

EINFLUSS VON TANTAL AUF DIE KORNFEBUNG EINER Al10SiMg LEGIERUNG

AUTOR:

Maria Elisabeth Pammer¹, Priv.-Doz. Dr. Jiehua Li¹ und Univ. Prof. Dip.-Ing. Dr. Peter Schumacher^{1,2}

¹ Lehrstuhl für Gießereikunde, Montanuniversität Leoben, Franz Josef-Str. 18, 8700 Leoben

² Österreichisches Gießerei-Institut, Parkstr. 21, 8700 Leoben

ABSTRAKT

Aluminium-Silizium-Gusswerkstoffe sind essenzielle Materialien für den Leichtbau in der Automobilindustrie. Hierfür werden ausgezeichnete mechanische Eigenschaften benötigt, welche durch Kornfeinung eingestellt werden können. Der heutzutage am häufigsten verwendete Kornfeiner ist Al-5Ti-1B. Aufgrund des überstöchiometrischen Verhältnisses von Titan zu Bor (TiB_2) reagiert das freie Ti mit Al zu Al_3Ti und ist aufgrund einer peritektischen Reaktion auf dem stabilen Titan-di-Borid ein guter Keimbildner für α -Aluminium. Jedoch wird ab 3,5 Gew.-% Silizium (Si) ein Vergiftungseffekt beobachtet, wobei sich neue ternäre Gleichgewichtsphasen bilden können und ein gröberes Korn ausbildet.

Im Zuge dieser Arbeit wurde der Einfluss von Tantal (Ta), das keine ternären Phasen im Al-Si-Ta System zeigt, auf

die Kornfeinung einer Al-10Si-0,4Mg Legierung untersucht, welche mit einem stöchiometrischen Kornfeiner gefeint und mit Strontium (Sr) veredelt wurde. Zur Bewertung des Kornfeinungseffekts wurde der standardisierte TP1 Test und thermische Analysen verwendet. Die TP1 Proben wurden geschnitten, geschliffen, poliert, geätzt und mit dem Lichtmikroskop analysiert, um die Korngröße unter Verwendung des Linienschnittverfahrens zu bestimmen. Die anschließenden Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop (REM) zeigen eine deutliche Ta-reiche Schicht auf dem TiB_2 Partikel, welche der Al_3Ta Phase zuzuordnen ist. Über eine peritektische Reaktion der Al_3Ta Phase mit restlicher Schmelze bildet sich α -Aluminium und kann somit als ausgezeichnete heterogene Keimbildner ohne signifikanten Vergiftungseffekt fungieren.

EINLEITUNG

Die Kornfeinung von Aluminium Legierungen ist unverzichtbar - unabhängig davon ob es sich um Formguss oder Knetlegierungen handelt. Beide Sorten profitieren von dem feineren Gefüge aufgrund des verbesserten Speiseverhaltens in der breiigen Zone aufgrund der erhöhten Fluidität bei höheren Feststoffanteils und dadurch einer feineren Verteilung der Porositäten¹. Des Weiteren verbessern sich durch Kornfeinung die mechanischen Eigenschaften der Legierung aufgrund einer verbesserten Verteilung von schlecht-löslichen Phasen auf den Korngrenzen.

In der industriellen Praxis wird die Kornfeinung von Al Legierungen meist durch die Einbringung von Fremdkeime durch chemische Impfung durchgeführt². Dabei wirken die größten Fremdkeime (hexagonale TiB_2 Partikel) als erste aktive Keimzentren, deren Wachstum durch einen Aufstau von Legierungselementen behindert wird und damit die Aktivierung weiterer kleiner Teilchen

ermöglicht. Für diesen Keimbildungsmechanismus ist es Voraussetzung, dass sich durch Adsorption auf den Keimgrenzflächen oberhalb der Liquidustemperatur eine peritektische Schicht ausgebildet hat, die schon bei geringer Unterkühlung einen Keim bildet und nach Überschreitung des kritischen Keimradius, die dem Partikelradius entspricht, frei vom Keim wächst³.

Kornfeinung von Al-Legierungen

Die am häufigsten verwendeten Kornfeiner für Aluminium Legierungen basieren auf dem Al-Ti-B System⁴. Es wird zwischen verschiedenen Kornfeinungsmitteln unterschieden: Überstöchiometrische (Al-5Ti-1B), Unterstöchiometrische und Stöchiometrische (Al-2,2Ti-1B). Bei ersteren liegt neben TiB_2 und Al_3Ti Partikel 2,8 Gew.-% freies Ti über dem stöchiometrischen Verhältnis von TiB_2 vor. Der stöchiometrische Kornfeiner Al-2,2Ti-1B enthält im Gegensatz dazu kein freies Ti. Allgemein bestehen diese Kornfeiner aus TiB_2 Partikel mit einem Durchmesser von 0,1-10 μm und Al_3Ti Partikel mit einem Durchmesser von

20-50 µm, gelöst in einer Aluminium-Matrix³. Aufgrund der peritektischen Reaktion ist Al₃Ti ein sehr effektiver Keimbildner, allerdings löst es sich direkt nach Zugabe des Kornfeiners in der Schmelze⁵. Übrig bleiben TiB₂ Partikel, auf welchen sich epitaktische Al₃Ti Schichten bilden, wodurch der Partikel für die Kornfeinung aktiviert wird⁶. Daher ist der am häufigsten verwendete Kornfeiner der überstöchiometrische Kornfeiner. Li et al. untersuchten den Vorgang der Bildung dieser Schicht und fanden eine eindeutige Bildung von Al₃Ti ausschließlich an der Basalfläche der hexagonalen Struktur des TiB₂ Partikels⁷.

Sobald sich in stabiler Keim gebildet hat, wird dessen Wachstum durch den Aufstau von Legierungselementen vor der Erstarrungsfront behindert. Grund dafür ist die Diffusion der Legierungselemente, welche nicht schnell genug abläuft, um die Gleichgewichtslöslichkeit zu erreichen. Der Einfluss jedes Elements kann mithilfe des Wachstumsbehinderungsfaktors Q nach Quested^{8,9} bestimmt werden:

$$(1) \quad Q = m(k-1)C_0$$

Dabei entspricht C₀ der Konzentration, m der Liquidussteigung und k dem Verteilungskoeffizienten, welcher aus binären Phasendiagrammen abgeschätzt oder thermodynamisch, über die Änderung des Festanteils über die Temperatur an der Liquidustemperatur $\partial f_s / \partial t$, bestimmt werden kann⁸. Elemente, welche ein Peritektikum mit Aluminium bilden, wie es bei Titan oder Tantal der Fall ist führen zu einem hohen Q-Wert mit Q_{Ti} (245.6 K/Gew.-%) und Q_{Ta} (105 K/Gew.-%)¹⁰. Über den Zusammenhang der Geschwindigkeit der planaren dendritischen Erstarrungsfront V mit dem Temperaturgradienten G und dem Diffusionskoeffizienten D in Formel (2) wird deutlich, dass mit steigendem Wachstumsbehinderungsfaktor Q die Geschwindigkeit der Erstarrungsfront sinkt, wodurch eine geringere Korngröße resultiert.

$$(2) \quad V = \frac{DG}{Q}$$

Siliziumvergiftung

Seit Jahrzehnten² wird der Einfluss von Silizium auf den Kornfeinungseffekt im Al-Ti-B System untersucht. Es ist bekannt, dass ab einem Si-Gehalt von 3,5 Gew.-% der kornfeinende Effekt abnimmt und eine Vergrößerung des Gefüges auftritt¹¹. Gröbner et al. erklären diesen Effekt anhand des ternären Phasensystem Al-Si-Ti, siehe **Abbildung 1**. Durch einen zunehmenden Si-Gehalt bildet sich die Phase τ₁ (Ti₇Al₅Si₁₄). Die Reaktion zur Bildung der τ₁-Phase ($L + Al_3Ti \leftrightarrow (Al) + \tau_1$) findet schon bei geringen Ti-Gehalten statt und es wird vermutet, dass die τ₁-Phase den Titan-di-Borid-Partikel umgibt, wodurch dieser seine kornfeinende Wirkung für Aluminium verliert. Das Auftreten der τ₁ Phase, bzw. deren Stabilitätsbereich ab ca. 3,5 Si Gew.-% stimmt mit dem Auftreten der Siliziumvergiftung überein und wird daher als Indiz für die Si-Vergiftung betrachtet¹¹.

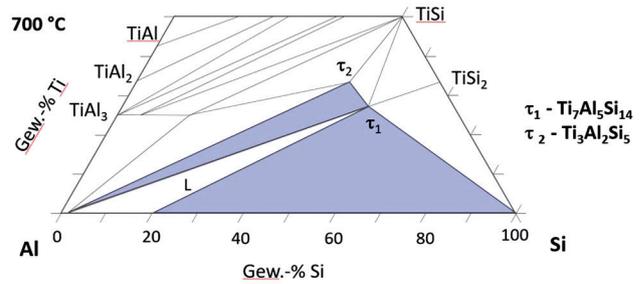


Abbildung 1: Ternärer Schnitt des Phasendiagramms Al-Si-Ti nach Gröbner et al.¹¹

Tantal

Schumacher et al.¹² haben schon beobachtet, dass andere gelöste Elemente (z.B. Hafnium, Molybdän, Niob, Scandium, Tantal, Vanadium und Zirkon) Titan in Al₃Ti substituieren können. Besonders Tantal könnte aufgrund einer fehlenden ternären intermetallischen Phase im Al-Si-Ta System und dessen ausgeprägten Peritektikums ein „Gegengift“ für den Si-Vergiftungseffekt darstellen.

Das Al-Ta Phasendiagramm weist mehrere intermetallische Phasen auf und bildet bei geringen Ta-Gehalten ein Peritektikum¹³. Die peritektische Temperatur liegt mit 668 °C knapp über jener im Al-Ti System (665 °C). Somit könnte Tantal ein optimaler Aktivator des Titan-di-Borid-Partikels ohne signifikanten Si-Vergiftungseffekt sein¹².

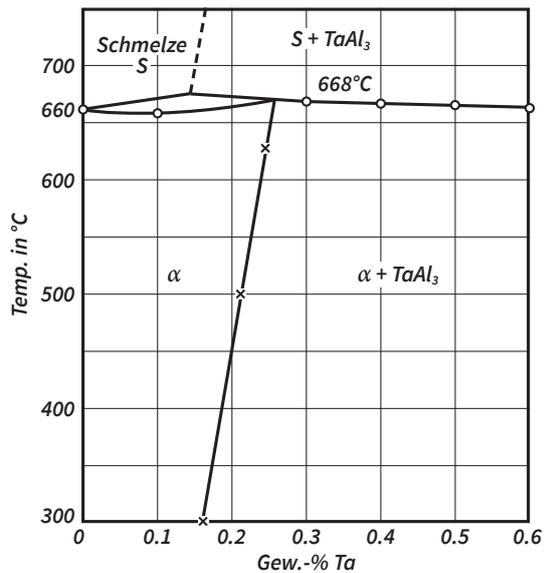


Abbildung 2: Al-Ta Phasendiagramm bei geringen Ta-Gehalten.¹³

Thermische Analyse

Eine industriell eingesetzte Methode, um eine erfolgreiche Kornfeinung festzustellen, ist die thermische Analyse. Mithilfe von Einwegtemperatursensoren auf Basis von Thermoelementen in einem kleinen Tiegel und einer Messkette aus Thermodraht, Ausgleichsleitung und Analog/Digital-Wandler wird eine präzise Messung der Abkühlkurve innerhalb der Auflösungsgrenze vorgenommen. Ein feines Gefüge entsteht bei keiner oder geringer Unterkühlung bzw. nur kurz anhaltender Unterkühlung. Im optimalen Fall tritt für ein feines Gefüge keine Unterkühlung ΔT auf. Dies entspricht dem Fall, dass ein Al Keim die kriti-

sche Größe erreicht R_{Keim}^* (**Formel 3**) hat, welche genau dem heterogenen Substrat (Borid) R_{Partikel} entspricht von dem er frei entwachsen kann und Latente-Wärme L am Schmelzpunkt T_m freisetzt. In dieser Formel entspricht γ der Grenzflächenenergie zwischen gebildetem Keim und umgebener Schmelze⁸.

$$(3) \quad R_{\text{Keim}}^* = \frac{2\gamma}{\Delta T - \frac{L}{T_m}} = R_{\text{Partikel}}$$

Abbildung 3 nach Dantzig und Rappaz¹⁴ verdeutlicht diesen Zusammenhang. Die Keimanzahl entspricht damit der Partikelgrößenverteilung und welche kleinsten Partikel noch durch die Unterkühlung aktiviert werden konnten, bevor Rekaleszenz einsetzt. Für eine erfolgreiche Keimbildung sind daher eine möglich hohe Anzahl von größeren Partikeln notwendig, die jedoch alle „aktiv“ sein müssen, d.h. eine Al_3Ti Schicht auf dem Borid aufweisen. In Al-Si Legierungen wird häufig eine klassische Unterkühlung gemessen, die jedoch auf eine Si-Vergiftung der „aktiven“ Keime beruht. Ziel dieser Arbeit ist es durch Zugabe von Tantal stöchiometrische TiB_2 Partikel zu „aktivieren“ und diese gegen eine Si- Vergiftung mit einer Wechselwirkung von freiem Ti zu schützen.

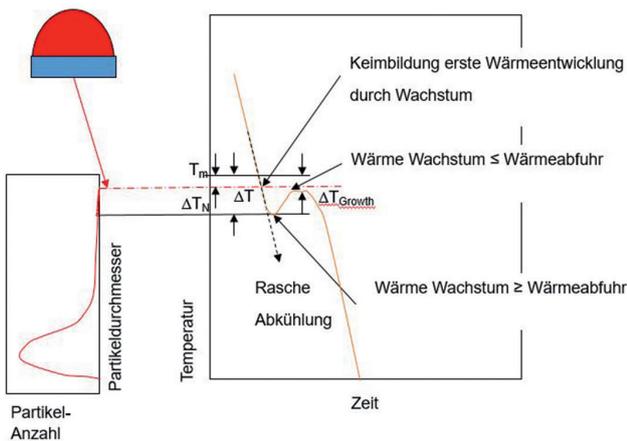


Abbildung 3: Unterkühlung versus Partikeldurchmesser im Verhältnis zur Zeit-Temperaturkurve nach Dantzig und Rappaz.¹⁴

EXPERIMENTELLE METHODEN

Bei der zu kornfeinenden Legierung handelte es sich um Al-10Si-0,4Mg mit 0,07 Gew.-% Tantal. Nach einer 15-minütigen Impeller- Entgasung wurde abgekrätzt und die erste TP1 Probe nach ASTM E112 Standard gegossen. Daraufhin wurde Tantal bei 800 °C in Form einer Al-10Ta Vorlegierung zugegeben, 20 min lange homogenisiert und die Referenzen für thermische Analyse und TP1 für die Kornfeinung gegossen. Nach der Zugabe des stöchiometrischen Kornfeiners Al-2,2Ti-1B und der Veredelung Al-10Sr wurden nach 2, 5, 10, 20, 30 und 60 min weitere TP1 Proben entnommen (**Abbildung 4**). Nach 15 min wurde eine weitere thermische Analyse gezogen, wofür ein QuiK-Cup von Heraeus und das System von pico Technology zur Datenübertragung verwendet wurden.



Abbildung 4: Vorrichtung für TP1 Test am Lehrstuhl für Gießereikunde.

Die TP1 Proben wurden 38 mm von der Spitze geschnitten, nach standardisierten metallographischen Verfahren geschliffen, poliert und am Lichtmikroskop (Zeiss Axio Imager) sowie mit höherer Auflösung am Rasterelektronenmikroskop REM (Jeol JSM-7200) mittels EBSD (Elektron Back Scattered Diffraction), Sekundärelektronenbild sowie EDX untersucht. In der EDX-Analyse (Energy dispersive X-Ray Analysis) ist die Überlappung von Peaks verschiedener Elemente und deren charakteristischen Linien zu beachten, da Tantal aufgrund seiner vielen Elektronenschalen ein breites Spektrum aufweist. Die $\text{K}\alpha$ -Si Linie überschneidet sich mit der $\text{M}\alpha$ -Ta Linie, sodass zur Ta-Bestimmung die $\text{L}\alpha$ -Ta Linie herangezogen werden muss. In **Tabelle 1** sind relevante Intensitäten wichtiger Elemente aufgelistet:

	Al	Si	Mg	Ti	Ta	P	Ca	Fe	Ni	Ag
$\text{K}\alpha$ [keV]	1,486	1,739	1,253	4,508		2,013	3,690	6,398	7,471	2,984
$\text{L}\alpha$ [keV]				0,452	8,145			0,705	0,851	
M [keV]					1,709					

Tabelle 1: Energien relevanter Elemente für EDX Analyse.¹⁵

Vor der Untersuchung am Lichtmikroskop (Carl Zeiss Axio Imager) wurden die Proben elektrolytisch nach Barker (HF, H_3BO_3 , H_2O) geätzt (ATM Kristall 620). Mithilfe des Linienschnittverfahrens wurden die Korngrößen ausgewertet.



Abbildung 5: Elektrolytisches Barker Ätzgerät.

RESULTATE UND DISKUSSION

Thermische Analyse

Aufgrund der Auflösung der verwendeten thermischen Analyse wurden zur Auswertung keine absoluten Werte verwendet, sondern die gemessenen Kurven unter Berücksichtigung der ersten Ableitung verglichen.

Bei der Bildung von α -Aluminium wurde schon nach der Ta-Zugabe keine nennenswerte Unterkühlung ($< 1\text{ °C}$) innerhalb der Messabweichung der thermischen Analyse verzeichnet. Dies deutet auf eine kornfeinende Wirkung hin, obwohl keine weiteren separaten Phasen mit Tantal erwartet werden. Die Gleichgewichtstemperatur in diesem Bereich liegt nahe der mit Thermo-Calc bestimmten Liquidustemperatur¹⁶ unter Vernachlässigung der geringen Ta-Gehalten aufgrund der mangelhaften Datenlage. Im Bereich der eutektischen Umwandlung wurde eine Unterkühlung von 10 °C zur binären Gleichgewichtstemperatur und eine Rekaleszenz von 3 °C zur maximalen Unterkühlung gemessen.

In der Abkühlkurve nach der Zugabe der Veredelung und des Kornfeiners in Anwesenheit von Tantal wurde bei der Bildung von α -Aluminium keine Rekaleszenz und Unterkühlung verzeichnet. Die eutektische Reaktion erfolgte mit einer Unterkühlung von 3 °C zur Gleichgewichtstemperatur und Rekaleszenz von 1 °C , wodurch kein nennenswerter negativer Einfluss von Tantal auf die Veredelung zu erwarten ist, siehe **Abbildung 9**.

Lichtmikroskopie

In **Abbildung 7** sind Gefügebilder vor und 20 min nach der Zugabe der Tantal-Masterlegierung zu sehen. Das Einbringen der Vorlegierung führt zu einem deutlich feineren

Gefüge. Ohne Tantal ((a), ergibt sich mit dem Schnittlinienverfahren eine Korngröße von $2076\text{ }\mu\text{m}$ und eine Standardabweichung von rund $1500\text{ }\mu\text{m}$. Diese Werte sind allerdings nur bedingt aussagekräftig, da beim Linienschnittverfahren über 50 Körner geschnitten werden müssen, damit das Ergebnis statistisch repräsentativ ist. Bei diesem Bild wurden mit drei Linien nur zwölf Körner geschnitten. 20 min nach der Zugabe der Masterlegierung Al-10Ta (b) sinkt die Korngröße auf $263 \pm 119\text{ }\mu\text{m}$ und es wurden 87 Körner vermessen. Die erhöhte Standardabweichung stammt aus der Tatsache, dass beim Linienschnittverfahren oft nur kleine Bereiche der Körner erfasst werden und im Gegenzug dazu große Bereiche anderer Körner geschnitten werden. Insgesamt betrachtet ergibt sich jedoch über den Schliff ein gleichförmiges, korngefeintes Gefüge.

Ausgehend von **Abbildung 7 (b)**, welche der ersten Probe des TP1 Tests vor der Zugabe des Kornfeiners entspricht, entwickelte sich die Korngröße wie in **Abbildung 7 (d)** ersichtlich. Es ist ein deutlicher Kornfeinungseffekt erkennbar, mit einer minimalen Korngröße nach 20 min mit $153 \pm 68\text{ }\mu\text{m}$ (**Abbildung 7 (c)**). Die relativ großen Standardabweichungen können wieder auf das verwendete Linienschnittverfahren zurückgeführt werden.

Ein Abklingeffekt einhergehend mit einer Zunahme der Korngröße nach längerer Zeit kann auf die Sedimentation der TiB₂ Partikel zurückgeführt werden, da diese aufgrund ihrer höheren Dichte, im Vergleich zur Schmelze, zum Tiegelboden sinken. Diesem Effekt kann durch Rühren entgegengewirkt werden, wodurch die Effektivität des Kornfeiners auf 80 % dessen Anfangsaktivität wieder erhöht wird nach einem Abklingen¹².

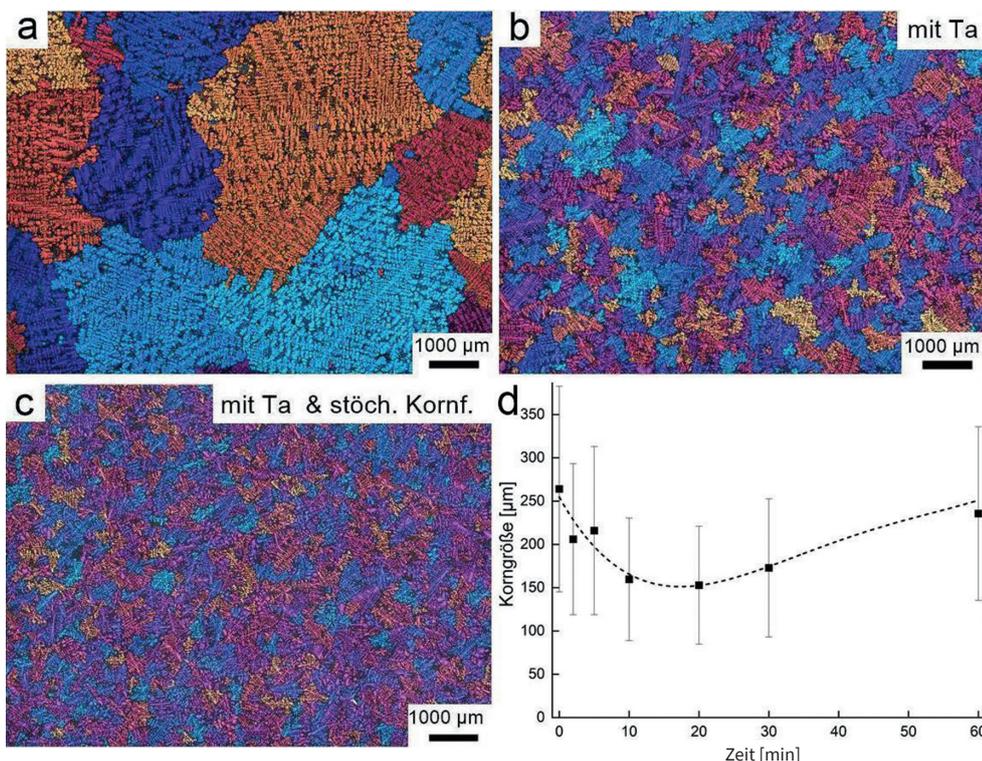


Abbildung 6: Gefüge (a) vor der Tantal Zugabe ($2076 \pm 1461\text{ }\mu\text{m}$), (b) 20 min nach der Zugabe der Ta-Vorlegierung ($263 \pm 119\text{ }\mu\text{m}$), (c) minimale Korngröße 20 min nach Zugabe des stöchiometrischen Kornfeiners in Anwesenheit von Tantal ($153 \pm 68\text{ }\mu\text{m}$), (d) Entwicklung der Korngröße über die Zeit (TP1).

Rasterelektronenmikroskopie

Zwei Proben wurden mittels REM untersucht: Eine 10 min nach Zugabe des stöchiometrischen Kornfeinungsmittels und eine 60 min nach dessen Zugabe, jeweils in Anwesenheit von Tantal.

Besonders interessant ist die Betrachtung der Keime, welche zur Verfeinerung der Körner beitragen. **Abbildung 7** stammt aus ersterer Probe, 10 min nach der Zugabe des Kornfeiners in Kontakt mit der Ta-hältigen Schmelze. Die dünne Schicht um das Agglomerat entspricht jener Schicht, der den TiB_2 Partikel für die Kornfeinerung aktiviert. Es ist darauf hinzuweisen, dass bei einem stöchiometrischen Kornfeinungsmittel jedoch nur eine sehr dünne Schicht, wenn überhaupt, zu erwarten ist und die Beobachtung dieser Schicht auf TiB_2 Partikel auf eine Wechselwirkung zwischen Tantal und stöchiometrischen Kornfeiner schließen lässt.

Um die zeitliche Entwicklung der Keimbildungsschicht zu untersuchen, wurde als zweite Probe jene gewählt, die 60 min nach der Zugabe des Kornfeinungsmittels in Kontakt mit der Schmelze und Ta stand, gezo-

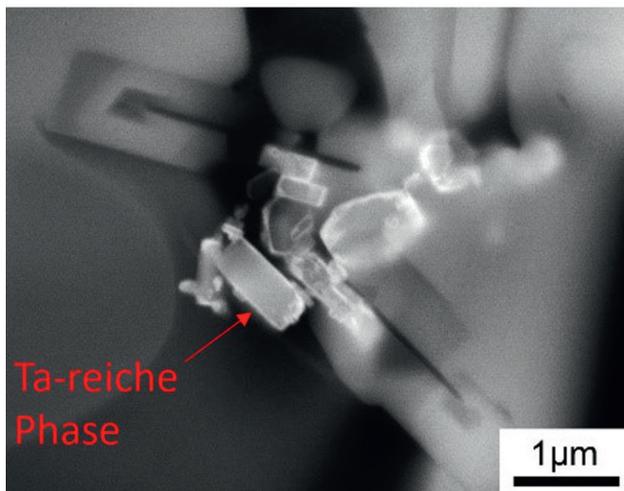


Abbildung 7: Agglomerat mit hexagonalen TiB_2 Partikel 10 min nach Zugabe des Kornfeiners mit einer deutlichen Schichtbildung auf Basalebene.

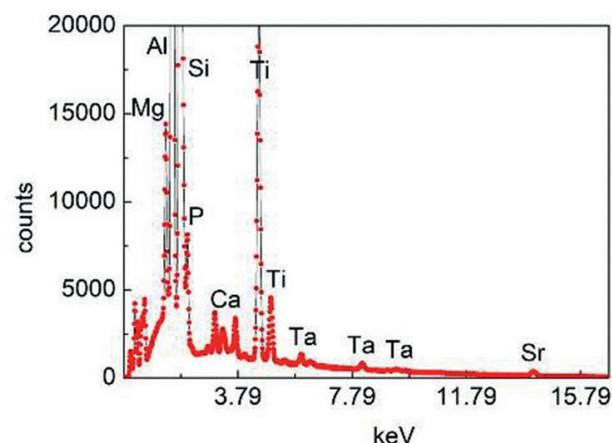


Abbildung 8: TiB_2 Partikel mit Al_3Ta Layer, 60 min nach Zugabe des stöchiometrischen Kornfeiners.

gen wurde. Ein heller Rand um den TiB_2 Partikel welche der aktivierenden Schicht entspricht, erscheint wesentlich dicker und für EDX-Untersuchungen in **Abbildung 8** geeignet. Aufgrund der Detektion von Tantal in ist diese Schicht wahrscheinlich der Al_3Ta Phase zuzuordnen. Diese bildet mit der Schmelze ein Peritektikum, aus dem bei weiterer Abkühlung α -Aluminium hervorgeht und ist daher hervorragend zur Keimbildung von Aluminium geeignet. Diese Schicht könnte Abhilfe gegen die Bildung der τ_1 -Phase im Al-Si-Ti System schaffen, welche als Indiz für den Vergiftungseffekt steht.

In **Abbildung 9** ist ein typisches Gefüge einer veredelten Legierung und Ta-Zugabe dargestellt. Deutlich ist eine gute Veredelung des Al-Si-Eutektikums in den interdendritischen Zwischenräumen zu erkennen. In EBSD-Aufnahmen (hier nicht dargestellt) sind in den Zwischenräumen der Dendriten das Aluminium des Aluminium-Silizium-Eutektikums als typisch unorientiert erkennbar. Die Mikrostruktur des Eutektikums ist dadurch deutlich veredelt und wurde nicht durch die Ta-Zugabe beeinflusst.

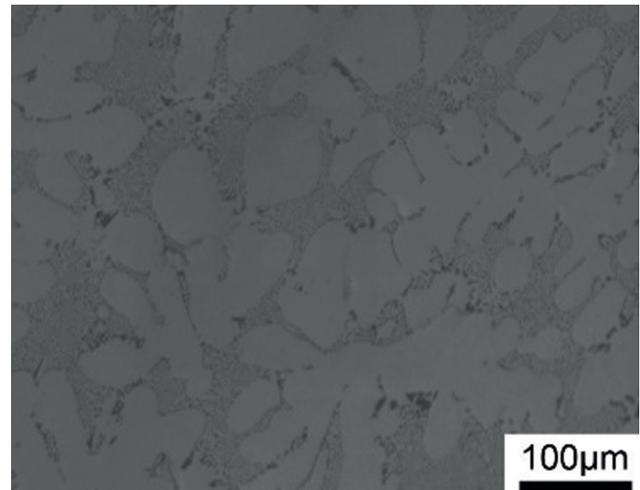


Abbildung 9: REM Gefüge eines typischen Gefüges nach Veredelung mit Al10-Sr und Ta Zugabe.

ZUSAMMENFASSUNG

Nach der Kornfeinerung einer Al-10Si-0,4Mg Legierung mit dem stöchiometrischen Kornfeiner Al-2,2Ti-1B und Tantal wurde am Rasterelektronenmikroskop auf der Basal-Ebene eines TiB_2 -Partikels mithilfe der EDX-Punktanalyse eine Tantal-reiche Phase nachgewiesen, welche der Al_3Ta -Phase zugeordnet werden konnte. Nach längerer Kontaktzeit wurde diese Schicht dicker. Aufgrund der Sedimentation der Titan-di-Borid Partikel konnte mithilfe des TP1 Tests eine Kornvergrößerung verzeichnet werden, welche durch permanentes Rühren leicht verhindert werden könnte.

In der thermischen Analyse konnte nach Zugabe von Tantal und des stöchiometrischen Kornfeiners eine Reduzierung der Keimbildungsunterkühlung und Rekaleszenz Unter- kühlung verzeichnet werden. Außerdem ist keine negative Wechselwirkung der Ta und stöchiometrischen

Kornfeinung mit der Veredlung erkennbar, wie es beispielsweise bei der Kornfeinung mit Al-B und der Bildung von SrB-Verbindungen der Fall ist und auch aus der thermischen Analyse hervorgeht.

Das größere Problem, der Vergiftungseffekt im Al-Ti-B Kornfeinungssystem für Al-Si Legierungen, könnte somit durch die Zugabe von geringen Mengen an Tantal bei einer gleichzeitigen Reduzierung des freien-Ti-Gehalts vermieden werden und die offensichtliche Bildung der τ_1 Phase verhindert werden. Dadurch könnten die eingebrachten Partikel ohne signifikanten Vergiftungseffekt für die Kornfeinung aktiv bleiben.

Weitere detaillierte Untersuchungen über die Wechselwirkung der τ_1 Phase und Tantal, eine mögliche Reaktivierung der Titan-di-Borid Partikel sowie die Beobachtung von Grenzflächenreaktionen auf dem TiB₂ Partikel würden zu einem tieferen Verständnis der Si-Vergiftung beitragen.

LITERATUR

- 1 G.K. Sigworth, Shrinkage, Feeding and Riser Design, AFS 118th Metalcasting Congress, Schaumburg, IL, (2014) Paper 14-002.
- 2 B.S. Murty, S.A. Kori, M. Chakraborty, International Materials Reviews 47 (2002) 3–29.
- 3 A. Greer, A. Bunn, A. Tronche, P. Evans, D. Bristow, Acta Materialia 48 (2000) 2823–2835.
- 4 Z. Fan, Y. Wang, Y. Zhang, T. Qin, X.R. Zhou, G.E. Thompson, T. Pennycook et al., Acta Materialia 84 (2015) 292–304.
- 5 T.W. Clyne, M.H. Robert, Metals Technology 7 (1980) 177–185.
- 6 A.M. Bunn, P. Schumacher, M.A. Kearns, C.B. Boothroyd, A.L. Greer, Materials Science and Technology 15 (1999) 1115–1123.
- 7 J. Li, F.S. Hage, Q.M. Ramasse, P. Schumacher, Acta Materialia 206 (2021) 116652.
- 8 T.E. Quested, Materials Science and Technology 20 (2004) 1357–1369.
- 9 T. QUESTED, A. DINSDALE, A. GREER, Acta Materialia 53 (2005) 1323–1334.
- 10 T. Sagstad, E. Bondhus in: Light Metals 1999, (Ed.) E.C. Eckert, 128th TMS Annual Meeting, San Diego, CA, Feb. 28 – March 4, 1999.
- 11 J. Gröbner, D. Mirković, R. Schmid-Fetzer, Materials Science and Engineering: A 395 (2005) 10–21.
- 12 P. Schumacher, A.L. Greer, J. Worth, P.V. Evans, M.A. Kearns, P. Fisher, A.H. Green, Materials Science and Technology 14 (1998) 394–404.
- 13 K. Swars, Tantal: Teil B 2. Legierungen, Tantal/Metall/Nichtmetall-Verbindungen, Komplexverbindungen, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1970.
- 14 J.A. Dantzig, M. Rappaz, Solidification, 2nd ed., EPFL Press; CRC Press, Lausanne, Boca Raton, Fla., (2016) 435.
- 15 JEOL Company, JEOL Company, Energy table for EDS analysis. www.jeol.co.jp/en/.
- 16 J.-O. Andersson, T. Helander, L. Höglund, P. Shi, B. Sundman, Calphad 26 (2002) 273–312.

Danksagung

Diese Veröffentlichung wurde im Rahmen einer B.Sc. Arbeit an der Montanuniversität Leoben am Lehrstuhl für Gießereikunde verfasst und wurde durch das FWF P 32378-N37 unterstützt.