



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 60 2004 010 459 T2 2008.11.13**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 493 517 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **60 2004 010 459.0**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **04 253 919.7**

(96) Europäischer Anmeldetag: **30.06.2004**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **05.01.2005**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **05.12.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **13.11.2008**

(51) Int Cl.⁸: **B22F 9/10 (2006.01)**

B22F 3/115 (2006.01)

B22D 13/08 (2006.01)

C22C 1/10 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

613908 03.07.2003 US

(73) Patentinhaber:

General Electric Co., Schenectady, N.Y., US

(74) Vertreter:

Rüger und Kollegen, 73728 Esslingen

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB

(72) Erfinder:

**Huang, Shyh-Chin, Latham, New York 12110, US;
Subramanian, Pazhayannur R., Niskayuna, New
York 12309, US; Zabala, Robert J., Schenectady,
New York 12303, US; Petterson, Roger J.,
Guilderland, New York 12084, US; Ott, Eric A.,
Cincinnati, Ohio 45241, US; Gowda, Srinivasa R.,
Cincinnati, Ohio 45236, US**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung von mit Nanopartikeln verstärkten Materialien sowie hergestellte Formkörper**

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

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich allgemein auf ein Verfahren zum Bilden Dispersions-verfestigter Materialien. Mehr im Besonderen bezieht sich diese Erfindung auf ein Verfahren zum Dispergieren von Nanoteilchen innerhalb eines Flüssigphasen-Materials, wie eines geschmolzenen Metalles, das bei der Erstarrung einen Körper mit einer gleichmäßigen Dispersion der Nanoteilchen ergibt.

[0002] Dispersions-verfestigte Phasen, die in metallischen Systemen relativ stabil sind, sind für eine Vielfalt struktureller Anwendungen von Interesse. Der potente Verfestigungseffekt von AlN-Ausscheidungen in massiven β -NiAl-Legierungen und des Oxid-dispersions-Verfestigungs (ODS) in Superlegierungen wurde demonstriert. Beispiele der Letzteren schließen kommerziell erhältliche MA754- und MA6000-Legierungen ein. Um ein genügendes Niveau des Dispersions-verfestigungs zu liefern, müssen feine Dispersoid-Teilchen (wie Oxide, Nitride usw.) in einer Volumenfraktion und Verteilung derart vorhanden sein, dass die mittlere freie Weglänge zwischen Teilchen genügend gering ist, um die Versetzungsbewegungen zu verzögern. Das Einbringen einer relativ gleichmäßigen feinen Dispersion kleiner Dispersoid-Teilchen in ein Grundmetall ist jedoch schwierig, insbesondere wenn die Größe der Teilchen verringert ist. Im Besonderen neigen Teilchen von Nanogröße (die eine Abmessung von weniger als ein μm aufweisen) aufgrund des Unterschiedes in der Dichte zwischen den Nanoteilchen und dem geschmolzenen Material zum Agglomerieren und sich nicht in einem geschmolzenen Metallbad zu vermischen. Als ein Resultat ist es außerordentlich schwierig, dass Nanoteilchen, die anfänglich in einem geschmolzenen Metall dispergiert sind, während der Erstarrung so eingefangen werden, dass sie in dem erstarrten Metall gleichmäßig dispergiert sind. Eine signifikant ungleichmäßige Verteilung des Dispersoids ergibt keine optimale mechanische Leistungsfähigkeit.

[0003] Zwei Verfahren zum Erzeugen von ODS-Nanoteilchen-Materialien haben kommerzielle Anwendung gefunden, die beide eine Behandlung des Metalles in festem Zustand einschließen. Das häufiger benutzte Verfahren ist ein mechanisches Legierungsverfahren, das eine kontrollierte Oxidation von Metallpulver einschließt, dessen Oxid-Oberflächenschicht durch Kugelmahlen zerbrochen und im übrigen Metallpulver verteilt wird. Dieses Verfahren kann bei Umgebungs-, erhöhten oder kryogenen Temperaturen ausgeführt werden, was von der Art des eingesetzten Grundmaterials und der Art des hergestellten Dispersions-verfestigten Materials abhängt. Ein Nachteil des mechanischen Legierungsverfahrens sind die Kosten, die sich aus den vielen Stunden des Mahlens mit hoher Energie ergeben, das zum Disper-

gieren der Nanoteilchen erforderlich ist. Das zweite kommerzielle Verfahren zum Erzeugen von ODS-Materialien schließt die interne Oxidation und Ausfällung von Oxidteilchen aus einer übersättigten Metallmatrix ein. Dieses Verfahren ist jedoch effektiv auf die Anwendung bei Metallsystemen beschränkt, die gelöste Elemente mit hoher thermodynamischer Stabilität von Oxiden und genügend Kombinationen von Sauerstoff-Diffusionsvermögen und Sektionsdicken aufweisen, um effektiv eine genügend gleichmäßige Dispersion zu produzieren. Jede der obigen verfügbaren Techniken zum Herstellen Dispersions-verfestigter Materialien hat auch signifikante Verfahrens-Beschränkungen, die aus der Notwendigkeit resultieren, das Dispersoid eher im festen als im flüssigen Zustand zu produzieren.

[0004] In Anbetracht des Obigen wäre es erwünscht, wenn alternative Verfahren verfügbar wären, mit denen Materialien, die mit Nanoteilchen-Materialien Dispersions-verfestigt sind, aus dem geschmolzenen Zustand hergestellt werden könnten. Es wäre besonders erwünscht, wenn ein solches Verfahren Gebrauch machen würde von einer weiten Vielfalt von Kombinationen Dispersions-verfestigender Phasen und Matrix-Materialien und durch Nanoteilchen Dispersions-verfestigte Materialien in verschiedenen Formen produzieren würde, einschließlich fein zerteilter und massiver Formen.

[0005] Die vorliegende Erfindung liefert ein Verfahren zum Bilden eines Dispersions-verfestigten Materials, enthaltend Nanoteilchen (Teilchen von Nanogröße), die in einer Matrixphase im Wesentlichen gleichmäßig dispergiert sind. Das Verfahren schließt das Hinzugeben von Nanoteilchen zu einem Bad eines geschmolzenen Materials innerhalb eines Behälters ein, der rotiert, um eine Wirbelkonvektion in dem Bad zu erzeugen. Der Konvektionswirbel genügt, um das Einlagern der Nanoteilchen in dem geschmolzenen Material zu verursachen, um ein geschmolzenes Verbundmaterial mit einer gleichmäßige Dispersion der Nanoteilchen zu ergeben, und verursacht weiter, dass das geschmolzene Verbundmaterial aus dem Behälter ausgestoßen wird. Das geschmolzene Verbundmaterial wird nach dem Ausstoßen aus dem Behälter rasch abgekühlt, sodass der feste Verbundkörper gebildet wird, der die Nanoteilchen gleichmäßig dispergiert in einer erstarrten Matrixphase umfasst.

[0006] Gemäß einem Aspekt der Erfindung erstarrt das geschmolzene Verbundmaterial unter Bildung des festen Verbundkörpers durch Kontaktieren einer Oberfläche (z. B. einer Form) nach dem Ausstoßen aus dem Behälter. Auf diese Weise wird das geschmolzene Verbundmaterial effektiv direkt auf die Oberfläche zentrifugal schleudergeworfen. Ist die Oberfläche die einer geeignet konfigurierten Form, dann kann der resultierende feste Verbundkörper ein Körper nahe der Endgestalt, eine Vorform oder ein

Walzprodukt (z. B. eine Bramme, Platte oder ein Ring) sein. Gemäß einem anderen Aspekt der Erfindung erstarrt das geschmolzene Verbundmaterial im Flug nach dem Ausstoßen aus dem Behälter derart, dass das geschmolzene Verbundmaterial in fein zerteilter Form zentrifugal schleudergeworfen ist, wie Pulverteilchen, Flocken, Drähte oder Bänder. Irgendeine oder mehrere dieser fein zerteilten Formen kann durch thermomechanische Techniken (z. B. Heißpressen, Sintern, Heiß isostatisches Pressen, Extrusion, Schmieden usw.) zu massiven Komponenten nahe der Endgestalt, Vorformen oder Walzproduktformen konsolidiert werden, die gut dispergierte Nanoteilchen enthalten. Unabhängig davon, ob es die Absicht ist, einen Dispersions-verfestigten festen Verbundkörper in massiver oder fein zerteilter Form zu produzieren, dient das zentrifugale Mischen der Nanoteilchen in das geschmolzene Material dem gleichmäßigen Dispergieren der Nanoteilchen und die rasche Erstarrung des resultierenden geschmolzenen Verbundmaterials, initiiert durch das zentrifugale Ausstoßen aus dem Mischbehälter, sichert, dass die Nanoteilchen während der Erstarrung im Wesentlichen gleichmäßig dispergiert bleiben, so dass die Nanoteilchen auch in dem resultierenden festen Verbundkörper gleichmäßig dispergiert sind.

[0007] In Anbetracht des Obigen ist ersichtlich, dass es ein signifikanter Vorteil dieser Erfindung ist, dass sie ein Verfahren bereitstellt, mit dem mittels Nanoteilchen Dispersions-verfestigte Materialien in einer fein zerteilten oder massiven Form zu geringeren, Kosten als konventionelle mechanisch legierte ODS-Materialien hergestellt werden können. Wenn in massiver Form, können die Dispersions-verfestigten Materialien direkt als Komponenten nahe ihrer Endgestalt, Vorformen oder massive Produkte produziert werden, wodurch die Kosten der Konsolidierung, maschinellen Bearbeitung und anderer Operationen vermieden oder zumindest vermindert werden. Die Art der Dispersions-verfestigten Phase ist nur durch die Verfügbarkeit und Verträglichkeit mit der Matrixphase beschränkt. Matrixmaterialien, die bei dem Verfahren dieser Erfindung eingesetzt werden können, schließen Phasen-Zusammensetzungen ein, die von einer konventionelleren gegossenen oder gegossen und gekneteten Art sind, ebenso wie signifikant höher legierte Matrix-Zusammensetzungen, die nur durch rasche Erstarrungstechniken effektiv produziert werden können. Rasche Erstarrungsraten, die mit dem Verfahren dieser Erfindung möglich sind, ermöglichen auch das Dispersions-Verfestigen einer Vielfalt hochfester Matrixmaterialien. Zusätzlich können geeignete Abscheidungs-Bedingungen angewendet werden, sodass die Matrixphase bei einer genügend raschen Rate erstarrt, um eine ultrafeine Korngröße oder Phasen mit ultrafeinen Korngrößen zu haben, einschließlich amorpher Mikrostrukturen und solcher von Nanogröße. Die vorliegende Erfindung bietet auch die Option zum Produzieren massiver Produkt-

formen mit einem abgestuften Dispersoid-Abstand und einer abgestuften Volumenfraktion in irgendeiner gegebenen Richtung durch Variieren der Rate, in der die Nanoteilchen zu dem geschmolzenen Material hinzugegeben werden.

[0008] Die Erfindung wird nun detaillierter beispielhaft unter Bezugnahme auf die Zeichnung beschrieben, in der:

[0009] [Fig. 1](#) schematisch eine erste zentrifugale Schleuderguss-Operation dieser Erfindung repräsentiert, mit der fein zerteilte feste Verbundkörper hergestellt werden, die jeweils eine gleichmäßige Dispersion von Nanoteilchen enthalten,

[0010] [Fig. 2](#) schematisch eine zweite zentrifugale Schleuderguss-Operation dieser Erfindung repräsentiert, mit der ein massiv abgeschiedener fester Verbundkörper produziert wird, der eine gleichmäßige Dispersion von Nanoteilchen enthält.

[0011] [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) repräsentieren schematisch zwei Techniken dieser Erfindung, mit der Dispersions-verfestigte Materialien produziert werden, wobei das Dispersionsverstärkungs-Material Dispersoid-Teilchen (Nanoteilchen) von Nanogröße einschließt oder vollständig daraus gebildet ist. In der in [Fig. 1](#) repräsentierten Ausführungsform werden Nanoteilchen **12** und ein geschmolzenes Material **14** in separaten Strömen zur Bildung eines Bades **16** aus geschmolzenem Verbundmaterial **18** zugeführt, das in einem Tiegel **10** enthalten ist. Während die Nanoteilchen **12** und das geschmolzene Material **14** zu dem Bad **16** hinzugefügt werden, wird der Tiegel **10** durch Rotieren um seine vertikale Achse, wie durch Montieren des Tiegels auf einem (nicht gezeigten) Schleuderpodest, geschleudert. Wie der Fachmann weiß, hängen Tiegelmateriale, Tiegelkonstruktionen und für diesen Zweck geeignete Ausrüstung von Art und Menge der eingesetzten Materialien ab.

[0012] Der Tiegel **10** wird mit einer genügenden Rate geschleudert, sodass die durch das mit Nanoteilchen gefüllte geschmolzene Verbundmaterial **18** auf die Wand des Tiegels **10** ausgeübte Zentrifugalkraft einen Konvektionswirbel **20** innerhalb des Bades **16** verursacht, was das Eintauchen und Mischen der Nanoteilchen **12** in das geschmolzene Material **14** verursacht und danach die Nanoteilchen **12** als eine gleichmäßige Dispersion innerhalb des geschmolzenen Materials **14** hält. Die Wand des Tiegels **10** ist mit ein oder mehreren Öffnungen (Düsen) **22** ausgerüstet, sodass die durch das Bad **16** ausgeübte Zentrifugalkraft auch das Ausstoßen des geschmolzenen Verbundmaterials **18** aus dem Tiegel **10** durch eine oder mehrere der Öffnungen **22** verursacht. In [Fig. 1](#) wird der Tiegel **10** gedreht, sodass das geschmolzene Verbundmaterial **18** als fein zerteilte Tröpfchen ausgestoßen wird, die rasch unter

Bildung fester Verbundkörper **24** (schematisch in [Fig. 1](#) dargestellt) erstarren, die jeweils eine im Wesentlichen gleichmäßige Dispersion von Nanoteilchen **12** enthalten. Für diesen Zweck können die Öffnungen eine geeignete Größe und Gestalt für das jeweilige geschmolzene Verbundmaterial **18**, das behandelt wird, haben, sodass die festen Verbundkörper **24** von einer erwünschten Größe und Form sind. So kann, z. B., die geringste Abmessung eines Körpers **24** in der Größenordnung von etwa 0,02 mm bis etwa 2 mm liegen und er kann in Form von Pulverteilchen, Flocken, Drähten, Bändern usw. vorliegen. Feste Verbundkörper **24** in irgendeiner oder mehreren dieser Formen können danach durch Konsolidierung unter Anwendung im Stande der Technik bekannter Verfahren, wie thermomechanischen Prozessen, die die Körper **24** unter Druck und bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes der festen Matrixphase (oder Phasen), die durch das geschmolzene Material **14** gebildet werden, schmelzen (sintern) in massive Form gebracht werden.

[0013] Bei der Herstellung fein zerteilter Teilchen, Flocken, Drähte, Bänder und anderer ähnlicher Materialien werden Behandlungs-Bedingungen derart genutzt, dass das geschmolzene Verbundmaterial **18** nach dem Ausstoßen aus den Öffnungen **22** (im Fluge) rasch erstarrt, um die Nanoteilchen **12** in einer rasch erstarrten Matrixphase einzufangen. Im Gegensatz dazu repräsentiert [Fig. 2](#) eine Ausführungsform bei der ein Teil oder das gesamte geschmolzene Verbundmaterial **18**, das aus dem Tiegel **10** ausgestoßen wird, auf eine Form **28** gerichtet wird, um direkt ein erstarrtes massives Verbundmaterial **30** auf einer Oberfläche der Form **28** abzuschneiden. Das geschmolzene Verbundmaterial **18** ist in [Fig. 2](#) als ein aus einer der Öffnungen **22** ausgestoßener Strom **26** gezeigt, obwohl das massive Verbundmaterial **30** aus Tröpfchen **34** abgeschieden werden könnte, die in [Fig. 2](#) als aus einer zweiten Öffnung **22** ausgestoßen gezeigt sind. Der Strom **26** oder die Tröpfchen **34** des Verbundmaterials **18** können vollständig flüssig oder, bevorzugter, in einer halbfesten Form in dem Moment vorliegen, in dem sie sich auf der Form **28** abscheiden, woraufhin das Material **18** aufgrund der thermischen Leitung zur Form **28** rasch erstarrt. Während eine Form **28** schematisch in [Fig. 2](#) dargestellt ist, könnten der Strom **26** oder Tröpfchen **34** auf irgendeiner Oberfläche abgeschieden werden, die für die speziellen Umstände als geeignet angesehen wird.

[0014] In Abhängigkeit von der benutzten Art der Form **28** (oder anderen Oberfläche), kann das massive Material **30** zur Bildung einer Komponente nahe der Endgestalt, einer Vorform, die danach unter Bildung einer Komponente bearbeitet werden kann, oder eines Walzproduktes, wie einer Bramme, Platte oder eines Ringes, die danach weiter bearbeitet werden können (z. B. geschmiedet, maschinell bearbei-

tet, überzogen, Wärmebehandlung usw.) abgeschieden werden, um eine erwünschte Komponente zu erzeugen. Weiter kann die Form **28** (oder andere Oberfläche) die Gestalt eines Zylinders oder einer Platte haben, die vertikal oder horizontal aufgestellt bzw. montiert werden und die gedreht oder einer Translationsbewegung unterworfen werden kann, um die Größe des abgeschiedenen Bereiches zu vergrößern. Wie in [Fig. 2](#) impliziert, kann der Behälter **10** vertikal betätigt werden, um das Verbundmaterial **18** über eine vertikale Länge der Form **28** abzuschneiden. Die Dicke des massiven Materials **30** an einer gegebenen Stelle auf der Form **28** kann durch geeignetes Kontrollieren der Zeitdauer, während der das Verbundmaterial **18** an dieser Stelle abgeschieden wird, eingestellt werden. Darüber hinaus kann das massive Material **30** derart abgeschieden werden, dass es eine abgestufte Dispersoid-Volumenfraktion und einen Abstand in einer Dickenrichtung davon aufweist, indem man die relativen Raten ändert, bei denen die Nanoteilchen **12** und geschmolzenes Material **14** zu dem Bad **16** hinzugegeben werden.

[0015] Mit jeder der in [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) abgebildeten Ausführungsformen kann der Tiegel **10** mit einer Druckeinheit **32** ausgerüstet sein, um das Ausstoßen des geschmolzenen Verbundmaterials **18** zu unterstützen, einschließlich eines Regulierens der Rate, mit der das geschmolzene Verbundmaterial **18** aus einer Öffnung **22** einer gegebenen Größe ausgestoßen wird. Druck kann bei einem im Wesentlichen konstanten Niveau angewendet werden, um das Ausstoßen des Materials **18** in einem kontinuierlichen Strom (**26** in [Fig. 2](#)) oder impulsförmig zu fördern, um das Aufbrechen des Materials **18** zu Tröpfchen (**24** und **34** in [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#)) zu unterstützen. Das Pulsieren kann auch benutzt werden, um zu verursachen, dass das Verbundmaterial **18** intermittierend und selektiv in einer speziellen Richtung aus dem Tiegel **10** ausgestoßen wird, sodass das Material **18** selektiv auf der Form **28** (oder einer oder mehreren zusätzlichen Oberflächen) abgeschieden wird. Mit geeignet großen Öffnungen **22**, z. B., können Druckimpulse innerhalb des Behälters **10** der [Fig. 2](#) benutzt werden, um selektiv den Strom **26** auf die Form **28** zu dirigieren, wie auf der linken Seite der [Fig. 2](#) dargestellt. Alternativ können andere Impulsbedingungen benutzt werden, um Tröpfchen **34** zu erzeugen, wie auf der rechten Seite von [Fig. 2](#) abgebildet.

[0016] Die in dieser Erfindung eingesetzten Nanoteilchen **12** können eine Vielfalt von Größen und Zusammensetzungen haben. Der Konvektionswirbel **20**, der in dem Tiegel **10** aufrechterhalten wird, ist in der Lage, Teilchen außerordentlich geringer Größe zu dispergieren, sodass Nanoteilchen, so klein wie etwa 10 nm, relativ gleichförmig dispergiert werden können. Teilchengrößen innerhalb eines Bereiches von etwa 10 bis etwa 100 nm sind von besonderem

Interesse vom Standpunkt der Verarbeitbarkeit und des Verfestigens. Geeignete Zusammensetzungen für die Nanoteilchen schließen Oxide, Carbide, Nitride, Oxycarbide, Oxynitride, Carbonitride, Boride, Phosphide, intermetallische Verbindungen und komplexe Kombinationen solcher Bestandteile ein, die während der Zeit, in der die Nanoteilchen **12** in Kontakt mit dem geschmolzenen Material **14** innerhalb des Bades **16** und der erstarrten Matrixphase der erstarrten Körper **24** und des massiven Materials **30** stehen, besonders stabil sind, sodass die Nanoteilchen keiner beträchtlichen Änderung in Quantität, Chemie oder Größe unterliegen. Weil sie nicht in situ gebildet werden, können die Nanoteilchen **12** Verbindungen von Elementen sein, die sich von denen unterscheiden, die im geschmolzenen Material **14** vorhanden ist, mit dem die Teilchen **12** kombiniert werden.

[0017] Es kann eine weite Vielfalt von Matrixmaterialien mit dieser Erfindung eingesetzt werden, einschließlich konventionell gegossener und gegossen-und-gekneteter Metalllegierungen, Legierungen, die früher nur durch Pulvermetallurgie-Techniken produziert wurden, und Legierungen, die früher nur unter Anwendung konventioneller rascher Erstarrungs(RS)-Techniken produziert wurden. Solche Materialien schließen, ohne Beschränkung, Aluminium, Nickel, Cobalt, Eisen, Magnesium, Titan, Kupfer und ihre Legierungen ein. Mit dieser Erfindung erzielbare Kühlraten können größer sein als bei vielen konventionellen Gießtechniken, was die Produktion fester Körper **24** und massiver Materialien **30** möglich macht, die feinere produzierte Matrixkorngrößen (z. B. Nanogröße) aufweisen, als dies mit Techniken nach dem Stande der Technik zum Dispergieren von Nanoteilchen in einer Matrixphase möglich war. Dieser Aspekt der Erfindung kann auch die Verwendung eines höheren Gehaltes an Matrix-Legierungselement gestatten, sodass ein zusätzliches Ausscheidungs-Verfestigen während des Kühlens oder nachfolgenden thermischen Behandelns in der Matrixphase auftritt.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen eines festen Materials (**24**, **30**, **34**), enthaltend eine Dispersion von Nanoteilchen, wobei das Verfahren die Stufen umfasst: Hinzugeben von Nanoteilchen (**12**) und eines geschmolzenen Materials (**14**) zu einem Behälter (**10**), um ein Bad (**16**) innerhalb des Behälters (**10**) zu bilden und Rotieren des Behälters (**10**), um einen Konvektionswirbel (**20**) in dem Bad (**16**) zu erzeugen, wobei der Konvektionswirbel (**20**) verursacht, dass die Nanoteilchen (**12**) in das geschmolzene Material (**14**) eingelagert werden, um ein geschmolzenes Verbundmaterial (**18**) zu ergeben, wobei der Konvektionswirbel (**20**) weiter verursacht, dass das geschmolzene Verbundmaterial (**18**) aus dem Behälter (**10**)

ausgestoßen wird, und dann Abkühlen des geschmolzenen Verbundmaterials (**18**) zum Bilden eines festen Verbundkörpers (**24**, **30**, **34**), der die Nanoteilchen (**12**) gleichförmig dispergiert in einer Matrixphase umfasst.

2. Verfahren nach Anspruch 1, worin die Nanoteilchen (**12**) mit dem geschmolzenen Material (**14**) und der Matrixphase des festen Verbundkörpers (**24**, **30**, **34**) nicht reagieren, so dass die Nanoteilchen (**12**) während der Zugabe- und Kühlstufen keiner wesentlichen Änderung in Menge, Chemie und Größe unterliegen.

3. Verfahren nach Anspruch 1, worin die Nanoteilchen (**12**) aus mindestens einem Material gebildet sind, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Oxiden, Carbiden, Nitriden, Oxycarbiden, Oxynitriden, Carbonitriden, Boriden, Phosphiden, intermetallischen Verbindungen und komplexen Kombinationen davon.

4. Verfahren nach Anspruch 1, worin das geschmolzene Material (**14**) mindestens ein Material umfasst, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Aluminium, Nickel, Cobalt, Eisen, Magnesium, Titan und Kupfer.

5. Verfahren zum Herstellen eines festen Materials (**30**), enthaltend eine Dispersion von Nanoteilchen (**12**), wobei das Verfahren die Stufen umfasst: Hinzugeben von Nanoteilchen (**12**) und eines geschmolzenen Materials (**14**) zu einem Behälter (**10**), um ein Bad (**16**) innerhalb des Behälters (**10**) zu bilden und Rotieren des Behälters (**10**) um eine vertikale Achse davon, um einen Konvektionswirbel (**20**) in dem Bad (**16**) zu erzeugen, wobei der Konvektionswirbel (**20**) verursacht, dass die Nanoteilchen (**12**) in das geschmolzene Material (**14**) eingelagert werden, um ein geschmolzenes Verbundmaterial (**18**) zu ergeben, wobei der Konvektionswirbel (**20**) weiter verursacht, dass das geschmolzene Verbundmaterial (**18**) aus dem Behälter (**10**) ausgestoßen wird, und dann

Abscheiden des ausgestoßenen geschmolzenen Verbundmaterials (**18**) auf einer Form (**28**), wo das ausgestoßene geschmolzene Verbundmaterial (**18**) unter Bildung eines festen Verbundkörpers (**30**), der die Nanoteilchen (**12**) im Wesentlichen gleichförmig dispergiert in einer Matrixphase umfasst, erstarrt; wobei die Nanoteilchen (**12**) mit dem geschmolzenen Material (**14**) und der Matrixphase des festen Verbundkörpers (**30**) nicht reagieren, sodass die Nanoteilchen (**12**) während der Zugabe- und Kühlstufen keiner wesentlichen Änderung in Menge, Chemie und Größe unterliegen.

6. Verfahren nach Anspruch 5, worin die Nanoteilchen (**12**) aus mindestens einem Material gebildet sind, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Oxi-

den, Carbiden, Nitriden, Oxycarbiden, Oxynitriden, Carbonitriden, Boriden, Phosphiden, intermetallischen Verbindungen und komplexen Kombinationen davon.

7. Verfahren nach Anspruch 5, worin das geschmolzene Material (**14**) mindestens ein Material umfasst, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Aluminium, Nickel, Cobalt, Eisen, Magnesium, Titan und Kupfer.

8. Verfahren zum Herstellen eines festen Materials (**24, 34**), das eine Dispersion von Nanoteilchen (**12**) enthält, wobei das Verfahren die Stufen umfasst: Hinzugeben von Nanoteilchen (**12**) und eines geschmolzenen Materials (**14**) zu einem Behälter (**10**), um ein Bad (**16**) innerhalb des Behälters (**10**) zu bilden und Rotieren des Behälters (**10**) um eine vertikale Achse davon, um einen Konvektionswirbel (**20**) in dem Bad (**16**) zu erzeugen, wobei der Konvektionswirbel (**20**) verursacht, dass die Nanoteilchen (**12**) in das geschmolzene Material (**14**) eingelagert werden, um ein geschmolzenes Verbundmaterial (**18**) zu ergeben, wobei der Konvektionswirbel (**20**) weiter verursacht, dass das geschmolzene Verbundmaterial (**18**) aus dem Behälter (**10**) ausgestoßen wird, und dann

Erstarrenlassen des geschmolzenen Verbundmaterials (**18**) beim Herausfliegen aus dem Behälter (**10**) zur Bildung einer Vielzahl fester Verbundkörper (**24, 34**), wobei jeder feste Verbundkörper (**24, 34**) die Nanoteilchen (**12**) gleichförmig dispergiert in einer Matrixphase umfasst;

wobei die Nanoteilchen (**12**) mit dem geschmolzenen Material (**14**) und der Matrixphase des festen Verbundkörpers (**24, 34**) nicht reagieren, sodass die Nanoteilchen (**12**) während der Zugabe- und Kühlstufen keiner wesentlichen Änderung in Menge, Chemie und Größe unterliegen.

9. Verfahren nach Anspruch 8, worin die Nanoteilchen (**12**) aus mindestens einem Material gebildet sind, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Oxiden, Carbiden, Nitriden, Oxycarbiden, Oxynitriden, Carbonitriden, Boriden, Phosphiden, intermetallischen Verbindungen und komplexen Kombinationen davon.

10. Verfahren nach Anspruch 8, worin das geschmolzene Material (**14**) mindestens ein Material umfasst, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Aluminium, Nickel, Cobalt, Eisen, Magnesium, Titan und Kupfer.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

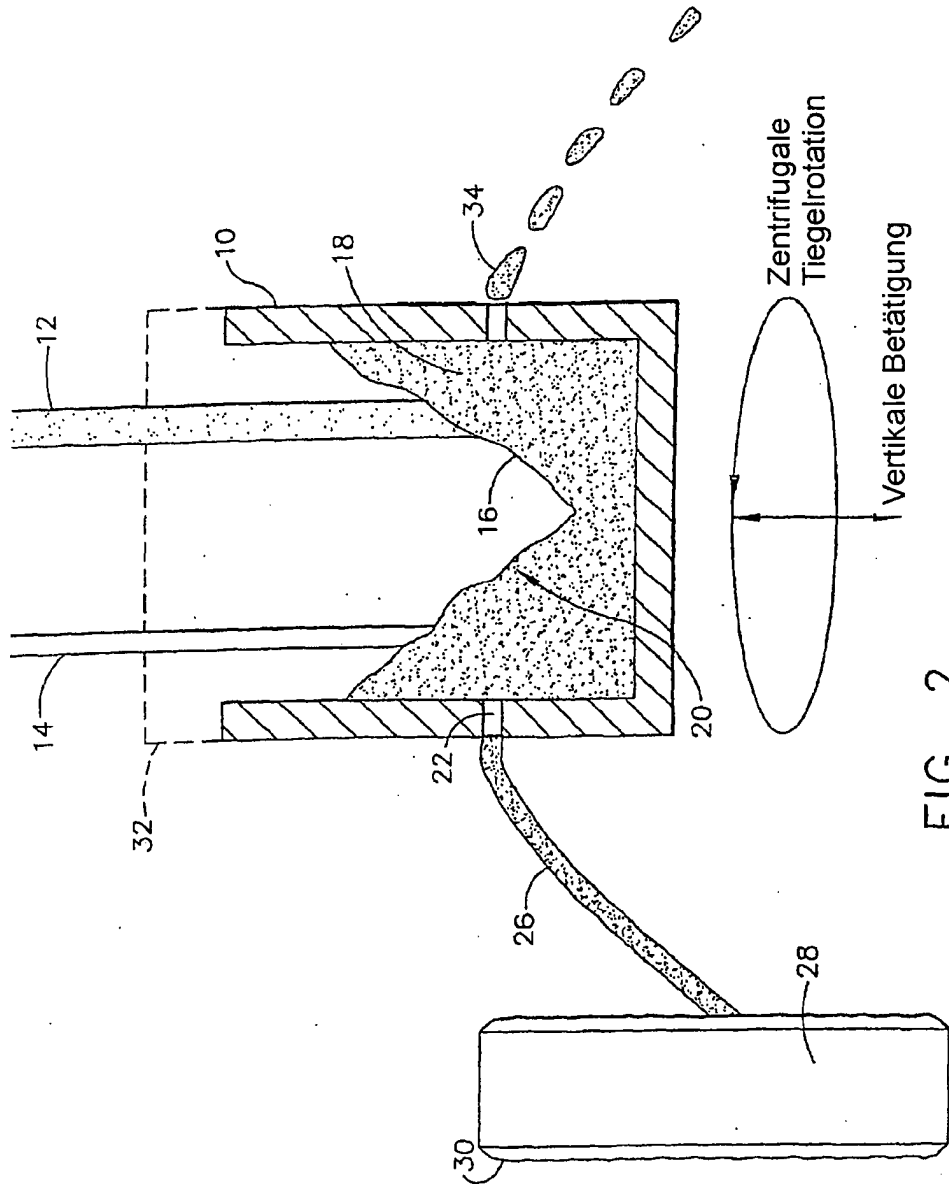


FIG. 2