

Änderung der Warmrissneigung bei AlSi7MgCu-Legierungen in Abhängigkeit vom Kupfer- und Magnesiumgehalt

Das Problem der Warmrissbildung bei Aluminium-Gusslegierungen ist altbekannt, aber nur unzureichend wissenschaftlich erforscht. Bereits marginale Schwankungen in der Legierungs Zusammensetzung können zu einem geänderten Warmrissverhalten führen.

Ziel der Arbeit war es, die Einflüsse der Elemente Kupfer und Magnesium auf die Warmrissneigung einer AlSi7Mg(Cu)-Basislegierung zu untersuchen. Zur Abschätzung der ausgeschiedenen Phasen und deren Phasenanteile wurden für fünf Legierungen thermodynamische Berechnungen mittels ThermoCalc-Classic-Software (TCC) durchgeführt. Zusätzlich wurden für diese Legierungsvarianten die Warmrisszahl (WRZ) und die Warmrissempfindlichkeit anhand von Abgüsse in eine sogenannte Warmrisskokille empirisch ermittelt. Die mit ThermoCalc-Classic berechnete Terminal Freezing Range (TFR) wurde den anderen relevanten Warmrissparametern, Warmrisszahl und Warmrissneigungs-Koeffizient (CSC), gegenübergestellt. Die Warmrissflächen wurden im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht und der Einfluss der eutektischen Phasen auf die Warmrissbildung beurteilt.

Im Rahmen der Arbeit konnte der Einfluss der Elemente Magnesium und Kupfer auf die Warmrissneigung unter eutektischer Gusslegierungen bestimmt werden. Die Ergebnisse der Gießversuche korrelieren ausgezeichnet mit den theoretischen Berechnungen zur Warmrissbildung.

Die zurzeit am Markt befindlichen Aluminiumgusslegierungen haben für gewisse Anwendungsfälle im Automotive-Bereich bereits ihre Grenzen erreicht. Bei der Entwicklung neuer Legierungen wird häufig das Hauptaugenmerk auf die mechanischen Eigenschaften gelegt, es werden aber kaum gießtechnologische Eigenschaften berücksichtigt.

Für viele im Kokillen- und Sandguss hergestellte Bauteile werden AlSi7MgCu-Legierungen verwendet. Durch die Zugabe von Kupfer und Magnesium wird die Festigkeit erhöht. Diese Legierungsgruppe ermöglicht das Gießen dünnwandiger Teile mit sehr guten mechanischen Eigenschaften, wie sie beispiels-

weise bei Zylinderköpfen gefordert werden. Im Allgemeinen ist die Warmrissempfindlichkeit von AlSi-Gusslegierungen geringer als bei AlZn-, AlMg- oder AlZnMg(Cu)-Legierungen [1-3]. Dennoch können auch bei den AlSi-Legierungen Variationen im Kupfer- und Magnesiumgehalt erhebliche Auswirkungen auf die Warmrissempfindlichkeit haben.

In körnigefesten Legierungen treten Warmrisse auf, wenn die Volumenkontraktion bei der Erstarrung durch Schwindungsbehinderung nicht vom Bauteil aufgenommen werden kann [4]. Zu diesem Zeitpunkt, dem sogenannten Dendritenkohärenzpunkt, wurden bereits stabile Brücken zwischen den Körnern gebildet und eine Nachspeisung damit behindert. Die niedrig schmelzende Phase bzw. die nicht in ausreichendem Maße vorhandene eutektische Phase zwischen den Körnern kann die auftretenden Schrumpfungen und Spannungsspitzen nicht kompensieren und bewirken so die Bildung von Spannungsrissen, die als Warmrisse bezeichnet werden und unterhalb der Soliduslinie im durcherstarrten Bauteil erhalten bleiben [5-7]. Trotz zahlreicher Arbeiten ist der exakte Mechanismus zur Initiierung noch nicht vollständig geklärt.

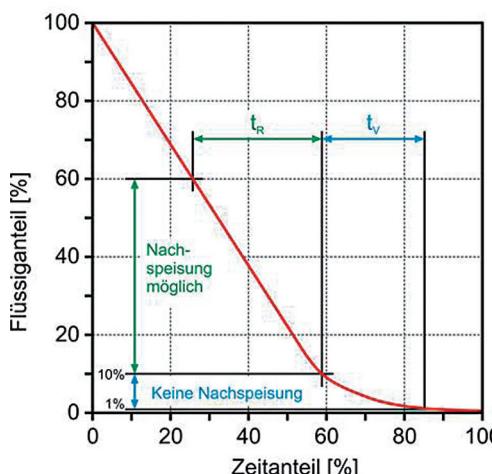
Theorie

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Warmrissbildung sind die chemische Zusammensetzung, das daraus resultierende Erstarrungsintervall und der letzte Erstarrungsbereich (Terminal Freezing Range, TFR), die Korngröße, der eutektische Anteil, die Bildung intermetallischer Phasen und die Seigungen an den Korngrenzen in einem gege-

benen Gießprozess.

Erstarrungsintervall: Generell gilt der Zusammenhang, dass ein größeres Erstarrungsintervall eine höhere Warmrissempfindlichkeit nach sich zieht. Ein großes Erstarrungsintervall gibt der schädlichen thermischen Ausdehnung bzw. den Volumenänderungen mehr Zeit, um ausreichend Spannungen zu generieren. Diese Spannungen verursachen ein Reißen der Flüssigkeitsfilme und schädigen so das interdendritische Netzwerk. Reinmetalle und Legierungen mit eutektischer Zusammensetzung haben hingegen einen sehr kleinen bzw. keinen Erstarrungsbereich und daraus resultierend auch eine niedrige Warmrissempfindlichkeit [7-9].

Der letzte Bereich des Erstarrungsintervalls (TFR) ist von entscheidender Bedeutung für die Ausbildung von Warmrissen. Eine höhere TFR, d.h. ein großer Temperaturunterschied, beispielsweise zwischen 90 und 100% erstarrtem Anteil (Festphasenanteil), führt zu einem komplexen Dendritennetzwerk und in weiterer Folge zu einer höheren Warmrissempfindlichkeit. M.B. Djurdjewic et al. [10] haben basierend auf umfangreichen Untersuchungen vorgeschlagen, den Bereich der TFR auf einen Festphasenanteil von 85 bis 95% oder 88 bis 98% zu beziehen. Aufgrund unserer empirischen Erfahrung wurde in der vorliegenden Arbeit die TFR auf den Bereich zwischen 95 und 99,5% Festphasenanteil bezogen. Die Erstarrung der allerletzten 0,5% Flüssigphasenanteile wird außer Acht gelassen, da die Gefahr von Fehlern bei der Berechnung in diesem Bereich besonders hoch ist [10].



$$CSC = \frac{t_V}{t_R} = \frac{t(Mf_{L10} - Mf_{L1})}{t(Mf_{L60} - Mf_{L10})}$$

CSC ... Warmrissempfindlichkeitskoeffizient

t_V ... kritische Zeitspanne

t_R ... Relaxationszeit für Speisung

Abb. 1: Bestimmung des CSC

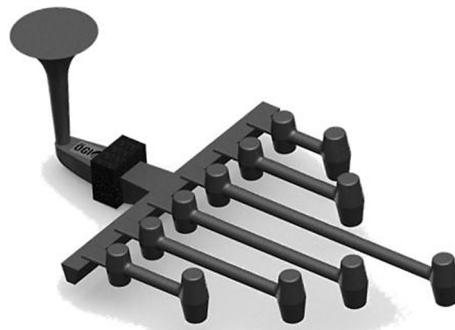


Abb. 2: 3D-Modell der Warmrissprobe der Sandabgüsse zur Bestimmung der Warmrissneigung

Der Haupteinflussfaktor auf die TFR ist die chemische Zusammensetzung der Legierung. Zusätzlich bewirken aber auch Spurenelemente und die damit verbundenen Seigerungen eine erhöhte TFR bzw. eine höhere Warmrissempfindlichkeit [9]. Aus den geschilderten Zusammenhängen und Abhängigkeiten ergibt sich die große Bedeutung der TFR für die Bildung von Warmrissen. Eine große TFR ist demnach unerwünscht, da das Risiko von Heißrissen in der letzten Stufe der Erstarrung erhöht wird [9]. Geht man von einem eutektischen System aus, so bilden sich zwischen der Liquidus- und der Solidustemperatur primäre Dendriten. Hat nun eine Legierung einen hohen Anteil solcher bei hoher Temperatur gebildeter Dendriten, so entstehen bei der eutektischen Erstarrung der Restschmelze hohe Belastungen durch Schwindungsspannungen.

Korngröße: Allgemein bekannt ist, dass ein feines Korn zu einer besseren Speisung des Gussteiles und zu einer gleichmäßigeren Verteilung der eutektischen Phasen führt. Kleine Körner können sich besser in der Zweiphasenströmung bewegen und so Schrumpfungs-

spannungen am Ende der Erstarrung knapp über der Soliduslinie minimieren [11]. H.F. Bishop [12] und D.C.G. Lees [13] untersuchten den Einfluss der Korngröße auf die Warmrissbildung. Sie postulierten, dass ein grobes Korn lokal zu Temperaturspitzen an den Korngrenzen, hohen Spannungen und dadurch in weiterer Folge zu Warmrissen führt. Aus einem feinen Korn hingegen resultiert eine Abnahme der Belastung und damit einhergehend eine geringere Tendenz zu Warmrissen [12, 13]. Allerdings sollte die Verformung einer körnigen Struktur als Verschiebung innerhalb eines Netzwerkes von Körnern (in Abhängigkeit der thermischen Ausdehnung) und nicht von Einzelkörnern betrachtet werden. Ein entsprechend feines Korn kann durch die Zugabe von speziellen Kornfeinungsmitteln oder über eine entsprechend hohe Abkühlgeschwindigkeit realisiert werden. In diesen Untersuchungen betrug die Korngröße bei den in Kokille abgegossenen Proben circa 250 µm und bei den Sandgussproben in Folge der niedrigeren Abkühlrate circa 350 µm.

Anteil eutektischer Phasen: Ein hoher Anteil von Eutektikum mit ausreichender Benetzbarkeit der Primärkristalle im Mikrogefüge führt zu einer geringeren Anfälligkeit für Warmrisse. Das Eutektikum umschließt dabei vollständig die Primärkristalle. Darüber hinaus erleichtern sogenannte eutektische Filme zwischen den Körnern die Bewegung der körnigen Struktur. Für den Fall, dass durch die Schwindung und die Spannungen kleine Risse initiiert werden, können diese durch Nachspeisung von eutektischem Anteil ausgeheilt werden [7, 8]. Ist der Anteil der eutektischen Phase jedoch zu gering, dann ist diese Ausheilung nicht möglich [9]. Silizium-

haltige Aluminiumgusslegierungen haben den Vorteil, dass sich Silizium als Halbleiter bei der Erstarrung ausdehnt, dadurch einen Teil der Schwindung kompensieren kann und eine bessere Mikrospeisung ermöglicht. Geringe Mengen an Verunreinigungen in der Schmelze können niedrig schmelzende Phasen und eine steigende Tendenz zur Warmrissbildung zur Folge haben. Die Ursache sind die schwachen Brücken zwischen den Dendriten im letzten Erstarrungsbereich, bei 95 bis 100% Festphasenanteil. Falls Zugspannungen auftreten, werden diese Brücken zerstört und zwischen den Körnern bildet sich ein Warmriss [14, 15].

Theoretische Modelle: Es gibt in der Literatur eine Reihe von theoretischen Modellen zur Berechnung der Warmrissempfindlichkeit. Für den Formguss wird am häufigsten das Modell des Warmrissempfindlichkeitskoeffizienten (engl. Cracking Susceptibility Coefficient, CSC) von Clyne und Davis verwendet [16]. Nachteilig ist dabei, dass das Modell nur die Materialeigenschaften bei einer Ungleichgewichtserstarrung nach Gulliver-Scheil und nicht die spezifischen Gießbedingungen berücksichtigt. Weitere Modelle wurden beispielsweise von L. Katgerman [17], U. Feurer [18] oder M. Rappaz et. al. [19] entwickelt. Die angeführten Modelle sind jedoch für die verschiedenen Gießprozesse wie Sandguss, Kokillenguss, Strangguss oder für Schweißungen nicht immer anwendbar.

Das CSC-Modell berücksichtigt ergänzend zu den Legierungszusammensetzungen auch die prozessrelevante Zeit, in der die Rissentstehung stattfindet und die Struktur am meisten anfällig für Risse ist. Daraus ergibt sich ein kritisches Zeitintervall während der Erstarrung. Der CSC ist definiert als das Verhältnis dieser kritischen Zeitspanne t_V zur Relaxationszeit für die Speisung t_R . Der Faktor t_V berechnet sich aus der Zeitdifferenz zwischen einem Flüssigphasenanteil von 10 bis 1% (Mf_{L10} bzw. Mf_{L1}). Die Zeit t_R wird benötigt für die Erhöhung und berechnet sich aus der Zeitdifferenz zwischen 60 und 10% Flüssigphasenanteil (Mf_{L60} bzw. Mf_{L10}) (Abb. 1). Im Bereich von t_V ist ein hoher Anteil der Festphase vorhanden, die eine Speisung verhindert und zu einer hohen thermisch induzierten Expansion führt. Im Gegensatz dazu ist im Bereich von t_R der Anteil der Festphase geringer und eine Nachspeisung möglich.

Experimentelle Methoden

Zur Ermittlung der Warmrissempfindlichkeit wurden umfangreiche Untersuchungen und Berechnungen durchgeführt. Wichtig war der Vergleich zwischen den theoretischen und

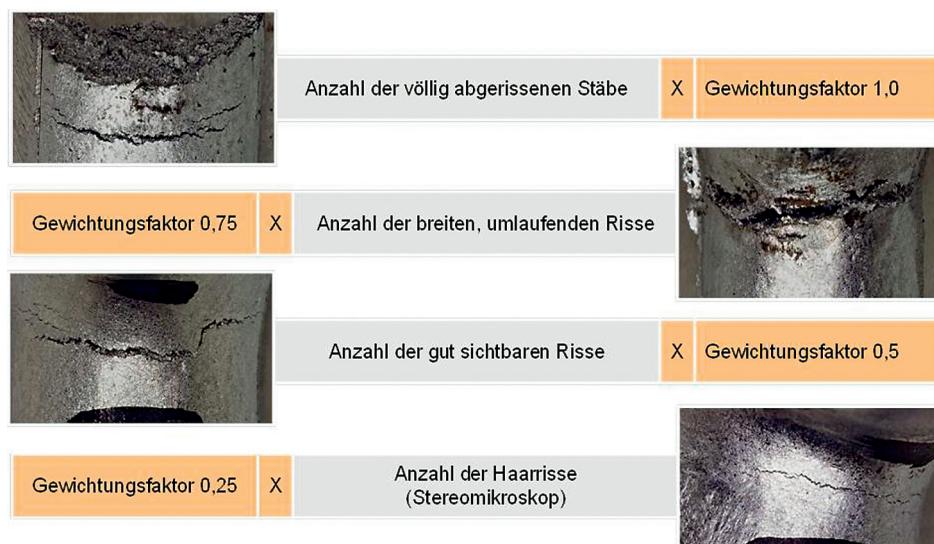


Abb. 3: Gewichtungsfaktoren für unterschiedlich ausgebildete Risse zur Ermittlung der Warmrisszahl WRZ [21, 22]

den praktischen Ergebnissen. Bei fünf Varianten einer AlSi7MgCu-Basislegierung wurden der Magnesium- und der Kupfergehalt unterschiedlich gewählt und die Auswirkungen auf die Warmrissempfindlichkeit praktisch und theoretisch untersucht. Zusätzlich erfolgte die Variation des Gießverfahrens (Kokillen- und Sandguss), um dessen Einfluss auf die Warmrissneigung zu verifizieren.

Folgende Legierungen wurden hergestellt und nach den oben erwähnten Methoden untersucht:

- AlSi7Mg0,1Cu0,05
- AlSi7Mg0,1Cu0,5
- AlSi7Mg0,3Cu0,05
- AlSi7Mg0,6Cu0,05
- AlSi7Mg0,6Cu0,5

Terminal Freezing Range: Die Berechnung der TFR erfolgte mittels ThermoCalc-Classic-Software (TCC) unter Verwendung der TTA15 Datenbank. Für die Simulation des Erstarrungsprozesses wurden die entstehenden Phasen und deren Anteile bei unterschiedlichen Temperaturen für den Ungleichegewichtszustand nach Gulliver-Scheil berechnet. Bei der Vorhersage der Ausscheidungen im Gusszustand bei Raumtemperatur ist vom Gleichgewichts- und Ungleichegewichtszustand ausgegangen worden.

Warmrissempfindlichkeitskoeffizient: Der Warmrissempfindlichkeitskoeffizient (CSC) konnte halbempirisch über TCC berechnet werden. Die dabei berechneten Temperaturen und Massenanteile wurden mit den Resultaten der praktisch durchgeführten Thermoanalysen in der Kokille und der Sandform kombiniert. Daraus ergaben sich die jeweiligen kritischen Zeitspannen t_V und die Relaxationszeiten t_R . Die Kokillentemperatur wurde beim Abguss für alle Legierungen konstant gehalten. Sie betrug dabei 250 °C, es wurden Typ K Thermoelemente, Klasse I kalibriert, zur Messung verwendet.

Warmrissempfindlichkeit: Zur Bestimmung der Warmrissneigung der verschiedenen Legierungen wurden Warmrissproben mit spezieller Geometrie (Abb. 2) in einer Stahlkokille und in bentonitgebundenen Sandformen abgegossen. Durch die höhere Abkühlrate

des Kokillengusses gegenüber dem Sandguss wirken hier die Schwindungsspannungen entsprechend stärker. Die Kokillenhälften wurden hierbei mittels Zweikreistemperiergerät auf eine beim Abguss für alle Proben konstante Temperatur von 250 °C erwärmt bzw. gekühlt.

Die Querschnittsänderungen an den Enden der Probe rufen Schwindungsspannungen hervor, die im Wärmezentrum der Probe zur Warmrissbildung führen. Die entstandenen Warmrisse werden in Abhängigkeit ihrer Größe mit Gewichtungsfaktoren (GF) (Abb. 3) bewertet, daraus die Warmrisszahl (WRZ) als Quotient der Anzahl der Risse multipliziert mit den Gewichtungsfaktoren und der Anzahl der Proben berechnet. Die Warmrissempfindlichkeit (WRE) einer Legierung ergibt sich aus den in Tabelle 1 definierten Bandbreiten der Warmrisszahlen [11, 20, 22].

Mikroskopie: Mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) wurden an metallographisch präparierten Schliffen die Phasen der Proben im Gusszustand bestimmt und mit den Ergebnissen der ThermoCalc-Berechnungen verglichen. Die Aufnahmen erfolgten bei 20 kV mittels RückstreuElektronendetektor (BSD).

Zusätzlich wurden die Bruchflächen von Proben mit einem völligen Abriss, einem gut sichtbaren Riss und einem Haarriß fraktographisch beurteilt.

Ergebnisse

Mikrostruktur: Die im Gusszustand auftretenden Phasen in der Mikrostruktur wurden für die verwendeten Legierungen mittels TCC unter Annahme des Gleichgewichtszustandes berechnet. Beachtenswert sind die Verschiebungen bei den Kupferphasen Al_2Cu und $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ in Abhängigkeit vom Magnesiumgehalt. Mit steigendem Mg-Gehalt wird anstelle der bei niedrigem Mg-Gehalt dominierenden Al_2Cu -Phase das Magnesium verstärkt in der $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ -Phase gebunden. Der Anteil der intermetallischen Mg_2Si -Phase steigt nahezu linear mit dem Magnesiumgehalt, parallel dazu fällt der Anteil der Mg_2Si -Phase durch Bildung der $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ -Phase bei gemeinsamer Erhöhung des Kupfer- und Magnesiumgehaltes. Der Anteil der eisenreichen Al_5FeSi -Phase ist unabhängig von den Variationen im Magnesium- bzw. Kupfergehalt (Abb. 4).

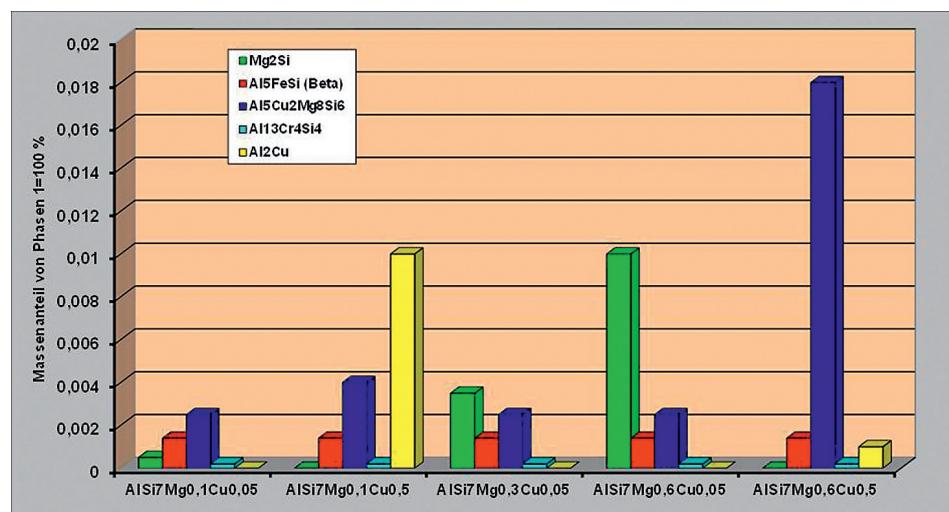


Abb. 4: Phasenanteile im Mikrogefüge, berechnet mit ThermoCalc (Raumtemperatur, Gleichgewicht)

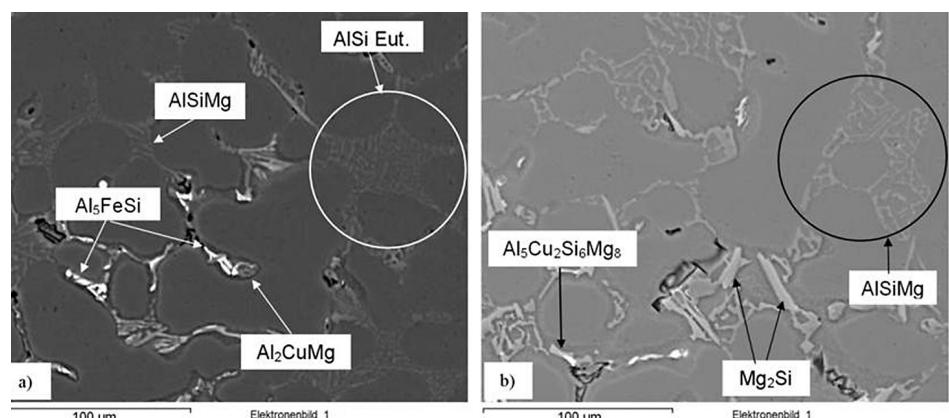


Abb. 5: REM, BSD-Modus, Rückstrahlelektronenbild, AlSi7Mg0,65Cu0,5F, (a) Kokillenguss, (b) Sandguss

Tabelle 1: Definition der Warmrissempfindlichkeit (WRE) auf Basis der berechneten Warmrisszahl (WRZ) [22]

Warmrisszahl WRZ	Warmrissempfindlichkeit WRE
$0 \leq 0,5$	keine WRE
$0,5 \leq 1,25$	geringe WRE
$1,25 \leq 2,25$	mittlere WRE
$2,25 \leq 3,5$	hohe WRE
$>3,5$	sehr hohe WRE

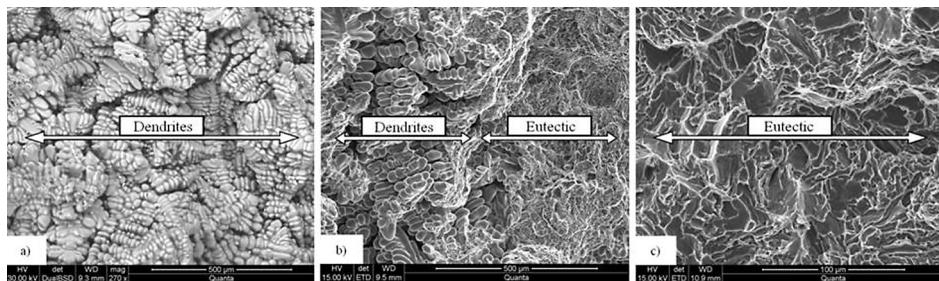


Abb. 6: REM-Bilder von Bruchflächen, a) Dendriten in vollständig abgerissenem Stab, GF=1, b) Dendriten und Eutektikum in Probe mit gut sichtbarem Riss, GF=0,5 – mechanisch geöffnet, c) Eutektikum in Probe mit Haarriss, GF=0,25 – mechanisch geöffnet

Die Untersuchungen der Mikrostruktur am REM bestätigen die nach den theoretischen Berechnungen mittels TCC erwarteten Ergebnisse. Es wurden dabei je Legierung eine in Kokille und eine in Sand gegossene Probe im REM untersucht. In Abb. 5 ist das Ergebnis der Gefügebeurteilung beispielhaft für die Legierung AlSi7Mg0,6Cu0,5 ersichtlich. Basierend auf circa 50 EDX-Analysen pro Schließprobe kann gesagt werden, dass bei den in der Sandform gegossenen Proben der Anteil der Mg_2Si -Phase infolge der längeren Erstarrungszeit wesentlich höher ist.

Bruchfläche: Mittels REM wurden die Bruchflächen von Warmrissproben mit unterschiedlich ausgebildeten Rissen bzw. Brüchen untersucht. Im Detail wurden vollständig gebrochene Stäbe und nach einer mechanischen

Rissöffnung auch Stäbe mit gut sichtbaren Rissen und solche mit Haarrissen betrachtet. In Abb. 6 sind die drei REM-Aufnahmen für die verschiedenen Rissklassen dargestellt. Die REM-Resultate zeigen, dass im unmittelbaren Umgebungsbereich des Warmrisses das Gefüge kristallin ausgebildet ist, da keine oder nur wenig eutektische Phase vorhanden ist. Darüber hinaus ergaben detaillierte fraktographische Betrachtungen, dass in der Bruchfläche keine Bifilme, die als Rissauslöser innerhalb der interdendritischen Restschmelze fungieren können, vorhanden sind.

Terminal Freezing Range: In Tabelle 2 sind die Ergebnisse für die TFR für alle Legierungen zusammengefasst. Es ist offenkundig, dass der Kupfergehalt den dominierenden Einfluss gegenüber dem Magnesiumgehalt auf die TFR

hat. Eine maximale TFR ergibt sich demnach bei einem hohen Kupfergehalt und einem niedrigen Magnesiumgehalt. Infolgedessen besitzt die Legierung AlSi7Mg0,1Cu0,5 die größte TFR und die Legierung AlSi7Mg0,6Cu0,05 die kleinste TFR (Abb. 7).

Warmrissempfindlichkeitskoeffizienten: In Tabelle 2 sind die CSC von drei ausgewählten Legierungen im Kokillen- und im Sandguss ersichtlich. Wie bereits bei der TFR überwiegt auch hier der Einfluss von Kupfer. Ein hoher Kupfergehalt kombiniert mit einem geringen Magnesiumgehalt zieht den größten CSC nach sich. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass der CSC im Sandguss wesentlich niedriger ist als im Kokillenguss. Die Ursache hierfür sind die längere Erstarrungszeit im Sandguss und der höhere Anteil an vorhandenem Eutektikum. Dadurch ist genug Zeit (t_R) vorhanden, um mögliche Ausheilungsprozesse für Anrisse in Gang zu setzen.

Warmrissempfindlichkeit: Zur Ermittlung der Warmrissempfindlichkeit wurden je Legierung fünf Proben mit je sechs Stäben im Kokillen- und im Sandgießverfahren abgegossen. Anhand dieser 300 Proben wurde die Warmrisszahl berechnet und daraus die Warmrissempfindlichkeit nach Tabelle 1 bewertet. Auch bei den praktischen Versuchen zeigte sich derselbe Trend wie zuvor bei der TFR und dem CSC. Ein hoher Kupfergehalt führt ebenso wie ein niedriger Magnesiumgehalt zu einer erhöhten Warmrissempfindlichkeit (Tabelle 2). Die höchste Warmrissempfindlichkeit entsteht demnach bei Legierungen, die diese beiden Extremwerte aufweisen. Im Sandguss besteht für keine der fünf Legierungen die Gefahr von Warmrissen. In Abb. 9 sieht man die hohe Übereinstimmung zwischen den theoretischen Berechnungen der TFR und den Ergebnissen aus den praktischen Versuchen.

Diskussion

In der Arbeit wurde ein kurzer Überblick über Einflussfaktoren und Zusammenhänge bei der Bildung von Warmrissen gegeben. Fünf Varianten der Basislegierung AlSi7MgCu mit variierenden Kupfer- und Magnesiumgehalten wurden theoretisch und praktisch auf ihre Warmrissanfälligkeit untersucht.

Im Gegensatz zu den Betrachtungen von D.G. Eskin et. al. [4] bei Strangguss zeigen in diesem Fall alle durchgeführten Untersuchungen denselben Trend. Für AlSi7MgCu-Gusslegierungen mit üblichen Korngrößen gibt es eine ausgezeichnete Korrelation zwischen den theoretischen Modellen und den praktischen Versuchen. Der Kupfergehalt ist demnach der dominierende Einflussfaktor

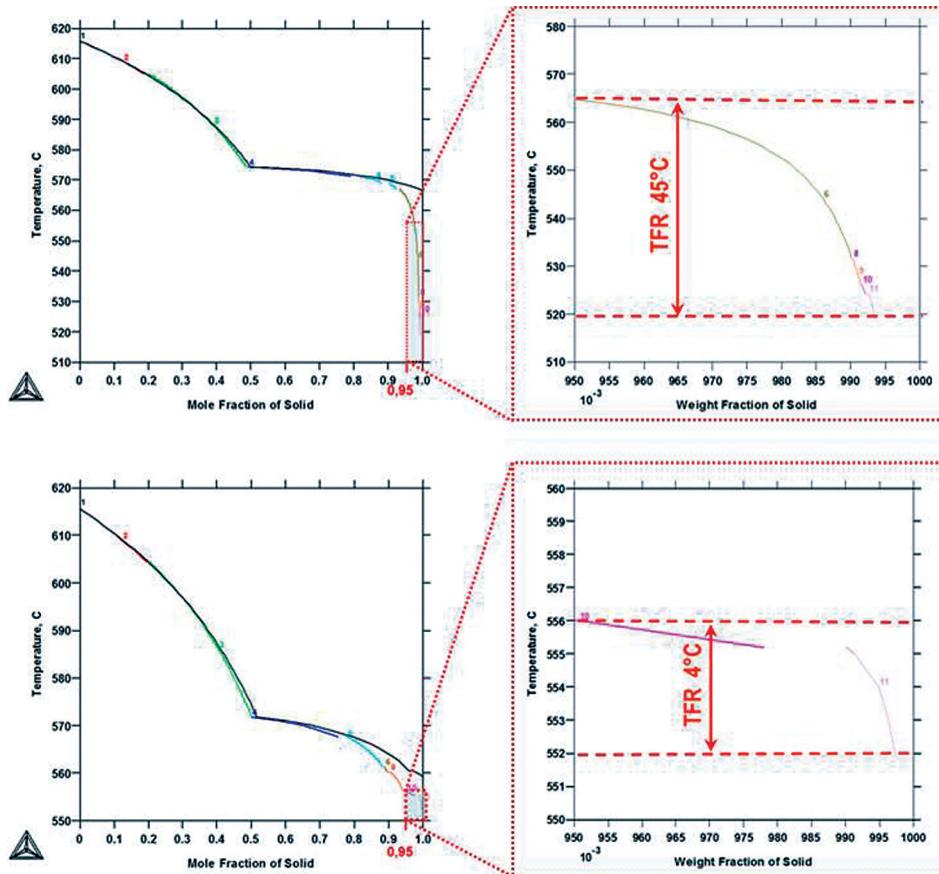


Abb. 7: TTC, Berechnung der TFR (AlSi7Mg0,6Cu0,05 = 4°C, AlSi7Mg0,1Cu0,5 = 45°C)

Legierung	TFR [°C]	Kokille			Sand		
		CSC [-]	WRZ [-]	WRE [-]	CSC [-]	WRZ [-]	WRE [-]
AlSi7Mg0,1Cu0,5	45,0	7,3	0,80	Gering	0,69	0,01	Keine
AlSi7Mg0,6Cu0,5	27,0	4,5	0,60	Gering	0,36	0,01	Keine
AlSi7Mg0,1Cu0,05	17,0	3,7	0,30	Keine	0,33	0,01	Keine
AlSi7Mg0,3Cu0,05	9,5	-	0,22	Keine	-	-	Keine
AlSi7Mg0,6Cu0,05	4,0	-	0,01	Keine	-	-	Keine

Tabelle 2: TFR (mit TTC berechnet), CSC, Warmrisszahl und Warmrissempfindlichkeit der untersuchten Legierungen in Abhängigkeit vom Gießverfahren

auf die Warmrissanfälligkeit bei AlSi7MgCu-Legierungen. Ein hoher Kupfergehalt führt zu einer großen Terminal Freezing Range, einer hohen Warmrisszahl und einem hohen Warmrissempfindlichkeitskoeffizienten. Beim Magnesiumgehalt ist der Trend genau gegenläufig, d.h. bei niedrigem Magnesiumgehalt steigen Terminal Freezing Range, Warmrisszahl und Warmrissempfindlichkeitskoeffizient. Die höchste Warmrissempfindlichkeit ergibt sich somit für Legierungen mit einem niedrigen Magnesiumgehalt und einem hohen Kupfergehalt.

Die mittels ThermoCalc theoretisch berechneten Phasen wurden bei den Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop bestätigt. Bei einem höheren Kupfergehalt scheiden sich die intermetallischen Kupferphasen Al_2CuMg , $Al_5Cu_2Si_6Mg_8$ und Al_2Cu während der Erstarrung aus. Diese Ausscheidungen bewirken in der Legierung eine Verarmung an Eutektikum (Mg_2Si und $AlSiMg$), was zu einer verminderen Mikrospeisung der Hauptanteile der eutektischen Phasen führt und sich somit negativ auswirkt.

Die in Sand abgegossenen Proben haben gegenüber jenen aus der Kokille generell eine deutlich niedrigere Warmrissempfindlichkeit. Obwohl die Korngröße bei den Sandgussproben in Folge der längeren Erstarrungszeit größer ist, werden vermehrt magnesiumhaltige Phasen im Eutektikum ausgeschieden und so die Warmrissanfälligkeit reduziert. Darüber hinaus nimmt die weichere Sandform einen

Teil der Schrumpfungsspannungen auf.

Die vorliegende Arbeit zeigt die Möglichkeiten auf, zukünftig bei der Entwicklung neuer Legierungen mit verbesserten mechanischen und/oder Korrosionseigenschaften bereits im frühen Entwicklungsstadium technologische Eigenschaften zu simulieren. Die bereits seit

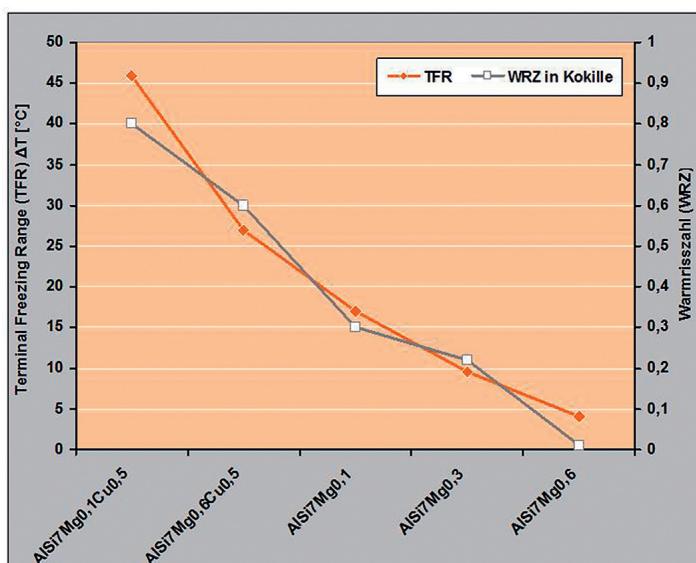


Abb. 9: Zusammenhang zwischen den theoretischen Berechnungen (TFR) und den praktisch ermittelten technologischen Eigenschaften (WRE) für die fünf verwendeten Legierungsvarianten

geräumer Zeit etablierten Formfüllungs- und Erstarrungssimulationen und die Methode der finiten Elemente können so um ein weiteres Werkzeug ergänzt werden. Die ThermoCalc-Methode ist ein probates Instrument zur Vorhersage der Warmrissneigung von Legierungen. Dadurch können früher Knock-Out-Kriterien in der Legierungsentwicklung erkannt und durch die Modifikation der Legierung am Computer Entwicklungskosten gespart werden. Auf aufwendige experimentelle Versuche kann damit im Vorfeld verzichtet werden, erst an der fertigen Legierung müssen die technologischen Eigenschaften nachgewiesen werden. Vorversuche zeigten, dass man die beschriebenen Methoden auch auf Magnesium- und Zinkbasislegierungen sowie

auf andere Aluminiumgusslegierungen anwenden kann.

Danksagung

Die Autoren danken der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) für die finanzielle Unterstützung dieses Projekts.

Literatur (auszugsweise)

- [1] F. Matsuda, K. Nakata, K. Tsukamoto, S. Johgan, "Combined Effect of Current Pulsation and Zr Addition on Improvement of Solidification Cracking of Al-Zn-Mg Alloy Weld Metal," *Transactions of JWRI*, 14, No. 2 (1985), 99-104.
- [4] D.G. Eskin, L. Katgerman, "A Quest for a New Hot Tearing Criterion," *Metallurgical and Materials Transactions A*, 38 (2007), 1511-1514.
- [5] E. Cicala, G. Duffet, H. Andrzejewski, D. Grevey and S. Ignat, "Hot cracking in Al-Mg-Si alloy laser welding – operating parameters and their effects," *Materials Science and Engineering A*, 395 (2005), 1-9.
- [7] T.W. Clyne, G.J. Davies, "The influence of composition on solidification cracking susceptibility in binary alloy systems," *The British Foundryman*, 74 (1981), 65-73.
- [9] A.A. Gokhale, "Solidification Cracking: A Review," *Transaction of the Indian Institute of Metals*, 39 (1986), 153-164.
- [10] M.B. Djurdjevic, R. Schmid Fetzer, "Thermodynamic calculation as a tool for thixoforming alloy and process development", *Material Science and Engineering A*, 417 (2006), 24-33.
- [14] J.A. Spittle, A.A. Cushway, "Influences of superheat on grain structure on hot-tearing susceptibilities of Al-Cu alloy castings," *Metals Technology*, 10 (1983), S. 6-13.
- [16] T.W. Clyne, G.J. Davies, "Comparison between experimental data and theoretical predictions relating to dependence of solidification cracking on composition," *Proceedings of the Conference on Solidification and Casting of Metals*, Metals Society, London (1979), 274-278.
- [17] L. Katgerman, "A Mathematical Model for Hot Cracking of Aluminum Alloys During D.C. Casting," *Journal of Metals* (1982), 46-49.
- [20] B. Lenczowski, H. Koch, K. Eigenfeld, "Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der warmfesten Aluminium-Gusswerkstoffe," *Gießerei*, 8 (2004), 32-38.
- [21] A. Franke, "Design of new high-performance aluminum casting alloys" (Ph.D. thesis, University of Leoben, 2006), 50-61.

Autoren

Dipl.-Ing. Dr. mont. Thomas Pabel¹, Dipl.-Ing. Salar Bozorgi², Dipl.-Ing. (FH) Christian Kneißl¹, Dipl.-Ing. Katharina Haberl², Prof. Dipl.-Ing. Dr. phil. Peter Schumacher^{1,2}

¹ Österreichisches Gießerei-Institut, Leoben, Österreich

² Lehrstuhl für Gießereikunde, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich