

Bild: Hydro Aluminium

Der Einfluss von Zirkonium auf die Eigenschaften von Al-Mg-Si-Schmiedevormaterial

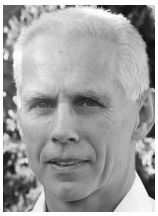
Aluminiumlegierungen der 6xxx-Serie (Al-Mg-Si) sind eine beliebte Werkstoffwahl zur Herstellung hochwertiger Fahrwerks- und Karosserieteile wie beispielsweise Schwenklager, Radträger und Lenker. Vor einigen Jahren führte Hydro Aluminium das HyForge™-Produkt ein [1] und zeigte in Zusammenarbeit mit Raufoss Technology, dass gegossenes Schmiedevormaterial als Alternative zu stranggepresstem Vormaterial für die Herstellung eines vorderen unteren Querlenkers (FLCA) eingesetzt werden kann. Dies ermöglicht erhebliche Einsparungen bei den Kosten und verringert gleichzeitig die Umweltauswirkungen deutlich [2].

AUTOREN



Endre A. Hennum

ist Senior Research Scientist
bei der Hydro Aluminium AS in Sunndalsøra
(Norwegen)



Ulf H. Tundal

ist Team Manager Extrusion Ingot
bei der Hydro Aluminium AS in Sunndalsøra
(Norwegen)



Magne H. Boge

ist Customer Technical Support Director
bei der Hydro Aluminium AS in Oslo
(Norwegen)



Jørgen Li

ist Senior Technical Specialist, Metallurgy
bei der Raufoss Technology AS in Raufoss
(Norwegen)

> Mit zunehmendem Fokus auf den CO_2-Fußabdruck von Rohstoffen ist die Recyclingfähigkeit ebenfalls ein wichtiger Aspekt im Legierungsdesign.
>
> **Endre A. Hennum**

> Getrieben durch Bestrebungen zur Reduzierung von Emissionen und zur Erhöhung der Reichweite von Elektrofahrzeugen hat sich ein allgemeiner Trend zum Leichtbau entwickelt, der zu einer signifikanten Zunahme des Aluminiumanteils in der Automobilindustrie geführt hat.
>
> **Magne H. Boge**

Für gegossenes Schmiedematerial werden die Eigenschaften des Schmiedebolzens, wie die beim Gießen gebildete durchschnittliche Korngröße, noch wichtiger als bei der strangepressten Version. Das zugesetzte Zirkonium (Zr) dient einer weiteren Verbesserung der Eigenschaften hochfester Aluminiumlegierungen, beeinträchtigt jedoch gleichzeitig die Wirksamkeit des Kornfeiners [3].

In einer groß angelegten Studie haben Hydro Aluminium und Raufoss Technology die Auswirkungen von Zr im gegossenen Schmiedevormaterial und in der geschmiedeten FLCA-Komponente untersucht. Es hat sich gezeigt, dass Zr bereits bei kleinen Mengen zu größeren Korngrößen sowohl im Schmiedebolzen als auch im Endprodukt führt, was sich negativ auf die Eigenschaften auswirkt. Außerdem wurde nachgewiesen, dass gegossenes Schmiedevormaterial eine hohe Rekristallisationsbeständigkeit aufweist und daher keine Zr-Zusätze benötigt.

Mit zunehmendem Fokus auf den CO_2-Fußabdruck von Rohstoffen ist die Recyclingfähigkeit ebenfalls ein wichtiger Aspekt im Legierungsdesign. In dieser Hinsicht sollte die Anzahl der Legierungselemente idealerweise so gering wie möglich gehalten werden.

DER HYFORGE™-PROZESS

Das zentrale Konzept im HyForge™-Verfahren ist die Verwendung der vertikalen Low-Pressure-Casting (LPC)-Technologie sowie das horizontale Gussverfahren mit nachgelagertem Schälprozess. Beides zusammen ermöglicht das Gießen von Barren mit kleinem Durchmesser und ausreichend geringen Oberflächenseigerungen, die direkt im Schmiedeprozess entweder homogenisiert oder unhomogenisiert eingesetzt werden können. Im Vergleich zu extrudiertem Material besitzt das gegossene Schmiedevormaterial zudem einige Vorteile wie isotrope Eigenschaften und eine Beständigkeit gegenüber Rekristallisation, da vor dem Schmieden weniger gespeicherte Energie im Material vorhanden ist. Daher verringert gegossenes Schmiedematerial das Risiko, dass sich in bestimmten Zonen des geschmiedeten Bauteils ungewöhnlich große Körner bilden.

ALUMINIUMSCHMIEDETEILE IN FAHRWERKSSYSTEMEN

Getrieben durch Bestrebungen zur Reduzierung von Emissionen und zur Erhöhung der Reichweite von Elektrofahrzeugen hat sich ein allgemeiner Trend zum Leichtbau entwickelt, der zu einer signifikanten Zunahme des Aluminiumanteils in der Automobilindustrie geführt hat [4]. Die Gewichtsreduzierung der Komponenten im Fahrwerkssystem des Fahrzeugs wirkt sich auch erheblich auf die Leistung des Fahrzeugs aus, da sie zur ungefederten Masse beitragen. Bei Elektrofahrzeugen ist dies besonders wichtig, da sie schwerer sind und daher stärkere Bremsen und Fahrwerke benötigen. Mit einem hohen Festigkeits-Gewichts-Verhältnis und guter Korrosions- und Ermüdungsbeständigkeit sowie hervorragender Formbarkeit, die

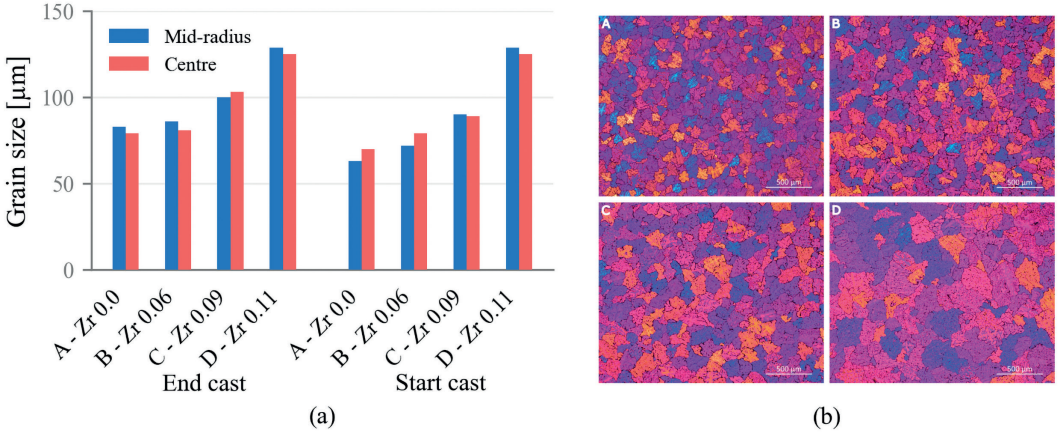


Bild 1: (a) Korngrößen wurden im mittleren Radius und in der Mittelposition des Bolzens am Anfang und am Ende des Gusses gemessen, (b) Kornstrukturabbildungen für Legierung A-D. Mittlere Radius-Position, Ende des Gusses

komplexe Formen und Designmöglichkeiten ermöglichen, sind 6xxx-Aluminiumschmiedeteile eine attraktive Lösung für leichte Fahrwerkskomponenten [5].

ROLLE DER DISPERSIODE IN 6XXX-SERIEN

Um die hohe Festigkeit sowie gleichzeitig Zähigkeit und Ermüdungsbeständigkeit für Automobilanwendungen zu erreichen, ist die Kontrolle der Kornstruktur wichtig. In 6xxx-Legierungen wird dies durch das Legieren mit Übergangselementen wie Mn und Cr erreicht, die kleine Partikel bilden, häufig auch „Dispersoide" genannt. Die Hauptwirkung dieser Partikel besteht darin, das Kornwachstum zu verlangsamen und so die Rekristallisation während der thermomechanischen Verarbeitung zu hemmen. Sowohl Mn als auch Cr sind Schlüsselkomponenten in den am weitesten verbreiteten 6xxx-Hochfestlegierungen AA6110A und AA6082. Während Mn den Hauptvolumenanteil liefert, können Cr-Zusätze die Verteilung verbessern und die thermische Stabilität der Dispersoidpartikel erhöhen. Bei einem Schmiedeprozess hängt das Ausmaß der Rekristallisation sowohl von den Dispersoiden und dem Verformungsgrad als auch von der im Prozess verwendeten Zeit und Temperatur ab. Schließlich müssen sämtliche Parameter so eingestellt werden, dass die Rekristallisation auf einem akzeptablen Niveau gehalten wird.

VERWENDUNG VON ZR IN ALUMINIUMLEGIERUNGEN

Ein weiteres dispersoidformendes Element im Aluminium ist Zr. Es wurde erfolgreich in anderen Legierungszusammensetzungen wie Al-Cu (2xxx) und Al-Zn-Mg (7xxx) eingesetzt, wo sie kleine und kohärente Al_3Zr-Dispersoide bilden.

Aufgrund des hohen Si-Gehalts zeigt Zr in 6xxx-Legierungen nicht die gleiche Wirksamkeit, da sich überwiegend inkohärente und gröbere $Al_3(Zr,Si)$-Partikel bilden, die die Rekristallisation weniger wirksam hemmen [6]. Dies hat Legierungsentwickler jedoch nicht davon abgehalten, den Einsatz von Zr weiter zu erforschen und die Leistung durch minimales Legieren mit Zr weiter zu steigern [7]. Es gibt jedoch einen weiteren bekannten Nachteil bei der Verwendung von Zr, nämlich die Herabsetzung der Wirksamkeit der branchenüblichen Al-B-Ti-basierten Kornfeiner [8]. Schon geringe Zr-Gehalte beeinträchtigen die Wirksamkeit der Kornfeinerpartikel als Kristallisationskeime für die Erstarrung von Aluminium erheblich und führen dadurch zu einem gröberen Gussgefüge beziehungsweise zu größeren Körnern.

Damit erscheint Zr als potenziell ungeeigneter Legierungszusatz für gegossenes Schmiedevormaterial, bei dem kleine Korngrößen von entscheidender Bedeutung sind. Ferner kann die durch Zr verursachte Reduzierung der Kornfeinung die Heiß-

Legierungsbezeichnung	Legierungstyp	Zr. [wt. %]
A	6110A	0,00
B	6110A	0,05
C	6110A	0,09
D	6110A	0,11

Tabelle 1: Versuchslegierungen

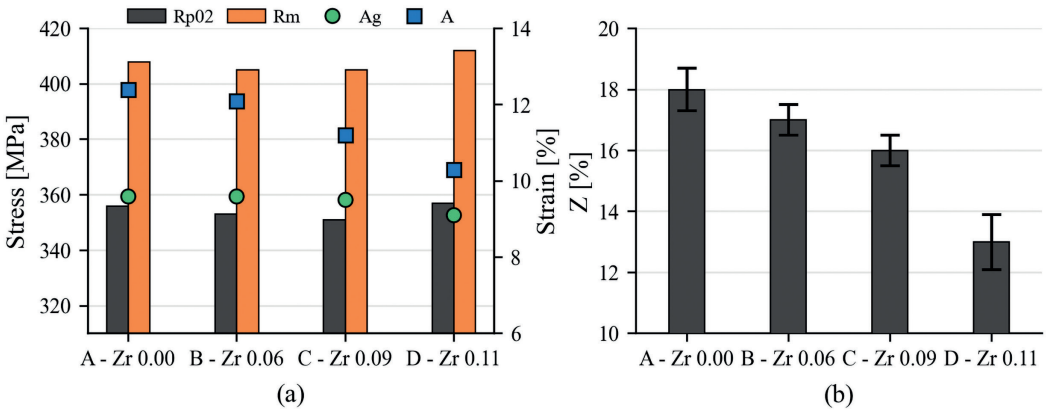


Bild 2: (a) Ergebnisse der Zugversuche am Bolzen nach T6-Wärmebehandlung, (b) Z-Werte (Querschnittsverminderung) aus den Zugversuchen am Bolzen.

rissempfindlichkeit des Werkstoffs während der Erstarrung erhöhen [9]. Dies kann höhere Schrottquoten und niedrigere Gießgeschwindigkeiten zur Folge haben, wodurch die Produktivität der Gießerei sinkt.

Eine verstärkte Kornfeinung kann diesen Effekt nur begrenzt ausgleichen, geht jedoch zulasten einer höheren Verunreinigung des Metalls.

AUSWIRKUNGEN AUF DAS SCHMIEDEVORMATERIAL

Vier 6110A-Legierungen, aufgeführt in Tabelle 1, mit einem Zr-Gehalt von 0,00 bis 0,11 Gew.-%, wurden mit Low-Pressure-Casting-Technologie (LPC) als Ø90-mm-Bolzen in einer Hydro Aluminium-Versuchsgießerei gegossen. Legierungen A-C hatten für alle Legierungselemente die gleiche chemische Zielzusammensetzung, während Legierung D etwas höhere Konzentrationen von Si und Cu aufwies. Den Legierungen wurde vor dem Gießen in der Gießrinne ein Al-Ti-B-Kornfeiner mit einer konstanten Zugabemenge von 1,0 kg/t zugesetzt. Alle Legierungen wurden drei Stunden bei 550 °C homogenisiert.

EINFLUSS AUF DIE KORNFEINUNG

Die Korngrößen wurden sowohl am Anfang als auch am Ende des Gusses mit dem Linienschnittverfahren (Line-Intercept-Methode) [10] sowie an zwei verschiedenen Positionen im Bolzenquerschnitt gemessen. Die in Bild 1(a) dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bereits beim niedrigsten untersuchten Zr-Gehalt von 0,06 Gew.-% eine Beeinträchtigung der Wirksamkeit des Kornfeiners auftritt. Die deutlichste Veränderung scheint jedoch beim Anstieg des Zr-Gehalts von 0,09 auf 0,11 Gew.-% zu erfolgen, was auf einen progressiven Effekt hindeuten könnte. Die gröberen Körner sind auch in den Polarisationslichtbildern in Bild 1(b) deutlich sichtbar.

MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

Um den Einfluss des erhöhten Zr-Gehalts auf die mechanischen Eigenschaften des Schmiedevormaterials zu untersuchen, wurden die Bolzen einer T6-Wärmebehandlung unterzogen. Dazu wurden sie zunächst 45 Minuten lang bei 560 °C lösungsgeglüht und anschließend für vier Stunden bei 185 °C warmausgelagert. Anschließend wurden Rundzugproben aus der halben Radiusposition des Bolzens gefertigt und einer Zugprüfung unterzogen.

Die in Bild 2(a) dargestellten Ergebnisse zeigen, dass der erhöhte Zr-Gehalt nur einen sehr geringen Einfluss auf die Streckgrenze (Rp0,2) und die Zugfestigkeit aufweist. Die Bruchdehnung reagiert dagegen deutlich auf die Kornvergröberung und zeigt einen kontinuierlichen Abfall von Legierung A bis D.

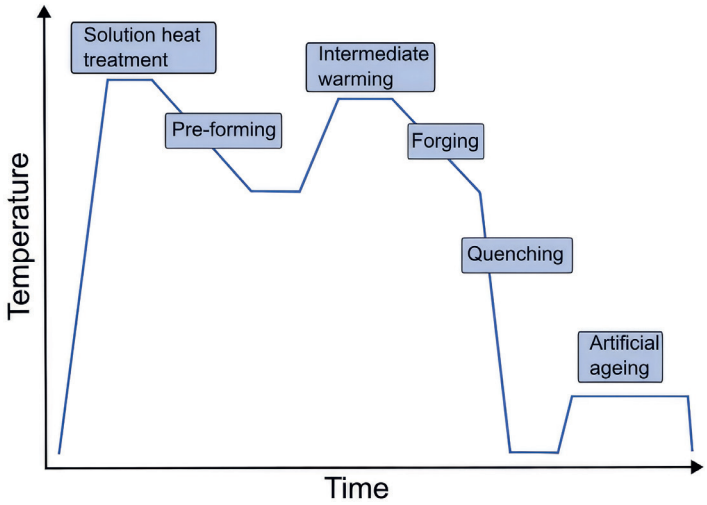


Bild 3: Schematisches Zeit-Temperatur-Diagramm für den T5-Schmiedeprozess

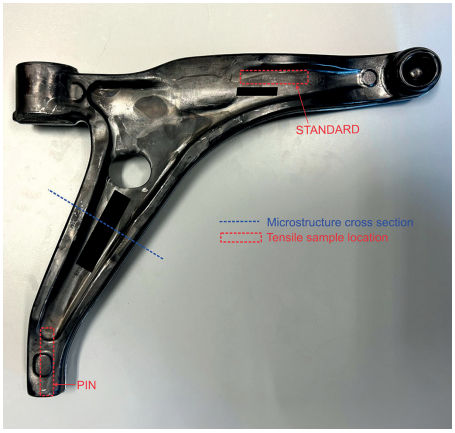


Bild 4: Bild der geschmiedeten FLCA-Komponente mit Positionen für Zugproben (rot) und Querschnitten für Mikrostrukturanalyse (blau)

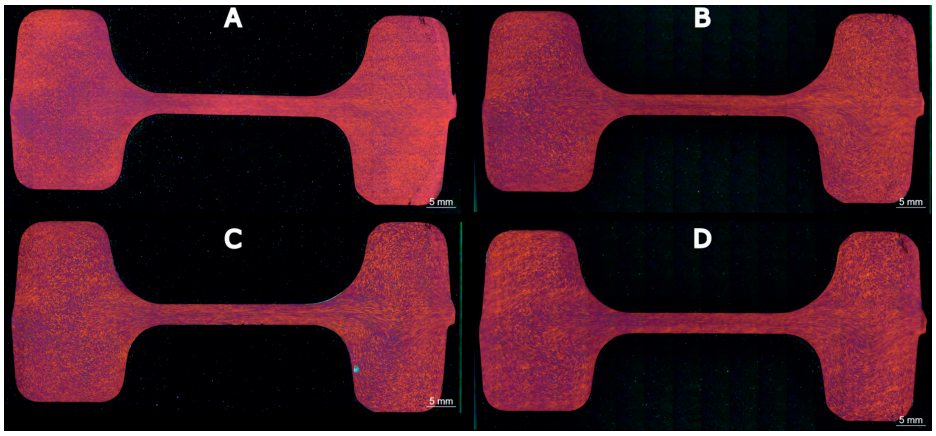


Bild 5: Kornstruktur des geschmiedeten Bauteils durch polarisiertes Licht betrachtet

Auch die Z-Werte, die die prozentuale Verringerung der Querschnittsfläche der Zugprobe beschreiben und in Bild 2(b) dargestellt sind, veranschaulichen mit zunehmendem Zr-Gehalt und wachsender Korngröße eine systematische Abnahme. Insgesamt ist ersichtlich, dass die Zr-Zugaben aufgrund ihres Einflusses auf die Kornfeinung einen negativen Effekt auf die Duktilität des Schmiedevormaterials haben.

Eine geringere Duktilität wirkt sich nachteilig auf die Zähigkeit und die Ermüdungsfestigkeit aus. Ob die größere Korngröße im Schmiedevormaterial jedoch die Eigenschaften des Endprodukts beeinflusst, hängt vom Umformgrad und damit vom jeweiligen Bauteil sowie vom eingesetzten Schmiedeprozess ab.

In den meisten Fällen ist die Verformung in einem Schmiedebauteil jedoch stark inhomogen. Daher werden bestimmte Bereiche des Werkstoffs nur geringfügig verformt und folglich von der größeren anfänglichen Korngröße des Schmiedevormaterials beeinflusst.

SCHMIEDEN UND CHARAKTERISIERUNG DER FLCA-KOMPONENTEN

Die Ø90mm-Schmiedebolzen wurden von Raufoss Aluminium im T5-Verfahren zu einem vorderen unterem Querlenker (FLCA) für einen großen europäischen Automobilhersteller geschmiedet. Der schematische Prozessweg für den Schmiedeprozess ist in Bild 3 dargestellt. Den geschmiedeten FLCA zeigt Bild 4, dort sind die Positionen für Zugproben und Querschnitte für die Mikrostrukturuntersuchung ebenfalls dargestellt.

– Microstruktur

Bild 5 zeigt die Kornstruktur der Bauteile. In keiner der untersuchten Legierungen waren Anzeichen einer Rekristallisation festzustellen. Im mittleren dünnwandigen Bereich, der einem hohen Umformgrad ausgesetzt ist, weist das Gefüge die gewünschte faserige Struktur auf, welche durch lange, gestreckte Körner gekennzeichnet ist. Im massiven Querschnittsbereich ist das Material weitgehend unverformt, sodass die Gusskornstruktur in hohem Maße erhalten bleibt. Vergrößerte Aufnahmen desselben Querschnitts im massiven Bereich des Bauteils zeigt Bild 6: Offensichtlich haben größere Körner im Schmiedevormaterial, die durch den Zr-Gehalt entstehen, auch zu größeren Körnern im massiven Querschnittsbereich des Schmiedebauteils geführt.

– Mechanische Eigenschaften

Für die Ergebnisse der Zugversuche für beide untersuchten Prüfpositionen kann Bild 7 herangezogen werden: Für jede Prüfposition wurden mindestens zwei Bauteile geprüft; die dargestellten Ergebnisse entsprechen dem Mittelwert der jeweiligen Stichprobe.

Die Legierungen weisen ein sehr ähnliches Festigkeitsniveau auf. Die Streckgrenze liegt im Bereich von 362 bis 368 MPa beziehungsweise 349 bis 351 MPa für den Standardbereich beziehungsweise den Zapfenbereich (pin area).

Der Grund für die höhere Streckgrenze im Standardbereich ist der höhere Umformgrad im mittleren Abschnitt (siehe Bild 4). Obwohl dieser Effekt nicht so ausgeprägt ist wie beim Schmiedevormaterial, ist dennoch ein deutlicher negativer Einfluss auf die Bruchdehnung erkennbar. Dieser geht zudem mit einer systematischen Abnahme der Z-Werte sowie der Gleichmaßdehnung (A–Ag) einher, was auf eine Verringerung der Duktilität mit zunehmendem Zr-Gehalt und wachsender Korngröße im Schmiedevormaterial hindeutet.

– Rekristallisationsbeständigkeit

Zur Untersuchung des Zr-Einflusses auf die Rekristallisationsbeständigkeit wurde ein simulierter T6-Prozess durchgeführt. Hierzu wurden aus den Legierungen A–C Proben aus derselben Position entnommen (Bild 4) und anschließend einer Lösungsglühbehandlung bei 550 °C für 30 Minuten (Haltezeit auf Temperatur) unterzogen. Die resultierende Kornstruktur zeigt Bild 8. Bei keiner der untersuchten Legierungen konnten Anzeichen einer Rekristallisation festgestellt werden. Dies zeigt, dass gegossenes Schmiedevormaterial die im T6-Prozess eingesetzte Wärmebehandlung ohne Rekristallisation übersteht.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieses industriellen Versuchs konnte nachgewiesen werden, dass bereits geringe Zr-Zusätze die Kornfeinung

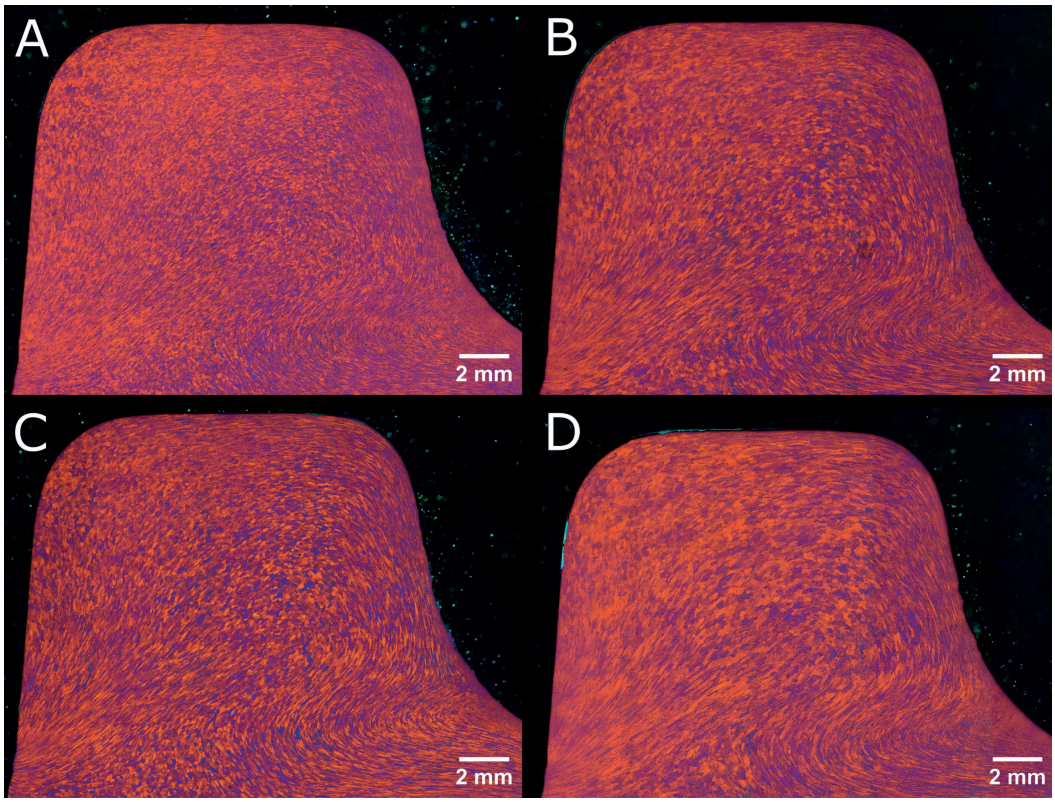


Bild 6: Vergrößerte Bilder der Kornstruktur im massivem Querschnittsbereich des Schmiedebauteils

während des Gießens deutlich beeinträchtigen. Aufgrund der inhomogenen Verformung resultiert dies ebenfalls in größeren Korngrößen im geschmiedeten Bauteil. Die mechanischen Untersuchungen zeigten keinen Einfluss des Zr-Gehalts auf das Festigkeitsniveau. Allerdings wurde aufgrund der vergrößerten Korngröße eine Verringerung der Duktilität festgestellt, was auf eine reduzierte Zähigkeit und Ermüdungsbeständigkeit hindeutet.

Im Rahmen eines simulierten T6-Prozesses konnten bei keiner der untersuchten Legierungen Anzeichen einer Rekristallisation festgestellt werden. Dies belegt, dass gegossenes Schmiedevormaterial bei ausreichender Legierung mit Mn und Cr bereits eine hohe Rekristallisationsbeständigkeit aufweist.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Zr bei gegossenem Schmiedevormaterial einen netto negativen Effekt ausüben

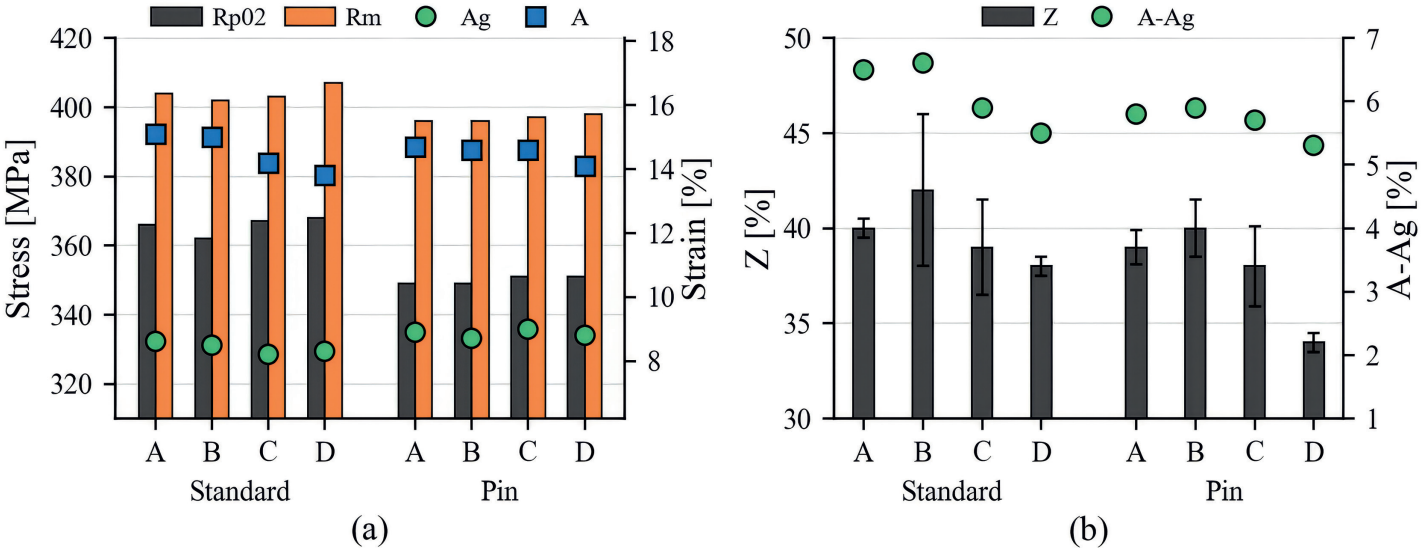


Bild 7: (a) Zugversuchsergebnisse der FLCA-Legierungen A – D im Standard- und Zapfenbereich (pin area), (b) Z-Werte und Gleichmaßdehnung (A – Ag) im Standard- und Zapfenbereich

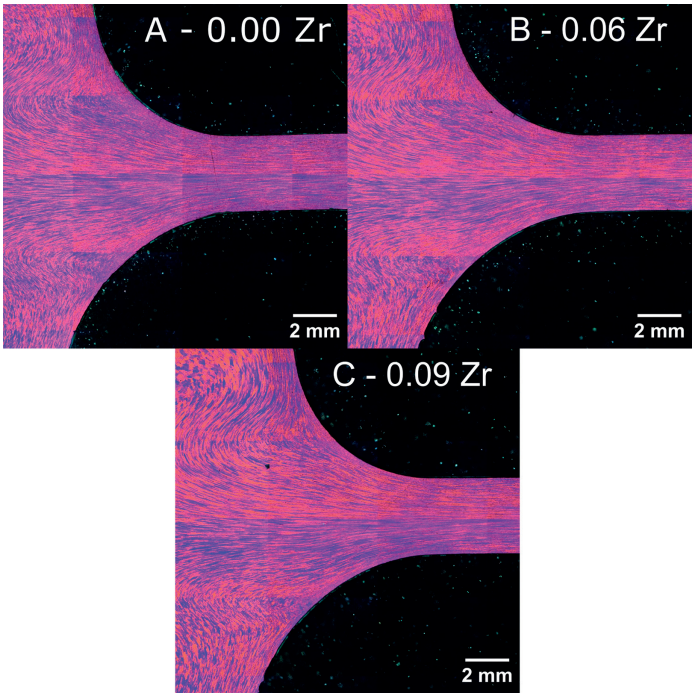


Bild 8: Kornstruktur der lösungsgeglühten Proben der Legierungen A – C
Bilder: Autoren

kann und sein Einsatz daher sorgfältig abgewogen werden sollte. Aufgrund seines bereits bei geringen Konzentrationen nachteiligen Einflusses auf Al-Ti-B-basierte Kornfeinungsmittel ist Zr im Schrottkreislauf als unerwünschtes Legierungselement anzusehen. Dies gewinnt vor dem Hintergrund der zunehmenden Nutzung von End-of-Life-Schrotten zur Reduktion des CO_2-Fußabdrucks in der Aluminiumproduktion weiter an Bedeutung. Folglich sollte Zr nur in Anwendungen eingesetzt werden, die eine hohe Rekristallisationsbeständigkeit erfordern und bei denen die Rekristallisationshemmung durch Mn und Cr in Kombination mit optimierten Wärmebehandlungen nicht ausreichend ist.

[1]. Hydro Aluminum AS: HyForge™, https://www.hydro.com/en/global/aluminium/products/casthouse-products/hyforge/

[2] Tundal U. et al.: The Potential for Cast Aluminium Forge Stock to Produce High Performance Automotive Suspension Components, Light Metal Age, December 2022

[3] Bunn A. M. et al.: Grain refinement by Al-Ti-B alloys in aluminium melts: a study of the mechanisms of poisoning by zirconium, Materials Science and Technology 15(10), 1999

[4] Ducker Research & Consulting: Aluminium Content in Passenger Vehicles (Europe), 2023, https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2023/05/2023_04_Aluminum-Content_Ducker-Study_EA-Public-Summary_190423.pdf.

[5] Halonen A.: Automotive Suspension Components Present Opportunity for Aluminium Forgings, Light Metal Age, January 2021

[6] Elasheri A. et al.: Evolution of Zr-Bearing Dispersoids during Homogenization and Their Effects on Hot Deformation and Recrystallization Resistance in Al-0.8%Mg-1.0%Si Alloy, Journal of Materials Engineering and Performance 30, 2021

[7] Zupanič, F. et al.: Microstructure and Properties of a Novel Al-Mg-Si Alloy AA 6086, Metals 11(2), 2021

[8] Wang Y. et al, Mechanism for Zr poisoning of Al-Ti-B based grain refiners, Acta Materialia 164, 2019

[9] Chandia et al., Effect of grain refiner amount on the hot tearing of 6xxx alloys during DC casting, Light Metals, 2012

[10] ASTM E112, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM International (2025)

Dieser Beitrag basiert auf einer englischen Version, die erstmals veröffentlicht wurde in «Light Metal Age, The International Magazine of the Light Metal Industry», June 2026, Volume 84, No. 3, https://www.lightmetalage.com/

Hydro Aluminium Deutschland GmbH
Blindeisenweg 21
41468 Neuss
Telefon: +49 172 293 3265
Email: tuschar.biswal@hydro.com
Internet: www.hydro.com