

Sprühkompaktierte Aluminiumlegierungen – Ungewöhnliche Werkstoffe für anspruchsvolle Leichtbaukonzepte

Dr. Peter Krug, Velbert

immanenten hohen Wärmeleitfähigkeit und geringen Dichte, auch bei hohen Anwendungstemperaturen. Dadurch ist diese Materialklasse in der Lage, anspruchsvolle Leichtbaukonzepte zu realisieren und Stähle bzw. Titanlegierungen zu substituieren.

Sprühkompaktierte Aluminiumlegierungen kombinieren hervorragende Festigkeiten, hohen Verschleißwiderstand und hohe E-Moduli mit der

Sprühkompaktieren

Sprühkompaktieren ist ein Verfahren, um Werkstoffe mit ungewöhnlichen Eigenschaften zu erzeugen. Es profitiert von den hohen Abkühlraten, wie sie bei der Gasverdüsung von Schmelzen auftreten. Üblicherweise erstarrten die durch die Zerstäubung generierten Tröpfchen zu Pulverpartikeln. Die so erhaltenen Pulver müssen dann jedoch wieder durch kalt- oder heißostatisches Pressen konsolidiert werden. Erst danach erhält man ein strangpressfähiges Produkt. Lässt man die Tröpfchen aber auf ein sich drehendes Substrat niederschlagen und zieht dieses Substrat sukzessive nach unten ab, so wächst im Gegenzug ein bolzenförmiges Gebilde auf, welches ohne weiteres extrudiert werden kann. Gegenüber der freien Erstarrung der Tröpfchen erzielt man beim Sprühkompaktieren leicht reduzierte Abkühlraten, die aber

immer noch im Bereich zwischen 1.000 und 10.000 K/s liegen. Aufgrund dieser schnellen Erstarrung sind die Löslichkeitsbereiche vieler Legierungselemente erheblich erweitert, was zusätzliche Freiheitsgrade beim Legierungsdesign gewährt. Die Legierungen können auf den jeweiligen Anwendungsfall sozusagen maßgeschneidert werden. Dadurch können Legierungen, welche herkömmlich weder gegossen noch umgeformt werden können, in umformbare Werkstoffe transferiert werden. Dies liegt einerseits an den Gefügebestandteilen, die um ein bis zwei Größenordnungen kleiner sind als in herkömmlichen Werkstoffen und an deren veränderter Morphologie, die wesentlich globularer in Erscheinung tritt und nicht zu einer Versprödung führt.

In Bild 1 ist ein Gefügevergleich einer sprühkompaktierten Legierung mit dem

Gussgefüge derselben Zusammensetzung zu sehen. Man beachte den unterschiedlichen Größenmaßstab. Das in der Kokille erstarrte Material weist größte Fe- und Ni-haltige, plattenförmige Ausscheidungen (dunkelgrau) auf. Daneben liegt das Primärsilizium (hellgrau) in teilweise bizarrer Form vor. Beide Phasen wirken als intrinsische Kerben und verhindern eine Umformung, der Werkstoff verhält sich glasspröde. Das sprühkompaktierte Material hingegen ist durchgängig mit homogenen, globularen Si-Ausscheidungen versehen. Die durchschnittliche Größe der Gefügebestandteile liegt unter 2 Mikrometern. Eine Warmumformung durch Strangpressen oder Fließpressen ist ohne Weiteres möglich. Die Erstarrung weitab vom Gleichgewichtszustand hat auf das Auftreten und den Anteil von intermetallischen bzw. Primärphasen einen erheblichen Einfluss.

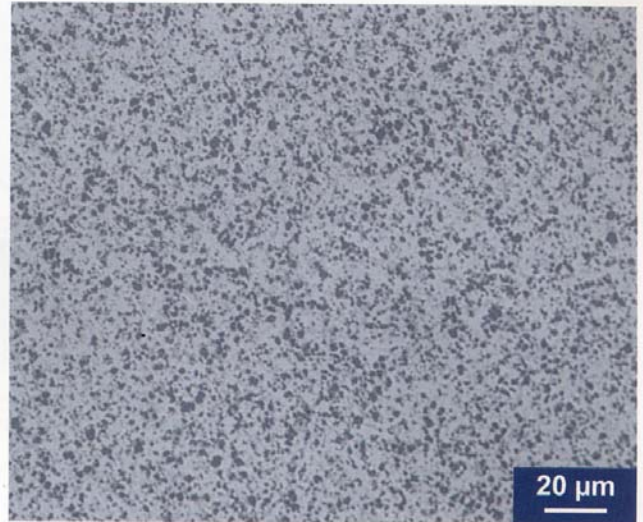
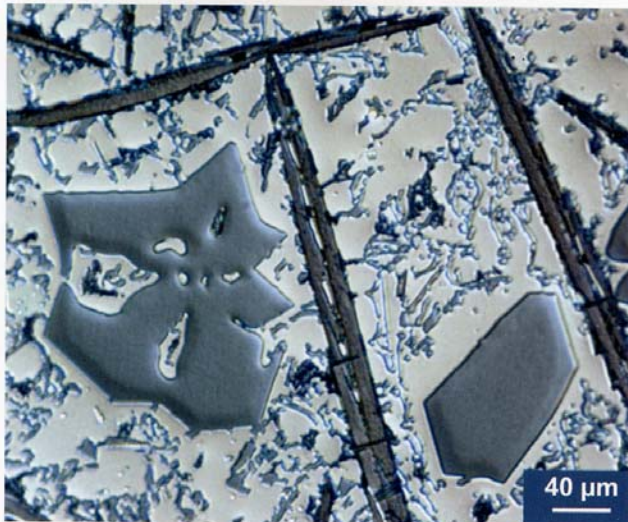


Bild 1: Vergleich von gegossenem (links) und von sprühkompaktiertem (rechts) DISPAL®S250 (AlSi20Fe5Ni2).

(Bild: Autor)

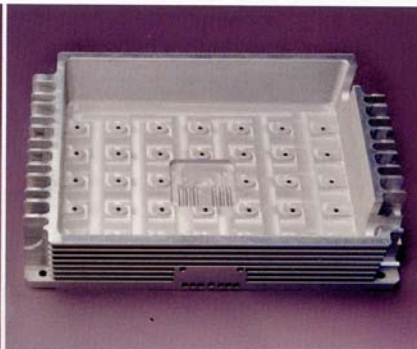


Bild 2: Links: Trägerarm eines Bestückungsautomaten (DISPAL® S250).
Rechts: Gehäuse für Linearantrieb (DISPAL® S250, AISi35).

(Bild: Autor)

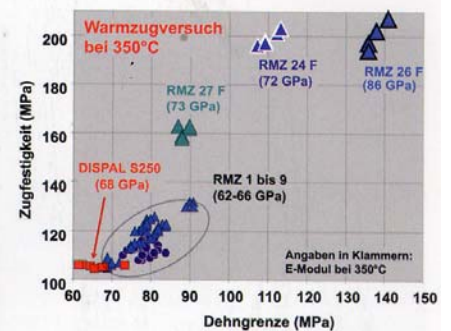


Bild 3: Warmfestigkeiten von sprühkompaktierten, disper-soidgehärteten Legierungen. (Bild: Autor)

Eine übereutektische Aluminium-Silizium-Legierung mit 17 Gew.-Prozent Silizium weist im gegossenen Zustand ca. 20 Vol.-Prozent Primärsiliziumgehalt auf, während der Rest des Siliziums eutektisch erstarrt und zum Verschleißverhalten keinen nennenswerten Beitrag leistet. Wird dieselbe Legierung sprühkompaktiert, steigt der Primärsiliziumgehalt auf 100 Vol.-Prozent mit entsprechend positiven Folgen für das Verschleißverhalten. Da die Siliziumpartikel durchschnittlich wenige Mikrometer groß sind, ist eine Zerspannung unproblematisch und führt zu guten Oberflächenqualitäten. Wegen ihres ungewöhnlichen Gefüges und ihrer Zusammensetzung weisen sprühkompaktierte Werkstoffe einige hervorragende Eigenschaften auf, die im folgenden Abschnitt näher erläutert werden. Die Zerstäubung und Kompaktierung verläuft kom-

plett in einer inerten Stickstoffatmosphäre wodurch sprühkompaktierte Werkstoffe hoher Reinheit und ohne oxidische Verunreinigung generiert werden können. Verfahrensimmanent befindet sich im gesprühten Bolzen noch eine Reststickstoffporosität (kein Wasserstoff!) von drei bis fünf Prozent, die in einem anschließenden Strangpressprozess vollständig eliminiert wird.

Eigenschaften

Da durch die hohen Abkühlraten beim Sprühkompaktieren auch Elementgehalte realisiert werden können, die weit jenseits von konventionellen Aluminiumlegierungen liegen, sind E-Moduli bis 110 GPa kein Problem. Diese Werte werden durch die Elemente Eisen, Nickel, Kobalt und Mangan (bis jeweils 5 Prozent) sowie durch hohe Gehalte an Silizium (bis 35 Gew.-Prozent) erreicht.

Dennoch sind diese Legierungen warmumformbar. Speziell die hohen Eisen- als auch Siliziumgehalte senken den thermischen Ausdehnungskoeffizienten bis ca. $15 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ab. So werden diese Werkstoffe dort eingesetzt, wo Temperaturschwankungen möglichst nicht zu einer Verringerung der Positioniergenauigkeit führen dürfen und dennoch auf eine niedriges Gewicht und hohe Wärmeleitfähigkeit Wert gelegt wird. Zudem reduzieren sich auch Bimetalleffekte bei konstruktiv bedingten Verbindungen zu anderen Werkstoffen auf z. B. Eisenbasis. Bild 2 zeigt Bauteile aus einem Bestückungsautomaten. Beim Trägerarm liegt der Fokus auf einer hohen Steifigkeit und beim Linearantriebsgehäuse auf geringer Wärmedehnung gepaart mit guter Wärmeleitfähigkeit. Dass ein hoher Si-Gehalt auch einen hohen Verschleißwiderstand bewirkt, versteht sich von selbst und ist in der Tatsache doku-



Bild 4: Warmumgeformte Bauteile. Links: Geschmiedeter Kolben aus sprühkompaktiertem MDS20 (AlMg17Si8Cu2), Materialdichte 2,54 g/cm³. Rechts: Fließgepresste Ventile aus DISPAL®S250 (AlSi20Fe5Ni2).

Bildquelle: Mahle GmbH

mentiert, dass weit über 35 Millionen ausgelieferte Zylinderlaufbuchsen in Ottomotoren zuverlässig ihren Dienst verrichten.

Hohe Legierungsgehalte ermöglichen auch die Einstellung von sehr hohen statischen Festigkeiten bei Raum- und bei erhöhten Temperaturen bis 350 °C. In Bild 3 sind die im Warmzugversuch ermittelten Festigkeiten von rein dispersoidgehärteten Legierungen wiedergegeben. Diese Legierungen erhalten ihre Eigenschaften nicht durch eine Wärmebehandlung, sondern durch intermetallische Phasen, die direkt aus der Schmelze gebildet werden. Da diese Phasen eine geringe Tendenz zur Vergrößerung zeigen, bleiben die guten Eigenschaften auch nach einer Langzeitbeanspruchung auf dieser Temperatur erhalten, sprich diese Werkstoffe altern nahezu nicht. Der E-Modul der experimentellen Legierungen RMZ24, 26 und 27 liegen bei Raumtemperatur zwischen 100 und 110 GPa; die in der Abbildung angegebenen E-Moduli beziehen sich auf die Prüftemperatur von 350 °C. Bei dynamischen Belastungen macht sich ebenfalls die hohe Erstarrungsgeschwindigkeit und das damit erzeugte, feine Gefüge positiv bemerkbar, so dass Dauerfestigkeitswerte von ca. 300 MPa (107 Lastwechsel; R = 1; P_ü = 50 Prozent) problemlos erreicht werden. Hochmagnesiumhaltige Legierungen weisen darüber hinaus noch Dichten von ca. 2,5 g/cm³ auf, was insbesondere für bewegte Massen z.B. Kolben, einen unschätzbaren Vorteil darstellt.

Der Sprühkompaktierprozess lässt eine Injektion von artemgenen wie auch artfremden Partikeln zu. Standardmäßig wird zerstäubtes Pulver, welches nicht auf dem Bolzen kompaktiert wird, gesammelt, abgesiebt und dem Zerstäubergas wieder zugeführt. Es können aber auch beliebige andere Pulver – auch nichtmetallische – eingefügt und damit so genannte Metall-Matrix-Composites (MMC)

hergestellt werden. Beispielsweise kann durch die Zugabe von Siliziumkarbid der Verschleißwiderstand und der E-Modul nochmals erheblich gesteigert werden.

Bauteile

Sprühkompaktierte Bolzen werden üblicherweise stranggepresst und die gewünschten Bauteile durch spanende Bearbeitung hergestellt. Bedingt durch den Extrudiervorgang können komplexe dreidimensionale Geometrien nur bedingt dargestellt werden und erfordern einen hohen Bearbeitungsaufwand.

Hier bieten sich Warmumformverfahren an, um aus stranggepressten Rohlingen einfacher Geometrie komplexere Bauteile wie z. B. Kolben, Pleuel, Lagerstühle, Ventile oder Ventildfederteller herzustellen (siehe Bild 4). Dabei kommen Verfahren wie das Schmieden oder das Warmfließpressen zum Einsatz. Da es sich z. T. um hochwarmfeste Werkstoffe handelt, die demgemäß auch einer Warmumformung einigen Widerstand entgegensetzen, sind die Ansprüche an das Schmiede-Know-how sehr hoch. Dennoch gelingt es, durch abgestimmte Umformschritte, Temperaturführung und Vordosierung entsprechende Bauteile zu generieren. Eine anschließende Wärmebehandlung dient dann der Einstellung der geforderten Festigkeiten. Bei rein dispersoidgehärteten also naturharten Legierungen kann dieser Schritt komplett entfallen, was zu einer deutlichen Reduzierung von Verzügen führt. Sollte ein Lösungsglühen und Abschrecken zum Erreichen der notwendigen Festigkeit unabdingbar, Verzüge jedoch nicht akzeptabel sein, kann auch ein Hochdruckgasabschrecken oder ein Eintauchen in ein temperiertes Abschreckmedium erfolgen. Versuche in Zusammenarbeit mit dem IWT Bremen haben gezeigt, dass durch eine angepasste Warmauslagerung die angestrebten Festigkeiten durchaus erreicht werden können.

Erhöht man die Umformtemperatur weiter bis in den Bereich des Schmelztemperaturintervalls sind komplexe Formgebungen mit einem geringen Umformwiderstand zu realisieren. Je nach Verfahren spricht man auch von Thixoforming bzw. Thixocasting. Sprühkompaktierte Werkstoffe eignen sich aufgrund ihrer Gefügestruktur hervorragend für beide Verfahren. Gerade MMC-Werkstoffe die entweder gar nicht oder nur eingeschränkt über schmelzmetallurgische Methoden dargestellt werden können, stehen hier im Fokus. Zusammen mit dem Institutverbund CCT-Novus in Stuttgart bzw. Aalen werden die Thixoverfahren weiterentwickelt.

Können Bauteile nicht monolithisch hergestellt werden, so stellt sich die Frage des geeigneten Fügeverfahrens. Schweißtechniken mit großen Schmelzbadvolumina sind hierfür nicht geeignet, da sprühkompaktierte Legierungen sonst ihre guten Eigenschaften einbüßen. Elektronenstrahl- oder Laserschweißen sind zwei Verfahren, welche lokal eng begrenzt die notwendige Wärmemenge in das Bauteil einbringen aber dennoch einen Selbstabschreckungseffekt, d.h. eine schnelle Wärmeabfuhr in den Grundwerkstoff ermöglichen und so die günstigen Gefügeeigenschaften nicht beeinträchtigen. Das Reibschweißen von rotationssymmetrischen Bauteilen wurde ebenfalls erfolgreich erprobt. Will man hingegen jedwede flüssige Phase vermeiden, kommt in der Serienproduktion das sogenannte Reibrührschweißen zum Einsatz. Dieses Verfahren dient hauptsächlich der Herstellung von großen Formaten aus mehreren, kleineren Strangpressprofilen. Diese Art des Fügens führt zusätzlich zu einer weiteren Gefügefeinung mit der Folge, dass die Schweißnaht sogar noch bessere Eigenschaften aufweist, als der Grundwerkstoff.

Zusammenfassung

Sprühkompaktierte Aluminiumlegierungen weisen hervorragende Eigenschaftskombinationen auf, die Anwendungsgebiete erschließen, die üblicherweise Eisenbasis- oder Titanbasiswerkstoffen vorbehalten waren. Durch das niedrige spezifische Gewicht und die gute Wärmeleitfähigkeit sind anspruchsvolle Leichtbaukonzepte realisierbar. Hohe Festigkeiten und Steifigkeiten ermöglichen im Maschinenbau anspruchsvolle Entwürfe und Anlagen und damit verbundene Wettbewerbsvorteile. Darüber hinaus können Legierungen für ihren Einsatzzweck maßgeschneidert werden, um neue Anwendungsgebiete zu erschließen, denen konventionelle Aluminiumlegierungen nicht gewachsen sind. ■



Dr. Peter Krug