



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 00 928 T2 2005.09.08**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 329 530 B1**

(51) Int Cl.⁷: **C22C 23/06**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 00 928.6**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 005 947.3**

(96) Europäischer Anmeldetag: **15.03.2002**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **23.07.2003**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **11.08.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **08.09.2005**

(30) Unionspriorität:

14756102 10.01.2002 IL

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,
LI, LU, MC, NL, PT, SE, TR**

(73) Patentinhaber:

**Dead Sea Magnesium Ltd., Beer-Sheva, IL;
Volkswagen AG, 38440 Wolfsburg, DE**

(72) Erfinder:

**Brofin, Boris, 84726 Beer Sheva, IL; Aghion,
Eliyahu, 84965 Omer, IL; von Buch, Frank, 38542
Leiferde, DE; Schumann, Soenke, 38179
Schwuelper, DE; Friedrich, Horst, 38300
Wolfenbüttel, DE; Katzir, Mark, 84770 Beer Sheva,
IL**

(74) Vertreter:

**Flaccus, R., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat., Pat.-Anw.,
50389 Wesseling**

(54) Bezeichnung: **Hochtemperaturbeständige Magnesium-Legierungen**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

Feld der Erfindung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft Legierungen auf der Basis von Magnesium, die für Anwendungen bei so hohen Temperaturen wie 250–300°C geeignet sind und die gute mechanische Eigenschaften, gute Korrosionsbeständigkeit und gute Vergießbarkeit aufweisen.

Technischer Hintergrund der Erfindung

[0002] Magnesiumlegierungen als leichtestes Metall-Konstruktions-Material sind in der Automobil- und Luftfahrtindustrie begehrt. Neue Legierungen, die der zunehmend belasteten Betriebsumgebung standhalten können, und die komplexere Bauteile mit höherer Standzeit und geringeren Instandhaltungskosten bereitstellen können, werden gefordert.

[0003] Eine ideale Legierung sollte hinsichtlich ihres Verhaltens verschiedene Anforderungen erfüllen, sowohl während des Gießens als auch im Betrieb unter Dauerbelastung. Die gute Vergießbarkeit umfaßt einen guten Fluß der geschmolzenen Legierung in enge Gußformquerschnitte, geringe Anhaftung der Legierung an der Gußform und Oxidationsbeständigkeit während des Gußverfahrens. Die Legierung sollte während der Abkühlungs- und Erstarrungsphase keine Risse bilden. Die aus der Legierung gegossenen Bauteile sollten eine hohe Zug- und Druckfestigkeit besitzen und im Betrieb eine geringe fortgesetzte Verformung unter Belastung bei erhöhten Temperaturen aufweisen (Kriechfestigkeit). Weiterhin sollte die Legierung korrosionsbeständig sein. Einige Anwendungen, z. B. die Verwendung als Bauteil des Getriebes oder als Kurbelgehäuse, erfordern, daß die Korrosionsbeständigkeit und die Beständigkeit gegenüber mechanischer Belastung auch bei hohen Temperaturen erhalten bleiben.

[0004] Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Legierung hängen im wesentlichen vom Vorhandensein anderer metallischer Elemente ab, die eine Vielzahl intermetallischer Verbindungen ausbilden können, die der Legierung verbesserte physikalische und chemische Eigenschaften verleihen können. Die Auswahl der Elemente und ihr Verhältnis in der Legierung zueinander sind auch aus ökonomischer Sicht von Bedeutung, da die Kosten der Legierung einen signifikanten Anteil der Gesamtkosten des Bauteils darstellen.

[0005] Magnesiumlegierungen können zweckmäßiger Weise in zwei Gruppen eingeteilt werden, nämlich Legierungen auf Mg-Al-Basis und Legierungen auf Mg-Zr-Basis. Der bekannteste Vertreter der Mg-Al-Gruppe ist Legierung AZ91E, die aufgrund ihrer guten Vergießbarkeit und guter Korrosionsbe-

ständigkeit weit verbreitet ist. Diese Legierung weist allerdings oberhalb von 120°C eine verringerte Festigkeit und Kriechfestigkeit auf. Weiterhin weisen Gußstücke oft eine zutage tretende Mikroporosität mit der resultierenden fehlenden Dichtigkeit auf, und die mechanischen Eigenschaften der Legierung können mit der Querschnittsstärke abweichen. Die genannten, für Mg-Al-Legierungen charakteristischen Nachteile werden von Mg-Zr-Legierungen überwunden. Zirkon weist einen starken Kornverfeinernden Effekt auf Magnesium auf, was zu einer größeren Gußintegrität und verbesserten mechanischen Eigenschaften führt. Mg-Zr-Legierungen haben gleichmäßigere Eigenschaften bei kleinen und großen Querschnitten und neigen nicht zu zutage tretender wanddurchdringender Porosität, was den Austritt von Schmiermittel verhindert. Eine Anzahl von Legierungen ist entwickelt worden, die den einzigartigen Effekt von Zirkonium ausnutzt, wobei einige auf einer Mg-Zr-Zn-RE-Mischung (RE = rare earth elements = Seltenerdmetalle) beruhen, in denen RE im allgemeinen eine Mischung von Seltenerdmetallen mit Cer als Hauptbestandteil ist, und andere auf einer Mg-Zr-Nd-Ag-Mischung beruhen. Kommerzielle Magnesiumlegierungen der ersten Gruppe, wie ZE41 und EZ33, bieten eine moderate Festigkeit bei Raumtemperatur mit einem Erhalt der Eigenschaften bis zu Temperaturen von 150°C. Legierungen der letzteren Gruppe, wie QE22, können lösungsgeglüht und künstlich gealtert sein, um eine hohe Festigkeit sowohl bei Raumtemperatur als auch bei Temperaturen oberhalb von 150°C zu erhalten. Beide genannten Legierungsgruppen weisen jedoch eine schlechte Korrosionsbeständigkeit infolge des Zn-Anteils von 2–5% oder des Ag-Anteils von 1,5–2,5% auf. Zusätzlich ist Silber ein teures Element (teurer Rohstoff).

[0006] Bei dem Versuch bestehende Legierungen zu verbessern, ist Yttrium als ein Hauptlegierungselement eingeführt worden. Es wurde festgestellt, daß die Anwesenheit von Yttrium die Hochtemperatureigenschaften der Legierung erheblich verbessert. Das Britische Patent Nr. 1,463,609 beschreibt Legierungen auf Basis von Magnesium mit einem Gehalt von 2,5–7 Gew.-% Yttrium, 1,25–3 Gew.-% Silber, 0,5–3 Gew.-% Seltenerdmetallen, 0–1 Gew.-% Zirkon, 0–0,5 Gew.-% Zink, und wahlweise anderen Komponenten.

[0007] US 4,194,908 offenbart Legierungen auf Basis von Magnesium mit einem Gehalt von 0,1–2,5 Gew.-% Yttrium, 1,6–3,5 Gew.-% Silber, 0,1–2,3 Gew.-% Seltenerdmetallen, von denen mindestens 60% Neodym sind, und wahlweise andere Elemente. Das Patent zeigt, daß eine verbesserte Kriechfestigkeit bei höheren Temperaturen durch den Zusatz kleiner Mengen an Yttrium zu Magnesiumlegierungen, die Silber und Neodym enthalten, erhalten werden kann. Wenn der Yttrium-Gehalt kleiner als 0,5 Gew.-% ist, sollte Thorium ebenfalls vorhanden sein.

Thorium ist allerdings radioaktiv und seine Verwendung in Magnesiumlegierungen verboten. US 3,419,385 offenbart Legierungen auf Basis von Magnesium mit einem Gehalt von 0,2–10 Gew.-% Yttrium, 0,5–2 Gew.-% Silber, 0,1–6 Gew.-% Zink und gegebenenfalls Mangan und Zirkon. Die Legierungen gemäß dieser Erfindung sind vorwiegend für das Extrudieren vorgesehen. Beim Sandguß sind die Legierungen dieser Erfindung konventionellen Legierungen, wie QE22, unterlegen. US 4,116,731 beschreibt Legierungen auf Basis von Magnesium, die eine hohe Temperaturstabilität aufweisen, die wärmebehandelt und gealtert sind, und die ohne Silber auskommen, wobei die Legierungen einen Gehalt von 0,8–6 Gew.-% Yttrium, 0,5–4 Gew.-% Neodym, 0,1–2,2 Gew.-% Zink, 0,31–1,1 Gew.-% Zirkon, bis zu 0,05 Gew.-% Kupfer und bis zu 0,2 Gew.-% Mangan aufweisen, vorausgesetzt, daß nicht weniger als 50% des Gesamtanteils von Neodym- und Yttriumzusätzen nach Wärmebehandlung in die feste Lösung übergehen. US 4,401,621 beschreibt Legierungen auf Basis von Magnesium, die eine Yttriumkomponente von 1,5 bis 10%, von denen mindestens 60% Yttrium und der Rest schwere Seltenerdmetalle sind, eine Neodymkomponente von 1 bis 6%, von denen mindestens 60% Neodym sind, und gegebenenfalls andere Elemente, einschließlich bis zu 1% Silber, aufweisen. Die Legierungen des besagten Patents zeigen bessere Kriechfestigkeit als jede konventionelle Magnesiumlegierung, die Legierungen QE22, EZ33, ZE41 und ZC63 eingeschlossen, und weisen zusätzlich eine gute Korrosionsbeständigkeit auf. Der hohe Yttriumgehalt verteuert die Legierungen jedoch. Darüber hinaus zeigen diese Legierungen eine schlechtere Ver gießbarkeit, insbesondere Fließfähigkeit, da Yttrium die Viskosität des geschmolzenen Magnesiums erhöht.

[0008] Daher ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, Magnesiumlegierungen bereitzustellen, die für Langzeitanwendungen bei Temperaturen bis zu 250°C und Kurzzeitanwendungen bis zu 300°C geeignet sind und eine gute Ver gießbarkeit besitzen.

[0009] Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist, Legierungen auf der Basis von Magnesium bereitzustellen, die für Sandguß, Dauerformguß und direkt gekühltem Kokillenguß mit anschließendem Extrudieren oder/und Schmieden geeignet sind.

[0010] Es ist ebenfalls eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, Legierungen bereitzustellen, die für plastische Formgebungsverfahren wie Schmieden oder Extrudieren geeignet sind.

[0011] Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, Legierungen bereitzustellen, die eine herausragende Kombination von Festigkeit, Kriechfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit aufweisen.

[0012] Es ist eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, Legierungen bereitzustellen, die eine geringe Korrosionsermüdung aufweisen.

[0013] Es ist eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, Legierungen bereitzustellen, die zuvor benanntes Verhalten und Eigenschaften aufweisen, aber relativ geringe Kosten haben, insbesondere im Vergleich mit handelsüblichen Magnesiumlegierungen des Typs WE43 oder WE54.

[0014] Andere Aufgaben und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden im Laufe der Beschreibung ersichtlich werden.

Zusammenfassung der Erfindung

[0015] Die Erfindung gemäß Anspruch 1 betrifft Legierungen auf der Basis von Magnesium für Anwendungen bei so hohen Temperaturen wie 250–300°C, die gute mechanische Eigenschaften, gute Korrosionsbeständigkeit und gute Ver gießbarkeit aufweisen. Die besagten Legierungen enthalten mindestens 92 Gew.-% Magnesium, und 2,7–3,3 Gew.-% Neodym, 0,0–2,6 Gew.-% Yttrium, 0,2–0,8 Gew.-% Zirkon, 0,2–0,8 Gew.-% Zink, 0,03–0,25 Gew.-% Calcium und 0,00–0,001 Gew.-% Beryllium. Der Gehalt an Eisen, Nickel, Kupfer, Silicium überschreitet jeweils nicht 0,007 Gew.-%, 0,002 Gew.-%, 0,003 Gew.-% und 0,01 Gew.-%. Ein bevorzugtes Verhältnis von Yttrium- zu Neodymgehalt liegt zwischen 0,45 und 0,7, und ein bevorzugter Zirkongehalt wird gemäß folgender Gleichung berechnet:

$$1,3/(\text{Gew.-% Nd} + \text{Gew.-% Y}) \leq \text{Gew.-% Zr} \leq 0,6 \text{ Gew.-%}$$

[0016] Die Legierungen der vorliegenden Erfindung sind für Sandguß, Dauerformguß und direkt gekühlten Kokillenguß mit anschließendem Extrudieren oder/und Schmieden gut geeignet.

[0017] Die Erfindung betrifft weiterhin Produkte, die durch Guß oder Formgebung von Legierungen auf Magnesiumbasis hergestellt wurden, die die hier zuvor definierten Eigenschaften aufweisen.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0018] Die oben genannten und andere Merkmale und Vorteile der Erfindung werden leicht durch die folgenden Beispiele und unter Berücksichtigung der beiliegenden Zeichnungen ersichtlich werden, in denen:

[0019] **Fig. 1** eine Aufnahme zeigt, die den Ringtest demonstriert;

[0020] **Fig. 2** eine Aufnahme zeigt, die den Fließtest demonstriert;

[0021] **Fig. 3** Tabelle 1 zeigt, die die chemische Zusammensetzung von Legierungen der Beispiele 1–10 und der Vergleichsbeispiele 1–5 darstellt;

[0022] **Fig. 4** Tabelle 2 zeigt, die die Gußeigenschaften von Legierungen der Beispiele 1–10 und der Vergleichsbeispiele 1–5 darstellt;

[0023] **Fig. 5** Tabelle 3 zeigt, die die mechanischen Eigenschaften von Legierungen der Beispiele 1–10 und der Vergleichsbeispiele 1–5 darstellt;

[0024] **Fig. 6** Tabelle 4 zeigt, die die chemische Zusammensetzung von Legierungen der Beispiele 11–15 und der Vergleichsbeispiele 6–8 darstellt;

[0025] **Fig. 7** Tabelle 5 zeigt, die die mechanischen Eigenschaften von Legierungen der Beispiele 11–15 und der Vergleichsbeispiele 6–8 darstellt.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung

[0026] Es ist festgestellt worden, daß bestimmte Elementkombinationen in Legierungen auf der Basis von Magnesium, die Neodym, Yttrium, Zirkon, Zink und Calcium enthalten, den Legierungen überlegene Eigenschaften verleihen. Diese Eigenschaften umfassen gute Vergießbarkeit, exzellente Kriechfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit in Verbindung mit hoher Zug- und Druckfestigkeit bei Raumtemperatur und erhöhten Temperaturen von 200°C und 250°C.

[0027] Eine Legierung auf Magnesiumbasis der vorliegenden Erfindung enthält 2,7–3,3 Gew.-% Neodym. Ist der Neodymgehalt kleiner als 2,7 Gew.-%, besitzt die Legierung bei Raumtemperatur keine ausreichende Festigkeit. Andererseits führt ein Nd-Gehalt von mehr als 3,3 Gew.-% zur Versprödung der Legierung infolge eines Überschusses intermetallischer Verbindungen. Eine erfindungsgemäße Legierung enthält bis zu 2,6 Gew.-% Yttrium. Yttrium besitzt eine gute Löslichkeit in festen Lösungen auf Magnesiumbasis, die mit sinkender Temperatur abnimmt und infolgedessen eine Aushärtungs-Reaktion gestattet. Die Anwesenheit von Yttrium und Neodym in der Legierung führt zu einer merklichen Ausscheidungshärtung nach T6-Behandlung, die Behandlung der festen Lösung, Härten und Altern einschließt. Ein Yttriumgehalt von mehr als 2,6 Gew.-% kann zur Versprödung führen, ganz ungeachtet der erhöhten Kosten, da Yttrium ein teures Element ist. Die Legierung der vorliegenden Erfindung enthält auch Zirkon als einen einzigartigen Kornverfeinerer des Magnesiums. Zr begünstigt ebenfalls die Korrosionsbeständigkeit der Legierung und verhindert die Porosität in Gußstücken. Es ist festgestellt worden, daß 0,2 Gew.-% Zirkon zur Kornverfeinerung ausreichen. Die Obergrenze des Zirkongehalts liegt bei 0,8 Gew.-% aufgrund seiner begrenzten Löslichkeit in flüssigem Magnesium. Die erfindungsgemäße Legierung enthält

0,2–0,8 Gew.-% Zink, das ihr verbesserte Vergießbarkeit verleiht, insbesondere Fließfähigkeit. Bei einem höheren Zinkgehalt wird der Großteil des Y und Nd in einer stabilen eutektischen Zn-Y-Nd Intermetallverbindung gebunden, die in festem Magnesium unlöslich ist, und so die Reaktion der Legierung auf Alterung unterdrückt. Der Zinkgehalt ist vorzugsweise kleiner als 0,5 Gew.-%. Die erfindungsgemäßen Legierungen enthalten weiterhin Calcium in 0,03 Gew.-% bis 0,25 Gew.-% als Oxidationsinhibitor, wahlweise begleitet von bis zu 0,001 Gew.-% Beryllium. Der Calciumgehalt ist vorzugsweise kleiner als 0,15 Gew.-%, um so mögliche Porositätsprobleme zu vermeiden. Der Berylliumgehalt ist vorzugsweise kleiner als 0,0005 Gew.-%, um eine Kornvergrößerung zu vermeiden. Silizium ist eine typische Verunreinigung von für die Herstellung der Legierungen verwendetem Magnesium, sein Gehalt sollte jedoch 0,01 Gew.-% nicht überschreiten und vorzugsweise unter 0,007 Gew.-% liegen. Eisen, Kupfer und Nickel verringern die Korrosionsbeständigkeit der Magnesiumlegierungen. Die erfindungsgemäßen Legierungen enthalten daher nicht mehr als 0,007 Gew.-% Eisen, 0,003 Gew.-% Kupfer und 0,002 Gew.-% Nickel, und vorzugsweise weniger als 0,005 Gew.-% Eisen, 0,0015 Gew.-% Kupfer und 0,001 Gew.-% Nickel.

[0028] In einer bevorzugten Ausführung werden die Produkte durch Sandguß, Dauerformguß und direkt gekühlten Kokillenguß mit anschließenden plastischen Formgebungsverfahren wie Extrudieren oder/und Schmieden hergestellt.

[0029] Es wurde festgestellt, daß der Zirkongehalt im Idealfall 0,6 Gew.-% nicht übersteigt. Weiterhin wurde festgestellt, daß der optimale Zirkongehalt vom Neodym- und Yttriumgehalt abhängt. In einer bevorzugten Legierung gemäß der vorliegenden Erfindung entspricht der Zirkongehalt der folgenden Gleichung:

$$1,3/(\text{Gew.}\% \text{ Nd} + \text{Gew.}\% \text{ Y}) \leq \text{Gew.}\% \text{ Zr} \leq 0,6 \text{ Gew.}\%$$

[0030] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung enthält eine Legierung auf Basis von Magnesium 2,9–3,2 Gew.-% Nd, 1,9–2,1 Gew.-% Y, 0,3–0,5 Gew.-% Zr, 0,2–0,4 Gew.-% Zn, 0,03–0,12 Gew.-% Ca, 0,0–0,0003 Gew.-% Be, 0,0–0,005 Gew.-% Si, 0,0–0,005 Gew.-% Fe und 0,0–0,001 Gew.-% Cu.

[0031] Die Magnesiumlegierungen der vorliegenden Erfindung sind getestet und mit Vergleichsproben, die die weit verbreiteten, im Handel erhältlichen Legierungen auf Magnesiumbasis WE43, ZE41 und QE22 einschließen, verglichen worden. Die Legierungen wurden in einem 100 Liter Schmelztiegel aus kohlenstoffarmem Stahl hergestellt und in Blöcke zu 8 kg gegossen. Als Schutzatmosphäre wurde eine

Mischung aus CO₂ und 0,5% SF₆ benutzt. Die Blöcke aller neuen und Vergleichslegierungen wurden wieder eingeschmolzen und dauerformgegossen, wobei Barren mit 30 mm Durchmesser erhalten wurden, die zur Herstellung von Mustern für Zug-, Druck-, Ermüdungs-, Korrosions- und Kriechtests verwendet wurden.

[0032] Der Ringtest wurde zur Bewertung der Anfälligkeit für Schrumpfrisse benutzt. Ein weiterer Parameter zur Charakterisierung der Vergießbarkeit ist die Fließfähigkeit, d. h., die Fähigkeit des geschmolzenen Metalls, weiter zu fließen und enge Querschnitte der Form zu füllen, auch wenn es bereits abkühlt. Fließfähigkeitseigenschaften wurden unter Verwendung des Spiralförmtestes analysiert. Einige Legierungen wurden wieder eingeschmolzen und mit direkt gekühltem Kokillenguß in Barren mit 100 mm Durchmesser gegossen. Nach Entfernen der obersten Schicht wurden die Barren bei 500°C für 10 h geglüht und bei 450°C zu Rundbarren mit 30 mm Durchmesser extrudiert. Dauerformgegossene Legierungen wurden einer Wärmebehandlung unterzogen, um die bestmögliche Kombination mechanischer Eigenschaften zu erzielen. Zugfestigkeit (tensile yield strength, TYS), Zerreißfestigkeit (ultimate tensile strength, UTS), prozentuale Dehnung (percent elongation, % E) und Druckfestigkeit (compression yield strength, CYS) wurden anschließend bestimmt. Das Korrosionsverhalten wurde mit dem Immersions-Korrosionstest nach ASTM Standard G31-87 bestimmt. Ermüdungstests wurden unter Verwendung des Hochfrequenz-Resonanzverfahrens durchgeführt. Für Flugzeug- und Kraftfahrzeuganwendungen ist das Ermüdungsverhalten von Magnesiumlegierungen unter aggressiv korrosiven Bedingungen von besonderem Interesse. Es ist bekannt, daß handelsübliche Magnesium-Knetlegierungen für Korrosionsrisse anfällig sind. Daher wurden Dauertests sowohl an der Umgebungsluft als auch unter einem Spray aus 5%iger NaCl-Lösung (Korrosionsermüdungstest).

[0033] Die Ergebnisse zeigen, daß die neuen Legierungen eine bessere Fließfähigkeit und geringere Anfälligkeit für Warmrisse aufweisen als Vergleichslegierungen. Der Abbrand der neuen Legierungen ist ebenfalls geringer als für Vergleichslegierungen. Da die Legierungen ziemlich kostspielige Elemente enthalten, ist dieses ein sehr wichtiger Faktor.

[0034] Weder Verbrennen noch Oxidation konnten an der Oberfläche der aus den erfindungsgemäßen Legierungen hergestellten Blöcken beobachtet werden. Im Gegensatz dazu war die Herstellung von Vergleichslegierungen von einer starken Oxidation und unerwünschten Verlusten an Legierungselementen, insbesondere Yttrium, begleitet.

[0035] Die mechanischen Eigenschaften der Legie-

rungen der vorliegenden Erfindung weisen gleiche oder höhere Festigkeit auf als die handelsübliche Legierung WE43 (Vergleichsbeispiel 1) und QE22 (Vergleichsbeispiel 3). Alle neuen Legierungen sind allen anderen Vergleichslegierungen einschließlich ZE41 (Vergleichsbeispiel 2) hinsichtlich der Festigkeit überlegen. Die neuen Legierungen übertreffen die im Handel erhältlichen Legierungen auch in Dauerfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Der größte Vorteil der neuen Legierungen wurde jedoch bei der Durchführung der Zugfestigkeits- und Kriechfestigkeitstests bei höheren Temperaturen gefunden. Die neuen Legierungen zeigen eine gleiche oder höhere Zugfestigkeit (TYS) als Legierung WE43 und eine signifikant höhere als die anderen Vergleichslegierungen. Beim Kriechverhalten zeigen die Test, daß die Minimum-Kriechrate (MCR) der neuen Legierungen sowohl bei 200°C als auch bei 250°C wesentlich höher als der Vergleichslegierungen ist. Der Wert der MCR der erfindungsgemäßen Legierungen liegt um 2–3 Größenordnungen unter dem der handelsüblichen Legierungen ZE41 und QE22.

[0036] Die hervorragenden Eigenschaften der Legierungen gemäß der vorliegenden Erfindung über einen weiten Temperaturbereich, der Raumtemperatur, 200°C und 250°C umfaßt, macht sie für Daueranwendungen bis 250°C ebenso wie Kurzanwendungen bis 300°C geeignet.

[0037] Weiterhin zeigen die Legierungen der vorliegenden Erfindung eine überragende Korrosionsbeständigkeit. Die Werte der Korrosionsraten (CR) aller untersuchten erfindungsgemäßen Legierungen waren niedriger als die Werte der Korrosionsraten (CR) jeder Vergleichslegierung, in einigen Fällen sogar um eine Größenordnung.

[0038] Es wurde festgestellt, daß die neuen Legierungen optimale mechanische Eigenschaften nach einer beschleunigten T6-Wärmebehandlung erreichen können, die Lösungsglühen bei 520–560°C, vorzugsweise bei 540°C, für 2 bis 10 Stunden, vorzugsweise für 4 bis 6 Stunden, gefolgt von Abkühlen in einem Abschreckmittel und nachfolgender Alterung bei 240–260°C, vorzugsweise bei 250°C, für 0,5 bis 7 Stunden, vorzugsweise für 1 bis 5 Stunden, umfaßt, wobei sich Zugfestigkeit, Druckfestigkeit und Kriechfestigkeit nach der beschriebenen Behandlung erhöhen.

[0039] Die erfindungsgemäßen Legierungen wurden ebenfalls in einem direkt gekühlten Kokillenguß gegossen, extrudiert und mit Vergleichsbeispielen verglichen, eingeschlossen handelsüblicher ZK60-Knetlegierung zum Extrudieren und Schmieden. Die Testergebnisse zeigten, daß die neuen Legierungen eine geringfügig niedrigere Zug- (TYS) und Zerreißfestigkeit (UTS) als die ZK60-Legierung und bessere als andere Vergleichslegierungen auf-

weisen. Alle neuen Legierungen übertreffen die Vergleichsbeispiele jedoch wesentlich hinsichtlich Duktilität, Kerbschlagzähigkeit und Druckfestigkeit (CYS). Dauerfestigkeit und im besonderen Dauerfestigkeit in einer korrosiven Umgebung (Spray einer 5%igen wäßrigen NaCl-Lösung) ist für Knetlegierungen die wichtigste Eigenschaft, um sie für die Herstellung von Felgen von Oberklasse- und Sportwagen zu verwenden. Alle Beispiellegierungen gemäß der vorliegenden Erfindung besitzen eine Korrosions-Dauerfestigkeit, die besser ist als die der Vergleichslegierungen, wobei der Wert für die neuen Legierungen mehr als zweimal so groß ist wie für die konventionelle ZK60-Legierung.

[0040] Ausgehend von den oben genannten Ergebnissen betrifft die vorliegende Erfindung ebenfalls die aus den hier beschriebenen Magnesiumlegierungen hergestellten Produkte, wobei die Produkte eine verbesserte Festigkeit, Kriechfestigkeit bei Raumtemperatur und höheren Temperaturen und auch eine gute Korrosionsbeständigkeit besitzen, wobei die Produkte Bauteile von Kraftfahrzeug- oder Flugzeug-Bausystemen sind.

[0041] Die vorliegende Erfindung betrifft weiterhin Produkte, die einer beschleunigten T6-Wärmebehandlung unterzogen wurden, die Lösungsglühen bei 520–560°C, vorzugsweise bei 540°C, für 2 bis 10 Stunden, vorzugsweise für 4 bis 6 Stunden, gefolgt von Abkühlen in einem Abschreckmittel und nachfolgender Alterung bei 240–260°C, vorzugsweise bei 250°C, für 0,5 bis 7 Stunden, vorzugsweise für 1 bis 5 Stunden, umfaßt.

[0042] Im besonderen betrifft die vorliegende Erfindung Legierungen, die bei Raumtemperatur eine Zugfestigkeit von mehr als 180 MPa und bei 250°C eine Zugfestigkeit von mehr als 150 MPa aufweisen; Legierungen, die eine Minimum-Kriechrate (MCR) von weniger als $2,6 \times 10^{-9}$ /s bei 200°C unter einer Belastung von 150 MPa aufweisen; Artikel, die eine Minimum-Kriechrate (MCR) von weniger als $2,1 \times 10^{-9}$ /s bei 250°C unter einer Belastung von 60 MPa aufweisen. Die Erfindung betrifft ferner Legierungen, die eine durchschnittliche Korrosionsgeschwindigkeit, bestimmt nach dem Immersions-Korrosionstest gemäß ASTM Standard G31-87, von weniger als 0,55 mg/cm²/d aufweisen. Die Erfindung betrifft weiterhin aus diesen Legierungen hergestellte Produkte.

[0043] Die vorliegende Erfindung stellt somit Legierungen bereit, die für Anwendungen bis zu so hohen Temperaturen wie 250°C bis 300°C geeignet sind, ebenso wie aus diesen Legierungen hergestellte Produkte.

[0044] Die Erfindung wird in den folgenden Beispielen weiter beschrieben und veranschaulicht werden.

Beispiele

Allgemeine Verfahrensvorschrift

[0045] Die Legierungen der vorliegenden Erfindung wurden in einem 100 l Schmelztiegel aus kohlenstoffarmem Stahl hergestellt. Eine Mischung aus CO₂ und 0,5% SF₆ wurde als Schutzgasatmosphäre verwendet. Es wurden folgende Rohstoffe eingesetzt:

- Magnesium: Reines Magnesium, Grade 9980A, Magnesiumgehalt mindestens 99,8%.
- Zink: Handelsübliches reines Zink (weniger als 0,1% Verunreinigungen).
- Neodym: Handelsübliches reines Neodym (weniger als 0,5% Verunreinigungen).
- Zirkon: Zr95-Pellets mit einem Zirkongehalt von min. 95%.
- Yttrium: Handelsübliches reines Yttrium (weniger als 1% Verunreinigungen).
- Calcium: Mg-30% Ca-Vorlegierung.
- Beryllium: als Na₂BeF₄.

[0046] Zink wurde dem geschmolzenen Magnesium während des Schmelzheizens in einem Temperaturbereich von 740°C bis 770°C zugesetzt. Intensives Rühren für 2–5 Minuten war zum Lösen dieses Elements im geschmolzenen Magnesium hinreichend. Neodym, und Zirkon wurden üblicherweise zwischen 770°C–780°C zugesetzt. Besondere Chargenvorbereitung in Form kleiner Stücke und intensives Rühren der Schmelze für 15–20 Minuten wurden genutzt, um die Auflösung dieser Elemente im geschmolzenen Magnesium zu beschleunigen und ihren Wiederfindungsgrad zu maximieren. Nach der Zirkonzugabe wurde die Schmelze für 20–40 Minuten ruhen gelassen, um Eisen absetzen zu lassen. Yttrium (falls erforderlich) wurde nach dem Absetzen des Eisens ohne intensives Rühren zugegeben, um die Bildung von Y-Fe-Intermetallverbindungen zu verhindern, die einen übermäßigen Yttriumverlust verursachen. Es wurde während des Legierens für eine genaue Temperaturregelung gesorgt, um sicherzustellen, daß die Schmelztemperatur 785°C nicht übersteigt und so eine übermäßige Kontamination mit Eisen aus den Tiegelwänden zu vermeiden; und um sicherzustellen, daß die Schmelztemperatur nicht unter 765°C fällt, um so einen übermäßigen Zirkonverlust zu vermeiden. Calcium und Beryllium wurden vor dem Absetzen zugesetzt.

[0047] Nach Erhalt der geforderten Zusammensetzungen wurden die Legierungen für 30–60 Minuten zur Homogenisierung und zum Absetzen des Eisens und nichtmetallischer Einschlüsse gehalten und dann in 8 kg-Blöcke gegossen. Der Guß wurde unter Schutz einer Gasatmosphäre aus CO₂ mit 0,5% SF₆ über dem geschmolzenen Metall während der Erstarrung in den Formen ausgeführt. Die Blöcke aller neuen und Vergleichslegierungen wurden dann wieder eingeschmolzen und in Stangen mit 30 mm Durch-

messer dauerformgegossen, die für die Herstellung von Mustern für die Zugfestigkeits-, Druckfestigkeits-, Dauer-, Korrosions- und Kriechtest verwendet wurden.

[0048] Der Ringtest wurde angewandt, um die Anfälligkeit für Schrumpfrisse zu ermitteln. Die Tests wurden unter Verwendung eines Matrizenstahls mit einem inneren zulaufenden Stahlkern (Scheibe) mit variablem Durchmesser ([Fig. 1](#)) durchgeführt. Der Kerndurchmesser kann von 30 mm bis 100 mm in Schritten von 5 mm variieren. Die Muster besitzen die Form eines flachen Rings mit einem Außendurchmesser von 110 mm und einer Stärke von 5 mm. Der Ringdurchmesser wird von 40 mm auf 5 mm in 2,5 mm-Schritten verändert. Die Anfälligkeit für Schrumpfrisse wurde über den minimalen Ringdurchmesser, der ohne Auftreten von Schrumpfrissen gegossen werden kann, ermittelt. Je kleiner dieser Wert ist, desto kleiner ist die Anfälligkeit für Schrumpfrisse.

[0049] Fließfähigkeitstests sind für die Simulation des tatsächlichen Gußverfahrens verwendbar und werden für die vergleichende Beurteilung der Ver gießbarkeit der Legierung eingesetzt. Fließfähigkeitseigenschaften wurden unter Verwendung des Spiralformtests ([Fig. 2](#)) untersucht.

[0050] Verschiedene Legierungen in Barrenform wurden wieder eingeschmolzen und als direkt gekühlter Kokillenguß in Rohlinge mit 100 mm Durchmesser gegossen. Nach Entfernen der Oberfläche wurden die Rohlinge bei 500°C für 10 Stunden geglüht. Die Rohlinge wurden anschließend bei 450°C zu Stangen mit 30 mm Durchmesser extrudiert. Dauerformgegossenen Legierungen wurden einer Wärmebehandlung unterzogen und die optischen und mechanischen Eigenschaften überprüft. Es wurde festgestellt, daß die neuen Legierungen optimale mechanische Eigenschaften nach beschleunigter T6-Wärmebehandlung entwickeln können, die Lösungsglühen bei 520–560°C, vorzugsweise bei 540°C, für 2 bis 10 Stunden, vorzugsweise für 4 bis 6 Stunden, gefolgt von Abkühlen in verschiedenen Abschreckmitteln, von Wasser bis zu ruhender Umgebungsluft, und nachfolgender Alterung bei 240–260°C, vorzugsweise bei 250°C, für 0,5 bis 7 Stunden, vorzugsweise für 1 bis 5 Stunden, umfaßt.

[0051] Zug- und Druckfestigkeitstest bei Raumtemperatur und höheren Temperaturen wurden mittels einer Instron 4483 Anlage, ausgestattet mit einer Hochtemperaturkammer, durchgeführt. Zugfestigkeit (TYS), Zerreißfestigkeit (UTS), prozentuale Dehnung (% E) und Druckfestigkeit (CYS) wurden bestimmt. Die Satec Model M3 Anlage wurde für die Kriechfestigkeitstest benutzt. Kriechtests wurden bei 200°C und bei 250°C für 200 Stunden unter verschiedenen Belastungen durchgeführt. Die Kriechfestigkeit wur-

de ausgehend vom Wert der Minimum-Kriechrate (MCR) und der Zeitstandfestigkeit abgeschätzt. Zeitstandfestigkeit wird im allgemeinen als die Belastung definiert, die erforderlich ist, um ein bestimmtes Maß an Kriechverformung in einer bestimmten Zeit und bei gegebener Temperatur zu erzeugen. Es ist gängige Praxis, die Zeitstandfestigkeit als die Belastung anzugeben, die 0,2% Kriechdehnung bei einer gegebenen Temperatur in 100 Stunden erzeugt. Von Konstrukteuren wird dieser Parameter genutzt, um das Belastungsvermögen eines Materials für eine begrenzte Kriechdehnung über einen längeren Zeitraum zu beurteilen. Das Korrosionsverhalten wurde durch den Immersions-Korrosionstest nach ASTM Standard G31-87 bewertet. Dieser Test besteht aus einer 72-stündigen natürlichen, den Laborumgebungsbedingungen bei 35°C ausgesetzten Tauchung in 5%iger NaCl-Lösung. Die Muster wurden in zylindrische Stangen mit einer Länge von 100 mm und einem Durchmesser von 10 mm geformt. Die Probestücke wurden in Aceton entfettet und vor der Tauchung in der Testlösung gewogen. Fünf Muster jeder Legierung wurden getestet. Am Ende des Tests wurden die Korrosionsprodukte in einer Chromsäurelösung (180 g CrO₃ pro Liter Lösung) bei 80°C über 3 Minuten entfernt und der Gewichtsverlust bestimmt. Der Gewichtsverlust wurde benutzt, um die durchschnittliche Korrosionsgeschwindigkeit in mg/cm²/d zu ermitteln. Dauerfestigkeitstests wurden unter Verwendung des Hochfrequenz-Resonanz-Verfahrens durchgeführt. Bei diesem Verfahren werden die Muster zu longitudinalen Resonanzschwingungen bei Ultraschallfrequenzen von ca. 20 kHz angeregt. Dieses führt zu sinusförmigen Wechselbeanspruchungen mit einer maximalen Belastungsamplitude in der Mitte des Musters. Hierzu wurden Muster mit einem Kerndurchmesser von 4 mm verwendet. Die Muster wurden ausgehend von 10⁹ Cyclen mit einem Spannungsverhältnis von R = -1 getestet. Für Luftfahrt- und Krafffahrzeuganwendungen ist die Dauerfestigkeit von Magnesiumlegierungen unter aggressiv korrosiven Bedingungen von besonderem Interesse. Es ist bekannt, daß handelsübliche Magnesium-Knetlegierungen für Korrosionsrisse anfällig sind. Daher wurden die Dauerfestigkeitstests sowohl an der Umgebungsluft als auch unter einem Spray einer 5%igen wäßrigen NaCl-Lösung (Korrosionsermüdungstest) durchgeführt.

Beispiele 1–10 und Vergleichsbeispiele 1–5

[0052] Die Tabellen 1–3 veranschaulichen die chemische Zusammensetzung und Eigenschaften der erfindungsgemäßen Legierungen und der Legierungen der Vergleichsbeispiele. Die Vergleichsbeispiele 1, 2 und 3 sind die entsprechenden handelsüblichen Legierungen auf Magnesiumbasis WE43, ZE41 und QE22. Die Ergebnisse der Ver gießbarkeits-Tests sind in Tabelle 2 aufgelistet. Es ist offensichtlich, daß die neuen Legierungen eine bessere Fließfähigkeit

(größere Spiralenlänge) und geringere Anfälligkeit für Warmrisse (geringerer Ringdurchmesser) als die Vergleichslegierungen aufweisen. Der Abbrand der neuen Legierungen ist ebenfalls geringer als der der Vergleichslegierungen. Dieses ist ein sehr wichtiger Faktor, da sowohl die neuen als auch die Vergleichslegierungen verhältnismäßig teure Elemente wie Ag, Y, Nd, Zr und Seltenerdmetalle enthalten. Die mechanischen Eigenschaften dauerformgegossener Legierungen gemäß der vorliegenden Erfindung und der Vergleichslegierungen werden in Tabelle 3 dargestellt. Alle neuen Legierungen sind den Vergleichslegierungen hinsichtlich der Festigkeit überlegen. Dauerfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit der neuen Legierungen übertreffen ebenso die Eigenschaften der Vergleichslegierungen. Tabelle 3 zeigt, daß die Zugfestigkeit (TYS) der neuen Legierungen bei 250°C gleich oder höher der von der WE43-Legierung und deutlich höher als die der anderen Vergleichslegierungen ist.

[0053] Ein großer Vorteil der Legierungen der vorliegenden Erfindung ist ferner ersichtlich, wenn sie hinsichtlich ihres Kriechverhaltens mit den handelsüblichen Legierungen verglichen werden. Tabelle 3 zeigt, daß die erfindungsgemäßen Legierungen WE43 bei beiden Temperaturen mit einer Minimum-Kriechrate (MCR), die so niedrige Werte wie $1,8 \times 10^{-9}$ /s bei 250°C/60 MPa erreichen kann, übertreffen können. Die Werte der Minimum-Kriechrate (MCR) der neuen Legierungen sind im Vergleich zu den handelsüblichen Verbindungen ZE41 und QE22 sowohl bei 200°C als auch bei 250°C um zwei bis drei Größenordnungen niedriger. Der MCR-Wert einer erfindungsgemäßen Legierung aus Beispiel 8 beträgt zum Beispiel $1,8 \times 10^{-9}$ /s bei 250°C verglichen mit 2124×10^{-9} /s für die Legierung ZE41.

Beispiele 10–15 und Vergleichsbeispiele 6–8

[0054] Fünf Legierungen in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung wurden als direkt gekühlter Kokillenguß gegossen, extrudiert und wie oben beschrieben untersucht. Drei Vergleichslegierungen wurden entsprechend mit dem gleichen Verfahren hergestellt und zu Vergleichszwecken benutzt. Die chemische Zusammensetzung der besagten Legierungen ist in Tabelle 4 gelistet. Vergleichsbeispiel 6 ist die handelsübliche Knetlegierung ZK60 zum Extrudieren und Schmieden. Tabelle 5 veranschaulicht, daß die neuen Legierungen bessere Zugfestigkeit (TYS) und Reißfestigkeit (UTS) als die Legierungen der Vergleichsbeispiele 7 und 8 aufweisen und hinsichtlich dieser Eigenschaften nur geringfügig schlechter sind als die ZK60-Legierung. Die neuen Legierungen übertreffen jedoch deutlich alle Legierungen der Vergleichsbeispiele in Duktilität, Kerbschlagzähigkeit und Druckfestigkeit (CYS). Die Dauerfestigkeit und insbesondere die Dauerfestigkeit in einer korrosiven Umgebung (Spray einer 5%igen

wäßrigen NaCl-Lösung) ist für Knetlegierungen die wichtigste Eigenschaft, um sie für die Herstellung von Felgen von Oberklasse- und Sportwagen zu verwenden. Wie aus Tabelle 5 ersichtlich, besitzen die neuen Legierungen der vorliegenden Erfindung eine Korrosionsdauerfestigkeit, die mehr als zweimal so hoch ist wie die der herkömmlichen Legierung ZK60 (Vergleichsbeispiel 6), und auch den anderen Vergleichslegierungen hinsichtlich der Dauerfestigkeitseigenschaften überlegen ist.

[0055] Während die vorliegende Erfindung unter Verwendung einiger spezifischer Beispiele beschrieben worden ist, sind zahlreiche Modifikationen und Variationen möglich. Es ist daher selbstverständlich, daß innerhalb des Anwendungsbereichs der begleitenden Ansprüche die Erfindung in anderer Weise als speziell beschrieben ausgeführt werden kann.

Patentansprüche

1. Legierung auf Basis von Magnesium, welche
 - a) mindestens 92 Gew.-% Magnesium,
 - b) 2,7–3,3 Gew.-% Neodym,
 - c) 0,0–2,6 Gew.-% Yttrium,
 - d) 0,2–0,8 Gew.-% Zirkonium,
 - e) 0,2–0,8 Gew.-% Zink,
 - f) 0,03–0,25 Gew.-% Calcium,
 - g) 0,00–0,001 Gew.-% Beryllium
 enthält und wahlweise außerdem bis zu 0,007 Gew.-% Eisen, bis zu 0,002 Gew.-% Nickel, bis zu 0,003 Gew.-% Kupfer und bis zu 0,01 Gew.-% Silicium, Rest Magnesium mit unwesentlichen Verunreinigungen.
2. Legierung nach Anspruch 1, die 0,2–0,5 Gew.-% Zn und 0,03–0,15 Gew.-% Ca enthält.
3. Legierung nach Anspruch 1, die 2,9–3,2 Gew.-% Nd, 1,9–2,1 Gew.-% Y, 0,3–0,5 Gew.-% Zr, 0,2–0,4 Gew.-% Zn und 0,03–0,12 Gew.-% Ca enthält.
4. Legierung nach Anspruch 1, die weniger als 0,005 Gew.-% Eisen, weniger als 0,001 Gew.-% Nickel, weniger als 0,0015 Gew.-% Kupfer, weniger als 0,007 Gew.-% Silicon und weniger als 0,0005 Gew.-% Beryllium enthält.
5. Legierung nach Anspruch 1, die 0,00–0,0003 Gew.-% Be, 0,00–0,005 Gew.-% Si und 0,00–0,001 Gew.-% Cu enthält.
6. Legierung nach Anspruch 1, in der das Verhältnis des Y-Gehalts zum Nd-Gehalt bei 0–0,8 liegt.
7. Legierung nach Anspruch 1, in der das Verhältnis des Y-Gehalts zum Nd-Gehalt bei 0,45–0,70 liegt.
8. Legierung nach Anspruch 1, in der der Zr-Ge-

halt vom gesamten Nd + Y-Gehalt gemäß der folgenden Gleichung abhängt:

$$1,3/(\text{Nd Gew.}\% + \text{Y Gew.}\%) \leq \text{Zr Gew.}\% \leq 0,6 \text{ Gew.}\%$$

9. Legierung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, die eine Erhöhung der Zugfestigkeit, der Druckfestigkeit und der Kriechfestigkeit nach beschleunigter T6-Wärmebehandlung aufweist, welche eine Wärmebehandlung der festen Lösung bei 520–560°C für 2–10 Stunden umfasst, mit anschließendem Abkühlen in einem Abschreckmittel und anschließender Alterung bei 240–260°C für 0,5–7 Stunden.

10. Legierung nach Anspruch 9, die eine Erhöhung der Zugfestigkeit, der Druckfestigkeit und der Kriechfestigkeit nach beschleunigter T6-Wärmebehandlung aufweist, welche eine Wärmebehandlung der festen Lösung bei 540°C für 4–6 Stunden umfasst, mit anschließendem Abkühlen in einem Abschreckmittel und anschließender Alterung bei 250°C für 1–5 Stunden.

11. Legierung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, deren Zugfestigkeit bei Umgebungstemperatur bei über 180 MPa und bei 250°C bei über 150 MPa liegt.

12. Legierung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, deren minimale Kriechrate unter $2,6 \cdot 10^{-9}/\text{s}$ bei 200°C bei einer Belastung von 150 MPa liegt.

13. Legierung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, deren Kriechrate unter $2,1 \cdot 10^{-9}/\text{s}$ bei 250°C bei einer Belastung von 60 MPa liegt.

14. Legierung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, bei der die durchschnittliche Korrosionsrate, gemessen durch Immersionskorrosionstest mittels ASTM Standard G31-87, unter $0,55 \text{ mg/cm}^2/\text{Tag}$ liegt.

15. Legierung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, die für Verwendungen bei Temperaturen bis zu 250°C geeignet ist.

16. Legierung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, die für Verwendungen bei Temperaturen bis zu 300°C geeignet ist.

17. Produkt, das ein Guss einer Magnesiumlegierung nach einem der Ansprüche 1 bis 16 ist.

18. Produkt nach Anspruch 17, bei dem der Guss aus der Gruppe gewählt ist, die aus Sandguss, Dauerformguss und direkt gekühltem Kokillenguss mit anschließendem Extrudieren oder/und Schmieden besteht.

19. Produkt, das hergestellt wird durch Gießen oder Formen einer Legierung nach einem der An-

sprüche 1 bis 16.

20. Produkt nach Anspruch 19, das hergestellt wird durch direkt gekühlten Kokillenguss mit anschließenden plastischen Formgebungsverfahren wie Extrudieren und Schmieden.

21. Produkt nach Anspruch 17, das einer beschleunigten T6-Wärmebehandlung unterzogen wurde, welche eine Wärmebehandlung der festen Lösung bei 520–560°C für 2–10 Stunden umfasst, mit anschließendem Abkühlen in einem Abschreckmittel und anschließender Alterung bei 240–260°C für 0,5–7 Stunden.

22. Produkt nach Anspruch 21, das einer beschleunigten T6-Wärmebehandlung unterzogen wurde, welche eine Wärmebehandlung der festen Lösung bei 540°C für 4–6 Stunden umfasst, mit anschließendem Abkühlen in einem Abschreckmittel und anschließender Alterung bei 250°C für 1–5 Stunden.

23. Produkt nach einem der Ansprüche 17 bis 22, das für Verwendungen bei Temperaturen bis zu 250°C geeignet ist.

24. Produkt nach einem der Ansprüche 17 bis 22, das für Verwendungen bei Temperaturen bis zu 300°C geeignet ist.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

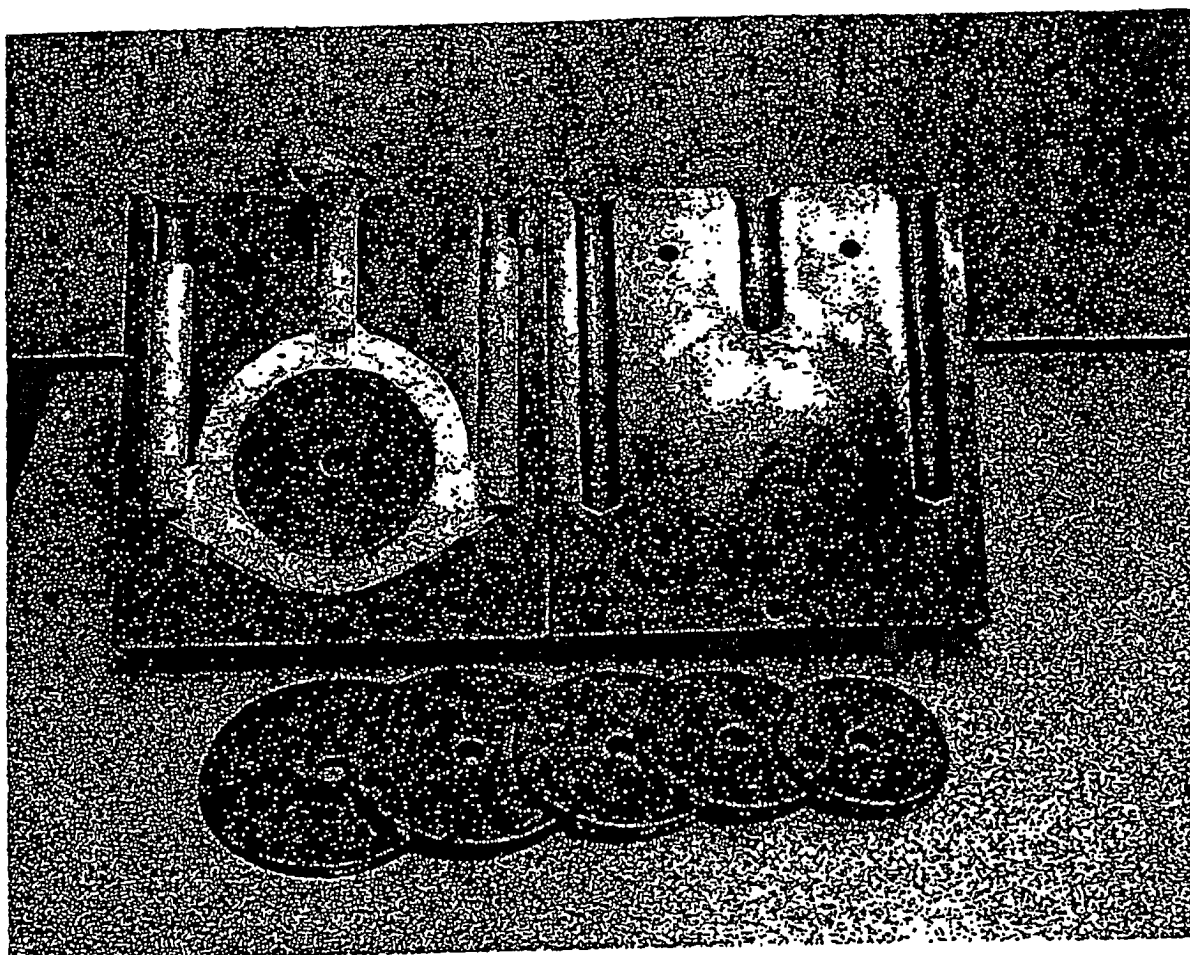


Fig. 1

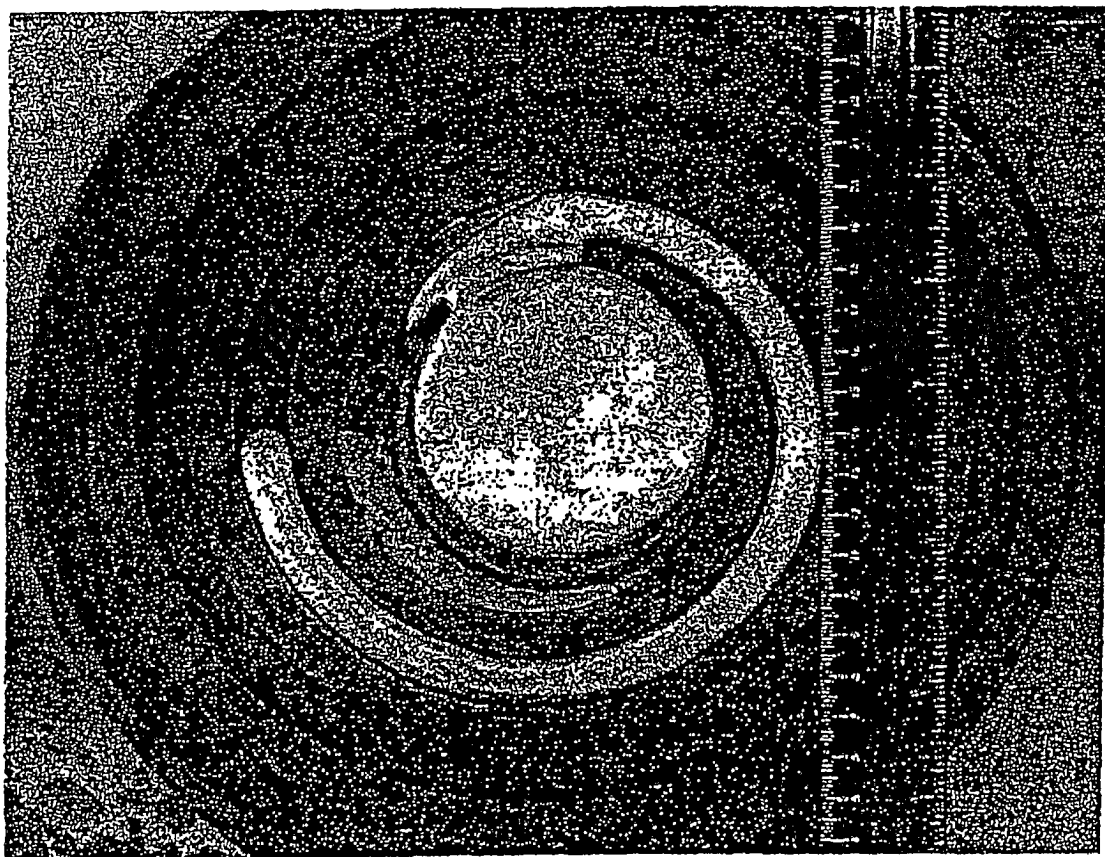


Fig. 2

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzungen der Legierungen

Legierung	Nd %	Y %	Zr %	Zn %	Ca %	Be %	Si %	Fe %	Cu %	Ni %
Beispiel 1	2,8	-	0,48	0,32	0,05	0,0005	0,007	0,004	0,001	0,001
Beispiel 2	3,0	0,15	0,44	0,25	0,1	-	0,005	0,005	0,001	0,001
Beispiel 3	2,9	0,25	0,55	0,34	0,07	-	0,006	0,004	0,001	0,001
Beispiel 4	2,9	0,5	0,42'	0,37	0,06	-	0,003	0,003	0,001	0,001
Beispiel 5***	3,1	1	0,33	0,41	0,04	0,003	0,008	0,004	0,001	0,001
Beispiel 6	3,2	1,6	0,29	0,35	0,04	-	0,006	0,004	0,001	0,001
Beispiel 7	2,9	2,1	0,48	0,23	0,03	-	0,008	0,005	0,001	0,001
Beispiel 8***	3,1	2,4	0,45	0,29	0,17	-	0,005	0,04	0,001	0,001
Beispiel 9	3,0	2,3	0,24	0,42	0,04	0,0004	0,006	0,006	0,001	0,001
Beispiel 10	3,2	1,9	0,35	0,36	0,12	0,0003	0,006	0,005	0,001	0,001
Vergleichsbeispiel 1	2,6*	4,1	0,45	-	-	-	0,0008	0,008	0,002	0,001
Vergleichsbeispiel 2	1,5**	-	0,45	4,1	-	-	0,0008	0,014	0,002	0,001
Vergleichsbeispiel 3	2,1	2,4 Gew.-% Silber	0,42	-	-	-	0,009	0,017	0,007	0,002
Vergleichsbeispiel 4	2,2	2,3	0,45	0,1	0,04	-	0,006	0,005	0,007	0,001
Vergleichsbeispiel 5	2,3	3,6	0,35	0,8	0,03	-	0,007	0,004	0,006	0,001

* Die Mischung aus 2,2 Gew.-% Nd und 0,4 Gew.-% schwerer Seltenerdmetalle (0,15 Gew.-% Gd + 0,10 Gew.-% Dy + 0,08 Gew.-% Er + 0,07 Gew.-% Yt)

** Cer-Mischmetall

*** Außerhalb des Bereichs der Ansprüche

Fig. 3

Tabelle 2: Vergießbarkeit

Legierung	Spirallänge [mm]	Ringdurchmesser [mm]	Abbrand [mm]
Beispiel 1	200	12,5	2,1
Beispiel 2	210	12,5	2,0
Beispiel 3	205	12,5	1,9
Beispiel 4	215	12,5	2,0
Beispiel 5	220	15	1,8
Beispiel 6	225	12,5	1,8
Beispiel 7	225	12,5	1,9
Beispiel 8	220	15	1,9
Beispiel 9	215	15	2,1
Beispiel 10	225	12,5	1,9
Vergleichsbeispiel 1	185	20	3,9
Vergleichsbeispiel 2	195	30	4,9
Vergleichsbeispiel 3	165	25	4,2
Vergleichsbeispiel 4	200	17,5	3,0
Vergleichsbeispiel 5	190	20	3,5

Fig. 4

Tabelle 3: Mechanische Eigenschaften der neuen Legierungen

Legierung	Zugfestigkeit (TYS) [MPa]		Zerreifestig keit (UTS) [MPa]	E [%]	Dauerfestig keit [MPa]	Minimum-Kriechrate (MCR) * 10 ⁻⁹ [s ⁻¹]		Belastung [MPa] zur Erzeugung einer 0,2%igen Kriechdehnung		CR [mg/cm ² /d]
	20°C	250°C				200°C 150MPa	250°C 60MPa	200 °C	250 °C	
Beispiel 1	155	130	260	8	100	6,2	2,9	110	40	0,43
Beispiel 2	157	135	258	7	105	6	2,8	112	40	0,45
Beispiel 3	158	135	262	6	108	5,4	2,4	120	42	0,51
Beispiel 4	162	137	261	7	110	4,1	2,4	135	57	0,37
Beispiel 5	167	137	262	6	115	3,1	2,2	145	62	0,41
Beispiel 6	175	145	264	7	118	2,9	2	150	68	0,44
Beispiel 7	190	160	265	7	120	2,4	1,9	162	75	0,38
Beispiel 8	192	159	260	6	119	2,5	1,8	160	73	0,34
Beispiel 9	194	163	264	6	122	2,6	1,9	165	77	0,29
Beispiel 10	195	162	263	6	121	2,5	2	167	77	0,37
Vergleichsbei spiel 1	185	150	250	5	105	2,6	2,3	160	60	0,57
Vergleichsbei spiel 2	140	55	205	4	90	1518	2124	50	20	5,9
Vergleichsbei spiel 3	188	115	255	3	100	545	385	83	31	7,7
Vergleichsbei spiel 4	135	120	245	6	92	7,9	2,5	110	58	0,59
Vergleichsbei spiel 5	150	135	250	4	112	3,1	2,1	120	67	0,64

Fig. 5

Tabelle 4 Chemische Zusammensetzungen der Legierungen

Legierung	Nd %	Y %	Zr %	Zn %	Ca %	Be %	Si %	Fe %	Cu %	Ni %
Beispiel 11*	2,9	0,2	0,45	0,37	0,03	0,002	0,004	0,003	0,001	0,001
Beispiel 12*	2,8	0,55	0,42	0,51	-	-	0,005	0,004	0,001	0,001
Beispiel 13	2,9	1,2	0,38	0,22	0,05	-	0,004	0,004	0,001	0,001
Beispiel 14*	3	1,8	0,41	0,28	0,02	0,003	0,006	0,004	0,001	0,001
Beispiel 15	3,2	2	0,28	0,42	0,03	-	0,006	0,004	0,001	0,001
Vergleichsbei spiel 6	-	-	0,58	5,3	-	-	0,009	0,009	0,003	0,001
Vergleichsbei spiel 7	2,2	1,9	0,47	0,29	-	-	0,007	0,006	0,001	0,001
Vergleichsbei spiel 8	2,5	3,7	0,41	-	-	-	0,006	0,005	0,001	0,001

* Außerhalb des Bereichs der Ansprüche

Fig. 6

Tabelle 5: Mechanische Eigenschaften der neuen Legierungen

Legierung	Zugfestigkeit (TYS) [MPa]		Zerreifestig keit (UTS) [MPa]	E [%]	Kerbschlag zhigkeit [J]	Dauerfestigkeit [MPa]	
						Luft	5%ige NaCl-Lsg.
Beispiel 11	180	270	19	185	65	110	66
Beispiel 12	190	280	18	192	63	112	70
Beispiel 13	210	285	17	215	62	114	72
Beispiel 14	220	290	17	225	60	116	74
Beispiel 15	225	294	15	228	58	120	76
Vergleichsbei spiel 6	240	330	16	190	45	108	26
Vergleichsbei spiel 7	155	250	12	160	52	95	52
Vergleichsbei spiel 8	178	265	12	180	50	107	59

Fig. 7