

Legierungsentwicklung, Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von ausscheidungsfähigen CuMg-Legierungen

Zilly, A.; Kött, S.; Jost, N. (1)

Die Legierung CuMg wird seit den siebziger Jahren als Substitut für das umweltschädliche Kupfer-Cadmium eingesetzt. Sie findet beispielsweise als Leitmaterial für elektrische Bahnen Verwendung und ist mittlerweile nahezu weltweit auf allen Bahnstrecken mit höheren Geschwindigkeiten im Einsatz. Die konventionellen CuMg-Legierungen mit ihrem Magnesiumgehalt von 0,3 - 0,7 Gew.-% befinden sich innerhalb des homogenen α -Mischkristallbereiches [ULL 91]. Daher lassen sich Festigkeitssteigerungen nur durch Mischkristall- und Kaltverfestigung erreichen, wodurch jedoch die Leitfähigkeit abnimmt. Eine Erhöhung der Magnesiumzugabe hin zu einem ausscheidungsfähigen System stellt daher einen plausiblen Ansatz zur Verbesserung der Eigenschaften dar.

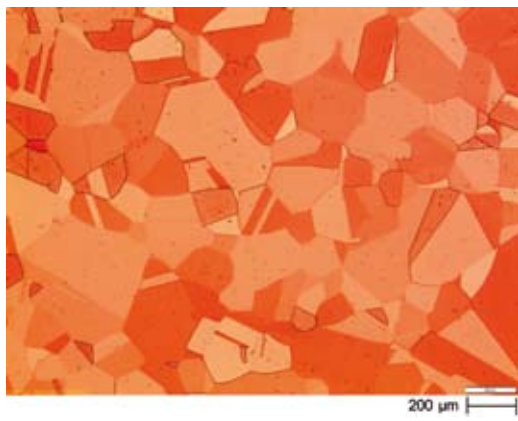


Bild 1: Homogenisiertes Gefüge, CuMg_{2,5}; 50-fach, geätzt

Die Möglichkeit einer Ausscheidungsverfestigung bleibt bisher noch weitgehend ungenutzt. Das liegt zum einen an der anspruchsvollen Gießbarkeit dieser Legierung und zum anderen an dem bisher noch sehr wenig erforschten und komplexen Ausscheidungsverhalten.

Herstellung und Homogenisierung

Da ausscheidungsfähige höher magnesi umhaltige Kupferlegierungen bisher nicht auf dem Markt erhältlich sind, musste mit

der Herstellung von Gussproben im Labormaßstab begonnen werden. Diese Legierungen verhalten sich beim Schmelzen und Vergießen sehr ungünstig. Dies liegt neben dem großen Erstarrungsintervall hauptsächlich an der hohen Sauerstoffaffinität von Magnesium. Wird Magnesium unter normaler Atmosphäre erhitzt, so beginnt es sich bereits bei ungefähr 100 °C unterhalb seines Schmelzpunktes von 650 °C zu entzünden. Daher ist eine Erschmelzung unter Schutzatmosphäre erforderlich. Von den verschiedenen erprobten Gießverfahren hat sich das vertikale Stranggussverfahren auf einer Vakuum-Stranggießanlage VC 400 V der Fa. Indutherm am besten

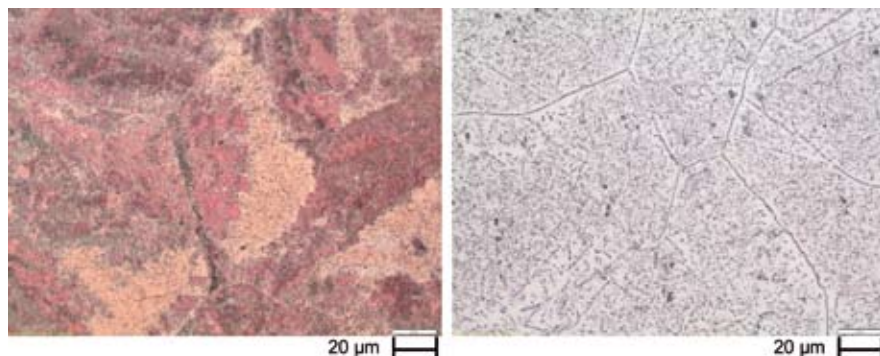


Bild 2: Verlauf der Ausscheidungsreaktion bei CuMg_{2,5}; li.: 400 °C, 47 h, re.: 500 °C, 71 h; 50-fach

bewährt. Die Aufschmelzung des Vormaterials erfolgte dabei induktiv unter Stickstoffatmosphäre in einem Grafittiegel. Damit konnte geeignetes Probenmaterial in einer sehr hohen Güte und Reproduzierbarkeit mit verschiedenen Legierungsgehalten zwischen 2,5 - 3,5 Gew. % Mg hergestellt werden. [ZIL 11].

Für eine effektive Ausscheidungsverfestigung ist es erforderlich, dass der Mischkristall in homogenisierter Form vorliegt. Um den Homogenisierungsvorgang so effektiv wie möglich zu gestalten, wurde hierfür eine thermomechanische Behandlung durchgeführt. Die zu dem gewünschten Homogenitätsgrad führenden Glühparameter wurden empirisch ermittelt, da diese von den Erstarrungsbedingungen beim Gießen abhängen. So konnte beispielsweise bei der Legierung CuMg_{2,5} an einer vorverformten Probe nach einer Glühzeit von 1 h bei 730 °C eine mittlere Korngröße von 110 µm (Bild 1) erzielt werden [ZIL 11a].

Ausscheidungsverhalten

Die bei CuMg auftretenden Ausscheidungen bestehen aus der intermetallischen Verbindung Cu₂Mg. Es handelt sich dabei um eine kubische Laves-Phase, welche sich vor allem durch ihre hohe Sprödigkeit auszeichnet. In der vorliegenden Arbeit soll der Fokus auf die Legierung CuMg_{2,5} gerichtet werden. Zur Ermittlung optimaler Wärmebehandlungsparameter wurden verschiedene isotherme Glühungen bei Temperaturen zwischen 350 °C und 500 °C mit einer Dauer von bis zu 71 h durchgeführt.

Der Ausscheidungsverlauf verläuft in Abhängigkeit von Auslagerungstemperatur und Zeit sowohl kontinuierlich als auch diskontinuierlich (Bild 2). Bei CuMg_{2,5} ist am Beispiel einer Glühtemperatur von 400 °C zu erkennen, dass der Ausschei-

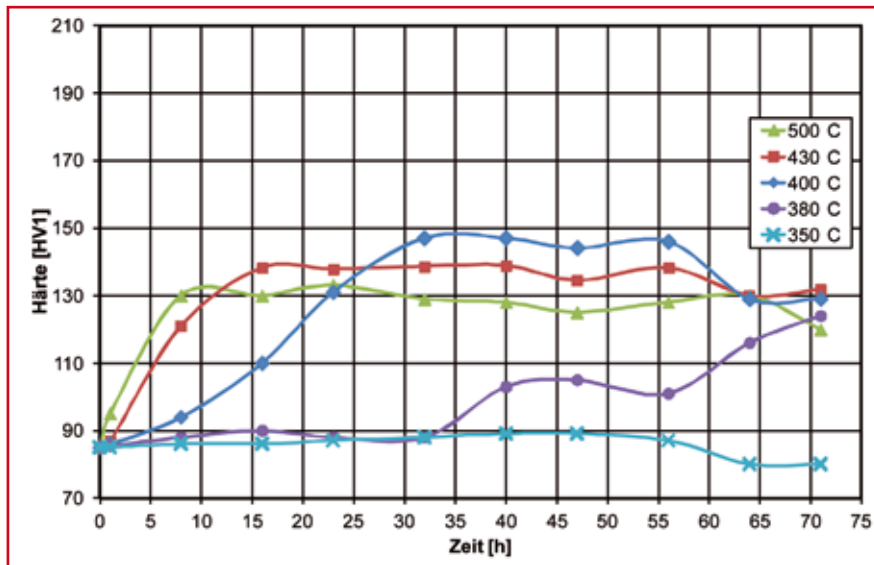


Bild 3: Härte-Zeit-Verläufe von CuMg_{2,5}

dingvorgang bei niedrigeren Temperaturen vornehmlich diskontinuierlich abläuft. Diese Ausscheidungen (Cu₂Mg) ähneln in ihrer charakteristischen Struktur der des Perlits. Die Matrix hingegen setzt sich aus hellen Bereichen zusammen. Im Vergleich dazu überwiegen bei einer Glühung bei 500 °C die kontinuierlichen Ausscheidungen, welche in diesem Fall bereits Vergrößerungserscheinungen aufweisen. Diese Wärmebehandlung führt zudem zu der Bildung von ausscheidungsfreien Zonen entlang der Korngrenzen, welche deutlich erkennbar sind.

Erhöhung der Härte und Leitfähigkeit

Die Härteverläufe der Legierung CuMg_{2,5} sind in Bild 3 dargestellt. Die Ausgangshärte des homogenisierten Gefüges liegt

bei 85 HV1 und lässt sich bei einer Temperatur von 400 °C nach 32 h auf einen Wert von 147 HV1 steigern. Unterhalb dieser Temperatur verläuft die diffusionsgesteuerte Keimbildung für eine ökonomisch sinnvolle Anwendung zu langsam. Bei den höheren Temperaturen steigt die Härte zwar zunächst schneller an, erreicht jedoch aufgrund der höheren Löslichkeit der Magnesiumatome nur ein geringeres ausschcheidbares Volumen und damit eine niedrigere Endhärte. Durch die einsetzende Vergrößerung der Ausscheidungsteilchen fällt die Härte danach wieder ab. Insgesamt steht ab einer Auslagerungstemperatur von 400 °C ein recht breites Auslagerungszeitfenster mit dabei jeweils erreichbarer Maximalhärte zur Verfügung.

Die Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit zeigt zunächst ein ähnliches Ver-

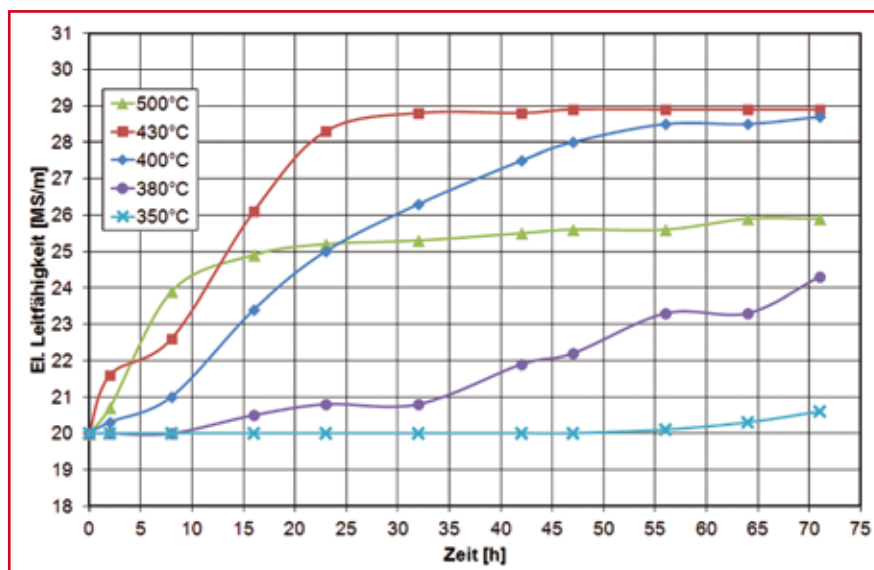


Bild 4: Leitfähigkeitsentwicklung von CuMg_{2,5}

halten (Bild 4). Analog zur Kurvenschar der Härteentwicklung wird auch hier die Steigung der Leitfähigkeitserhöhung mit der Temperaturzunahme größer. Das erreichbare Maximum beträgt hierbei 28,9 MS/m und wird bei 430 °C nach 47 h erreicht (bei einer Ausgangsleitfähigkeit von 20 MS/m). Während bei den Härtewerten eine Abnahme im überalterten Zustand gemessen wurde, trifft dies bei der Leitfähigkeit nicht zu. Da die feinen Cu₂Mg-Ausscheidungen offensichtlich eine viel stärkere Streuung der Elektronen verursachen, als die aufgrund der Überalterung koagulierten Teilchen, steigt die Leitfähigkeit der entmischten Matrix auch nach einer längeren Glühdauer noch an.

Zugfestigkeit und Duktilität

Neben der Härte und der elektrischen Leitfähigkeit wurden als weitere wichtige Werkstoffkennwerte auch die Zugfestigkeit und Bruchdehnung ermittelt. Im nichtausgeschiedenen Zustand beträgt bei CuMg_{2,5} die Zugfestigkeit R_m = 320 MPa bei einer Bruchdehnung A₅ = 65 %. Im Laufe der Ausscheidungsglühung bei 400 °C steigt die Zugfestigkeit zunächst zwar auf 430 MPa an, jedoch geht deren Rückgang im weiteren Verlauf mit der Verringerung der Duktilität durch die Bildung der spröden intermetallischen Phase Cu₂Mg einher. So sinkt beispielsweise die Bruchdehnung nach 47 h auf einen Wert von A₅ < 4 % ab. Zur Verbesserung der Duktilität wurden daher mehrere Verfahren zur Kornfeinung des homogenisierten Ausgangsgefüges vor der Ausscheidungsbehandlung erprobt. Am geeignetsten erwies sich dabei eine statische Rekristallisation des zuvor kaltverformten Gefüges. Durch die Bildung neuer Körner an den Stellen mit einer hohen Versetzungsdichte fand dadurch eine deutliche Reduzierung der mittleren Korngröße um 80 % von 110 µm auf 23 µm statt. Im Vergleich zum herkömmlichen Ausgangswerkstoff konnte die Zugfestigkeit durch das so korngefeinte Gefüges auf über 500 MPa bei einer Bruchdehnung von 14 % gesteigert werden. Somit hat die Kornfeinung in Bezug auf die einsetzende Ausscheidungsvergrößerung einen überaus positiven Effekt.

Kombination verschiedener Verfestigungsmechanismen

Bei einer Vielzahl industriell eingesetzter aushärtbarer Kupferbasislegierungen wer-

den verschiedene Mechanismen zur Härte- und Festigkeitssteigerung kombiniert. So ist beispielsweise Kupfer-Chrom mit einem Cr-Gehalt von 0,3 - 1,2 Gew. % im ausgehärteten Zustand noch gut kaltumformbar [VIN 02]. Bauteile aus Kupfer-Beryllium, für deren Anwendung ein hoher Umformgrad erforderlich ist, werden nach dem letzten Verformungsschritt ausscheidungsgehärtet [LAM 12]. Eine handelsübliche Kombination aus einer Kaltumformung mit anschließender Aushärtung stellt der Lieferzustand „werksvergütet“ dar. Hierbei handelt es sich um einen Kompromiss bezüglich Festigkeit und Verformbarkeit. Dieser wird für Teile eingesetzt, bei denen die maximal erreichbare Werkstofffestigkeit nicht erforderlich ist. Ein typischer Werkstoff, welcher in diesem Zustand den Herstellern von elektrischen Kontakten zur Verfügung gestellt wird, ist die Legierung CuNi2Si [KIN 07], [VIN 02].

Um die durch eine Ausscheidungshärtung erreichten Eigenschaften bei der Legierung CuMg weiter zu optimieren, wurden die anhand der vorherigen Beispiele dargestellten Kombinationsmöglichkeiten erprobt. Bei einer Kaltumformung des bereits ausgeschiedenen Materials ist ein ausreichend hohes Formänderungsvermögen erforderlich, welches aufgrund der Versprödung durch die Cu₂Mg-Teilchen ohne eine Beeinträchtigung des Werkstoffgefüges nicht mehr gegeben ist. Ab einem gewissen Umformgrad machte sich eine Überschreitung der Grenzformänderung durch das Auftreten von Rissen und einer deutlichen Verminderung der Bruchdehnung bemerkbar. Da sich diese Verfahrensreihenfolge bei CuMg als nicht praktikabel erwies, erfolgte deren Umkehrung.

Die bei 400 °C durchgeführte Ausscheidungsbehandlung des zuvor kaltverfestigten Gefüges wirkt wie eine statische Erholungsglühung. Daher fallen die hohen Anfangswerte der Härte und Zugfestigkeit während der Glühung etwas ab. Dadurch erreicht die Bruchdehnung wiederum Werte, welche eine Weiterverarbeitung des Werkstoffes zu Langprodukten möglich machen. Die Leitfähigkeit erfährt ab einem gewissen Umformgrad einen überproportionalen Anstieg. So lassen sich beispielsweise bei der Legierung CuMg_{2,5} mit einem logarithmischen Umformgrad von $\phi_h = 2,1$ und einer 8-stündigen Glühung bei 400 °C Zugfestigkeitswerte oberhalb 650 MPa bei einer Bruchdehnung von ca. 6 % erreichen. Die Leitfähigkeit



Bild 5: Verformtes Gefüge, CuMg_{2,5}; $\phi_h = 2,1$; 400 °C, 8 h; 2.000-fach, REM (BSE)

beträgt dabei 32,1 MS/m. Aufgrund der vorhandenen Versetzungen, welche als Keimstellen für die Bildung von zahlreichen Ausscheidungen dienen, lassen sich das Volumen der Zweitphase und damit die Leitfähigkeit innerhalb relativ kurzer Zeit auf diesen Maximalwert erhöhen. In der REM-Aufnahme (Bild 5) ist anhand der hohen Vergrößerung die geringe Größe der kontinuierlichen Ausscheidungen zu erkennen, welche deutlich unter 1 µm liegt.

Die Glühdauer von 8 h ist vor allem daher von großem Interesse, da sie sich sehr gut in einen industriellen 3-Schichtbetrieb integrieren ließe. Vergleicht man diese Wertekombination beispielsweise mit den Herstellerangaben [NKT 06] einer derzeit aktuell für Bahnleitmaterial eingesetzten CuMg-Legierung mit 0,5 Gew. % Mg (Tabelle 1), so liegen die Härte und die Zugfestigkeit deutlich oberhalb des herkömmlichen Werkstoffes. Die Bruchdehnung lässt sich aufgrund des unterschiedlichen Indexes nur bedingt vergleichen. Die Leitfähigkeit von CuMg_{2,5}

liegt zwar unterhalb, erreicht aber trotz des fünffachen Magnesiumgehaltes einen verhältnismäßig hohen Wert, welcher im Zuge weiterer Optimierungsmaßnahmen durchaus noch gesteigert werden kann. Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass aufgrund dieser genannten Vorteile zu diesen Legierungen und den dazugehörigen Fertigungsverfahren von den Autoren aktuell ein Patent angemeldet wurde.

Einsatzmöglichkeiten und Ausblicke

Der Vergleich mit herkömmlichem Bahnleitmaterial zeigt, dass die Legierung CuMg_{2,5} nach einer Kaltverfestigung und nachfolgender Ausscheidungshärtung für den Einsatz als Bahnleitmaterial geeignet sein kann. Gemäß derzeit gültiger Auslegungskriterien von Fahrleitungen [KIE 98] ließe sich mit der Legierung CuMg_{2,5} und der erreichbaren Kombination an mechanischen Werkstoffkennwerten nach einer überschlägigen Berechnung eine Geschwindigkeitssteigerung um 50 km/h realisieren, da die Maximalgeschwindigkeit

		Standardlegierung CuMg _{0,5} $\phi_h = 1,64$	Versuchslegierung CuMg _{2,5} $\phi_h = 2,1$
Härte	HV1	107	192
Leitfähigkeit	MS/m	36,0	32,1
Zugfestigkeit R_m	MPa	490	654
Bruchdehnung A	%	3 - 10 (A200)	5,5 (A5)

Tabelle 1: Vergleich von CuMg_{2,5} mit CuMg_{0,5}

keit nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten direkt von der Vorspannung der Fahrdrähte und damit ihrer mechanischen Festigkeit bei Zugbeanspruchung abhängig ist. Neben Bahnleitmaterial lassen sich diese ausscheidungsfähigen Legierungen durchaus und in vielfältiger Weise auch in anderen Bereichen einsetzen, in denen es auf eine hohe Festigkeit bei gleichzeitig guter Leitfähigkeit ankommt. Dadurch könnten beispielsweise Leitungsquerschnitte verringert werden, was zu einer Gewichtsreduzierung und einer nachhaltigen Einsparung des teuren Werkstoffes Kupfer führen würde. In Anbetracht der Verfünfachung des Kupferpreises in den vergangenen zehn Jahren [LME 12] und mit einer weiterhin steigenden Tendenz, könnte eine solche Materialeinsparung einen deutlichen Wettbewerbsvorteil für viele Hersteller und Anwender darstellen. Durch den Einsatz dieser neuartigen ausscheidungsfähigen CuMg-Legierungen lässt sich das Anwendungsgebiet bisher verwendeter niedriglegierter Kupferbasislegierungen deutlich und in ausgeprägt optimierter Weise erweitern. So könnten

beispielsweise diese Legierungen durch das physiologisch unbedenkliche, verhältnismäßig preisgünstige und auch langfristig gut verfügbare Magnesium sehr gut als Substitut für andere Kupferbasislegierungen dienen, welche toxische oder teure Legierungselemente beinhalten. Um diese Einsatzmöglichkeiten noch näher zu untersuchen, soll in den nächsten Schritten der Labormaßstab hin zu größeren Chargen in den industriellen Maßstab hinein erweitert werden. Bisher wurde aufgrund der komplexen Ausscheidungskinetik noch auf den Zusatz weiterer Legierungselemente verzichtet. Basierend auf den vorliegenden Erkenntnissen soll nun jedoch auch eine Erweiterung des binären Legierungssystems CuMg erfolgen, wobei erste Versuche mit weiteren Elementen bereits ausgesprochen vielversprechende Ergebnisse erbrachten.

Literatur

[KIE 98] Kießling, F.; Puschnann, R.; Schmieder, A.; Schmidt, P.: Fahrleitungen elektrischer Bahnen. B.G. Teubner Verlag, 2. Auflage, 1998.

[KIN 07] Kinder, J.: Verbesserung des Langzeitverhaltens einer elektrisch hochleitfähigen Kupferlegierung für elektromechanische Kontaktsysteme durch Ausscheidungsoptimierung. Abschlussbericht AIF 14129 N (2007).

[LAM 12] Lamineries Matthey SA (Hrsg.): Kupfer-Beryllium Legierungen. Technische Information, Vergleich der Eigenschaften. 2012.

[NKT 06] nkt cables GmbH: Valcond® - Innovation für die Bahn. Produktbeschreibung, 2006.

[ULL 91] Ullwer, H.; Linke, M.; Pangert, L.: Technologische Betrachtungen zur kontinuierlichen Fertigung von Cu-Mg-Leitbronzedraht. METALL 45 (1991), H. 11, S. 1120 - 1123.

[VIN 02] Vinaricky, E.: Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen., Springer Verlag Berlin, 2. Auflage, 2002.

[ZIL 11] Zilly, A.; Christian, U.; Kött, S.; Nobiling, D.; Jost, N.: Production and Metallographic Examination of Precipitable Cu-Mg Alloys. Practical Metallography 48 (2011), H. 11, S. 582-593.

[ZIL 11a] Zilly, A.; Christian, U.; Kött, S.; Schmid, T.; Jost, N.: Anwendungsorientierte Optimierung der Werkstoffeigenschaften von ausscheidungsfähigen CuMg-Legierungen. Wanner, A.; Rettenmayr, M. (Hrsg.): Fortschritte in der Metallographie, Berichte der 45. Metallographietagung Karlsruhe, 2011. Sonderbände der Praktischen Metallographie 43, (2011), S. 201-206.

(1) Hochschule Pforzheim, Fakultät für Technik / Maschinenbau - Institut für Werkstoffe und Werkstofftechnologien (IWWT)

AnzeigeWRC