

Herstellung von partikelverstärkten Verbundwerkstoffen durch Magnesiumspritzgießen

C. Rauber¹, A. Lohmüller¹, M. Hilbinger¹, S. Opel², M. Hartmann¹, R.F. Singer²

¹Neue Materialien Fürth GmbH, Fürth

²Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Technologie der Metalle, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

1 Einführung

Vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussion um steigende Energiepreise, Klimawandel, CO₂-Ausstoß und Schonung der natürlichen Ressourcen stellt der Leichtbau einen zentralen Bestandteil jeder Entwicklung in der Verkehrstechnik dar. Neben dem konzeptionellen Leichtbau ist dabei der Materialleichtbau von besonderer Bedeutung [1]. Hierbei werden Werkstoffe mit hohen Dichten, wie z.B. Stahl oder Gusseisen, durch leichtere Materialien ersetzt. Mit einer Dichte von 1,74 g/cm³ ist Magnesium das leichteste metallische Konstruktionsmaterial und findet dadurch vermehrt Anwendung im Automobilbau. Als Beispiele sollen hier das Magnesium-Aluminium-Verbundkurbelgehäuse der aktuellen Sechszylinder-Baureihe der BMW Group [2] sowie das Getriebegehäuse 7G-Tronic aus der Legierung AS31 der Daimler AG [3] genannt werden.

Der geringe Elastizitätsmodul, die vergleichsweise niedrige Festigkeit sowie die mangelnde Verschleißbeständigkeit schränken aber bislang eine breitere Anwendung des Magnesiums ein. Die Verstärkung von Magnesiumlegierungen mit einer zweiten Phase bietet das Potenzial diese Hemmnisse zu überwinden [4]. In den letzten Jahrzehnten wurden daher zahlreiche Versuche unternommen Bauteile aus partikel- oder kurzfaserverstärkten Leichtmetalllegierungen herzustellen. Häufig wurde die Verstärkungsphase in die Schmelze eingerührt und anschließend durch konventionelle Gießprozesse weiterverarbeitet [5, 6]. Diese Prozessroute weist jedoch einige Nachteile auf. Zum einen ist die Durchmischung oft nicht ausreichend, um das Absetzen der Partikel im Tiegel zu verhindern sowie Partikelagglomerate aufzubrechen. Zum anderen werden durch das Rühren bei hohen Temperaturen Gase in der Schmelze eingeschlossen, die zu erhöhten Porositäten im Bauteil führen. Weiterhin fördern die langen Kontaktzeiten und hohen Prozesstemperaturen bei der Durchmischung die Bildung von Reaktionen zwischen der Matrixlegierung und den Verstärkungspartikeln [5-7].

Eine vielversprechende Verfahrensalternative stellt hier das Magnesiumspritzgießen dar. Gegenüber dem Druckguss ergibt sich eine Reihe von Vorteilen, die sich bei der Herstellung von partikelverstärkten Magnesiumlegierungen positiv auswirken sollten. Durch eine deutlich niedrigere Schmelzetemperatur, relativ kurze Kontaktzeiten und eine gezielte Temperaturführung in der Schnecke lassen sich Grenzflächenreaktionen auf ein Minimum reduzieren. Ein Absinken der Partikel und die Bildung von Agglomeraten wird durch die intensive Vermischung der Komponenten in der Schnecke und die geometrische Begrenzung des Schneckengangs verhindert [8].

In diesem Beitrag sollen zunächst Laborversuche zur Ermittlung eines Prozessfensters im Magnesiumspritzgießen vorgestellt werden. Anschließend wird über die Verarbeitung der Legierungen AZ91 und AJ62 verstärkt mit SiC-Partikeln im Magnesiumspritzgießen und die Mikrostruktur sowie die mechanischen Eigenschaften der Verbundwerkstoffe berichtet.

2 Experimentelles

Als Matrixmaterialien wurden Granulate der Legierungen AZ91 und AJ62 der Firma ECKA Granulate GmbH & Co. KG eingesetzt. SiC-Partikel F600 mit einer mittleren Korngröße d_{50} von $9,3\text{ }\mu\text{m}$ der Firma ESK-SiC GmbH dienten als Verstärkungsphase.

2.1 Herstellung und Charakterisierung der Laborproben

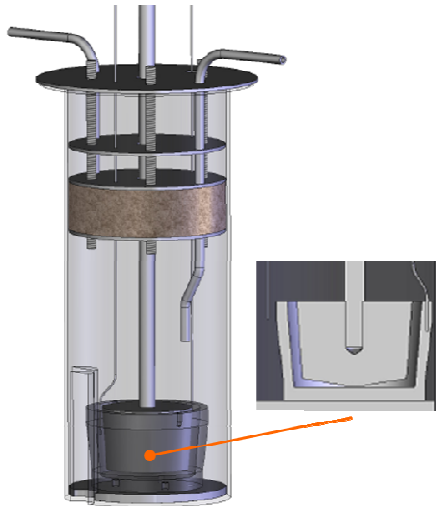


Bild 1: Ofenkammer mit Rotor und Tiegel zur Durchführung der Laborversuche unter Schutzgas.

Bild 1 zeigt den Versuchsaufbau zur Herstellung der Laborproben unter Argonatmosphäre. Das Magnesiumgranulat und die Verstärkungspartikel werden zunächst manuell vorge-mischt in den Tiegel gegeben. Im Anschluss an eine Aufheizphase auf die jeweilige Prozesstemperatur erfolgt die Einbringung der Partikel durch eine definierte Scherung im Spalt zwischen Tiegelwand und Rotor. Die Temperaturen sind an die Bedingungen im Magnesiumspritzgießen angepasst und variieren von 595 bis $630\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Scherrate von 100 l/s wird für 10 min aufgebracht und das Partikel-Schmelze-Gemisch in eine auf $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperierte Versuchskokille abgegossen. Aus den Probestäben mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Länge von 110 mm wurden die benötigten Probengeometrien herausgearbeitet.

Die Härte HV1 wurde an einem Mikrohärteprüfgerät LM 300 AT der Firma Leco ermittelt. Die Bestimmung des E-Moduls erfolgte an zylindrischen Proben mit einem Durchmesser von

5 mm und einer Länge von 50 mm durch Resonanzfrequenzanalyse nach ASTM E 1876-01. An einer Universalprüfmaschine vom Typ Zwick/Roell Z100 wurden Druckversuche unter Verwendung von Rundproben mit einem Durchmesser von 5 mm und einer Länge von 7 mm durchgeführt.

2.2 Gießversuche im Magnesiumspritzgießen

Die Gießversuche wurden bei der Neue Materialien Fürth GmbH auf einer Magnesiumspritzgießanlage vom Typ JLM220-MG der Firma Japan Steel Works Ltd. durchgeführt (Bild 2).



Bild 2: Magnesiumspritzgießanlage mit 220 t Schließkraft bei der Neue Materialien Fürth GmbH.

Dabei wurden Zugstäbe nach ASTM-Norm B557-02a und der Prototyp eines Lenkhilfepumpenhalters hergestellt. Die Gießtemperaturen betrugen 605 °C (AZ91) bzw. 615 °C (AJ62) bei einer Werkzeugtemperatur von 125 °C.

Die Zugproben wiesen eine Messlänge von 50,8 mm bei einem Durchmesser von 6,2 mm auf. Die Prüfung erfolgte mit Gusschuttschicht ohne Nachbearbeitung der Proben.

3 Ergebnisse

3.1 Mikrostruktur der Kokillenabgüsse

In Bild 3 ist die Gefügeausbildung der Legierung AZ91 verstärkt mit SiC für drei verschiedene Gießtemperaturen T_G exemplarisch dargestellt. Die Proben weisen jeweils eine homogene Partikelverteilung über den Querschnitt auf. Es sind nur vereinzelt kleine Agglomerate zu erkennen. Bei einer Temperatur von 595 °C bildet sich die globulare, primäre α -Phase aus. In diese werden die Partikel trotz der aufgetragenen Scherung nicht eingearbeitet. Reaktionen zwischen den Partikeln und der Matrix, unter Bildung der spröden Mg_2Si -Phase, treten nur bei 625 °C auf und können durch eine Absenkung der Verarbeitungstemperatur vermieden werden. Die erkennbare Gasporosität ist durch das drucklose Abgießen in die Kokille bedingt.

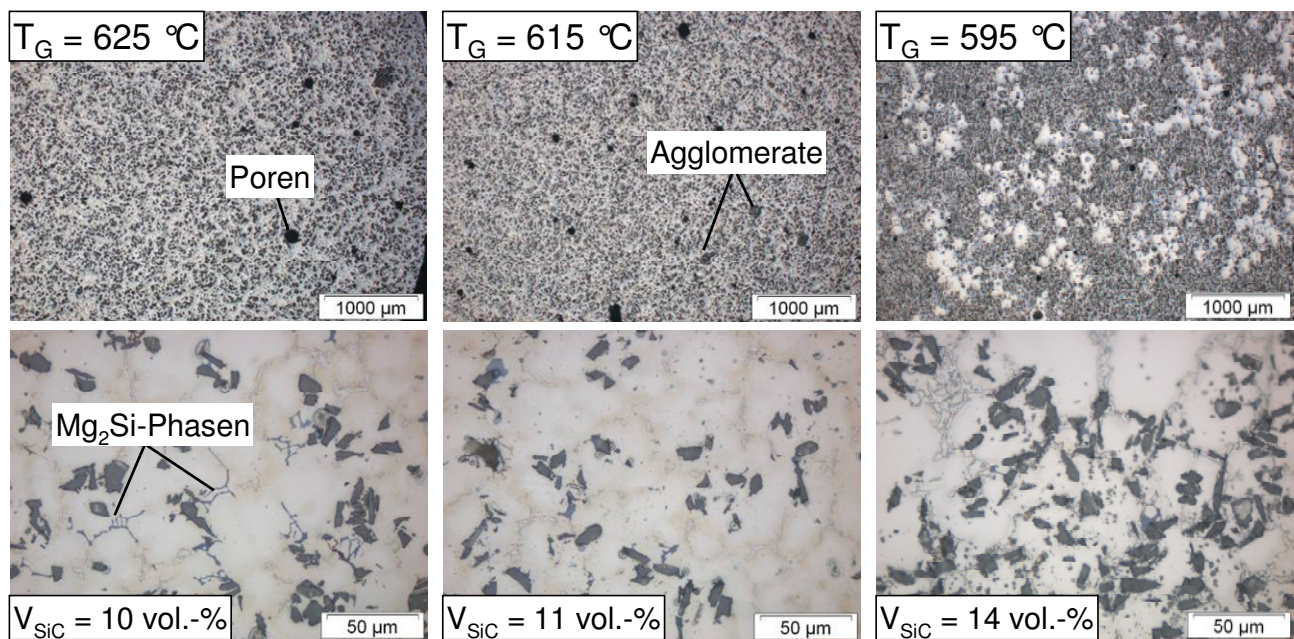


Bild 3: Mikrostruktur der Legierung AZ91 verstärkt mit SiC für verschiedene Gießtemperaturen T_G .

3.2 Bauteil Lenkhilfepumpenhalter

Als Prototypgeometrie wurde ein partikelverstärkter Lenkhilfepumpenhalter im Magnesiumspritzgießen realisiert. Die Auslegung von Anschnitt und Anguss sowie die Gießversuche erfolgten bei der Neue Materialien Fürth GmbH. Bild 4 zeigt eine homogene Verteilung der Partikel in der Matrixlegierung AJ62. Agglomerate sind nicht zu erkennen. Ebenso können keine Reaktionen zwischen den Partikeln und der Matrix beobachtet werden. Die Verarbeitung von partikelverstärkten Legie-

ungen führt damit auch bei komplexen Geometrien zu einer homogenen Verteilung der Verstärkungsphase in den Bauteilen.

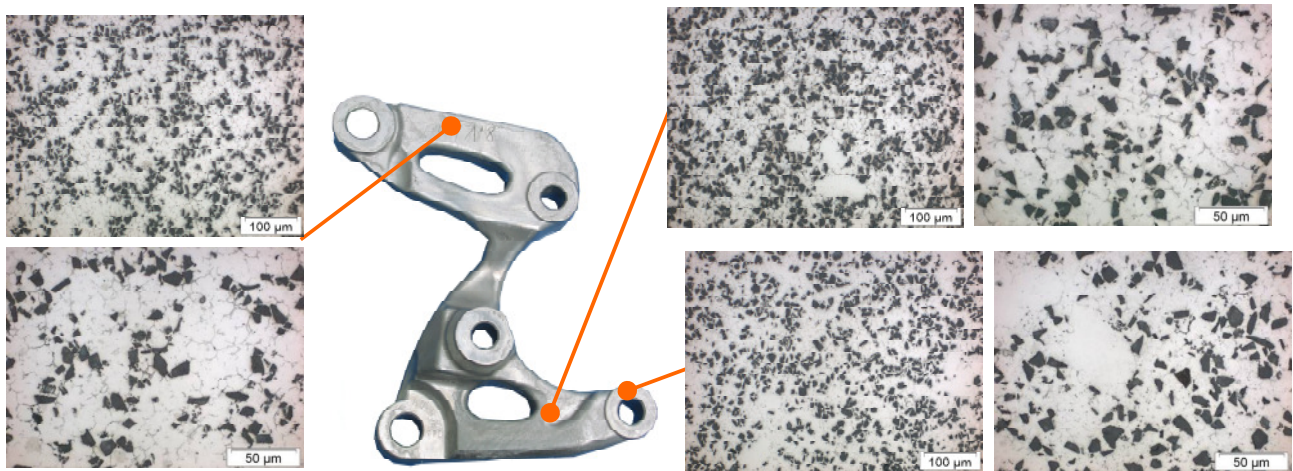


Bild 4: Lenkhilfepumpenhalter aus der Legierung AJ62 verstärkt mit 15 vol.-% SiC hergestellt im Magnesiumspritzgießen. Die Partikel sind homogen in der Matrix verteilt. Reaktionen zwischen Partikel und Matrixlegierung können nicht festgestellt werden.

Auch in den Zugstäben wurde eine homogene Verteilung der Partikel ohne Reaktionen mit der Matrixlegierung erreicht.

3.3 Mechanische Eigenschaften

Bild 5 fasst den Einfluss der Verstärkungspartikel auf die Härte (links) und den E-Modul (rechts) der Legierung AZ91 zusammen.

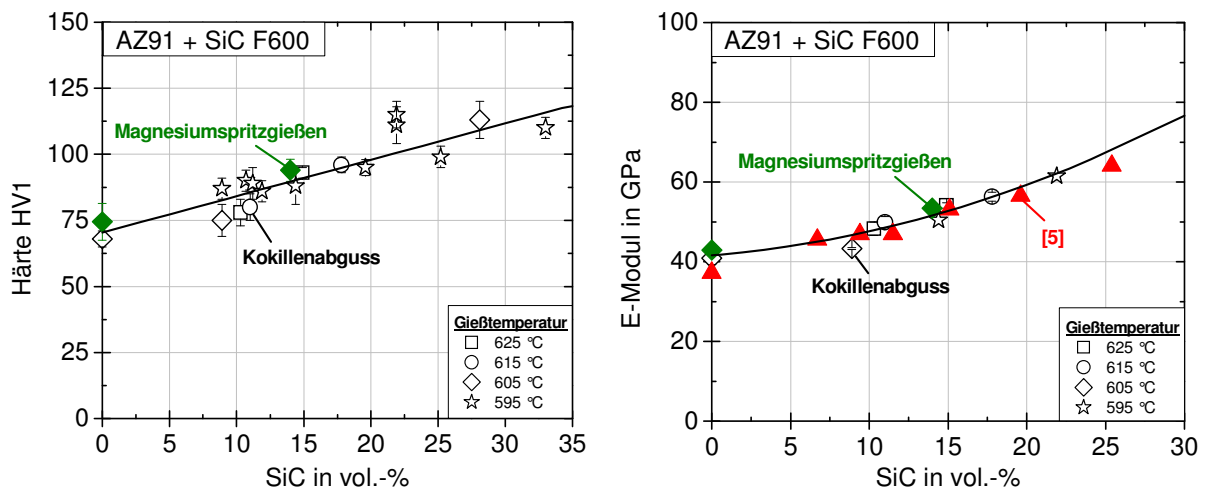


Bild 5: Härte (links) und E-Modul (rechts) der Legierung AZ91 in Abhängigkeit vom SiC-Gehalt. Mit zunehmendem Partikelanteil steigen Härte und E-Modul an. Die Werte für den E-Modul stimmen sehr gut mit Werten von Mikucki [5] überein.

Ausgehend von der unverstärkten Legierung kann die Härte um 70 % von 68 auf 115 HV1 gesteigert werden. Auch der E-Modul verbessert sich durch die Partikelzugabe um bis zu 50 % bei einem

SiC-Anteil von 22 vol.-%. Dies steht in guter Übereinstimmung mit Literaturwerten für partikelverstärkte Druckgussproben [5]. Die unterschiedlichen Gießtemperaturen der Kokillenabgüsse zeigen keinen Einfluss auf Härte oder E-Modul. Die Zugabe der SiC-Partikel resultiert damit in einer erhöhten Verschleißbeständigkeit und Steifigkeit der Magnesiumlegierungen.

Bild 6 zeigt die Ergebnisse der Druckversuche bei Raumtemperatur für die Legierungen AZ91 (links) und AJ62 (rechts) an Proben aus dem Kokillenguss und dem Magnesiumspritzgießen. Durch die Partikelzugabe können die Stauchgrenze und die Druckfestigkeit der beiden Legierungen gesteigert werden. Die Bruchstauchung nimmt dabei ab.

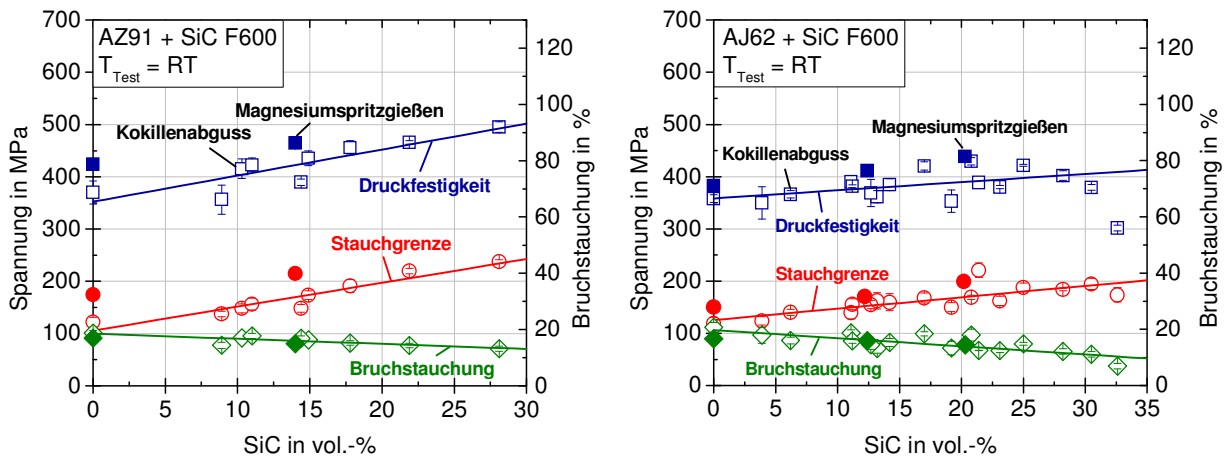


Bild 6: Mechanische Eigenschaften der Legierungen AZ91 (links) und AJ62 (rechts) in Abhängigkeit vom Partikelgehalt im Druckversuch. Die Stauchgrenze und die Druckfestigkeit steigen mit zunehmendem Partikelgehalt an.

Das Verhalten der partikelverstärkten Legierungen im Zugversuch ist in Bild 7 ersichtlich.

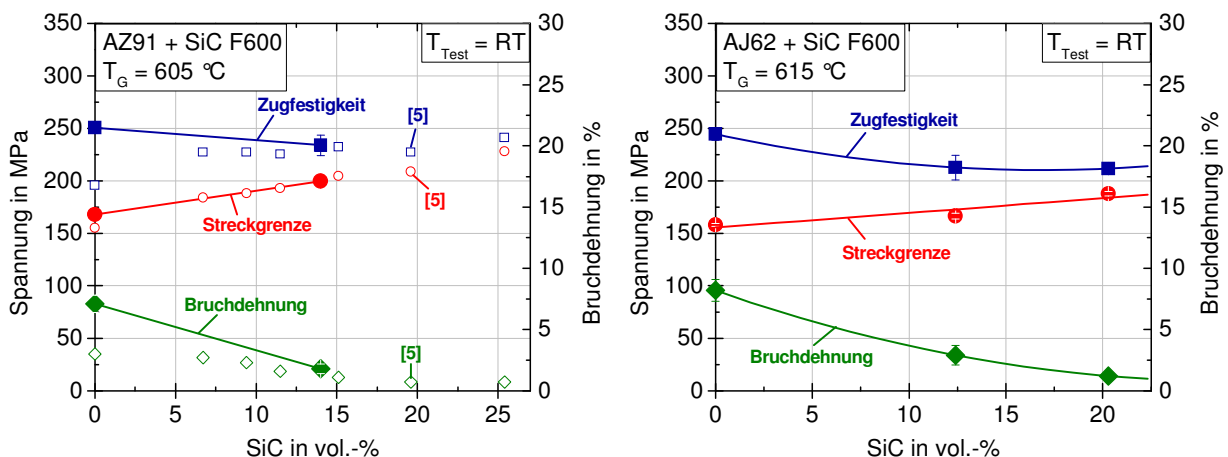


Bild 7: Mechanische Eigenschaften der spritzgegossenen Legierungen AZ91 (links) und AJ62 (rechts) in Abhängigkeit vom Partikelgehalt im Zugversuch. Die Werte für die partikelverstärkte Legierung AZ91 zeigen wiederum eine gute Übereinstimmung mit Werten von Mikucki [5].

Für die Legierung AJ62 (Bild 7, rechts) wird die Streckgrenze bei einer Partikelzugabe von etwa 20 vol.-% um 20 % gesteigert. Die Zugfestigkeit sinkt dagegen leicht ab. Dies ist in einer Versprö-

derung der Proben, die sich auch in einer reduzierten Bruchdehnung äußert, begründet. Dies zeigen auch die Literaturwerte für partikelverstärkte Druckgussproben [5], die in guter Übereinstimmung mit den Messwerten für die partikelverstärkte Legierung AZ91 liegen (Bild 7, links).

4 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass die partikelverstärkten Legierungen AZ91 und AJ62 erfolgreich im Magnesiumspritzgießen verarbeitet werden können. Die gute Durchmischung im Verfahrensteil führt dabei zu einer homogenen Verteilung der Verstärkungsphase in den Bauteilen. Die Temperaturen und Kontaktzeiten sind ausreichend gering, um Reaktionen der SiC-Partikel mit der Matrixlegierung zu verhindern.

Durch die Partikelzugabe können Stauch- und Streckgrenze, die Druckfestigkeit, die Härte und der E-Modul der Legierungen teils signifikant gesteigert werden. Die mechanischen Eigenschaften stoßen damit nahezu in den Bereich der Aluminiumlegierungen vor und treten in direkte Konkurrenz zu diesen. Aufgrund der geringeren Dichte der Magnesiumlegierungen können die Aluminiumlegierungen in Bezug auf die, für den Leichtbau relevanten, spezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten sogar übertroffen werden.

5 Danksagung

Die Autoren danken der Bayerischen Forschungsförderung für die finanzielle Förderung des Forschungsprojekts. Ein besonderer Dank gilt der BMW Group, München für die Initiierung des Projekts.

6 Literatur

- [1] F. Bechmann, P. Fallböhrer, R. Stauber, C. Rauber, A. Lohmüller, M. Hartmann, R.F. Singer, in *Advances in Lightweight Materials: Casting and Aluminum and Achieving Lightweight Vehicles (SP-2105)*, SAE International, **2007**
- [2] C. Landerl, A. Fischersworring-Bunk, J. Wolf, A. Fent, *VDI-Berichte*, **2005**, Nr. 1830, pp. 69-91
- [3] M. Hördler, M. Ratka, *15th Magnesium Automotive and User Seminar*, EFM, Aalen, **2007**
- [4] F. Moll, K.U. Kainer, in *Magnesium – Eigenschaften, Anwendungen, Potentiale*, Wiley-VCH, **2000**, pp. 212-235
- [5] B.A. Mikucki, S.O. Shook, W.E. Mercer, W.G. Green, in *Proceedings of the 43rd Annual World Magnesium Conference*, International Magnesium Association, 15-18. June **1986**, pp. 13-23
- [6] A. Luo, in *Metallurgical and Materials Transactions*, **1995**, 26A, 2445-2455
- [7] V. Laurent, P. Jarry, G. Regazzoni, D. Apelian, in *Journal of Materials Science* **1992**, 27, 4447-4459
- [8] A. Lohmüller, M. Scharrer, R. Jennings, C. Rauber, M. Loos, N. Kömpel, M. Hilbinger, M. Hartmann, R.F. Singer, in *15th Magnesium Automotive and User Seminar*, EFM, Aalen, **2007**