

# Die Weiterentwicklung des Werkstoffs EN-AC AlSi7Mg0,3 (A356) für das Thixoforming

Noll, T., Friedrich, B. (1)

*Der Werkstoff A356 (EN AC-AlSi7Mg0,3) ist einer der mengenmäßig wichtigsten Werkstoffe für das Thixoforming. Weltweit werden 14 000 bis 15 000 Tonnen Aluminium pro Jahr durch das Thixoforming verarbeitet. Der Marktanteil muss im Vergleich zur Druckgussproduktion noch als verschwindend gering eingestuft werden. Dies kann vor allem auf die allgemeine Zurückhaltung gegenüber neuen Prozessen und Technologien zurückgeführt werden. Darüber hinaus haben die Kosten für Thixoforming-Vormaterial mit Sicherheit einen zusätzlichen Einfluss, der den Marktdurchbruch bisher verhindert.*

*Die chemische Kornfeinung ist aufgrund des positiven Einflusses auf die mechanischen Eigenschaften und das Formfüllungsvermögen bekannt. Trotzdem wird zur Vormaterial-Herstellung für das Thixoforming vor allem das sogenannte MHD (magneto-hydro-dynamic-stirring) Verfahren eingesetzt. Vermutlich hat sich die chemische Kornfeinung als alternatives Verfahren bisher nicht durchsetzen können, weil Gusslegierungen mit diesem Verfahren kaum effektiv zu behandeln sind. Dennoch lässt die chemische Kornfeinung zur Vormaterial-Herstellung für das Thixoforming aufgrund des relativ geringen verfahrenstechnischen Aufwandes Kostenvorteile erwarten. Die vorliegende Arbeit befasst sich daher mit der Weiterentwicklung des chemisch korngefeinten Aluminiumwerkstoffes A356 (EN AC-AlSi7Mg0,3) für das Thixoforming unter Verwendung der modellgestützten Versuchsplanung.*

## Aufgabenstellung der Arbeit und Stand der Technik

Mit der Einrichtung des Sonderforschungsbereich (SFB) 289 „Formgebung metallischer Werkstoffe im teilflüssigen Zustand“ besteht in Aachen neben den USA und Japan auch in Deutschland ein Forschungsschwerpunkt auf dem Gebiet der Formgebung metallischer Werkstoffe im teilerstarrten Zustand. Der SFB 289 umfasst heute Arbeiten von neun Instituten unterschiedlicher Fakultä-

ten der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) in Aachen. Am Institut und Lehrstuhl der RWTH für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling (IME) stehen Untersuchungen zu den „Vormaterialherstellungsprozessen und Werkstoffen“ für das Thixoforming im Vordergrund. Im Zeitraum von 1998 – 2002 wurden dazu Entwicklungsarbeiten zu den Vormaterialien durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchungen ist auch die Motivation für die hier vorgestellte Arbeit entstanden. Die Herstellung von chemisch korngefeintem Vormaterial über die dreistufige Prozessabfolge Stranggießen, Wiedererwärmen von Billets und abschließende Formgebung

der teilflüssigen Schmelze haben sich zu einer herausfordernden Aufgabenstellung entwickelt. Zusätzlich haben die beiden letzten wichtigen Konferenzen zum Thema Thixoforming in den Jahren 2000 in Turin (Italien) und 2002 in Tsukuba (Japan) gezeigt, dass es noch weiteren Handlungsbedarf bei der Anpassung von Werkstoffen an die speziellen Anforderungen für das Thixoforming gibt. In dieser experimentellen Arbeit besteht daher das Ziel in der Anpassung potentiell wichtiger Werkstoffe

für das Thixoforming – am Beispiel einer Aluminiumlegierung – und der anschließenden anwendungsgerechten Weiterverarbeitung. Die Entwicklung einer vollständig neuen Legierung wird wegen der damit verbundenen Hürden bei der später erforderlichen Normungsprozedur bewusst außer acht gelassen.

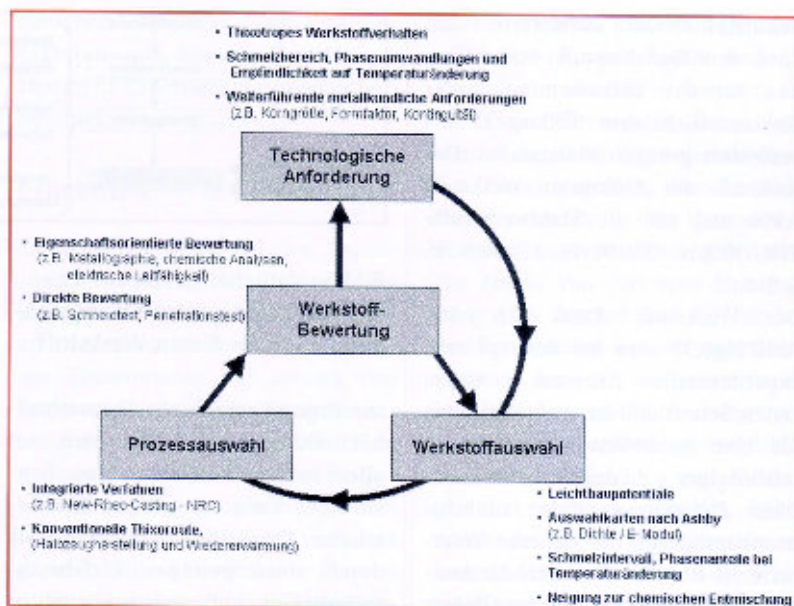
Im vorangehenden theoretischen Teil wird das Prozesspotential des Thixoforming im Vergleich zu den Konkurrenzverfahren Schmieden und Gießen umrissen. Der Kurzüberblick der Forschungsdichte zu den Werkstoffen und Prozessschritten des Thixoforming zeigt, dass heute die Verarbeitung von Aluminium und Stahl im Zentrum der allgemeinen Entwicklungsaktivitäten zu sehen sind. Bei den Prozessen sind neben dem konventionellen Verfahren (Stranggießen, Wiedererwärmen und Formgebung) die neuen sogenannten integrierten Verfahren, z.B. das New-Rheo-Casting (NRC) besonders hervorzuheben.

## Werkstoffauswahl

Bild 1 zeigt die erarbeitete schematische Übersicht einer modularen Vernetzungsstruktur für die Anforderungen, Auswahl, Einsatz und Bewertung von Werkstoffen für das Thixoforming. Diese bilden ein komplexes System mit wechselseitigen Verknüpfungen, die sowohl für die Werkstoffe als auch für die Prozessschritte entscheidende Bedeutung haben.

Die wichtigste nicht-technische Anforderung an Werkstoffe für das Thixoforming sind geringe Herstellungskosten, die sich durch eine einfache Herstellung, geringe Anzahl an Prozessschritten, sowie mit einem geringen Anfall an Reststoffen realisieren lassen müssen. Daneben haben die Werkstoffe den Anforderungen an





**Bild 1:** Verknüpfungen zwischen Anforderungen, Auswahl, Einsatz und Bewertung von Werkstoffen für das Thixoforming

die mechanischen Eigenschaften zu genügen, die bei der Entwicklung von Bauteilen zu definieren sind. Die Auswahl eines geeigneten Werkstoffes legt alle weiteren Prozessschritte und auch die benötigte Verarbeitungsdauer fest. Zusätzlich hat der Werkstoff einen deutlichen Einfluss auf die erreichbare Prozessstabilität bei der weiteren Verarbeitung bis zum Bauteil.

Wegen der Anwendungsmöglichkeiten in Fahrzeug-, Maschinen- und Flugzeugindustrie, Schiffbau und Elektrotechnik gehört der Werkstoff A356 (EN AC-ALSi7Mg0,3) zu einem der mengenmäßig wichtigsten Aluminiumguss-Werkstoffe. Dies ist vor allem auf die geringe Dichte und die guten mechanischen Eigenschaften,

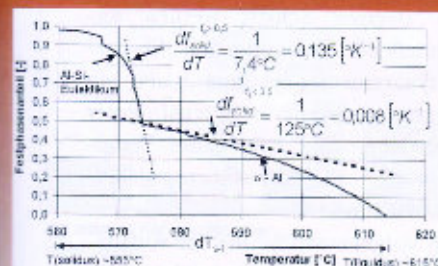
wie z.B. die hohe Festigkeit und Zähigkeit sowie gute Korrosionsbeständigkeit, Schweiß- und Wärmebehandelbarkeit zurückzuführen. Auf Grund dieser Werkstoffcharakteristika bietet die Legierung ein gutes Leichtbaupotential. Darüber hinaus ist der Werkstoff immer noch das wichtigste Vormaterial zur Herstellung von Bauteilen mit dem Thixoforming. Das Erstarrungsintervall liegt mit etwa 60 K in einem Bereich guter Verarbeitbarkeit. Besonders gut eignet sich der Werkstoff in Bezug auf die Tem-

peraturempfindlichkeit der Phasenanteile, sobald der Flüssigphasenanteil auf > 50% eingestellt wird.

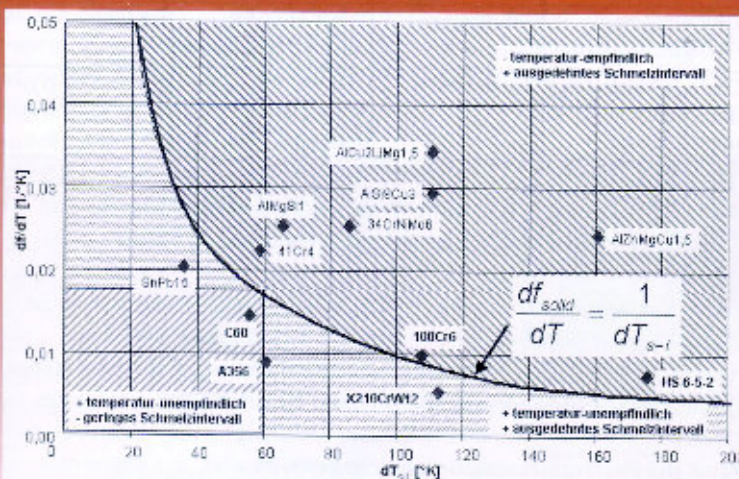
Bild 2 zeigt den Verlauf des Festphasenanteils innerhalb des Erstarrungsintervalls für die Legierung A356 (EN AC-ALSi7Mg0,3).

Bild 3 zeigt das Schmelzintervall und die Empfindlichkeit der Fest-/Flüssigphasenanteile ( $df/dT$ ) bei Temperaturänderung ( $dT$ ) für interessante Thixoforming-Werkstoffe. Die Übersicht lässt sich aus bekannten Daten zusammenstellen.

Die beschriebenen Legierungen decken einen umfangreichen Bereich möglicher Schmelzintervalle ab. Grundsätzlich ist es naheliegend, dass Legierungen mit einem ausgedehnten Schmelzintervall eine geringe Empfindlichkeit der Phasenanteile bei Temperaturänderung aufweisen (vgl. Kurvenverlauf  $df/dT=1/dT$ ). Der im Bild 3 eingezeichnete Kurvenverlauf gibt die rechnerisch bestimmten Empfindlichkeitswerte für unterschiedliche Schmelzintervalle bei hypothetisch angenommenem vollkommen linearem Abfall des Festphasenanteils bei Temperaturanstieg wieder. Tatsächlich folgen technische Legierungen diesem Kurvenverlauf jedoch nur bedingt. Die Legierungen, die sich deutlich oberhalb des eingezeichneten Kurvenverlaufs befinden, sind als „temperaturempfindlich“ einzustufen, geben den allgemeinen

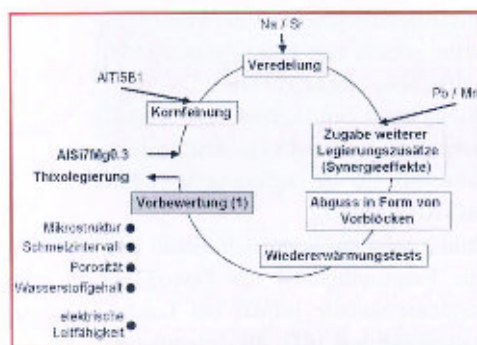


**Bild 2:** Verlauf des Festphasenanteils für die untereutektische Legierung A356 (EN AC-ALSi7Mg0,3)



**Bild 3:** Schmelzintervall und Empfindlichkeit der Fest-/Flüssigphasenanteile bei Temperaturänderung für wichtige Thixoforming-Werkstoffe





**Bild 4: Vorgehensweise zur Anpassung der Legierungszusammensetzung des Werkstoffes A356 (EN AC-AISi7Mg0,3) an die Anforderungen für das Thixoforming**

Regelfall wieder und bereiten bei der Verarbeitung im teilflüssigen Zustand eher Probleme. Alle Legierungen, die sich unterhalb der eingezeichneten Kurve befinden und zusätzlich ein ausgedehntes

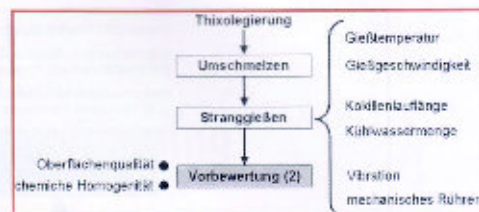
Schmelzintervall aufweisen, sind unter dem Gesichtspunkt „Qualifikation für das Thixoforming“ unter diesem wichtigem Teilaspekt als besonders geeignet einzustufen. Das sind z.B. der Aluminium-Werkstoff A356 und z.B. die Stahlwerkstoffe C60, 100Cr6, X210CrW12 sowie HS 6-5-2.

Der Werkstoff A356 (EN AC-AISi7Mg0,3) wird bei den späteren experimentellen Arbeiten in einem ersten Schritt auf die Anforderungen für eine gute Verarbeitbarkeit im teilflüssigen Zustand vorbereitet. Diese Zielsetzung erfolgt zunächst unabhängig von der weiteren Verarbeitungs-Route, z.B. durch die konventionellen Prozesse (Thixo-Gießen, -Schmieden) oder durch die sogenannten integrierten Verfahren. Tabelle 1 zeigt die zusammenfassende Übersicht wichtiger Anforderungen an Werkstoffe für das Thixoforming.

Anforderung	Kenngröße	Formel z.B.	Orientierungs-Wert
Geringe Viskosität der Schmelze unter Scherbelastung	Viskosität unter Scherbelastung	$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$	~ 1 bis 10 cP
Ausgedehntes Schmelzintervall	$dT = (T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}})$	$dT = f(c, \dot{T}, p)$	~ 100 °K
Möglichst definierter Fest-/ Flüssigphasenanteil	$F_{\text{liquid}}$	$f_s = 1 - \left( \frac{T_M - T_L}{T_M - T} \right)^{\frac{1}{1-n}}$	40 – 60 mass. %
Geringe Korngröße	mittlerer Korndurchmesser	$d_m = f(\dot{T}, c)$	$d_K < 100 \mu\text{m}$
Globulitisches Gefüge	Formfaktor	$f = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{U^2}$	$f > 0,6$
Geringe Vernetzung der Dendriten untereinander	Kontiguität	$C^{SS} = f^{SS} \cdot \frac{2 \cdot S^{SS}}{2 \cdot S^{SL} + S^{SS}}$	$0,4 < C^{SS} < 0,6$

**Tabelle 1: Übersicht wichtiger Werkstoffanforderungen für das Thixoforming am Beispiel der Aluminiumlegierung A356 (EN AC-AISi7Mg0,3)**

mit  $\eta$ : Viskosität,  $k$ : Konstante,  $\dot{\gamma}$ : Schergeschwindigkeit,  $n$ : Oswald-de Waele Exponent;  $dT$ : Schmelzintervall,  $f(c, \dot{T}, p)$ : Funktion der (Legierungselement-Gehalte, Abkühlgeschwindigkeit, Druck),  $f_s$ : Feststoffanteil,  $T_M$ : Schmelztemperatur einer Komponente;  $T_L$ : Liquidustemperatur der Legierung mit einer bestimmten Zusammensetzung;  $p$ : Exponent, der durch das Phasenzustandsgleichgewicht definiert wird,  $d_m$ : mittlerer Korndurchmesser,  $f$ : Formfaktor,  $A$ : Kornfläche,  $U$ : Umfang eines Kornes,  $S^{SS}$ : Korngrenzfläche zwischen der Festphase, d.h. die Fläche zwischen den zusammenhängenden und nicht durch Schmelze getrennten Körnern,  $S^{SL}$ : Phasengrenzfläche zwischen Festphase und Schmelze



**Bild 5: Vorgehensweise zur Bestimmung geeigneter Stranggussparameter für diesen Werkstoff**

Die Prozesstechnik zur Vormaterialherstellung konzentriert sich vor allem auf die Einstellung eines feinkörnigen Ausgangsgefüges. Die chemische Kornfeinung zeichnet sich durch einen geringen verfahrenstechnischen Aufwand aus, und ist daher im Vergleich zu den anderen Möglichkeiten zur Einstellung der feinkörnigen Struktur (z.B. mit Hilfe der physikalischen Kornfeinungsmethoden) auch wirtschaftlich attraktiv. Zudem sind chemische Kornfeinungszusätze wegen des positiven Einflusses auf die mechanischen Eigenschaften und das Formfüllungsvermögen bekannt. Die Anwendung dieser Vormaterialherstellungs-Variante, ist jedoch trotz dieser bekannten Vorteile bisher selbst im Rahmen der Grundlagenforschung kaum beachtet worden.

## Praktische Arbeiten

Bild 4 zeigt die bei den experimentellen Arbeiten angewendete Vorgehensweise zur Anpassung der Legierungszusammensetzung des Werkstoffes A356 (EN AC-AISi7Mg0,3) an die Anforderungen für das Thixoforming.

Im zweiten Schritt werden anschließend die optimalen Stranggussparameter bestimmt, um ein Vormaterial mit möglichst guter Oberfläche und homogener Verteilung der Legierungselemente sicherzustellen (Bild 5).

Die Vorgehensweise bei der Aufstellung der Versuchspläne erfolgt unabhängig davon, welche der möglichen Zielvorstellungen später tatsächlich umgesetzt werden sollen. Das Ziel der Versuchsplanung wird darauf reduziert, die allgemeine Beziehung



zwischen Zielgrößen und Einflussfaktoren mit Einsatz des DoE – Design of Experiments mathematisch beschreibbar zu machen.

## Ergebnisse

Tatsächlich können bei der Anpassungsentwicklung der Aluminiumlegierung A356 (EN AC-ALSi7Mg0,3) an die besonderen Anforderungen für das Thixoforming mit Einsatz von Legierungszusätzen nur Kompromisslösungen gefunden werden. Eine geringe Korngröße, mit gutem Einförmigkeitsverhalten bei einer Wiedererwärmung und ein fein verteiltes gleichmäßiges Eutektikum können nicht gemeinsam optimal sichergestellt werden. Es lassen sich jedoch bei den Versuchen mit einem Kornfeinerzusatz von 0,25 mass. % Titan (in Form von AlTi5B1) bei gleichzeitig kurzen Wiedererwärmungszeiten Ergebnisse erzielen, die mit konventionellem Vormaterial vergleichbar sind. Bild 6 zeigt aufbauend auf die gefundenen Ergebnisse, die dazu entwickelte schematische Vorstellung zur Gefügeveränderung während der Wiedererwärmung des Halbzeugvormaterials in den teilflüssigen Zustand.

Die optimale Gefügeeinstellung ist erreicht, wenn die Dendriten in einzelne Globuliten überführt werden können. Wird der Werkstoff darüber

hinaus erwärmt, kann es zum unerwünschten Kornwachstum und zur Koagulation der Körner kommen. Die Erfolgsaussichten dieser Behandlung werden damit im Wesentlichen durch das Ausgangsgefüge, die chemische Zusammensetzung des Vormaterials und der Temperaturführung definiert. Ein Zusatz von 200 ppm Strontium wirkt sich deutlich auf die Feinheit des Eutektikums aus, so dass dieser Zusatz – der auch bei konventionellen Legierungen üblicherweise verwendet wird – unbedingt empfohlen wird. Eine Veredelung mit Natrium gestaltet sich, wegen des hohen Abbrandes bei der Legierungsherstellung und der Schwierigkeit die Legierungszusammensetzung kontrolliert einzustellen, als unpraktikabel für die Verwendung beim Thixoforming. Ein Zusatz von 0,3 mass. % Mangan wirkt sich auf das Einförmigkeitsverhalten des  $\alpha$ -Aluminiums bei der Wiedererwärmung positiv aus. Das Schmelzintervall der untersuchten Legierungen wird vor allem durch geringe Schwankungen der Legierungsbestandteile Silizium und Magnesium beeinflusst. Allein der Titanzusatz – der schon zur Kornfeinung einzusetzen ist – wirkt sich auch positiv auf das Schmelzintervall aus, indem die Liquidustemperatur zu höheren Werten verschoben wird. Der Titan- und Strontiumgehalt haben neben der Dauer bei der Wiedererwärmung einen deutlichen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit der Proben. Dieser Zusammenhang wird auf deren Einfluss auf die Mikrostruktur der untersuchten Werkstoffe zurückgeführt und für künftige Untersuchungen als eine Möglichkeit zur indirekten Qualitätsbeurteilung von Vormaterial für das Thixoforming gesehen.

## Definition der weiterentwickelten Legierungszusammensetzung

Für die folgenden Untersuchungen wurde der Zusatz von 0,25 mass. % Titan – in Form des Standardkornfeiners AlTi5B1 – ausgewählt. Zur Veredelung kann auf den Einsatz von konventionellen strontiumhaltigen

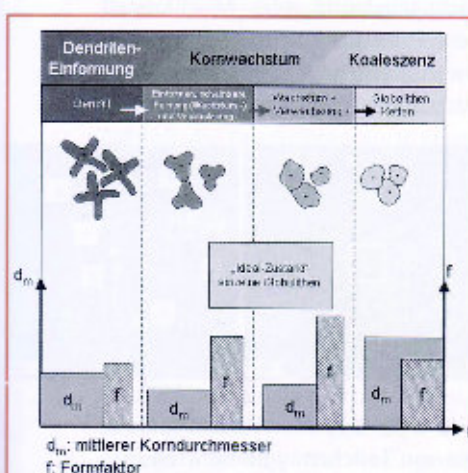
Vorlegierungen, oder bereits mit Strontium veredelten Basislegierungen vom gleichen Typ kommerziell zurückgegriffen werden. Weiterhin werden 0,3 mass. % Mangan zur Verbesserung des Einförmigkeitsverhaltens bei der Wiedererwärmung zugesetzt.

## Stranggussversuche

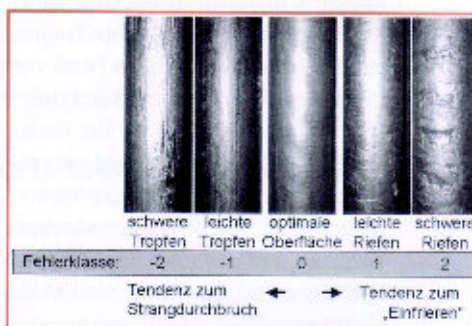
Bei der Einstellung geeigneter Stranggussparameter werden vorab die wichtigsten Einflussgrößen auf die Strangqualität gesucht. Die Untersuchung der Strangoberfläche wird an der chemisch korngefeinten Legierung mit einem Strangdurchmesser von 76 mm [3"] und einer Gießtemperatur von  $670 \pm 25$  °C ausgeführt. Dabei definieren das Verhältnis aus Gießgeschwindigkeit und Menge des Kühlwasserdurchflusses die Kühlintensität, die einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der gegossenen Stränge hat.

Es wird folgendes Bewertungsschema zur Beschreibung der Oberflächenqualität verwendet:

- 3 Schmelze in der Kokille eingefroren,
- 2 starke Kaltläufe in der Oberfläche / Tendenz zum Einfrieren der Kokille,
- 1 leichter Kaltlauf,
- 0 gute Oberfläche,
- 1 leichte Ausschwitzungen / „Tränenbildung“,
- 2 starke Ausschwitzungen / Tendenz zum Strangdurchbruch,
- 3 Strangdurchbruch.

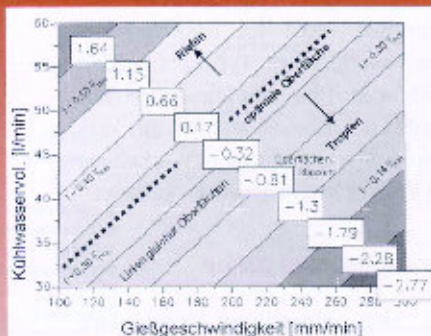


**Bild 6:** Gefügeveränderung während der Wiedererwärmung von Halbzeugvormaterial in den teilflüssigen Zustand



**Bild 7:** Einteilung der Oberflächen-Fehlererscheinungen beim Stranggießen in Fehlerklassen





**Bild 8: Linien gleicher Oberflächenklassen beim Stranggießen als Funktion von Gießgeschwindigkeit und Kühlwasservolumenstrom (Kokill Lauflänge 20 mm; ohne Vibration, ohne mechanisches Rühren)**

Bild 7 zeigt wichtige Oberflächenfehlererscheinungen und die Zuordnung in die Fehlerklassen.

In Bild 8 sind für das gefundene mathematische Modell die Fehlerklassen als Funktion des Kühlwasservolumenstromes und der Gießgeschwindigkeit wiedergegeben.

Der optimale Arbeitsbereich – gekennzeichnet durch eine fehlerfreie Oberfläche und ein möglichst chemisch homogenes Vormaterial – kann bei einer Gießgeschwindigkeit von 250 mm/min und einem Kühlwasserdurchfluss von 45 l/min realisiert werden. Abweichungen von diesen Prozessgrößen haben einen weitgehend geringen Einfluss auf die Qualität der Stranggussoberfläche. Bei einer deutlichen Änderung der Kühlintensität können sich jedoch sogenannte Kaltlaufriefen oder im anderen Extremfall tränenförmige Tropfen auf der Strangoberfläche in Form von „Schwitzperlen“ bilden. Beide Fehlererscheinungen müssen für die weitere Verarbeitbarkeit unbedingt vermieden werden. Bei noch ausgeprägter Abweichung von den Prozessfenstervorgaben lässt sich der Strangdurchbruch oder das Einfrieren der Kokille nicht vermeiden.

### Keimbildungsuntersuchungen

Das weiterentwickelte Vormaterial zeichnet sich im Vergleich zu kon-

ventionellem Vormaterial durch eine gleichmäßigere Korngrößenverteilung im Rand- und Mittenbereich aus. Dadurch sollte sich der neue Werkstoff günstig auf ein gleichmäßiges Fließverhalten der Fest- und Flüssigphase und damit auf die Vermeidung des Entmischungsverhaltens im Formgebungsschritt auswirken.

Sowohl beim konventionellen Vormaterial als auch bei der chemisch korngefeinten Variante können Aluminiumkarbid-Teilchen als Kornzentren nachgewiesen werden, obwohl dies auf Grund der Konstitution des eingesetzten Kornfeiners zunächst nicht zu erwarten war.

Neben dem punktförmigen Teilchen in der Bildmitte von Bild 9 befindet sich eine langgestreckte Nadel mit mehreren punktförmigen Ausscheidungen (Bild 10).

Die mit „1“ bis „6“ gekennzeichneten Stellen wurden mittels EDX-Analyse untersucht. Es handelt sich um eine  $Al_3Ti$ -Nadel, umgeben mit Silizium-Teilchen (auch unter der Nadel / unterhalb der Schliffebene) sowie einem weiteren  $Al_3Ti$ -Teilchen (Pos. 2) und  $TiB_2$ -Teilchen. Das Doppelteilchen in Pos. 3 besteht aus  $Al_3Ti$  und Silizium. Bei Pos. 4 handelt es sich um ein Gemenge aus  $TiB_2$ - und Silizium-Teilchen. Die Teilchen in Pos. 5 sind Silizium-Teilchen eutektischer Natur, während Pos. 6 die  $\alpha$ -Aluminium-Matrix repräsentiert. Das Gefüge am Bolzenrand zeigte auch als Kornzentrum mindestens einmal ein  $Al_4C_3$ -Teilchen als Kristallisationszentrum. Die  $\alpha$ -Aluminiumdendriten enthalten geringe Silizium-Anteile. Das Eutektikum ist feinkörnig veredelt, in dem neben Aluminium nur Silizium nachzuweisen ist.

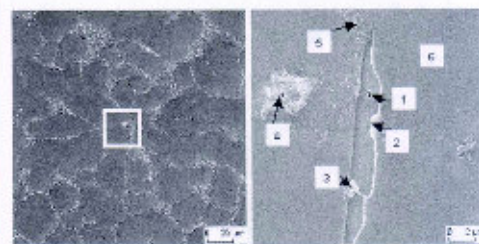
Auch bei manganlegierter und korngefeinter Legierung konnten einige Aluminiumkarbid-Kornzentren nachgewiesen werden.

Ein besonderer Einfluss des Mangangehaltes auf Keimbildungsmechanismen konnte nicht nachgewiesen werden. Mit Hilfe dieser Untersuchungsmethode gelang es auch nicht, zu erwartende Unterschiede in den Keimbildungsmechanismen bei den verschiedenen Herstellungsmethoden für das Vormaterial eindeutig abzu-

leiten. Auch der beobachtete günstige Einfluss von Mangan bei der Wiedererwärmung in den teilflüssigen Zustand blieb ungeklärt. Es konnte aber gezeigt werden, dass sowohl für konventionelles Vormaterial als auch für die chemisch-korngefeinte Variante  $TiC$ -Partikel offensichtlich als Keimbildungszentren wirken.

### Benchmarking

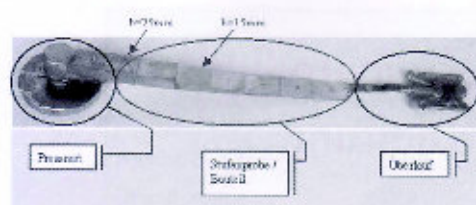
Im Rahmen von Stauchversuchen wurde das rheologische Verhalten des Werkstoffes bei Zusatz von Kornfeinungsmittel und Mangan untersucht. Der Zusatz von Titan und die damit erreichte Kornfeinung wirkte sich allein nicht positiv auf das rheologische Verhalten aus. Durch den Titanzusatz wird das Ausgangsgefüge zunehmend dendritisch, wodurch die Überführung in den thixotropen Zustand und das Gleiten der Dendriten nachteilig beeinflusst werden. Mangan allein hat auch nahezu keinen Einfluss auf die gemessenen Werte. Durch die Kombination von Titan und Mangan, kann aber sogar ein etwas besseres rheologisches Verhalten im Vergleich zu konventionellem MHD-Vormaterial erzielt werden. Eine Mikro-Untersuchung der Phasenübergänge bestätigte die Anreicherung von Silizium und Magnesium im Eutektikum. Der Verbleib von Titan und Mangan konnte jedoch nicht eindeutig dem Mischkristall oder Eutektikum zugeordnet werden. Die Anreicherung dieser Legierungszusätze scheint eher punktuell zu sein.



**Bild 9 (links): Übersichtsaufnahme von Teilchenagglomeraten in einem Kornzentrum (chemisch korngefeintes und mit Mangan modifizierte Stranggussprobe)**

**Bild 10 (rechts): Detailaufnahme des Korn-Zentrums**





**Bild 11: Prinzip-Bauteil aus dem weiterentwickelten Vormaterial**

und findet sich sowohl im Mischkristall als auch im Eutektikum. Mittels induktiver Wiedererwärmungsversuche kann gezeigt werden, dass das chemisch korngefeinte Vormaterial sich bei der gewählten Strategie ähnlich gut in ein feinglobulitisches Gefüge überführen lassen kann wie konventionelles MHD-Material. Sowohl der mittlere Korndurchmesser als auch der Formfaktor sind vergleichbar. Bild 11 zeigt ein Prinzipbauteil, dass aus dem weiterentwickelten Vormaterial hergestellt wurde.

## Fazit

Mit dieser Arbeit ist es gelungen, die alternative Herstellung von Vormaterial für das Thixoforming mit Einsatz der chemischen Kornfeinung zu entwickeln. Die komplexen Anforderungen an die Werkstoffe und Bewertungsmöglichkeiten zur Formgebung im teillüssigen Zustand werden mit dieser Untersuchung ganzheitlich zusammengefasst. Die dabei erarbeitete Methode zur Lösung vergleichbarer Aufgabenstellungen erlaubt in Zukunft die Bearbeitung auch neuer Einfluss- und Zielgrößen zu diesem Thema.

Für das Thixoforming bedeuten die erfolgreiche Umsetzung zur Weiterentwicklung und Anpassung des Vormaterials und die damit neu eingestellten Eigenschaften eine Vereinfachung der Prozesskette, da die verfahrenstechnisch aufwendige Herstellung des Vormaterials mit Hilfe des magnetischen Rührens durch die kombinierte chemische Kornfeinung und Manganzugabe vereinfacht umgesetzt werden kann. Durch die neue Möglichkeit zur Vormaterialherstellung mit Hilfe dieser Methode kann das Thixoforming seine Position als Konkurrenzverfahren zu den etablierten Ur- und Umformverfahren erweitern.

Für weiterführende Untersuchungen wird empfohlen dem Einfluss und der Eigenschaft der Fest- und Flüssigphasengrenze auf das rheologische Verhalten intensive Aufmerksamkeit zu widmen. Hier wird in Folge der Mikrosegrierung ein deutlicher Einfluss bereits geringer Konzentrationschwankungen vermutet. Da die Löslichkeit der Legierungsbestandteile und Verunreinigungen extrem von der Temperatur abhängt, wird ein großes Potential für die Werkstoffweiterentwicklung gesehen, indem durch die kontrollierte Zugabe von ausgewählten Legierungselementen auch die rheologische Eigenschaft gezielt angepasst werden kann.

## Literatur

- T. Noll: Die anwendungsgerechte Weiterentwicklung des Aluminiumwerkstoffes EN AC- $\text{AlSi7Mg0,3}$  (A356) für das Thixoforming mit chemischer Kornfeinung. Diss., RWTH Aachen (2003), Shaker-Verlag

- M. Hufschmidt, M. Modigell, T. Noll, B. Friedrich, B. Noll, W. Wagener, D. Hartmann: Evaluation and Modelling of chemical Segregation Effects for Thixoforming Processing, *Advanced Engineering Materials* 5, No. 3; (2003); Seite 156-160
- Budak, W. Bleck; T. Noll; B. Friedrich: Einfluss chemischer Entmischungen auf mechanische Eigenschaften thixogeförderter Bauteile, *Materialwissenschaft und Technik* 33, (2002); S. 643-650
- T. Noll; B. Friedrich: Thixoforming Raw Material Development by Means of optimized Design of Experiments (DoE), Konferenz-Einzelbericht: 131st TMS Annual Meeting, Seattle, WA, United States, Light Metals: Proceedings of Sessions, (Warrendale, Pennsylvania), (2002), S. 987-993
- B. Friedrich; T. Noll: Raw material development and recycling concepts for semi-solid processing; erschienen in: EMC, (2001), Friedrichshafen, Germany, Poster Guide, S. 2-3
- T. Noll; B. Friedrich; H. Meuser; I. Budak: Auswahl und Bewertung von Werkstoffen zur Formgebung im teillüssigen Zustand, *Gießerei*, Band 88 (2001) Heft 8, S. 60-66
- T. Noll; C. Kiehne; J. Krüger; B. Friedrich: Recycling of semi-solid processing residues, 6th International conference of semi-solid processing of alloys and composites, Hrsg.: Chiarmetta, Gian Luigi; Rosso, Mario; (2000), Turin, Italien, ediment Spa, Bescia, Italien, S. 35-40
- T. Noll; C. Kiehne; J. Krüger; B. Friedrich: Grain refining optimisation of A356 alloy by Mn-addition, 6th International conference of semi-solid processing of alloys and composites, Hrsg.: Chiarmetta, Gian Luigi; Rosso, Mario; (2000), Turin, Italien, ediment Spa, Bescia, Italien, S. 753-758
- K. Krone et al.: Fachbuch: Aluminiumrecycling – Vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung, Hrsg.: Vereinigung Deutscher Schmelzhütten VDS, (2000), ISBN: 3000038396

(1) Dr. Tony R. Noll, Prof. Dr.-Ing. B. Friedrich (Institutsleiter), IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen, Intzestraße 3, 52056 Aachen

## Fachbuch: Die anwendungsgerechte Weiterentwicklung von EN-AC- $\text{AlSi7Mg0,3}$ (A 356) für das Thixoforming

An die Vormaterialien für das Thixoforming werden hohe Qualitätsanforderungen gestellt. Das vorliegende Buch befasst sich mit der Weiterentwicklung des Aluminiumwerkstoffes EN AC- $\text{AlSi7Mg0,3}$  für das Thixoforming mit chemischer Kornfeinung in Kombination mit weiteren Legierungszusätzen unter Verwendung der

modellgestützten Versuchsplanung. Ziele waren die Vereinfachung der Prozesstechnik sowie die Verbesserung der Vormaterialqualität. Es gelang der Nachweis, dass mittels der chemischen Kornfeinung in Kombination mit weiteren Legierungszusätzen das rheologische Verhalten eines konventionellen Werkstoffes anwendungsgerecht

angepasst werden kann. Insbesondere werden die Wechselwirkungen der Legierungszusätze und deren Einfluss auf wichtige Zielgrößen für das Thixoforming mit den angewendeten Methoden beschreibbar gemacht.

Von Tony Noll, Shaker Verlag, Aachen, 2003, 178 Seiten, br., EUR 49,80, ISBN 3-8322-2003-8