

Untersuchung der Legierung THX 540 (AlMg5Si2Mn) in Abhängigkeit von verwendeten Thixoparametern

Salar Bozorgi*, Peter Schumacher* und Christian Eder**

* Lehrstuhl für Gießereikunde, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

** SAG Motion AG, Alutech GmbH, Thixalloy Components, Lend, Österreich

Eingegangen am 27. September 2010, angenommen am 11. Oktober 2010

Zusammenfassung: In der vorliegenden Arbeit wurde der gesamte Prozess des Thixogießens durchleuchtet. Ziel war es, eine Optimierung des Thixogießprozesses und in weiterer Folge eine Verbesserung der Bauteilqualität zu erreichen. Für das erfolgreiche Produzieren von Thixobauteilen ist die Wahl der geeigneten Legierungsgehalte innerhalb der Legierungstoleranz und des Vormaterials hinsichtlich des Gefüges für die Bolzen sowie die geeignete Erwärmung der Bolzen im teilerstarten Zustand entscheidend. Um den Einfluss der Gehalte der Legierungselemente auf den Flüssig- bzw. Festanteil des Metalls zu ermitteln, wurden Simulationen mit Thermocalc® durchgeführt. Das Gefüge der Bolzen wurde auf seine Zellgröße hin untersucht. Für die Ermittlung der Qualität im Bauteil wurden Rundheitsgrad sowie intermetallische Phasen (im REM) und Gussfehler bestimmt. Bei den untersuchten Bauteilen handelt es sich um Gussstücke für die Automobilindustrie.

Investigation of a THX540 (AlMg5Si2Mn) Alloy with Respect to its Thixoprocessing Parameters

Abstract: In this study the entire thixocasting process was examined. The aim was to optimize the process and thus improve the quality of the as-cast part. To successfully produce a thixocast part, the choice of appropriate alloy composition, the appropriate microstructure within the billet and the appropriate heat treatment of the billets into the semisolid state were found to be critical. In order to determine the influence of the alloy composition on fraction solid, simulations using Thermocalc® were conducted. For the special microstructure of the billets the cell size was examined. To determine the characteristics of the castings the circularity, the intermetallic phases (examined with SEM) and the casting defects were investigated. The casting

examined was manufactured for use in the automobile industry.

1. Einleitung

Mittels des Gießverfahrens Thixogießen (englisch: semisolid Casting oder auch semisolid Metal, SSM) ist es möglich, hochwertige Bauteile aus Leichtmetallen mit schwierigen Geometrien in einem Formgebungsschritt zu produzieren. Als wichtigste Anwender dieses Verfahrens sind die Automobil- und Elektronikindustrie zu nennen. Die Grundlage des Verfahrens des Thixogießens ist, dass die Formgebung bei Aluminiumlegierungen innerhalb des Solid/Liquid-Intervalls vonstattengeht (innerhalb des Schmelzintervalls)^{1,2,4}. Das Verfahren besitzt folgende Vorteile³:

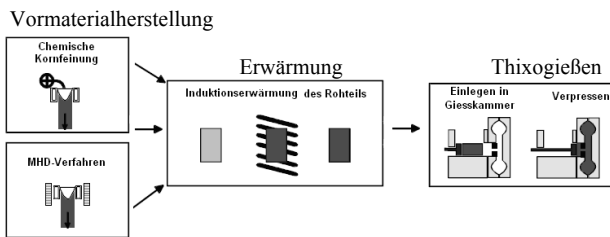
- Vergrößerung der konstruktiven Freiheit
- Erhöhung der Produktivität
- Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und Dichtigkeit
- Erhöhung der Dehnungs- und Festigkeitswerte ohne Wärmebehandlung
- Verbesserung der Verschleißbeständigkeit der verwendeten Form (abhängig vom Anwendungsfall)

Folgende Prozessschritte sind Teil des Verfahrens, wobei es für eine korrekte Vorgangsweise von großer Bedeutung ist, dass jeder einzelne Prozessschritt Berücksichtigung findet^{1,2,4}:

- Vormaterialherstellung bzw. Erzeugung der Bolzen (Slugs)
- Wiedererwärmung der Bolzen in den teilerstarten Zustand
- Herstellung von Formteilen durch das Thixogießen

Das verwendete Vormaterial stellt beim Thixogießen einen dominierenden Faktor dar. Dabei sind für einwandfreie Formgebungsprozesse einerseits eine feinzellige, globulare Gefügestruktur und andererseits eine ausreichende Präzision, Temperatur und ein geringer Temperaturgradient

Korrespondenzautor:
 Dipl.-Ing. Salar Bozorgi
 Lehrstuhl für Gießereikunde, Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Straße 18, Leoben, Österreich
 E-Mail: Salar.Bozorgi@unileoben.ac.at

Abb. 1: Schematisches Verfahrensprinzip nach⁵

im Bolzen bei der Erwärmung der Bolzen entscheidend^{1, 2, 4}. Nach dem Einlegen des erwärmten, „butterweichen“ Vormaterials in eine Druckgussmaschine erfolgt zur Formgebung das Verpressen mit einem entsprechenden Geschwindigkeits- und Druckprofil in das Formwerkzeug^{1, 2, 4}. Das Verfahrensprinzip ist in Abb. 1 dargestellt.

Zur Erreichung der beim Vormaterial geforderten feingeligen, globularen Gefügestruktur werden beim Gießen der Bolzen im Strangguss (Rundbarren) elektromagnetische Rührverfahren oder chemische Kornfeinung angewendet. Weiters muss zur Schaffung möglichst gleichmäßiger Erwärmung des Bolzens für den Verarbeitungszustand die Erwärmung bzw. Wiedererwärmung mit ausreichender Präzision über den gesamten Bolzenquerschnitt sichergestellt sein^{4, 5}.

Für die Herstellung des Vormaterials von Aluminium bzw. das Gießen einer Aluminiumstange, die ein für das Thixogießen geeignetes Gefüge besitzt, ist es möglich, eine horizontale Stranggussanlage mit einem elektromagnetischen Rührer auszurüsten. Beim elektromagnetischen Rühren (MHD-Rühren) erfolgt die Induzierung eines Magnetfeldes bzw. der Wirbelströme in der Schmelze während der Erstarrung im Strangsumpf über einen Stator. Die dadurch entstehenden Lorenzkräfte sind für die erzwungenen Konvektionen im Strang verantwortlich. Durch diese Konvektionen und die dadurch auftretenden Scherkräfte zwischen erstarrenden Kristallen und der rotierenden Schmelze brechen bzw. schmelzen Dendritenstrukturen mit hoher Längsausrichtung ab und formen sich kugelig ein⁶.

Im nächsten Prozessschritt, der Wiedererwärmung der Bolzen in das Solidus-/Liquidus-Intervall zwischen 45–55%, ist es einerseits notwendig, die Erwärmung homogen über den gesamten Querschnitt zu gestalten (Einstellung des Anteils der flüssigen Phase innerhalb enger Toleranzgrenzen), und andererseits erforderlich, dass der Vorgang rasch erfolgt, um ein unerwünschtes Kornwachstum durch einen zu langen Erwärmungsprozess zu verhindern⁷.

Dabei ist es möglich, die Bolzen in verschiedenen Formen/Lagen bzw. durch vertikal-induktive Aufheizung oder horizontal-induktive Aufheizung zu erwärmen.

Das Aufheizen der Bolzen geschieht bei der horizontal-induktiven Aufheizung in einer keramischen Schale innerhalb einer Spule. Dieser Erwärmungsweg besitzt den wesentlichen Vorteil, dass der Bolzen im Zeitraum der Erwärmung nur geringe Formstabilität benötigt. Dadurch kann bei dieser Verfahrensvariante im Vergleich zur stehenden (vertikalen) Erwärmung ein höherer Flüssiganteil eingestellt werden⁷.

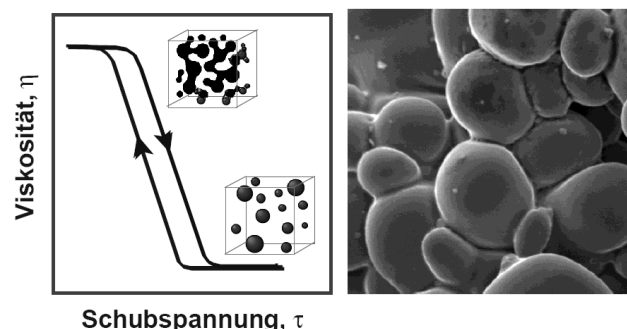
Dieses Verfahren besitzt allerdings auch Nachteile. Es wurde festgestellt, dass die Abtropfverluste, die während

der Erwärmung in der keramischen Schale erreicht werden, in das Bauteil eingeschleust und dadurch zu dendritischem Gefüge und damit verbunden zu Gussfehlern führen können⁷.

Eine spezielle Gefügeausbildung im Fest-flüssig-Zustand ist eine besondere Vorbedingung für einen erfolgreichen Semisolid-Gießprozess. Der Werkstoff muss zum Formgebungszeitpunkt als eine halbfeste Suspension mit geeigneter Viskosität vorliegen, wobei diese Forderung nicht von allen Legierungen erfüllt wird. Dafür ist es unabdingbar, dass einerseits das Schmelzintervall der Legierung eine bestimmte Breite aufweist und andererseits spezielle Vorbehandlungen erfolgen (Erwärmung der Bolzen), so dass das Gefüge der Festphase nicht dendritisch, sondern globular ausgebildet ist. Nach der Umsetzung dieser Voraussetzungen kann die Legierung die gewünschten thixotropen Eigenschaften für das Thixogießen erreichen⁸.

Thixotropie bezeichnet ein besonderes rheologisches Verhalten, das durch eine erhebliche Viskositätsabnahme unter mechanischer Belastung unter Schubspannungen gekennzeichnet ist⁸. In Abb. 2 ist die Viskositätsänderung von thixotropen Werkstoffen schematisch dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass eine niedrigviskose, fließfähige Suspension in Abhängigkeit von der Scherbelastung aufgewiesen werden kann. In der unbelasteten Stellung erfolgt die Bezeichnung der geometrischen Ausbildung der Festphase als verknüpfter Korncluster, der ein räumliches Skelettnetzwerk mit gewisser Stabilität ausbildet. Beim Aufbringen einer Schubspannung geschieht das Aufbrechen dieser Überstrukturen, und es liegt danach eine fließfähige Suspension aus Feststoffpartikeln in der flüssigen Matrixphase vor⁸. Für thixotropisches Verhalten bedeutet demzufolge der halbfeste Zustand einer Legierung zwar eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung. Zusätzlich ist vor allem die Ausbildung eines geeigneten Mikrogefüges eine wesentliche Forderung⁸.

Für einen vorgegebenen Werkstoff ist es möglich, eine weitere kritische Voraussetzung direkt aus dem Phasendiagramm und dem Phasenzustand herauszulesen. Dies ist in Abb. 3 erläutert. Reinmetalle und naheutektische Legierungen wie Typ 1 weisen keine Thixoformbarkeit auf, da kein Zweiphasengebiet (Schmelze + α) existiert, das als Voraussetzung wesentlich ist. Der Typ „einphasig“ in Abb. 3 stellt einen Werkstoff mit einer chemischen Zusammensetzung unter der maximalen Löslichkeit des Mischkristalls C_{Max} dar, bei dem durch die ausreichende Löslichkeit der Legierungselemente im Mischkristall kein Eutektikum auftritt⁸.

Abb. 2: Schematische Darstellung der Viskositätsänderung bei thixotropen Werkstoffen nach⁸

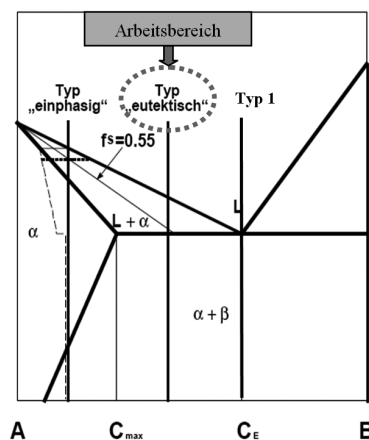


Abb. 3: Schematisches Phasendiagramm einer binären Legierung nach⁸

Heute erfolgt der Einsatz von Werkstoffen überwiegend mit einer chemischen Zusammensetzung zwischen C_{Max} und C_E für das Thixogießen. Der Grund hierfür liegt in deren Schmelzintervall mit einem günstigen, kontrollierbaren und reproduzierbaren Festanteil (Mf_s) bzw. Flüssiganteil (Mf_l) von ca. 45 % bis 55 %⁸.

2. Werkstoff und experimentelle Methoden

Für dieses Projekt wurden alle Versuche zur Vormaterialherstellung und der Herstellung des Bauteils im Legierungsgebiet der Thixalloy Components Legierung AlMg5Si2Mn (Code: Thixo540, SAG, GmbH) durchgeführt. Die Bolzen des Vormaterials hatten folgende Abmessungen: Format $\varnothing 88$, Länge 180 mm. Für die Versuche wurden Proben aus dem Bolzen und dem angefertigten Bauteil genommen. Abbildung 4 zeigt Bauteil und Bolzen.

Der Einfluss der Gehalte an Legierungselementen auf den Flüssig- bzw. Festanteil des Metalls wurde untersucht. Hierzu wurden Simulationen mit Thermocalc Classic^{®9}TCC



Abb. 4: Vorne: Bauteil mit Anschnittsystem, hinten: Bolzen



Abb. 5: Erwärmungsanlage des SAG Thixalloy Components

(Scheil-Gulliver) auf Basis der Database (TTAL5) durchgeführt. Diese Database ist unter anderem für die verwendete Legierung AlMg5Si2Mn geeignet.

Mit Hilfe von Erwärmungsversuchen kann festgestellt werden, ob die für das Thixocasting erforderliche Temperatur bzw. Temperaturverteilung erreicht wird. Die optimalen Erwärmungsparameter sollen dabei ermittelt werden.

Der Erwärmungsversuch wird auf Basis der Ergebnisse von TCC-Simulationen durchgeführt. Die Vormaterialbolzen wurden in einer feuerfesten Keramikschale erwärmt. Die leistungsstarke Anlage erlaubte sehr kurze Erwärmungszeiten. Zur genauen Erfassung der Bolzentemperatur bzw. Kontrolle der homogenen Erwärmung der Bolzen wurden Thermoelemente im Bolzen platziert. Um die Heizleistung flexibel einstellen zu können, wurde die Anlage mit einer einstellbaren Erwärmungsfrequenz bis 650 Hz und einer Maximalleistung von ca. 100 kW betrieben. Die Erwärmung eines Bolzens auf diese Weise dauerte 10 min. Die Erwärmungsversuche der Bolzen wurden auf einer horizontalinduktiven Erwärmungsanlage (siehe Abb. 5) im Betrieb der SAG Thixalloy Components GmbH durchgeführt.

Zur genauen Erfassung der Bolzentemperatur wurden für jeden Aufheizversuch je vier Thermoelemente pro Bol-



Abb. 6: Positionen der Thermoelemente im Bolzen

zen (eines in der Mitte des Bolzens, zwei zwischen Rand und Mitte, eines am Rand (Abstand jeweils 10 mm), positioniert (Abb. 6).

In weiterer Folge wurde das Gefüge der Bolzen auf die vorherrschende Zellgröße hin untersucht. Für die Ermittlung der Eigenschaften der Bauteile wurden bei diesen der Rundheitsgrad sowie intermetallische Phasen (im REM, EDX) und Gussfehler bestimmt.

3. Ergebnisse

TCC-Simulationen zeigten, dass die Legierungselemente (untersucht wurden Mg, Si, Mn, Ti, Fe, Zn, Cu) einen wesentlichen, aber stark unterschiedlichen Einfluss haben. So beeinflusst z. B. der Mg-Gehalt das Prozessfenster für erfolgreiches Thixogießen derart, dass ein geringer Gehalt eine große Temperaturspanne in der Erwärmung zulässt, ein hoher Gehalt jedoch nur eine sehr geringe Spanne. Die daraus resultierenden Temperaturverläufe, z. B. für Mg über Mf_s , sind in Abb. 7 und 8 dargestellt.

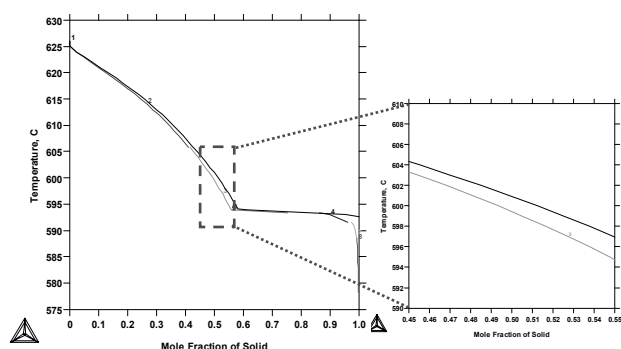


Abb. 7: Linke Seite: mit TCC berechnete Abkühlkurven für die AIMg5Si2Mn, rechte Seite: Detail Abkühlkurve, minimaler Mg-Gehalt (5 Gew. %)

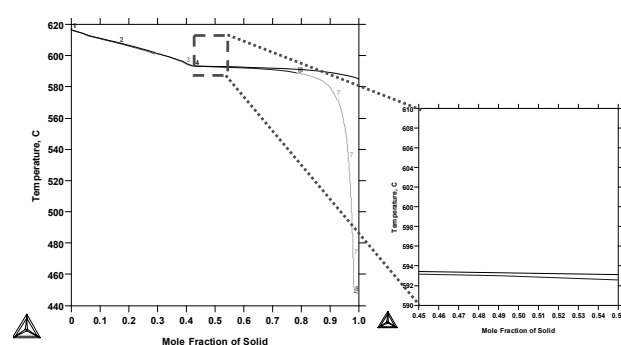


Abb. 8: Linke Seite: mit TCC berechnete Abkühlkurven für die AIMg5Si2Mn, rechte Seite: Detail Abkühlkurve, maximaler Mg-Gehalt (7 Gew. %)

Die folgenden Diagramme stellen die Einflüsse der unterschiedlichen Mg- und Si-Gehalte auf die Temperaturen, die für das Erreichen der 40%, 50% bzw. 60% Mf_s in der verwendeten Legierung erforderlich sind, dar (Abb. 9 bis 10). Diese Diagramme ergaben sich aus den durchgeführten TCC-Simulationen.

Aus Abb. 7 bis 8 geht hervor, dass an die Einstellung der Temperatur in der Wiedererwärmungsanlage hohe Genauigkeitsanforderungen gestellt werden. Der geeignete Tem-

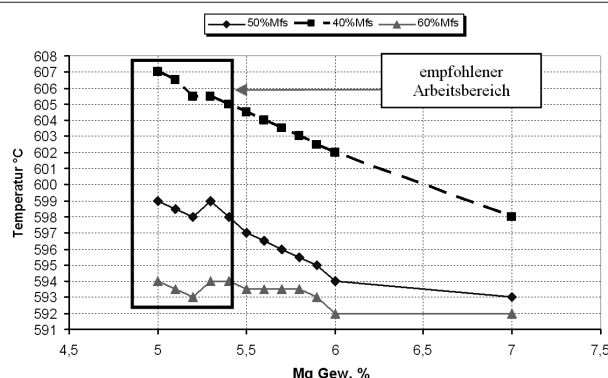


Abb. 9: Einfluss des Mg-Gehaltes bei 40%, 50% und 60% Mf_s

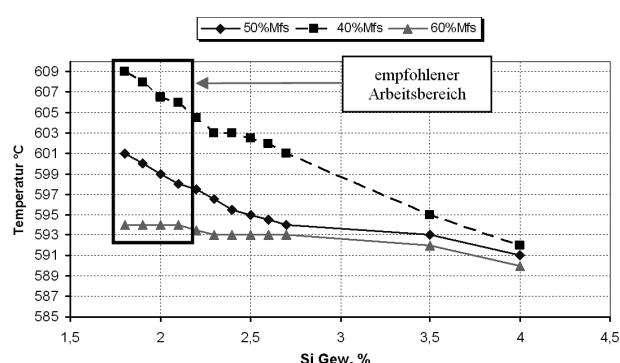


Abb. 10: Einfluss des Si-Gehaltes bei 40%, 50% und 60% Mf_s

peraturbereich liegt bei $596 \pm 5^\circ\text{C}$, wobei es jedoch einige wenige Ausnahmen (5% Mg- und 1,8% Si-Gehalt) gibt. Ansonsten ist es nicht möglich, den für den Prozess geeigneten Bereich des Flüssigkeits- bzw. Festanteils (Mf_s) zwischen 45 und 55% zu halten.

Es ist darauf hinzuweisen, dass mit steigendem Mg- oder Si-Gehalt (Abb. 9 und 10) die Temperaturen für das Erreichen von 40%, 50% bzw. 60% Mf_s signifikant herabgesetzt werden. Als Prozessoptimierung kann festgelegt werden, dass mit dem Steigen des Mg- und Si-Gehalts der Temperaturunterschied zum Einstellen eines Mf_s von 40%, 50% oder 60% geringer wird, d. h., dass die Temperaturen für das Einstellen eines bestimmten Mf_s immer näher beieinander liegen. Dadurch kann schon bei geringen Schwankungen der Temperatur der vorherrschende Mf_s geändert werden bzw. stellt sich ein zu kleiner Mf_s ein, was zu Abtropfverlusten der Bolzen während der Erwärmung führt, oder es stellt sich ein zu großer Mf_s ein, was eine Verschlechterung des rheologischen Verhaltens nach sich zieht.

Mit Hilfe eines Bildanalysesystems wurden die resultierenden dendritischen Zellgefüge untersucht. Wesentliche Zusammenhänge zwischen den Prozessbedingungen und dem resultierenden Zellgefüge konnten erörtert werden. In Abb. 11 ist ersichtlich, dass der äußere Querschnittsbereich der Bolzen (bis ca. 2 mm) eine feine dendritische Zellgröße aufweist. In einem Abstand von 5 bis 7 mm von der Strangoberfläche ist die dendritische Zellgröße signifikant reduziert, wenn von den Standard-Prozessparametern der Firma SAG Thixalloy abgewichen wird. In Abb. 12 wurde das Gefüge für eine Probe, die im Standardzustand abgegossen

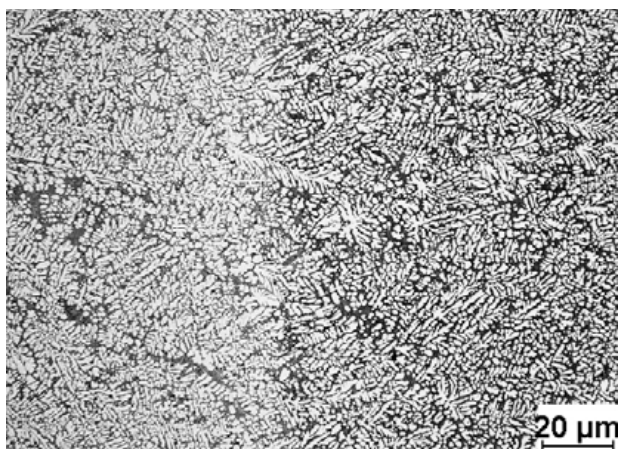


Abb. 11: Abweichung vom Standard

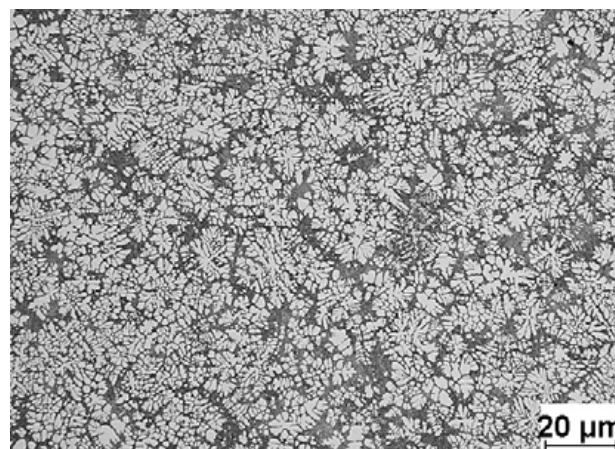


Abb. 12: Ideal-Gefüge SAG Thixalloy

wurde, ca. 4,5 bis 7 mm von der Strangoberfläche von links nach rechts entfernt, dargestellt.

Wie aus Abb. 13 ermittelt, wurde mit der Steigerung der Gießgeschwindigkeit bzw. Abkühlgeschwindigkeit die Zellgröße im äußeren Bereich des Bolzens signifikant reduziert (bis ca. 15 mm Abstand von der Strangoberfläche). In der Strangmitte wird die Zellgröße wegen der geringen Abkühlgeschwindigkeit weiter vergrößert. Dendritische Zellen im Mittenbereich des Bolzens werden durch das Rühren vergrößert. Die Rührströmung breitet in der Bolzenmitte (zentraler Strangsumpf) die Erstarrungszone aus, die durch die Isothermen der Liquidus- und Solidustemperatur begrenzt wird¹⁰. Der Anstieg und anschließende Abfall der Zellgröße in einer Entfernung von 5 bis 7 mm von der Randschale ist beeinflusst durch die Spaltbildung in der Kokille.

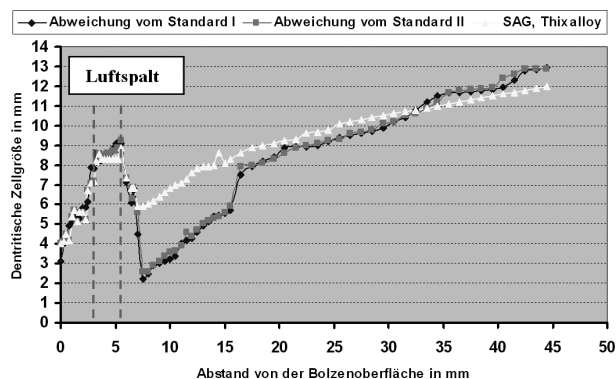


Abb. 13: Einfluss der Gießparameter auf die dendritische Zellgröße im Bolzen, zwei unterschiedliche Chargen

In Abb. 14 und 15 sind die entsprechenden Mikrogefüge des mittels Lichtmikroskop und REM-Versuchen untersuchten thixotropen Bauteils dargestellt. Die Rundheit der Körner liegt im Standardbereich sehr nahe beieinander mit Werten zwischen 0,75 und 0,85. Dendritische Strukturen im Bauteil (Abb. 16 und 17) haben auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils eine erheblich verschlechternde Wirkung. In Bauteilen des Thixogießverfahrens ist das Auftreten von dendritischen Strukturen eher unüblich. Bei ei-

ner ungleichmäßigen Wärmeverteilung kommt es im Bolzen zur Ausbildung einer unterschiedlichen Menge an Mf_s , das heißt zu Bereichen mit unterschiedlichem Fest-flüssig-Anteil. Die Abtropfverluste des erwärmten Bolzens können ebenfalls mit in die Gießkammer eingebracht werden und führen zu einer dendritischen Struktur im Gussteil.

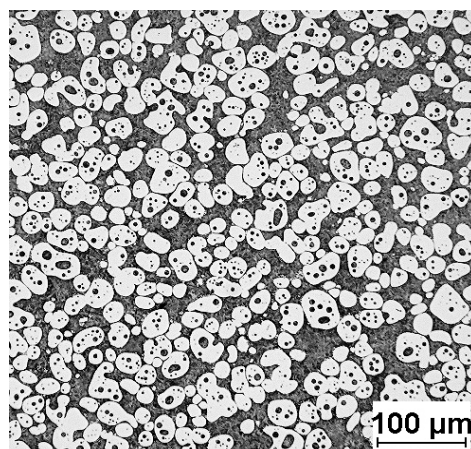


Abb. 14: Kornmorphologie des Bauteils (Standard)

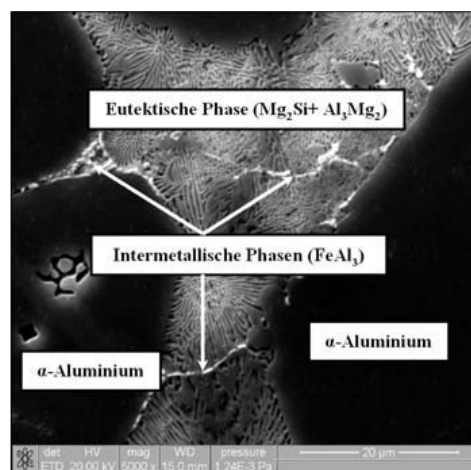


Abb. 15: REM-Aufnahme Foto (SEI), Gefüge des Bauteils (Standard)

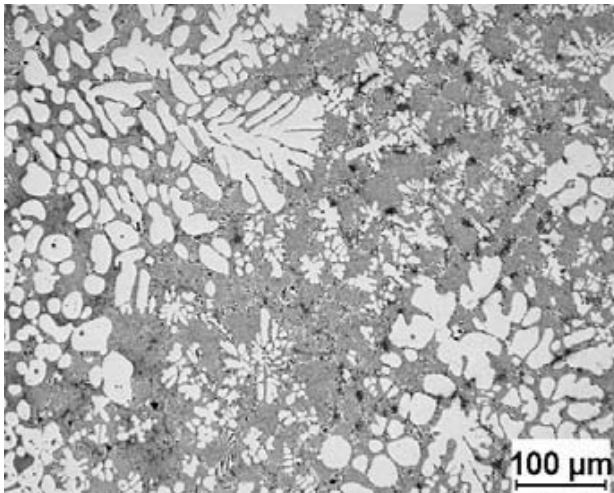


Abb. 16: Dendritische Struktur im Bauteil, Gussfehler (Abweichung vom Standard)

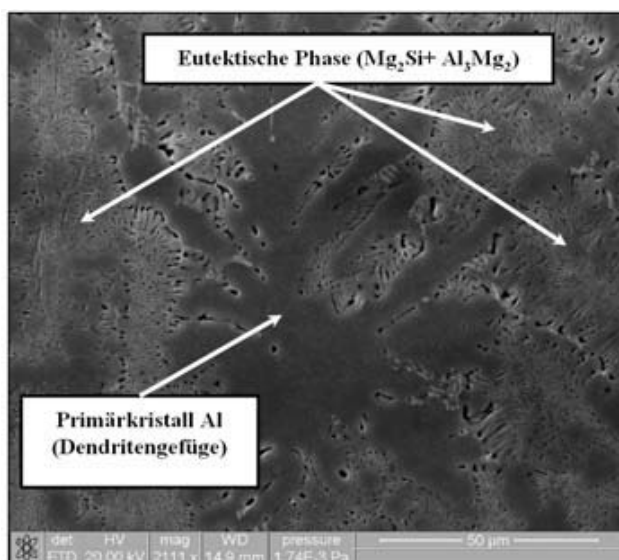


Abb. 17: REM-Aufnahme Foto (SEI), dendritische Struktur im Bauteil bzw. Gussfehler (Abweichung vom Standard)

4. Zusammenfassung

Im vorliegenden Projekt wurden die wesentlichen Parameter wie die Gehalte der Legierungselemente für das Vormaterial der Bolzen und des hergestellten Bauteils untersucht. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse erläutert:

Um den Prozess zu optimieren bzw. Abtropfverluste zu vermeiden und ein geeignetes Rheoverhalten des erwärm-

ten Bolzens zu erreichen, muss der Mg- und Si-Gehalt so eingestellt werden, dass eine stark untereutektische Legierung vorliegt.

Um den geeigneten Bereich des Flüssig- bzw. Festanteils (Mf_s) von 45 bis 55% in der verwendeten Legierung (Bolzen) zu erreichen, muss die Temperatur bei $596 \pm 5^\circ\text{C}$ liegen, wobei es jedoch einige wenige Ausnahmen gibt (5% Mg-Gehalt $T = 603^\circ\text{C}$, 1,8% Si-Gehalt $T = 603^\circ\text{C}$).

Die Werte der Rundheit der Körner im Bauteil sind ähnlich, sie bewegen sich zwischen den Werten 0,75 bis 0,85.

Bei Versuchen am REM wurden im Bauteil Mg_2Si , Fe-reiche Phasen wie FeAl_3 , Al_3Mg_2 und Mn im Fe-Mischkristall gefunden.

Bei Abweichungen von Standard-Prozessbedingungen (SAG Thixalloy GmbH) können in bestimmten Bereichen des Bauteils verschiedene Gussfehler wie eutektische Seigerungen oder dendritische Strukturen gefunden werden.

Danksagung

Auf diesem Weg bedanken wir uns bei der Salzburger Aluminium Gruppe (SAG) THIXALLOY Components GmbH für die finanzielle Förderung und bei den Mitarbeitern der SAG für das Ermöglichen dieser Arbeit in ihrem Betrieb, für die ständige Diskussionsbereitschaft und für ihre Hilfsbereitschaft bei der Durchführung dieses Projekts.

Literaturverzeichnis

- 1 Hirt, G., B. Nohn, U. Morjan und T. Witulski: Thixogießen, Verfahrenstechnik und Werkstoffaspekte. Gießereipraxis 2 (1999), 58–65.
- 2 Loue, W. R., M. Brimont, C. Pluchon, P.Y. Menet und M. Garat: Metallurgische Aspekte des Thixogießens der Aluminiumlegierungen AlSiMg0.3 und AlSi7Mg0.6 . Gießereipraxis 13/14 (1996), 251–252.
- 3 Müller, B.: Herstellung von Motorrad- Kurbelgehäusen mittels Thixocasting. Deicasting Technologies Center GmbH (DGH Group), Dresden/Deutschland (2003).
- 4 Hirt, G., L. Khizhnyakova, R. Baadjou, F. Knauf und R. Kopp: Semi-solid forming of aluminium and steel introduction and overview. Thixofforming Semi-solid Metal Processing. (2009) WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- 5 Kopp, R., G. Winning und T. Möller: Thixoforging of aluminium alloys. Institute for Metal Forming, RWTH-Aachen, METEC Düsseldorf (1999).
- 6 Dubke, M., und R. Jauch: Elektromagnetisches Rühren beim Stranggießen. Metallurgie des Stranggießens. Gießen und Erstarren von Stahl. Schwerdtfeger, K., Hrsg., Stahleisen Düsseldorf (1992).
- 7 Niedick, I.: Eignungsbewertung und Optimierung von Vormaterial für Thixofforming. Fortschritt-Bericht VDI Verlag, Reihe 5, Grund- und Werkstoffe/ Kunststoffe, Düsseldorf (2000), 5–6.
- 8 Uggowitzer, P. J., G. C. Gullo und A. Wahlen: Metallkundliche Aspekte bei der Semi-solid Formgebung von Leichtmetallen. Institut für Metallforschung, ETH Zürich (2000).
- 9 Thermocalc.com. Thermo-Calc Software Norra Stationsgatan 93, Plan 5 SE-113 64 Stockholm Sweden, www.Thermocalc.com.
- 10 Zillgen, M.: Vertikaler Rheostrangguss von Aluminium-Legierungen. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (1997), Reihe 5, Nr. 489.