfassung

Bei den Metallen dominieren drei Kristallstrukturen. Zu den kubisch-flächenzentrierten (kfz) Metallen zählen unter anderem austenitisches γ -Eisen, Aluminium, Nickel, Blei, Platin, Gold, Silber und Kupfer. Zu den kubisch-raumzentrierten (krz) Metallen zählen das α -Eisen, das δ -Eisen, Wolfram, Molybdän, Tantal, Niob, Chrom und das β -Titan. α -Titan, Magnesium, Zink und Cadmium gehören zu den hexagonal dichtest gepackten (hdp) Metallen. Einige Metalle wie das Eisen oder das Titan können je nach Temperatur, Legierungszusammensetzung oder Wärmebehandlung unterschiedliche Kristallstrukturen annehmen. Dieses Phänomen wird mit dem Begriff Polymorphie beschrieben („Vielgestalt“).

Reale Werkstoffe enthalten Gitterdefekte, z. B. Leerstellen, Fremdatome, Versetzungen, Korngrenzen oder Ausscheidungen. In anisotropen Werkstoffen (Einkristalle, polykristalline Werkstoffe mit Textur, Faserverbundwerkstoffe) sind die Eigenschaften richtungsabhängig, in isotropen und quasiisotropen Werkstoffen (amorphe und polykristalline Werkstoffe ohne Textur) hingegen richtungsunabhängig.

Der E -Modul ist ein Maß für die Bindungsenergie und die elastische Federkraft zwischen den Gitterbausteinen. Ein hoher E -Modul resultiert in einer geringen thermischen Ausdehnung. Die elastischen Eigenschaften in Werkstoffen haben Tensorcharakter. So verursacht z. B. ein einachsiger Spannungszustand eine dreiaxige elastische Verformung.

Die irreversible plastische Verformung von Metallen basiert in erster Linie auf der Bewegung von Versetzungen auf dicht gepackten Gleitebenen. Kubisch-flächenzentrierte Metalle

sind wegen ihrer vielen Gleitsysteme und hohen Packungsdichte am leichtesten plastisch verformbar, gefolgt von den kubisch-raumzentrierten Metallen mit ebenfalls sehr vielen Gleitsystemen und einer etwas weniger dichten Packung. Die hexagonal dichtest gepackten Metalle sind trotz ihrer hohen Packungsdichte aufgrund der geringen Anzahl von Gleitsystemen schlechter plastisch verformbar. Metalle mit kfz oder hdp Struktur können sich neben dem klassischen Versetzungsgleiten ebenfalls unter Bildung von Stapelfehlern und Zwillingsdefekten plastisch verformen. Bei hohen Temperaturen erfolgt die plastische Verformung der Metalle zusätzlich durch atomare Diffusionsprozesse, vor allem entlang der Korngrenzen (Kriechen).

Um die Festigkeit von Metallen zu erhöhen, werden den Versetzungen gezielt Hindernisse in Form von Gitterfehlern in den Weg gestellt. Fremdatome führen zur Mischkristallverfestigung, Kaltumformung mit starker Versetzungsmultiplikation zur Kaltverfestigung, kleine Körner mit vielen Korngrenzen zur Feinkornverfestigung und die Bildung einer zweiten Phase zur Ausscheidungshärtung. Kohärente Ausscheidungen mit ihren weit in den Kristall hineinreichenden Verzerrungsfeldern sind große Versetzungshindernisse und führen zu einem sehr starken Festigkeitsanstieg.

