



Einfluss der Hauptlegierungselemente auf wichtige physikalische Eigenschaften warmfester AlSi-Gusslegierungen

Im AluReport vom Jänner 2012 wurde bereits detailliert über den Einfluss von Ni auf die Wärmeleitfähigkeit warmfester Al-Gusslegierungen berichtet. In diesem Beitrag soll des Weiteren die Bedeutung der Legierungselemente Si und Cu geklärt werden.

Neben der Wärmeleitfähigkeit λ spielt auch der thermische Ausdehnungskoeffizient α eine entscheidende Rolle bei der Auswahl von Legierungen für Motorkomponenten. Im Antriebsbereich beispielsweise sind Materialien mit möglichst geringer thermischer Ausdehnung einzusetzen, um ein Festfressen des Kolbens im Zylinder zu verhindern [1]. Das Verständnis des Einflusses oben genannter Legierungselemente auf die Wärmeleitfähigkeit

und den thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist unter anderem eine Voraussetzung dafür, sinnvolle Konzentrationen in den jeweiligen Legierungen festzusetzen bzw. physikalische Kennwerte bei bekannter Legierungszusammensetzung in guter Näherung abzuschätzen. AMAG ist deshalb in der Lage, ihre Beratungskompetenz gegenüber ihren Kunden hinsichtlich wichtiger physikalischer Kennwerte auszuweiten.

Wärmeleitfähigkeit

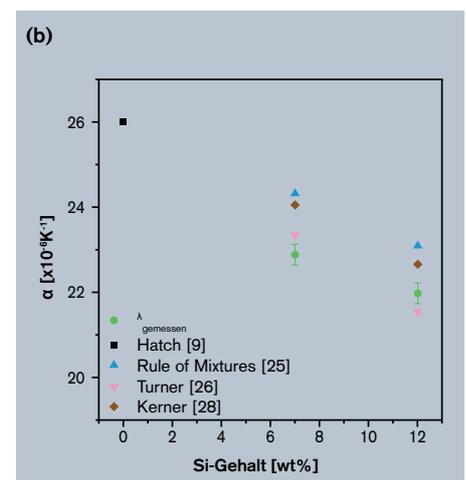
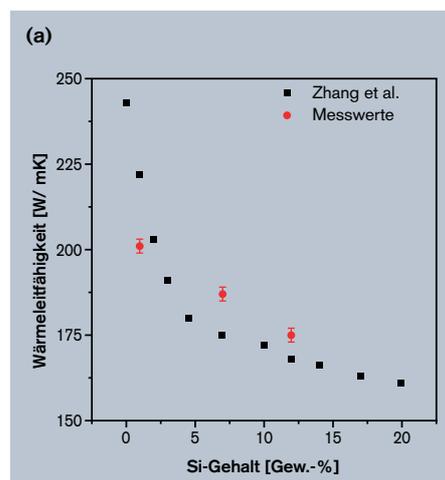
Abbildung 1a zeigt den Einfluss von Si auf die Wärmeleitfähigkeit von Al-Sekundärlegierungen und stellt die gemessenen Daten Literatur-Werten [2] für Reinaluminium gegenüber.

AlSi-Legierungen werden vereinfacht als eine Art „Verbundwerkstoff“ betrachtet, bestehend aus einer Al-Matrix und eutektischem Silizium. Der λ -Wert eines solchen Materials liegt zwischen den jeweiligen Werten für die einzelnen Bestandteile des Verbundes und kann mit Hilfe von Modellen [3, 4] abgeschätzt werden. Bei einem Wert von 25 W/mK [5, 6] für λ_{Si} konnte eine gute Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Werten erzielt werden [1]. Es ist zu berücksichtigen, dass AMAG keine reine Al99,99 Matrix für die Messungen zum Einfluss der Legierungselemente heranzog, sondern eine AlFe0,4Mn0,3Mg0,35 Grundlegierung, welche die Realzusammensetzung einer Gusslegierungen aus Recyclingmaterial besser widerspiegelt.

Abb. 1:

a) Einfluss von Si auf die Wärmeleitfähigkeit λ bei 40 °C [1] und Vergleich mit Literaturwerten [2]

b) Einfluss von Si auf den thermischen Ausdehnungskoeffizienten α und Vergleich mit Literaturwerten [7-9, 14]





In Abbildung 2a ist der Einfluss von Cu auf die Wärmeleitfähigkeit unter- und naheeutektischer Al-Recyclinglegierungen dargestellt, wobei in beiden Fällen ein nahezu linearer Abfall mit zunehmender Cu-Konzentration auftritt [1]. Die untersuchten Legierungen enthalten jeweils 0,35 % Mg, weshalb sich im Zuge der Warmauslagerung sekundäre Ausscheidungen vom Typ θ -Al₂Cu und η -Al₅Cu₂Mg₈Si₇ bilden, welche die thermische Leitfähigkeit herabsetzen. Im Fall der untereutektischen Legierungen wird der gesamte Anteil an Mg und Cu durch eine vorangegangene Glühbehandlung bei 495 °C in Lösung gebracht. Bei AlSi₁₂Cu₄(Mg) bleibt bei dieser Lösungsglühung bereits ein Teil des Cu ungelöst und liegt in Form primärer Al₂Cu-Phasen vor, die sich stärker negativ auf

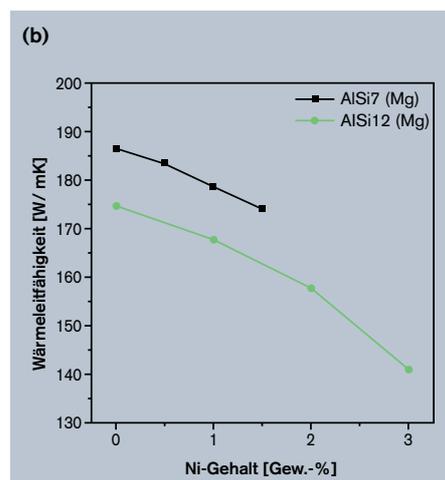
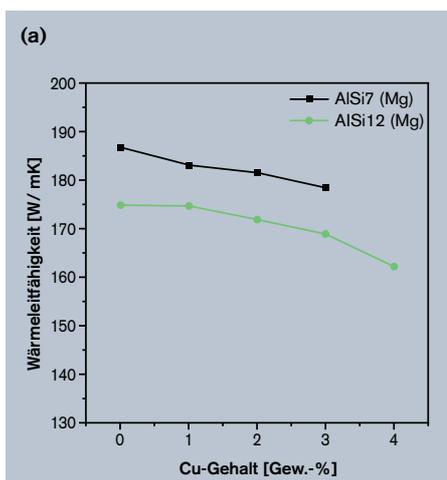
λ auswirken als feinst verteilte Sekundärphasen. Dies erklärt den verhältnismäßig stärkeren Abfall der Wärmeleitfähigkeit zwischen 3 und 4 % Cu bei den eutektischen Varianten [1].

Abbildung 2b zeigt den Einfluss von Ni auf die Wärmeleitfähigkeit der Legierungen AlSi₇(Mg) und AlSi₁₂(Mg). Es tritt ein deutlich stärkerer Abfall mit zunehmender Ni-Konzentration auf als im Fall von Cu. Da weder Fe noch Ni eine nennenswerte Löslichkeit im α -Mischkristall aufweisen, kommt es selbst bei geringen Konzentrationen dieser Elemente zur Bildung Fe- und Ni-haltiger Primärphasen (Al₉FeNi bzw. Al₃Ni), wobei sich der Charakter des Werkstoffs von einem „homogenen Material“ hin zu einem komplexeren „Verbundwerkstoff“ verändert [10-13].

Auch in diesem Fall ist eine näherungsweise Abschätzung von λ durch die Anwendung oben erwähnter Modelle möglich. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise zur Modellierung der Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Ni-Gehaltes bzw. des Volumenanteils Ni-haltiger intermetallischer Phasen wurde bereits veröffentlicht [11].

Thermischer Ausdehnungskoeffizient

In Abbildung 1b ist der Effekt von Si auf den thermischen Ausdehnungskoeffizienten dargestellt. Als eine Möglichkeit zur Bewertung des Einflusses von Silizium bieten sich unter anderem Modelle zur Abschätzung des α -Wertes zweiphasiger Werkstoffe an [7-9, 14].



Der separate Einfluss von Cu und Ni auf α ist relativ gering und liegt unter der Auflösungsgrenze der in dieser Arbeit angewandten Messmethodik (siehe Abbildungen 3 a und b). Dies lässt sich auf die verhältnismäßig geringen Volumenanteile sekundärer bzw. primärer Phasen zurückführen, die durch die getrennte Zugabe von Cu oder Ni gebildet werden. Erst bei sehr hohen Gehalten sowohl an Cu als auch an Ni zeigt sich eine signifikante Änderung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten [1]. →

Abb. 2: Einfluss von (a) Cu und (b) Ni auf den Wärmeausdehnungskoeffizienten von AlSi₇(Mg) und AlSi₁₂(Mg) [1]

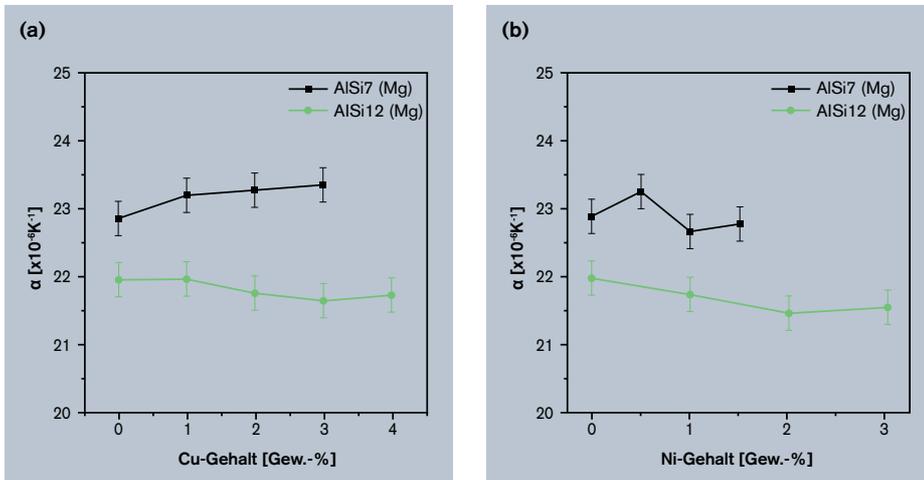


Abb. 3: Einfluss von (a) Cu und (b) Ni auf den thermischen Ausdehnungskoeffizienten von AlSi7(Mg) und AlSi12(Mg) bei 250 °C [1]

→ Temperaturwechselbeständigkeit:

Trotz der Tatsache, dass im Rahmen dieser Arbeit keine umfangreichen Messungen zur Temperatur-Wechselbeständigkeit durchgeführt wurden, kann ein Ranking verschiedener Legierungen in Bezug auf ihre Widerstandsfähigkeit gegen thermisch induzierte Spannungen aufgestellt werden. Dies wird durch Berechnung des zweiten Thermochockparameters RS' ermöglicht [1]:

$$R'_s = \lambda \cdot \sigma_{\text{krit}} \cdot \frac{1 - \nu}{E \cdot \alpha} \cdot \frac{W}{m} \left[\frac{\text{m}}{\text{m}} \right]$$

Der Thermochockparameter beschreibt folglich den Widerstand eines Materials gegen eine thermisch induzierte Rissbildung. Je größer der jeweilige Wert, desto unempfindlicher ist das Material gegen thermisch induzierte Spannungen. Es wird also deutlich, dass ein Werkstoff bei zyklischen Temperaturbelastungen umso anfälliger gegen Versagen ist, je geringer die Warmfestigkeit und die Wärmeleitfähigkeit und je höher der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient sind [15]. ■

Kundennutzen

Das Verständnis der konkurrierenden Wechselwirkungen der Hauptlegierungselemente untereinander sowie deren Einfluss auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften sind von grundlegender Bedeutung, um warmfeste Legierungen auf Recyclingbasis zu entwickeln und zu optimieren. Dabei zeigt sich, dass ein Mehr an teuren Legierungselementen wie Kupfer und Nickel nicht immer bessere Ergebnisse zur Folge hat. Zusätzlich ist es wichtig, den Fokus nicht ausschließlich auf Festigkeit zu legen, sondern auch auf andere legierungsspezifische Kennwerte wie Wärmeleitfähigkeit, thermischer Ausdehnungskoeffizient und Temperaturwechselbeständigkeit. Je nach Bauteil und Anwendung kann eine Verbesserung dieser Eigenschaften wirkungsvoller sein und zu besseren Ergebnissen führen.

Die umfassende Untersuchung verschiedenster Legierungsvarianten, gekoppelt mit einem wissenschaftlichen Verständnis der ablaufenden Mechanismen, erlaubt es der AMAG, dem Kunden die bestmögliche Legierung entsprechend dessen Bedürfnissen maßzuschneidern und gleichzeitig Kostenoptimierungspotentiale zu bestehenden Lösungen aufzuzeigen.

Literaturverzeichnis:

- [1] F. Stadler, H. Antrekowitsch, W. Fragner, H. Kaufmann, E. Pinatel und P. J. Uggowitzer: The effect of main alloying elements on the physical properties of Al-Si foundry alloys, *Materials Science and Engineering A*, 560 (2013), 481-491.
- [2] Y. Zhang, X. Wang und J. Wu: The Influence of Silicon Content on the Thermal Conductivity of Al-Si/Diamond Composites. In: *International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP)*, Beijing (2009), 708-712.
- [3] J. E. Parrott und A. D. Stuckes: *Thermal conductivity of solids*, London: Pion Limited (1975).
- [4] Z. Hashin: Analysis of composite materials - a survey, *Journal of Applied Mechanics*, 50 (1983), 481-505.
- [5] L. Wei, M. Vaudin, C. S. Hwang und G. White: Heat conduction in silicon thin films: Effect of microstructure, *Journal of Materials Research*, 10, No. 8 (2012), 1889-1896.
- [6] S. Uma, A. D. McConnell, M. Ashegi, K. Kurabayashi und K. E. Goodson: Temperature-Dependent Thermal Conductivity of Doped Polycrystalline Silicon Layers, *International Journal of Thermophysics*, 22, No. 2 (2001), 605-616.
- [7] N. Chawla und K. K. Chawla: *Metal Matrix Composites*, New York: Springer (2006).
- [8] P. S. Turner: Thermal-Expansion Stresses in Reinforced Plastics, *Modern Plastics*, 24 (1946), 153-157.
- [9] E. H. Kerner: The Elastic and Thermo-Elastic Properties of Composite Media, *Proceedings of the Physical Society Section B*, 69 (1956), 808-813.
- [10] Z. Asghar, G. Requena und F. Kubel: The role of Ni and Fe aluminides on the elevated temperature strength of an AlSi12 alloy, *Materials Science and Engineering A*, 527 (2010), 5691-5698.
- [11] F. Stadler, H. Antrekowitsch, W. Fragner, H. Kaufmann und P. J. Uggowitzer: The effect of Nickel on the thermal conductivity of Al-Si cast alloys. In: *13th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA13)*, TMS (The Minerals, M. & M. S. (Hrsg.). Pittsburgh: TMS (11121), 137-142.
- [12] F. Stadler, H. Antrekowitsch, W. Fragner, H. Kaufmann und P. J. Uggowitzer: Der Einfluss von Nickel auf die Warmfestigkeit von AlSi-Gusslegierungen, *Giesserei*, 98 (2011), 26-31.
- [13] F. Stadler, H. Antrekowitsch, W. Fragner, H. Kaufmann und P. J. Uggowitzer: The effect of Ni on the high-temperature strength of Al-Si cast alloys, *Materials Science Forum*, 690 (2011), 274-277.
- [14] J. E. Hatch: *Aluminium: properties and physical metallurgy*, ASM (1988).
- [15] Spörl, R.: Einfluss des Gefüges auf mechanische Festigkeit und dielektrische Eigenschaften von CVD Diamant. *Forschungszentrum Karlsruhe, Bericht* (2002), (FZKA 6658), 16- 17.