

Einfluss der Mikrostruktur dünner Kupferbleche auf die Werkstoffkennwerte

Kim, J.; Hoffmann, H. (1)

Der Trend zu Miniaturisierung in Technik und Industrie stellt immer höhere Anforderungen an die Herstellung kleiner Umformteile. Die Entwicklung solcher Kleinteile wird dabei durch Skalierungseffekte erschwert. Mit abnehmender Werkstückgröße nimmt der Einfluss der Mikrostruktur auf den Erfolg des Umformprozesses zu und macht eine Anpassung der Prozessparameter erforderlich [1, 2].

Um zukünftigen fertigungstechnischen Herausforderungen durch die Miniaturisierung begegnen zu können, müssen die Auswirkungen der Mikrostruktur auf die Werkstoffkennwerte analysiert werden. In dieser Arbeit werden die Einflüsse der Korngröße auf die mechanischen Werkstoffkennwerte dünner Kupferbleche mit Dicken zwischen 10 µm und 100 µm untersucht.

Theoretische Basis (Hall-Petch Beziehung)

Eine Steigerung der Festigkeit eines Werkstoffs wird dann erreicht, wenn der Widerstand gegen plastische Verformung, d.h. gegen Versetzungsbewegung, erhöht wird. Das Gleiten von Versetzungen wird verhindert, weswegen ein zusätzlicher Kraftaufwand notwendig ist, um die Versetzungen weiter zu bewegen. Als Folge davon steigt die Festigkeit. Die einzelnen Mechanismen der Festigkeitssteigerung beruhen damit auf dem Einbau von Hindernissen in den Gleitweg der Versetzungen durch [3]:

- Mischkristallverfestigung,
- Kaltverfestigung,
- Kornverfeinerung,
- Ausscheidungs- und Dispersionsverfestigung

Die mechanischen Eigenschaften eines reinen einkristallinen Werkstoffs lassen sich durch die Korngröße erheblich beeinflussen. Effek-

tive Kornfeinerung ist daher von großer Bedeutung für die Festigkeitssteigerung. Der Zusammenhang zwischen der Korngröße und der Fließspannung wird durch die Hall-Petch-Gleichung beschrieben:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{D}}$$

wobei σ_y die Streckgrenze, σ_0 die Startspannung für die Versetzungsbewegung, D die mittlere Korngröße und K den Korngrenzwiderstand beschreibt. Eine Kornfeinerung führt zu einer Erhöhung der Streckgrenze [4 - 6].

Versuchsdurchführung

Versuchswerkstoff

Die maximal erreichbare Dehnung eines Blechwerkstoffes nimmt mit abnehmender Dicke stark ab. Für die Erfassung der analysierbaren Dehnungen und Spannungen muss deswegen der Werkstoff sehr gut umformbar sein. Kupfer hat 12 Gleitsysteme aufgrund seiner kubisch-flächenzentrierten Gitterstruktur und besitzt daher sehr gute Umformeigenschaften. Für die Untersuchung wurde der Werkstoff Cu-HCP (alt SE-Cu58) mit Dicken von 10, 35, 50 und 100 µm ausgewählt, der einen sehr hohen Anteil an Kupfer (99,9 %) enthält. Die chemische Zusammensetzung des Versuchswerkstoffes ist in der Tabelle 1 aufgelistet.

Probenfertigung

Für die Durchführung der Zugversuche wurden rechteckige Zugprobenrohlinge aus der Ausgangsplatte entnommen. Aus den rechteckigen

Legierungselement	Cu + Ag	P
Gewichtsanteil [%]	99,95	max. 0,003

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des Cu-HCU Werkstoffs

Rohlingen in Anlehnung an DIN 50125 - H skalierte Proben gefräst. Die gefertigte Geometrie ist in Bild 1 dargestellt.

Glühen der Proben

Um den Einfluss der Korngröße auf die mechanischen Werkstoffkennwerte zu untersuchen, wird die Korngröße variiert. Schon geglähte Blechwerkstoffe oder Blechwerkstoffe mit einem geringen Umformgrad enthalten eine geringe Keimzahl, so dass die Gefüge nicht rekristallisiert werden können [6]. Die in der Untersuchung verwendeten Proben haben einen walzharten Zustand und weisen einen Umformgrad von mindestens 50 % auf. Die Korngröße hängt bei einem konstanten Umformgrad von der Glüh-temperatur und -dauer ab. Für die Untersuchung wurde der Versuchswerkstoff eine Stunde lang erwärmt und anschließend die Glüh-temperatur für eine Stunde gehalten. Die Abkühlung wurde im Ofen langsam durchgeführt, um einen Verzug der Proben zu vermeiden. Das Glühen wurde wegen einer möglichen Oxidation der Proben unter Vakuum, mit Glüh-temperaturvariationen von 300, 320,

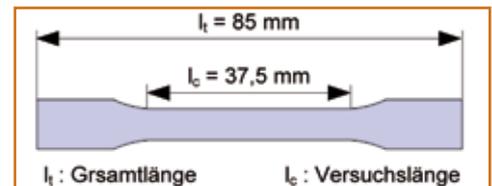


Bild 1: Halbskalierte Zugproben-geometrie nach DIN 50125 - H 12,5x50

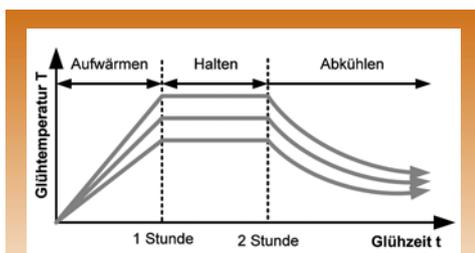


Bild 2: Glühvorgang für Cu-HCP

340, 360 und 400 °C durchgeführt. In Bild 2 ist der Glühvorgang graphisch dargestellt.

Während der Rekristallisation wird die Dichte der Versetzungen, in der der Hauptanteil der im Verlaufe der Verformung erhöhten inneren Energie gespeichert ist, wesentlich reduziert. Es tritt deswegen eine Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Neubildung und Wachstum versetzungsarmer Kristallite ein [6].

Quantitative Gefügeanalyse

Bei der Linearanalyse wird die Schlißfläche entlang einer beliebig gelegten Linie der Länge untersucht. Dabei werden die Schnittpunkte der Messlinie mit Korngrenzen oder Phasengrenzen gezählt. Die sich beim Schneiden der einzelnen Gefügebestandteile ergebenden Sehnen werden gezählt und vermessen.

Die mittlere Korngröße (lineare Mittelkorngröße) ergibt sich als das Verhältnis aus Gesamtsehnenlänge und der Anzahl der Sehnen [6].

$$\bar{R}^K = \frac{\sum L^K}{N} = \frac{L}{N}$$

Zugversuch mit optischem Messverfahren

Der Zugversuch ist ein genormtes Standardverfahren zur Ermittlung mechanischer Werkstoffkennwerte. Im Zugversuch werden Proben mit einer konstanten Dehnrates bis zum Bruch gezogen und dabei die aktuelle Zugkraft und die Probenlängenänderungen kontinuierlich aufgezeichnet. Daraus lässt sich das Spannungs- und Dehnungsdiagramm ableiten. Aus diesem lassen sich Werkstoff-

kennwerte, wie die 0,2 % Streckgrenze, die senkrechte Anisotropie, und die Zugfestigkeit ermitteln [7].

Plastizität ist eine weitere wichtige Werkstoffeigenschaft. Auf ihr beruhen die Fertigungsverfahren der bildsamen Formgebung. Plastische Verformung entsteht erst nach Überschreiten der Streckgrenze. Daher werden die folgenden Werkstoffkennwerte untersucht, die mit der plastischen Verformung eines Werkstoffes verbunden sind.

■ **Fließkurve:** Die Fließkurve beschreibt das Verhältnis zwischen der logarithmischen Formänderung und der Fließspannung. Die Fließkurve aus dem einachsigen Zugversuch wird in der Regel für die FE-Simulation als grundlegende Eingabe benötigt.

■ **0,2 % Streckgrenze $R_{p0,2}$:** Die Streckgrenze beschreibt die Grenze zwischen elastischer und plastischer Formänderung. Die Bestimmung der Streckgrenze ist diffizil, so dass eine 0,2 % Offsetdehnung unter Berücksichtigung des entsprechenden E-Moduls als Fließgrenze eines Materials angenommen wird.

■ **senkrechte Anisotropie r :** Die senkrechte Anisotropie beschreibt die richtungsabhängigen mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffes bei plastischer Verformung. Bei hoher senkrechter Anisotropie besitzt ein Werkstoff eine gute Tiefziehfähigkeit [8]. Die senkrechte Anisotropie wird mit folgender Formel im plastischen Umformbereich ermittelt.

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s}$$

φ_b beschreibt dabei die logarithmische Formänderung in Breitenrichtung und φ_s die logarithmische Formänderung in Dickenrichtung.

Die Verwendung eines optischen Messverfahrens ermöglicht die indirekte Erfassung der lokal vorherrschenden Formänderung der Proben. Die Proben werden vor dem Versuch mit einem schwarzen und einem weißen Lack stochastisch gerastert.

Vor und während einer Deformation werden digitale Stereobilder aufgenommen. Diese Bilder werden im Rechner anschließend zu Dehnungen und Verschiebungen verarbeitet. Ein Beispiel einer gerasterten Probe und eines Messergebnisses sind in Bild 3 zu sehen.

Die Zugversuche wurden an einer Universalprüfmaschine Typ 1484/DUPS-M der Fa. Zwick GmbH & Co., Ulm, durchgeführt. Für die genaue

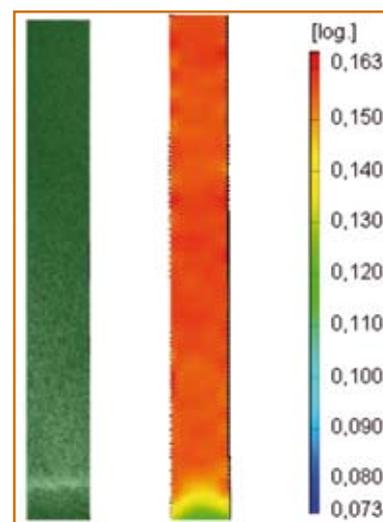


Bild 3: gerasterte Probe (links) und Messergebnis (rechts)

Messung der Spannung an den Proben wurde eine Kraftmessdose mit einer Nennkraft von 2,5 kN verwendet. Alle Versuche wurden quasi statisch, mit einer konstanten Dehnrates von 0,0025 1/s durchgeführt.

Ergebnisse

Quantitative Gefügeanalyse

In Bild 4 ist die Gefügestruktur bei einer Blechdicke von 100 µm dargestellt. Das Blech zeigt eine Textur vor dem Glühen. Nach dem Glühen bei einer Temperatur von 300 °C beträgt die mittlere Korngröße ca. 7,3 µm und bei 400 °C Glühtemperatur ca. 12,8 µm.

Bei der Werkstoffkennwertermittlung mittels Zugversuch müssen der Werkstoffzustand und die Dimension der Geometrie uniform angenommen werden, damit die lokalen Verformungen der Proben von der

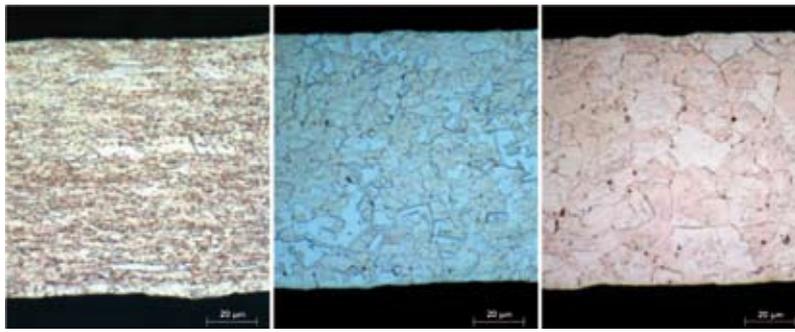


Bild 4: Gefügestruktur bei 100 µm Blechdicke (links) vor dem Glühen, (Mitte) Glühen bei 300 °C, (rechts) Glühen bei 400 °C



Bild 5: Dickenverteilung bei 10 µm: (links) vor Glühen, (Mitte) Glühen bei 300 °C, (rechts) Glühen bei 400 °C

Geometrieänderung der Proben im Messbereich vorausberechnet werden können. Nach dem Glühen der 10 µm dicken Bleche wurde eine Inhomogenität in der Dickenverteilung festgestellt, die auf ungleichmäßiges Kornwachstum während des Glühvorganges zurückzuführen ist. Auf eine quantitative Gefügeanalyse wurde aus diesem Grund für diese Dicke verzichtet.

Die Korngrößen der Proben sind in Tabelle 2 dargestellt. Bei konstanter Blechdicke sind die Korngrößen abhängig von der Glühtemperatur.

Wiederholbarkeit der Versuche

Für die Verifizierung des Ergebnisses muss der ermittelte Werkstoffkennwert unter gegebenen Bedingungen reproduzierbar sein. Als Beispiel werden die Fließkurven der dünnsten Dicken in Bild 6 dargestellt. Trotz der inhomogenen Dickenverteilung des 10 µm Bleches zeigt sich eine gute Wiederholbarkeit.

Werkstoffkennwerte

Fließkurve

In Bild 7 ist die Änderung der Fließkurve in Abhängigkeit von den verschiedenen Glühtemperaturen dargestellt. Im Diagramm nimmt die Fließspannung bei einer logarithmischen Formänderung mit steigenden Glühtemperaturen ab, da die Korngröße die Fließspannung beeinflusst.

Senkrechte Anisotropie

Wie in Bild 8 dargestellt ist, ist der Einfluss der Glühtemperatur auf die senkrechte Anisotropie sehr gering. Unabhängig von der Glühtemperatur zeigt die senkrechte Anisotropie jedoch eine Abhängigkeit von der Probendicke. 35, 50 und 100 µm dicke Proben weisen eine relativ konstante senkrechte Anisotropie auf. Bei einer Dicke von 10 µm zeigt sich ein starker Abfall der Werte, d.h. die Dickenänderungen der dünnen Proben sind sehr gering im Vergleich

zu den Längen- und Breitenänderungen. Dies führt zu einer schlechten Tiefziehfähigkeit.

Hall-Petch Beziehung

Für die Streckgrenze gilt normalerweise die Hall-Petch-Beziehung.

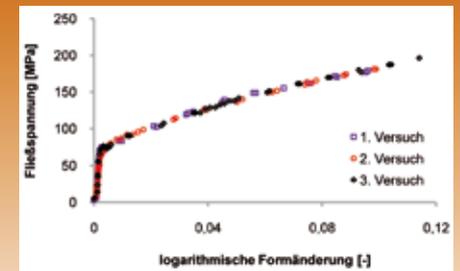


Bild 6: Wiederholbarkeit der Versuche (10 µm Blechdicke)

Mikroskopisch entsteht die plastische Verformung durch Versetzungsbewegungen. Die Korngrenzen behindern dabei diese Bewegung. Man spricht von der sogenannten Korngrenzenverfestigung. Nach dem Überschreiten der Streckgrenze verfestigt sich der Werkstoff aufgrund der Erhöhung der Versetzungsdichte.

In Bild 9 ist die Hall-Petch Beziehung für Blechdicken von 35, 50 und 100 µm dargestellt. Die Steigung

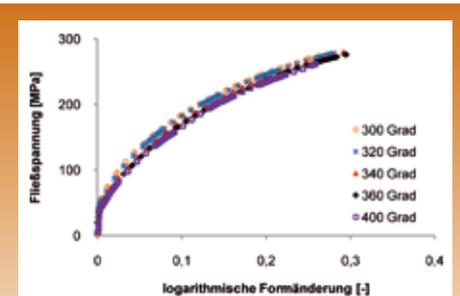


Bild 7: Fließkurven von 50 µm Probendicke mit unterschiedlichen Glühtemperaturen

	300 °C	320 °C	340 °C	360 °C	400 °C
35 µm	7,5 µm	8,4 µm	9,1 µm	10,1 µm	12,0 µm
50 µm	16,3 µm	18,2 µm	20,2 µm	21,8 µm	22,2 µm
100 µm	7,3 µm	7,7 µm	8,3 µm	9,5 µm	12,8 µm

Tabelle 2: Mittlere Korngröße nach der Linearanalyse

gen der Linien sind konstant für jede Dicke. Das heißt, dass der Einfluss der Korngröße auf die Streckgrenze konstant ist und unabhängig von der Blechdicke ist. Bei einer konstanten Korngröße ergibt sich eine unter-

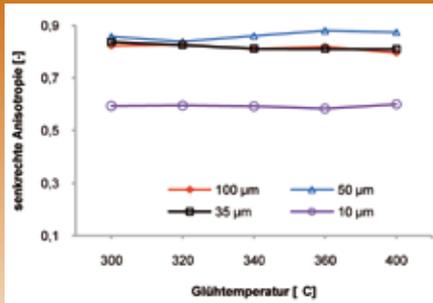


Bild 8: Senkrechte Anisotropie der Proben mit unterschiedlichen Glüh-Temperatur

schiedliche Streckgrenze, die abhängig von der Probendicke ist. Diese Werkstoffkennwertänderung ist der Skalierungseffekt. Mit abnehmender Probendicke nimmt die Streckgrenze stark ab.

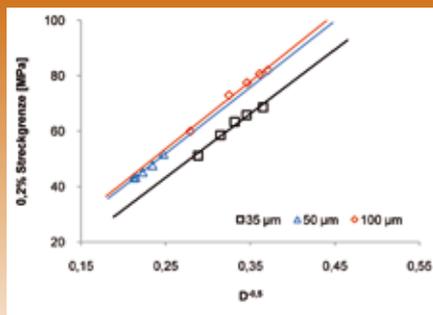


Bild 9: Hall-Petch-Beziehung

Zusammenfassung

- Werkstoffkennwerte für Probendicken von 10, 35, 50 und 100 µm wurden mittels Zugversuch sowie mit einem optischen Messverfahren ermittelt. Das Messverfahren zeigt eine gute Reproduzierbarkeit. Durch die indirekten Messung der Dehnung ist das Verfahren für die Werkstoffkennwertermittlung der dünnen Proben sehr gut geeignet.
- Die 10 µm Proben zeigen eine relativ große inhomogene Dickenverteilung aufgrund von fertigungstechnologischen Einschränkungen. Die Abweichung der Dicke beträgt relativ zur Nenndicke ±10%.
- Die Kupferproben wurden mit Temperaturvariationen von 300, 320, 340, 360 und 400 °C gegläht. Dabei zeigt sich, dass bei einer konstanten Probendicke die Korngröße mit steigenden Glüh-Temperaturen zunimmt.
- Der Kennwert senkrechte Anisotropie erweist sich als unabhängig von der Korngröße. Bei einer Dicke von 10 µm ist die Dickenabnahme bedingt durch die Längen- und Breitenänderung sehr gering, so dass sich eine schlechte Tiefziehfähigkeit zeigt.

Das Verhältnis zwischen Korngröße und Streckgrenze ist nach der Hall-Petch Beziehung für jede Blechdicke linear. Der Einfluss der Korngröße auf die Streckgrenze ist unabhängig von der Probendicke. Am Beispiel der Hall-Petch Beziehung wurde der Skalierungseffekt der Streckgrenze gezeigt.

Literatur

- [1] Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N., and Engel, U., 2001, "Microforming," CIRP Ann., pp. 445–462.
- [2] Tiesler, N., and Engel, U., 2000, "Microforming—Effects of Minaturization," Metal Forming 2000, Balkema, Rotterdam, pp. 355–360.
- [3] Callister, William Jr, Materials Science and Engineering, An Introduction. John Wiley & Sons, NY, NY 1985.
- [4] E.O.Hall, Proc. Phys. Soc., Ser. B, Vol. 64, pp. 747-753, (1951).
- [5] N.J.Petch, J. Iron and Steel Institute, pp. 25-28, May 1953.
- [6] Schatt, W., Worch, H., "Werkstoffwissenschaft," 8., Auflage 1996
- [7] E. Dowling, N. "Mechanical behavior of materials," Second Edition 1999.
- [8] Hosford WF. The mechanics of crystals and textured polycrystals. New York: Oxford University Press, 1993

(1) M.Sc. JaeKun Kim, Prof. Dr.-Ing. Hatrnut Hoffmann, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg), Technische Universität München

Eine runde Sache: Kupferrotoren

Faßbinder, S.; Tikana, L.; Klassert, A. (1)

In einem optimierten Drehstrommotor (Wirkungsgradklasse EFF1) der gegenwärtig üblichen Technik ist prinzipiell nichts Neues enthalten. Die Unterschiede zu älteren, weniger effizienten Klassen (EFF2 und EFF3) bestehen allesamt aus graduellen Verbesserungen der Details.

Jetzt aber steht ein Verbesserungsschritt zur Verfügung, der den Übergang auf eine andere Technologie darstellt. Dessen Potential ist erheblich, so dass dies zusammen mit den anderen Faktoren ohne Schwierigkeiten die Einführung einer kompletten weiteren Stufe, „EFF0“

so zu sagen, ermöglichen würde: Als Leiterwerkstoff im Kurzschlussläufer kann jetzt Kupfer statt Aluminium eingesetzt werden. Die Vorteile

- können sich sehen lassen:
- Kupfer leitet um 35 % besser und senkt die Stromwärmeverluste entsprechend.
- Statt die Verluste zu senken, kann man auch die Leistungsdichte erhöhen und einen kleineren Motor bauen oder einen

Kompromiss eingehen und diese beiden Vorteile je zum Teil ausnutzen.

- Der Läufer kann einfacher gestaltet werden. Die Kühlrippen können entfallen. Auswuchten ist in vielen Fällen nicht mehr erforderlich, da das Kupfer eine gleichmäßigere Füllung der Nuten ermöglicht.
- Auf das Volumen bezogen hat die Kupferfüllung eine höhere Wärmekapazität, und der Motor ist daher kurzzeitig stärker überlastbar.

In dem neuen Schema zur Klassifizierung der Wirkungsgrade von Elektromotoren, das zur Zeit von der www.cemep.org und den zuständigen Normungsgremien der www.iec.ch erarbeitet wird, ist dies bereits berücksichtigt: Es sieht 4 statt nur 3 Effizienzklassen vor und ist – mit Blick auf weiteren zukünftigen Fortschritt – nach oben statt nach unten offen, sieht also die Klasse 1 als schlechteste vor und lässt sich somit jederzeit nach oben hin erweitern. Nach unten dagegen kommt eine Erweiterung nicht mehr in Frage.

(1) *Stefan Faßbinder, Dr. Ladji Tikana & Dr. Anton Klassert, Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e. V.*



Kupferrotoren für Elektromotoren

Functional copper layers integrated into fiber composite structures for antenna reflectors

Baier, H.; Datashvili, L.; Rapp, S. (1)

In addition to their functional requirements, antenna reflectors for radio frequencies in the higher GHz range have to have high geometric shape accuracy even under significant disturbances e.g. by temperature variations.

In addition they should be sufficiently stiff and lightweight, especially so in aerospace applications. For certain concepts copper layers as electrically conducting and reflecting materials are to be properly combined with fiber reinforced materials and structures. For example, so called reflect arrays consist of planar sandwich structures with integrated copper patches obtained via chemical

etching from copper plated Kapton layers. The overall composition is designed such that the fiber reinforced parts have low electromagnetic damping and compensate the relatively high thermal expansion of the copper parts. The copper patches are shaped and positioned such that the planar reflector electrically behaves like a paraboloid, which simplifies the geometrical setup and related tooling. Another example for functional copper layers in this application area are rectangular wave guides composed of Carbon fiber com-

posites for structural performance and internal thin (about 20-30 µm) copper coatings for electrical performance. Again high geometric accuracy has to be maintained.

Investigations in layout, manufacturing and experimental characterization of these hybrid components are presented.

(1) *H. Baier, L. Datashvili, S. Rapp, Lehrstuhl für Leichtbau, TU München*



Copper patches on Kapton layer (left) integrated into Aramid-Carbon-sandwich (right)

Umfassend informiert:

METALL-Mini-Abos für Einsteiger!

Abo-Hotline:

05 11/73 04-122