



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 131 823.5**

(22) Anmeldetag: **01.12.2020**

(43) Offenlegungstag: **02.06.2022**

(51) Int Cl.: **C22C 21/00** (2006.01)

B22F 10/28 (2021.01)

B22F 9/00 (2006.01)

(71) Anmelder:

**Airbus Defence and Space GmbH, 85521
Ottobrunn, DE**

(74) Vertreter:

**KASTEL Patentanwälte PartG mbB, 81669
München, DE**

(72) Erfinder:

**Palm, Frank, 82024 Taufkirchen, DE; Schimbäck,
David, 82024 Taufkirchen, DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE	10 2007 018 123	A1
DE	10 2010 053 274	A1

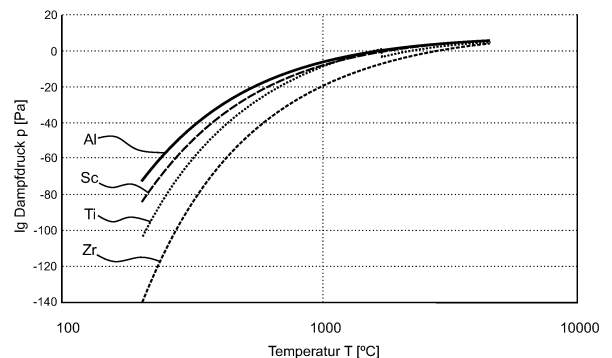
BOSCH, A. J. [et al.]: Nanostructured and high-strength alloys: scalmalloy - a unique high strength and corrosion insensitive AlMgScZr material concept. In: Aluminium alloys: their physical and mechanical properties; [proceedings of the 11th International Conference on Aluminium Alloys, 22 - 26 Sept. 2008, Aachen, Germany; ICAA 11] / ed. by HIRSCH, Jürgen [et al.] / Vol. 2. Weinheim : Wiley-VCH, 2008. S. 2215-2223. - ISBN 978-3-527-32367-8

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Aluminiumlegierung und Verfahren zur additiven Herstellung von Leichtbauteilen**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Legierung, die aus Aluminium, Titan, Scandium und Zirkonium und gegebenenfalls einem, zwei oder mehreren weiteren Metallen besteht, die unter Hafnium, Vanadium, Niob, Chrom, Molybdän, Silicium, Eisen, Cobalt, Nickel und Calcium ausgewählt werden. Die Aluminiumlegierung ist für die additive Fertigung von Leichtbauteilen für Luftfahrzeuge geeignet. In einem ersten Schritt wird ein Pulver der erfindungsgemäßen Aluminiumlegierung durch additive Fertigung, wie Laserschmelzen im L-PBF-Verfahren (Laser Powder Bed Fusion), ein Leichtbauteil-Vorläufer hergestellt, der durch Schnellerstarrung der Laserschmelze Titan, Scandium und Zirkonium in fester Lösung enthält. In einem zweiten Schritt wird der Leichtbauteil-Vorläufer durch Ausscheidung von sekundären Phasen bei 250 bis 400 °C zum Leichtbauteil gehärtet. Es werden 3D-gedruckte Leichtbauteile mit einer hoher Festigkeit erhalten.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Aluminiumlegierung, ein Verfahren zur additiven Fertigung von Leichtbauteilen unter Verwendung eines Pulvers aus dieser Aluminiumlegierung und die durch dieses Verfahren hergestellten Leichtbauteilen.

[0002] Aluminiumlegierungen stellen einen wichtigen Werkstoff für die Herstellung von Leichtbauteilen für Luftfahrzeuge dar. Die mit dem Einbau dieser Leichtbauteile in Luftfahrzeuge verbundene Senkung des Gesamtgewichts von Luftfahrzeugen ermöglicht eine Senkung der Treibstoffkosten. Die hierfür brauchbaren Aluminiumlegierungen müssen unter dem Aspekt der Flugsicherheit zusätzlich über eine hohe Zugfestigkeit, Duktilität, Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit verfügen.

[0003] Beispiele für in der Luftfahrzeugfabrikation verwendbare Aluminiumlegierungen sind die Legierungen mit der Bezeichnung AA2024, AA7349 und AA6061. Sie enthalten neben dem Basismetall Aluminium, Magnesium und Kupfer als wesentliche Legierungspartner und weiterhin zwingend oder fakultativ Mangan, Zirconium, Chrom, Eisen, Silicium, Titan und/oder Zink.

[0004] Eine bedeutende Weiterentwicklung stellen die Scandium-haltigen Aluminiumlegierungen dar, die beispielsweise unter der Produktbezeichnung Scalmalloy® im Handel von APWorks GmbH erhältlich sind. Sie weisen eine noch höhere Festigkeit, Duktilität und Korrosionsbeständigkeit als die weiter oben genannten Legierungen auf. Scandium zeigt von allen Übergangsmetallen den höchsten Anstieg an Festigkeit durch Ausscheidungshärtung von Al_3Sc . Wegen der geringen Löslichkeit von Scandium in Aluminium (etwa 0,3 Gew.-% bei ca. 660°C) muss Scalmalloy® allerdings durch Schnellerstarren, wie Schmelzschleudern („melt spinning“), einer Schmelze und anschließendes Ausscheidungshärten unter Bildung sekundärer Al_3Sc -Ausscheidungen in der Aluminiummatrix hergestellt werden.

[0005] Für weitere Informationen zu Scalmalloy® wird auf die Veröffentlichungen „Scalmalloy® - A unique high strength and corrosion insensitive AlMgScZr material concept“ (A.J. Bosch, R. Senden, W. Entelmann, M. Knüwer, F. Palm, „Proceedings of the 11th International Conference on Aluminum Alloys in: „Aluminum Alloys: Their physical and mechanical properties“, J. Hirsch, G. Gottstein, B. Skrotzki, Wiley-VCH) und „Metallurgical peculiarities in hyper-eutectic AlSc and AlMgSc engineering materials prepared by rapid solidification processing“ (F. Palm, P. Vermeer, W. von Bestenbostel, D. Isheim, R. Schneider (aaO) verwiesen.

[0006] Tabelle 1 gemäß Fig. 1 zeigt die chemische Zusammensetzung der oben angegebenen Aluminiumlegierungen, die für die Herstellung von Leichtbauteilen für Luftfahrzeuge verwendet werden können.

[0007] Ein weiterer Vorteil von Scalmalloy® besteht darin, dass es für die additive Fertigung von Leichtbauteilen geeignet ist. Neben Verfahren wie dem Lichtbogendrahtauftragschweißen (engl. WAAM = „Wire Arc Additive Manufacturing“) ist es insbesondere für Laser Powder Bed Fusion geeignet. Dieses additive Fertigungsverfahren wird im Folgenden auch als L-PBF-Verfahren (L-PBF = „Laser Powder Bed Fusion“) bezeichnet. Die Anzahl der für dieses Verfahren brauchbaren Legierungen ist begrenzt. Nach WO 2018/144323 ist eine zuverlässige additive Fertigung im L-PBF-Verfahren mit den Legierungen Scalmalloy®, AlSi10Mg, TiAl6V4, CoCr und Inconel 718 möglich, während die große Mehrzahl der mehr als 5.500 Legierungen, die heutzutage verwendet werden, für das L-PBF-Verfahren bzw. den 3D-Druck nicht brauchbar sind.

[0008] Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine verbesserte Aluminiumlegierung bereitzustellen, die für die additive Fertigung mit ausreichend schneller Abkühlgeschwindigkeit, beispielsweise im L-PBF-Verfahren, geeignet ist.

[0009] Die Aufgabe wird durch die Aluminiumlegierung nach Anspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche.

[0010] Nach einem ersten Aspekt schafft die Erfindung eine Aluminiumlegierung, die die folgenden Legierungskomponenten enthält:

- Ti in einem Anteil von 0,1 bis 15,0 Gew.-%,
- Sc in einem Anteil von 0,1 bis 3,0 Gew.-%,
- Zr in einem Anteil von 0,1 bis 3,0 Gew.-%,
- Rest Al und unvermeidbare Verunreinigungen.

[0011] Mit dem Zulegieren von Ti sind mehrere Vorteile verbunden. Der LPB-F-Prozess ist wegen der Abwesenheit von Metallen mit hohem Dampfdruck bzw. niedriger Verdampfungsenthalpie, wie Mg oder Zn, stabil. Ti erhöht die Festigkeit durch Kornfeinung, indem sich kohärente, primäre Al_3X -Phasen (X = Ti, Zr, Sc) ausscheiden und gemeinsam mit der sich durch das Zulegieren von Ti einstellenden hohen konstitutionellen Unterkühlung als Keimbildungsstellen wirken. Die Festigkeit nimmt durch Ausscheidungshärtung von sekundären Phasen während der nachfolgenden Wärmenachbehandlung zu. Eine AlSc-Legierung, die zusätzlich Ti enthält, zeigt eine noch bessere Korrosionsbeständigkeit.

[0012] Ti bewirkt in einer Aluminiumlegierung keine so große Zunahme der Festigkeit bei Raumtemperatur wie Sc oder Zr. Das meiste Ti bleibt während der Rascherstarrung im Mischkristall gelöst. Die Vergrößerung der Ausscheidungen erfolgt langsamer als vorhergesagt. Die Kriechfestigkeit bzw. Dauerstandfestigkeit („creep resistance“) ist erhöht.

[0013] Die chemische Triebkraft ΔF_{ch} für die Ausscheidung ist für Al_3Zr deutlich größer als für Al_3Ti . Die elastische Verzerrungsenergie von Al_3Ti bei der Ausscheidung ΔF_{el} („elastic strain energy for precipitation“) verhindert die Keimbildung und ist siebenmal größer als die elastische Verzerrungsenergie von Al_3Zr . Bei einer Schnellabkühlung können bis zu 2 Gew.-% Ti in der Aluminiummatrix zwangsgelöst werden.

[0014] Ein Vorteil von Ti bei der additiven Fertigung von Leichtbauteilen durch das L-PBF-Verfahren (oder SLM-Verfahren von „Selective Laser Melting“) der Aluminiumlegierung ist sein geringer Dampfdruck bzw. seine hohe Verdampfungsenthalpie. Der Dampfdruck von Ti ist geringer als der des Basismetalls Aluminium. Die Verdampfungsenthalpie von Ti ist höher als die des Basismetalls Aluminium. Dadurch wird die Prozessstabilität dahingehend verbessert, dass beim Umschmelzen ein deutlich ruhigeres Schmelzbad im Vergleich zu magnesiumhaltigen Aluminiumlegierungen entsteht.

[0015] Ti sorgt für eine starke konstitutionelle Unterkühlung während der Erstarrung was zum Aktivieren von potenten primären Keimbildungsstellen in der Schmelze führt und damit in einer Kornfeinung resultiert. Die feine Mikrostruktur erhöht die Festigkeit der Aluminiumlegierung nach Hall-Petch (Festigkeitsanstieg ist invers proportional zur Korngröße nach $\frac{1}{d^2}$).

[0016] Zr liefert in der Schmelze bereits bei hohen Temperaturen effektive Keimbildungsstellen, weil Al_3Zr bereits bei ca. 900 °C ausgeschieden wird und daher durch die konstitutionelle Unterkühlung aktiviert werden kann. Im Gegensatz dazu scheidet sich Al_3Sc erst kurz vor der Solidustemperatur aus.

[0017] Es ist bevorzugt, dass die Aluminiumlegierung Ti in einem Anteil von 0,5 Gew.-% bis 5,0 Gew.-%, Sc in einem Anteil von 0,2 Gew.-% bis 1,5 Gew.-% und Zr in einem Anteil von 0,2 Gew.-% bis 1,5 Gew.-% enthält.

[0018] Es ist bevorzugt, dass die Aluminiumlegierung Ti in einem Anteil von 1,0 Gew.-% bis 5,0 Gew.-%, vorzugsweise 1,0 Gew.-% bis 4,0 Gew.-%, Sc in einem Anteil von 0,5 Gew.-% bis 1,0 Gew.-% und Zr in einem Anteil von 0,2 Gew.-% bis 0,8 Gew.-% enthält.

[0019] Es ist bevorzugt, dass die Aluminiumlegierung ein, zwei oder mehrere Metalle enthält, die aus der Gruppe ausgewählt sind, die aus Hafnium (Hf), Vanadium (V), Niob (Nb), Chrom (Cr), Molybdän (Mo), Silicium (Si), Eisen (Fe), Cobalt (Co) und Nickel (Ni) besteht, wobei der Anteil jedes dieser Elemente einzeln

- bis zu 100 %, vorzugsweise höchstens 90 %, vorzugsweise höchstens 70 %, noch bevorzugter höchstens 50 % des Ti-Anteils entspricht mit der Maßgabe, dass der Gesamtanteil dieser Metalle höchstens 15 Gew.-% und vorzugsweise höchstens 10 Gew.-% der Aluminiumlegierung nach einem der Ansprüche 1 bis 3 ausmacht, oder

- von 0,1 Gew.-% bis 2 Gew.-% beträgt mit der Maßgabe, dass der Gesamtanteil dieser Metalle höchstens 15 Gew.-% und vorzugsweise höchstens 10 Gew.-% der Aluminiumlegierung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, ausmacht.

[0020] Es ist bevorzugt, dass die Aluminiumlegierung neben Aluminium und unvermeidbaren Verunreinigungen ausschließlich Metalle enthält, die eine höhere Verdampfungsenthalpie bzw. einen geringeren Dampfdruck als Aluminium aufweisen.

[0021] Es ist bevorzugt, dass die Aluminiumlegierung Calcium (Ca) in einem Anteil im Bereich von 0,1 bis 5 Gew.-%, vorzugsweise im Bereich von mehr als 0,5 Gew.-% bis 5 Gew.-%, besonders bevorzugt im Bereich von 0,7 Gew.-% bis 3 Gew.-% enthält. Calcium bildet beim Laserschmelzen einen Überzug aus Calciumoxid, der das unerwünschte Verdampfen von Legierungselementen behindert.

[0022] Es ist bevorzugt, dass die Aluminiumlegierung kein Magnesium und/oder kein Mangan enthält.

[0023] Es ist bevorzugt, dass die Aluminiumlegierung den weiter oben beschriebenen Kombinationen von Legierungskomponenten besteht.

[0024] Es ist bevorzugt, dass die Aluminiumlegierung abgesehen von unvermeidbaren Verunreinigungen aus Al, Ti, Sc und Zr bzw. Al, Ti, Sc, Zr und einem, zwei oder mehreren der weiter oben erwähnte Metallen besteht.

[0025] Es ist bevorzugt, dass die Aluminiumlegierung abgesehen von unvermeidbaren Verunreinigungen aus Al, Ti, Sc, Zr und Cr besteht, wobei der Cr-Anteil im Bereich von 0,2 Gew.-% bis 3,5 Gew.-%, vorzugsweise 0,5 bis 3,0 Gew.-%, liegt.

[0026] Es ist bevorzugt, dass die Aluminiumlegierung abgesehen von unvermeidbaren Verunreinigungen aus Al, Ti, Sc, Zr und Ni besteht, wobei der

Ni-Anteil im Bereich von 0,2 Gew.-% bis 2,5 Gew.-%, vorzugsweise 0,5 Gew.-% bis 2,0 Gew.-%, liegt.

[0027] Es ist bevorzugt, dass die Aluminiumlegierung abgesehen von unvermeidbaren Verunreinigungen aus Al, Ti, Sc, Zr und Mo besteht, wobei der Mo-Anteil im Bereich von 0,1 Gew.-% bis 1,3 Gew.-%, vorzugsweise 0,5 Gew.-% bis 1,0 Gew.-%, liegt.

[0028] Es ist bevorzugt, dass die Aluminiumlegierung abgesehen von unvermeidbaren Verunreinigungen aus Al, Ti, Sc, Zr und Fe besteht, wobei der Fe-Anteil im Bereich von 0,1 Gew.-% bis 2,5 Gew.-%, vorzugsweise 0,5 Gew.-% bis 2,0 Gew.-%, liegt.

[0029] Es ist bevorzugt, dass die Aluminiumlegierung abgesehen von unvermeidbaren Verunreinigungen aus Al, Ti, Sc, Zr und Ca besteht, wobei der Ca-Anteil im Bereich von 0,1 Gew.-% bis 5 Gew.-%, vorzugsweise im Bereich von mehr als 0,5 Gew.-% bis 5 Gew.-%, besonders bevorzugt im Bereich von 0,7 Gew.-% bis 3 Gew.-% liegt.

[0030] Nach einem zweiten Aspekt schafft die Erfindung ein Verfahren zur additiven Fertigung eines Leichtbauteil-Vorläufers, das umfasst:

a) Zusammenschmelzen der Metalle zu einer Aluminiumlegierungsschmelze;

b) Abkühlen oder Abkühlenlassen der Aluminiumlegierungsschmelze

b1) in einem Schnellerstarrungsverfahren mit einer Abkühlgeschwindigkeit von 1.000 K/s bis 10.000.000 K/s, insbesondere 100.000 K/s bis 1.000.000 K/s, zum Beispiel Schmelzschleudern, Pulververdüsen mittels Gas oder in Wasser, Dünnbandgießen oder Sprühkompaktieren, unter Erhalt einer erstarrten, gegebenenfalls pulverförmigen Aluminiumlegierung mit darin in fester Lösung enthaltenem Scandium; oder

b2) in einem Abkühlungsverfahren unter Erhalt einer erstarrten Aluminiumlegierung;

c) Zerkleinern der Aluminiumlegierung aus Schritt b1) oder b2) zu einem Pulver.

[0031] Es ist bevorzugt, dass in Schritt b) oder Schritt b1) die Abkühlgeschwindigkeit zumindest in einem Temperaturbereich von 1.800 K bis 500 K eingehalten wird.

[0032] Wenn die geschmolzene Aluminiumlegierung in Schritt b) abgekühlt wird, entsteht bei nicht allzu hoher Abkühlgeschwindigkeit, wie beim Gießen der Schmelze in einen Tiegel, eine Aluminiummatrix, wobei die Legierungselemente Ti, Sc und Zr hauptsächlich in Form von großen primären Ausscheidungen vorliegt. Wenn die obige Aluminiumlegierung sehr schnell abgekühlt wird, wie mit einer Geschwindigkeit von 1.000 K/s bis 10.000.000 K/s, enthält die

erstarrte Aluminiumlegierung die oben genannten Legierungselemente im Wesentlichen in fester Lösung. Die Ausscheidung primärer Phasen wird durch schnelles Abkühlen unterdrückt. Je schneller die Schmelze abgekühlt wird, desto geringer ist der Anteil an primären Ausscheidungen. Bei einer anschließenden Ausscheidungshärtung bei Temperaturen beispielsweise um 250 bis 450 °C werden nano-skalige, kohärente Al₃X Phasen (X = Ti, Zr, Sc) ausgeschieden, die für eine starke Verbesserung der Festigkeit der Aluminiumlegierung sorgt.

[0033] In Schritt e) kommt es nach dem Aufschmelzen des Pulvers mit dem Laserstrahl zu einer sehr schnellen Abkühlung, bei der die Legierungselemente im Wesentlichen in fester Lösung erstarren. Insgesamt handelt es sich bei diesem Verfahrensschritt um ein Umschmelzen in die gewünschte Legierung.

[0034] Nach einem dritten Aspekt schafft die Erfindung ein Verfahren zum additiven Fertigen eines Leichtbauteil-Vorläufers aus einer wie weiter oben beschriebenen Aluminiumlegierung, das umfasst:

d) Herstellen eines Pulverbetts aus dem in Schritt c) von Anspruch 10 erhaltenen Pulver;

e) Additives Fertigen eines dreidimensionalen Leichtbauteil-Vorläufers in einem Laserschmelzverfahren im Pulverbett mit einem Laser unter lokalem Aufschmelzen des Pulvers und Abkühlen bzw. Abkühlenlassen des lokal aufgeschmolzenen Bereichs unter Erhalt eines Leichtbauteil-Vorläufers aus einer Aluminiumlegierung mit in fester Lösung erhaltenem Scandium.

[0035] Nach einem vierten Aspekt schafft die Erfindung ein Verfahren zum Herstellen eines Leichtbauteils, dass das Wärmebehandeln des in dem weiter oben beschriebenen Verfahren erhaltenen Leichtbauteil-Vorläufers bei einer Temperatur umfasst, bei der der Leichtbauteil-Vorläufer durch Ausscheidungshärtung gehärtet wird.

[0036] Nach einem fünften Aspekt schafft die Erfindung einen Leichtbauteil-Vorläufer, der nach dem oben beschriebenen additiven Fertigungsverfahren erhältlich ist

[0037] Nach einem sechsten Aspekt schafft die Erfindung ein Leichtbauteil, das nach dem oben beschriebenen Härtnungsverfahren erhältlich ist.

[0038] Nach einem siebten Aspekt schafft die Erfindung eine Verwendung der wie weiter oben beschriebenen Aluminiumlegierung oder des nach dem oben beschriebenen Verfahren erhältlichen Pulvers für die Herstellung eines Leichtbauteil-Vorläufers durch selektives Laserschmelzen und die Herstellung

eines Leichtbauteils durch selektives Laserschmelzen und nachfolgendes Ausscheidungshärten.

[0039] Ein Ausführungsbeispiel wird im Folgenden anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Darin zeigt:

Fig. 1 die chemische Zusammensetzung von gängigen Aluminiumlegierungen für Leichtbauteile für die Luftfahrt in Tabelle 1;

Fig. 2 die physikalischen Eigenschaften der wichtigsten Legierungselemente in Tabelle 2;

Fig. 3 den Dampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur der Bestandteile von Scalmalloy®;

Fig. 4 den Dampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur der Bestandteile einer erfindungsgemäßen Legierung

[0040] **Fig. 1** zeigt in Tabelle 1 die Zusammensetzung von Aluminiumlegierungen, die für die Herstellung von Leichtbauteilen für die Luftfahrt verwendet werden. Die Legierungen AA2024, AA7349, AA7010 und AA6061 enthalten wie Duraluminium Magnesium und Kupfer. Duraluminium ist eine 1906 von Alfred Wilms entwickelte Aluminiumlegierung, für die erkannt wurde, dass die Festigkeit der Legierung durch Ausscheidungshärtung erheblich gesteigert werden kann. Mit der so erzielten Festigkeitssteigerung wurde es möglich, Aluminium in legierter Form in der Luftfahrt einzusetzen.

[0041] Eine weitere erhebliche Festigkeitssteigerung von Aluminium ist durch das Zulegieren von Scandium möglich, wie bei Scalmalloy®. Wegen der geringen Löslichkeit von Scandium in Aluminium bei Raumtemperatur muss hier das Scandium aber zunächst in einem Schnellerstarrungsprozess, wie Schmelzschleudern, im Aluminium zwangsgelöst werden, bevor die Ausscheidungshärtung bei einer Temperatur im Bereich von 250°C bis 450 °C durchgeführt werden kann.

[0042] Eine Besonderheit der beiden Aluminiumlegierungen AlSi10Mg und Scalmalloy® in Tabelle 1 ist, dass sie für das Laserschmelzen im L-PBF-Verfahren geeignet sind. Diese beiden Legierungen können also durch additive Fertigung zu Leichtbauteilen für Luftfahrzeuge verarbeitet werden.

[0043] **Fig. 2** zeigt in Tabelle 2 die physikalischen Eigenschaften verschiedener Legierungselemente. Die Legierungselemente oberhalb von Aluminium weisen eine höhere Verdampfungsenthalpie als Aluminium auf. Jene unterhalb von Aluminium weisen eine geringere Verdampfungsenthalpie als Aluminium auf.

[0044] **Fig. 3** zeigt in einem Diagramm die Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks der Legierungsbestandteile von Scalmalloy®.

[0045] **Fig. 4** zeigt in einem Diagramm die Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks einer erfindungsgemäßen Aluminiumlegierung.

[0046] Im Folgenden werden Verfahren zur Herstellung von Aluminiumlegierungen, eines Leichtbauteil-Vorläufers und eines Leichtbauteils beschrieben.

A) Verfahren zur Herstellung von Aluminiumlegierungen

Beispiel 1 Herstellung von pulverförmigen Aluminiumlegierungen

[0047] In einem inerten Tiegel werden 0,75 Gew.-% Sc, 0,35 Gew.-% Zr, 1,0 Gew.-% Ti und 97,9 Gew.-% Al geschmolzen. Die Schmelze kann vor der weiteren Verarbeitung homogenisiert werden.

[0048] Ein erster Anteil der Schmelze wird in einen inerten Tiegel gegossen, in dem sie abkühlt und erstarrt. Beim Abkühlen fallen primäre Al_3Sc , Al_3Zr und Al_3Ti Phasen aus. Das erhaltene Material wird zu einem Pulver zerkleinert, das für das selektive Laserschmelzen in einem Pulverbett verwendet werden kann.

[0049] Ein zweiter Anteil der Schmelze wird in einem Schmelzschleuderverfahren auf eine rotierende, mit Wasser gekühlte Kupferwalze gegossen. Die Schmelze kühlt mit einer Geschwindigkeit von 1.000.000 K/s unter Bildung eines Bandes ab. Die Schmelze kühlt so schnell ab, dass die Bildung von Al_3Sc , Al_3Zr und Al_3Ti ganz oder im Wesentlichen unterdrückt wird. Das Band wird zu kurzen Flocken geschnitten.

[0050] Das bei den beiden Abkühlverfahren erhaltene Legierungsmaterial wird zu einem Pulver zerkleinert, das für das selektive Laserschmelzen in einem Pulverbett verwendet werden kann.

Beispiel 2 Herstellung von pulverförmigen Aluminiumlegierungen mit unterschiedlichem Titangehalt

[0051] Das obige Verfahren wird wiederholt, wobei der Anteil an Ti auf 3,0 Gew.-%, 5,0 Gew.-%, 10,0 Gew.-% und 15,0 Gew.-% erhöht wird und der Anteil an Al entsprechend verringert wird. Der Anteil an Sc und Zr bleibt unverändert.

Beispiel 3 Herstellung einer pulverförmigen Aluminiumlegierung mit Vanadiumgehalt

und Al_3Zr bleibt aber ein überwiegender oder größerer Anteil des Titans in fester Lösung.

[0052] Das Verfahren von Beispiel 1 wird wiederholt, wobei zusätzlich 2,0 Gew.-% Vanadium in den Tiegel gegeben werden und der Anteil an Ti, Sc und Zr konstant gehalten wird.

Beispiel 4 Herstellung einer pulverförmigen Aluminiumlegierung mit Nickelgehalt

[0053] Das Verfahren von Beispiel 1 wird wiederholt, wobei zusätzlich 1,2 Gew.-% Nickel in den Tiegel gegeben werden und der Anteil an Ti, Sc und Zr konstant gehalten wird.

Beispiel 5 Herstellung einer pulverförmigen Aluminiumlegierung mit Chrom-Vanadiumgehalt

[0054] Das Verfahren von Beispiel 1 wird wiederholt, wobei zusätzlich 1,0 Gew.-% Vanadium und 2,0 Gew.-% Chrom in den Tiegel gegeben werden und der Anteil an Titan auf 5 Gew.-% erhöht wird. Der Zr-Anteil bleibt unverändert

B) Verfahren zur Herstellung eines Leichtbauteil-Vorläufers im L-PBF-Verfahren

[0055] Jeweils ein Aluminiumlegierungspulver aus einem der obigen Beispiele 1 bis 5 wird unter Bildung eines Pulverbetts in eine Anlage zur additiven Fertigung durch selektives Laserschmelzen gegeben. Der Laserstrahl wird gemäß den digitalen Informationen über das dreidimensionale Pulverbett bewegt, wobei das Pulverbett schrittweise abgesenkt und neue Pulverschichten aufgetragen werden. Die Abkühlung der punktwise aufgeschmolzenen Aluminiumlegierung erfolgt dabei so schnell, dass Scandium, Zirconium und Titan unabhängig von der sonstigen Zusammensetzung der Aluminiumlegierung und unabhängig davon, ob das Pulver durch normales Abkühlen oder Schnellabkühlen beispielsweise mit einer Geschwindigkeit von 1.000.000 K/s hergestellt worden ist, vollständig oder im Wesentlichen oder überwiegend in fester Lösung eingefroren sind. Nach Abschluss des Scanvorgangs wird der Bauteilvorläufer aus der Aluminiumlegierung aus dem Pulverbett entnommen.

C) Verfahren zur Herstellung eines Leichtbauteils

[0056] Der in B) hergestellte Bauteilvorläufer wird auf eine Temperatur erhitzt, wie im Bereich von 250 °C bis 450 °C, vorzugsweise 300 °C bis 400 °C und noch bevorzugter 325 °C bis 350 °C, bei der es zur Ausscheidung von diversen Al_3X Phasen (X = Ti, Zr, Sc oder eine beliebige nichtstöchiometrische Mischung der einzelnen Elemente) kommt. Al_3Ti wird ebenfalls ausgeschieden, verglichen mit Al_3Sc

ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Zitierte Patentliteratur

- WO 2018/144323 [0007]

Patentansprüche

1. Aluminiumlegierung, die die Legierungskomponenten enthält:

- Titan (Ti) in einem Anteil von 0,1 Gew.-% bis 15,0 Gew.-%,
- Scandium (Sc) in einem Anteil von 0,1 Gew.-% bis 3,0 Gew.-%,
- Zirkonium (Zr) in einem Anteil von 0,1 Gew.-% bis 3,0 Gew.-%,
- Rest Aluminium (Al) und unvermeidbare Verunreinigungen.

2. Aluminiumlegierung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie Ti in einem Anteil von 0,5 Gew.-% bis 5,0 Gew.-%, Sc in einem Anteil von 0,2 Gew.-% bis 1,5 Gew.-% und Zr in einem Anteil von 0,2 Gew.-% bis 1,5 Gew.-% enthält.

3. Aluminiumlegierung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie Ti in einem Anteil von 1,0 Gew.-% bis 5,0 Gew.-%, vorzugsweise 1,0 Gew.-% bis 4,0 Gew.-%, Sc in einem Anteil von 0,5 Gew.-% bis 1,0 Gew.-% und Zr in einem Anteil von 0,2 Gew.-% bis 0,8 Gew.-% enthält.

4. Aluminiumlegierung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie ein, zwei oder mehrere Metalle enthält, die aus der Gruppe ausgewählt sind, die aus Hafnium (Hf), Vanadium (V), Niob (Nb), Chrom (Cr), Molybdän (Mo), Silicium (Si), Eisen (Fe), Cobalt (Co) und Nickel (Ni) besteht, wobei der Anteil jedes dieser Elemente einzeln

- bis zu 100 %, vorzugsweise höchstens 90 %, vorzugsweise höchstens 70 %, noch bevorzugter höchstens 50 % des Ti-Anteils entspricht mit der Maßgabe, dass der Gesamtanteil dieser Metalle höchstens 15 Gew.-% und vorzugsweise höchstens 10 Gew.-% der Aluminiumlegierung nach einem der Ansprüche 1 bis 3 ausmacht, oder
- von 0,1 Gew.-% bis 2 Gew.-% beträgt mit der Maßgabe, dass der Gesamtanteil dieser Metalle höchstens 15 Gew.-% und vorzugsweise höchstens 10 Gew.-% der Aluminiumlegierung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, ausmacht.

5. Aluminiumlegierung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie Calcium (Ca) in einem Anteil im Bereich von 0,1 Gew.-% bis 5 Gew.-%, vorzugsweise im Bereich von mehr als 0,5 Gew.-% bis 5 Gew.-%, besonders bevorzugt im Bereich von 0,7 Gew.-% bis 3 Gew.-% enthält.

6. Aluminiumlegierung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie neben Aluminium und unvermeidbaren

Verunreinigungen ausschließlich Metalle enthält, die eine höhere Verdampfungsenthalpie bzw. einen geringeren Dampfdruck als Aluminium aufweisen.

7. Aluminiumlegierung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie kein Magnesium und/oder kein Mangan enthält.

8. Aluminiumlegierung, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie aus den Legierungskomponenten gemäß Anspruch 1 besteht.

9. Aluminiumlegierung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie, abgesehen von unvermeidbaren Verunreinigungen, besteht aus:

- Al, Ti, Sc, Zr und einem, zwei oder mehreren Metallen gemäß Anspruch 4;
- Al, Ti, Sc, Zr und Cr, wobei der Cr-Anteil im Bereich von 0,2 Gew.-% bis 3,5 Gew.-%, vorzugsweise 0,5 bis 3,0 Gew.-%, liegt;
- Al, Ti, Sc, Zr und Ni, wobei der Ni-Anteil im Bereich von 0,2 Gew.-% bis 2,5 Gew.-%, vorzugsweise 0,5 Gew.-% bis 2,0 Gew.-%, liegt;
- Al, Ti, Sc, Zr und Mo, wobei der Mo-Anteil im Bereich von 0,1 Gew.-% bis 1,3 Gew.-%, vorzugsweise 0,5 Gew.-% bis 1,0 Gew.-%, liegt;
- Al, Ti, Sc, Zr und Fe, wobei der Fe-Anteil im Bereich von 0,1 Gew.-% bis 2,5 Gew.-%, vorzugsweise 0,5 Gew.-% bis 2,0 Gew.-%, liegt;
- Al, Ti, Sc, Zr und Ca, wobei der Ca-Anteil im Bereich von 0,1 Gew.-% bis 5 Gew.-%, vorzugsweise im Bereich von mehr als 0,5 Gew.-% bis 5 Gew.-%, besonders bevorzugt im Bereich von 0,7 Gew.-% bis 5 Gew.-% liegt.

10. Verfahren zum additiven Fertigen eines Leichtbauteil-Vorläufers aus einer Aluminiumlegierung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, das umfasst:

- a) Zusammenschmelzen der Metalle zu einer Aluminiumlegierungsschmelze;
- b) Abkühlen oder Abkühlenlassen der Aluminiumlegierungsschmelze
 - b1) in einem Schnellerstarungsverfahren mit einer Abkühlgeschwindigkeit von 1.000 K/s bis 10.000.000 K/s, insbesondere 100.000 K/s bis 1.000.000 K/s, zum Beispiel Schmelzschleudern, Pulververdüsen mittels Gas oder in Wasser, Dünnbandgießen oder Sprühkompaktieren, unter Erhalt einer erstarrten, gegebenenfalls pulverförmigen Aluminiumlegierung mit darin in fester Lösung enthaltenem Scandium; oder
 - b2) in einem Abkühlungsverfahren unter Erhalt einer erstarrten Aluminiumlegierung;
- c) Zerkleinern der Aluminiumlegierung aus Schritt b1) oder b2) zu einem Pulver.

11. Verfahren zum additiven Fertigen eines Leichtbauteil-Vorläufers aus einer Aluminiumlegierung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, das umfasst:

- d) Herstellen eines Pulverbetts aus dem in Schritt c) von Anspruch 10 erhaltenen Pulver;
- e) Additives Fertigen eines dreidimensionalen Leichtbauteil-Vorläufers in einem Laserschmelzverfahren im Pulverbett mit einem Laser unter lokalem Aufschmelzen des Pulvers und Abkühlen bzw. Abkühlenlassen des lokal aufgeschmolzenen Bereichs unter Erhalt eines Leichtbauteil-Vorläufers aus einer Aluminiumlegierung mit in fester Lösung erhaltenem Scandium.

12. Verfahren zum Herstellen eines Leichtbauteils, dass das Wärmebehandeln des in dem Verfahren nach Anspruch 11 erhaltenen Leichtbauteil-Vorläufers bei einer Temperatur umfasst, bei der der Leichtbauteil-Vorläufer durch Ausscheidungshärtung gehärtet wird.

13. Leichtbauteil-Vorläufer, erhältlich nach dem Verfahren nach Anspruch 11.

14. Leichtbauteil, erhältlich nach dem Verfahren nach Anspruch 12.

15. Verwendung der Aluminiumlegierung nach einem der Ansprüche 1 bis 9 oder des nach dem Verfahren nach Anspruch 10 erhältlichen Pulvers für die Herstellung eines Leichtbauteil-Vorläufers durch selektives Laserschmelzen und die Herstellung eines Leichtbauteils durch selektives Laserschmelzen und nachfolgendes Ausscheidungshärten.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

Tabelle 1: Zusammensetzung von Aluminiumlegierungen für die Luftfahrt
(Mengenangaben in Gew.-%)

	AA2024-T3	AA7349	AA7010	EN AW-6061	AlSi10Mg	Scalmalloy®
Mg	1,2 - 1,8	2,3 - 2,6	2,2 - 2,5	0,8 - 1,20	0,2 - 0,45	1.8 - 4.3
Sc	–	–	–	–	–	0,7 - 1,4
Mn	0,3 - 0,9	0,14 - 0,19	≤ 0,05	≤ 0,15	≤ 0,45	0,3 - 0,7
Zr	–	0,10 - 0,13	0,10 - 0,13	–	–	0,22 - 0,55
Cu	3,8 - 4,9	1,5 - 1,8	1,5 - 1,8	0,15 - 0,40	≤ 0,05	–
Cr	≤ 0,1	0,15 - 0,18	≤ 0,05	0,04 - 0,35	–	–
Fe	≤ 0,5	0,10 - 0,12	0,10 - 0,12	≤ 0,7	≤ 0,55	–
Si	≤ 0,5	0,08 - 0,10	0,08 - 0,10	0,4 - 0,8	9,0 - 11,0	–
Ti	≤ 0,15	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,15	≤ 0,15	–
Zn	≤ 0,25	7,6 - 9,7	6,2 - 6,5	≤ 0,25	≤ 0,10	–
Al	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest

Fig. 2

Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften der Metalle

	Smp. (°C)	Dichte (g/cm ³)	Schmelzenthalpie [KJ/mol]	Verdampfungs- enthalpie [KJ/mol]*
Nb	2477	8,57	26,8	694
Zr	1.857	6,5	16,9	591
V	1.910	6,11	21,5	444
Ti	1.668	4,50	18,7	427
Si	1.410	2,34	50,1	383
Ni	1.455	8,91	17,7	379
Fe	1.538	7,87	13,8	354
Cr	1.907	7,14	16,9	347
Sc	1.541	2,99	16,0	310
Cu	1.085	8,92	13,3	305
Al	660	2,70	10,7	284
Mn	1.246	7,43	13,2	225
Ca	842	1,55	8,5	153
Li	180	0,53	3,0	136
Mg	650	1,74	8,7	132
Zn	420	7,14	7,4	115

* Verdampfungsenthalpien aus: Yiming Zhang, Julian R. G. Evans, Shoufeng Yang: *Corrected Values for Boiling Points and Enthalpies of Vaporization of Elements in Handbooks*. In: *Journal of Chemical & Engineering Data*. 56, 2011, S. 328-337

Fig. 3

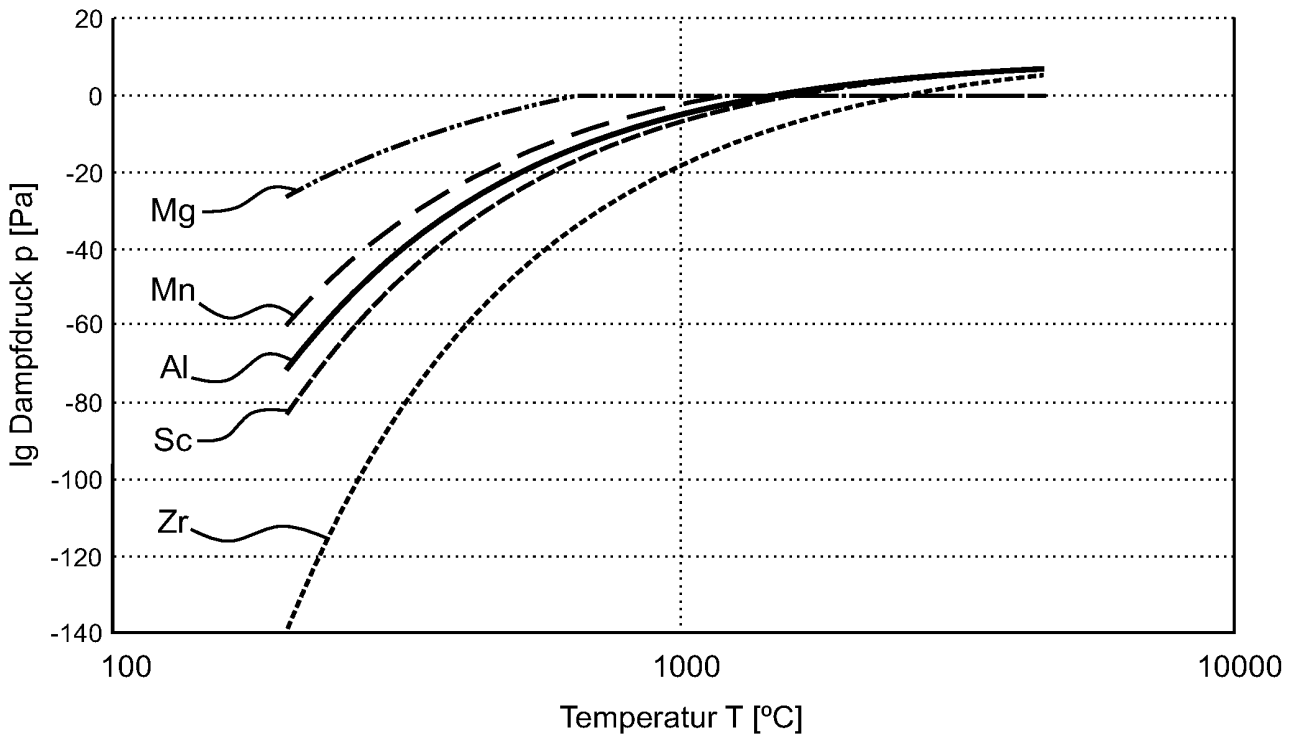


Fig. 4

