



(11) **EP 1 685 263 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
23.07.2008 Patentblatt 2008/30

(51) Int Cl.:
C22C 1/00 (2006.01) C22C 47/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **03773705.3**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2003/012352

(22) Anmeldetag: **05.11.2003**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2005/052199 (09.06.2005 Gazette 2005/23)

(54) **VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG EINES BAUTEILS MIT METALLISCHER MATRIX UND VERSTÄRKUNG DURCH FASERN ODER PARTIKEL**

METHOD FOR PRODUCING A COMPONENT PROVIDED WITH A METAL MATRIX AND A FIBRE OR PARTICLE REINFORCEMENT

PROCEDE DE PRODUCTION D'UN COMPOSANT A MATRICE METALLIQUE ET A RENFORCEMENT PAR DES FIBRES OU DES PARTICULES

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IT LI LU MC NL PT RO SE SI SK TR

- **MESSMER, Günther**
78589 Dürbheim (DE)
- **SIEGERT, Klaus**
71063 Sindelfingen (DE)

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
02.08.2006 Patentblatt 2006/31

(74) Vertreter: **Gahlert, Stefan et al**
Witte, Weller & Partner,
Patentanwälte,
Postfach 105462
70047 Stuttgart (DE)

(73) Patentinhaber: **UNIVERSITÄT STUTTGART**
CENTER OF COMPETENCE FOR
CASTING & THIXOFORGING
70174 Stuttgart (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
US-A- 6 135 195 US-A- 6 151 198

(72) Erfinder:

- **GADOW, Rainer**
84544 Anschau am Inn (DE)
- **SPEICHER, Marcus**
66127 Saarbrücken (DE)
- **VON NIESSEN, Konstantin**
71384 Weinstadt (DE)
- **UNSELD, Peter**
88677 Markdorf (DE)

- **S.W. YOUN, C.G. KANG, P.K. SEO: "Mechanical characteristics evaluation of hollow shape part with metal matrix composites fabricated by thixoforging process" JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, Bd. 130, 2002, Seiten 574-580, XP002277297**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 1 685 263 B1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Bauteils aus einem Verbundwerkstoff (MMC) mit einem metallischen Matrixwerkstoff, der durch eingelagerte Fasern oder Partikel verstärkt ist, umfassend die folgenden Schritte:

- Herstellen eines Halbzeuges, in dem die Fasern oder Partikel und der metallische Matrixwerkstoff enthalten sind und
- Thixoomformen des Halbzeuges in einem Werkzeug bei einer Temperatur oberhalb der Solidustemperatur und unterhalb der Liquidustemperatur des metallischen Matrixwerkstoffes.

[0002] Ein derartiges Verfahren ist aus der US-A-6 151 198 bekannt.

[0003] Bei dem bekannten Verfahren werden partikelverstärkte Halbzeuge mit einer thixoformbaren Metallmatrix hergestellt und dann durch Thixoformen zu endkonturnah geformten Teilen umgeformt.

[0004] Ein ähnliches Verfahren ist aus der US-A-6 135 195 bekannt.

[0005] Aus S.W. Youn et al., "Mechanical characteristics evaluation of hollow shape part with metal matrix composites fabricated by thixoforging process" in Journal of Materials Processing Technology, Bd. 130, 2002, S. 574-580, XP002277297 ist ferner das Thixoformen von SiC-verstärkten Halbzeugen bekannt.

[0006] Die Notwendigkeit, primäre Energieträger einzusparen und Emissionen zu reduzieren, lässt dem Leichtmetallwerkstoff im Automobilbau und in der Luft- und Raumfahrttechnologie eine immer größere Bedeutung zukommen. Der Einsatz von MMC-Werkstoffen (Metal Matrix Composites) bzw. die Einlagerung hochfester Verstärkungsfasern kann die für viele Anwendungen mangelnde Hochtemperaturfestigkeit und Steifigkeit dieser Werkstoffe erhöhen. Zusätzlich sollen durch kurze Fertigungszyklen und die Herstellung endabmessungsnaher Bauteile ("net shape forming") die Fertigungskosten reduziert werden.

[0007] Im Stand der Technik führt die Einlagerung von faserförmigen Verstärkungskomponenten zu einer signifikanten Erhöhung der Herstellkosten. Zudem verhindert die mangelnde Beständigkeit der in Frage kommenden Fasertypen gegenüber den chemisch aggressiven Metallschmelzen bei den konventionellen Herstellprozessen aus der flüssigen Phase die optimale Ausnutzung der Faserfestigkeit. Die herkömmlichen Herstellungsrouten aus der flüssigen Phase für MMC-Werkstoffe sind meist Druckinfiltrationsprozesse, bei denen zur Überwindung des Kapillarwiderstandes die Schmelze durch einen Kolben in die poröse Faservorform eingedrückt wird ("squeeze casting"). Dieser Druckgießprozess kann auch vakuumunterstützt durchgeführt werden ("Vacural-Verfahren"). Zur Realisierung komplexer Geometrien und zur Minderung der mechanischen Belastung dieser

faserhaltigen Vorform während des Infiltrationsvorganges kann diese in einem evakuierten Autoklaven in die Schmelze eingetaucht und dann mit Gasdruck beaufschlagt werden ("Gasdruckverfahren"). Daneben ist natürlich grundsätzlich die pulvermetallurgische Formgebungsrouten durch Sintern und anschließendes Pressen, ggf. durch Heißpressen oder Heißisostatischpressen (HIP) bekannt. Sinterverfahren sind allerdings sehr zeit- und kostenaufwendig und ermöglichen keine Net-Shape-Abformung komplexer Bauteilgeometrien. Außerdem treten bei Sinterverfahren meist erhebliche Restporositäten auf, durch die die Eigenschaften nachteilig beeinflusst werden können.

[0008] Bei der Herstellung von faserverstärkten Leichtmetallen auf Aluminiumbasis wird in der Regel auf schmelzmetallurgische und Flüssigphasenimprägnierungen sowie Druckgießtechniken zurückgegriffen. Durch die langen Reaktions- und Kontaktzeiten von schmelzflüssigen metallischen Phasen mit den Verstärkungsfasern sowie den Formwerkzeugen oder -flächen kommt es zu unerwünschten Schädigungen. So treten beispielsweise Löse- und Ausscheidungsprozesse sowie chemische Grenzflächenreaktionen auf. Dies führt zu Schwierigkeiten durch Anhaften beim Trennen von der Form, durch wärmeübergangsbedingte Gefügeausbildungen mit einer insgesamt sehr aufwendigen Prozessführung. Hierdurch ist eine aufwendige Anlagentechnik bedingt, die mit vergleichsweise langen Taktzeiten für die Formgebung arbeitet. In allen Fällen wird mit flüssigen, chemisch hochaktiven Leichtmetallschmelzen (meist Aluminium) gearbeitet, so dass ein zusätzlicher Schutz der verwendeten Fasern durch eine geeignete Schutzschicht unumgänglich ist. Gerade, wenn Aluminium mit Kohlenstofffasern verstärkt werden soll, ist die Bildung einer Aluminiumkarbidschicht (Al_3C_4) an der Faser-Matrix-Grenzfläche unerwünscht, da diese Karbidphase durch ihre ausgeprägte Sprödbuchanfälligkeit und ihre mangelnde Korrosionsbeständigkeit ein vorzeitiges Versagen des Verbundes herbeiführt. Auf eine Faserbeschichtung kann grundsätzlich verzichtet werden, wenn man die Leichtmetallmatrix in der festen Phase mit der Verstärkungskomponente zusammenfügt ("diffusion bonding"). Bei diesem Umformprozess werden Lamine aus Fasergeweben und Metallblechen im Heißpressverfahren verarbeitet. Die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens ist allerdings durch sehr hohe Taktzeiten in Frage gestellt. Eine Zusammenfassung der gängigen Verfahren zur Herstellung von faserverstärkten Aluminium-Verbundwerkstoffen findet sich in Talat Lecture 1402, Froyne, L., Verlinden, B., University of Leuven (Belgium), 1994, EAA European Aluminium Association.

[0009] Das Thixoomformverfahren ist im eingangs genannten Stand der Technik zwar grundsätzlich zur Umformung von speziellen partikelverstärkten Legierungen insbesondere auf Aluminiumbasis bekannt. Mit den bekannten Verfahren lassen sich jedoch keine endkonturnah geformte Bauteile herstellen, die eine hohe Festigkeit aufweisen und an spezielle Belastungen anpassbar

sind. Auch ist die Herstellung der Halbzeuge im Stand der Technik nicht offenbart.

[0010] Es ist daher eine Aufgabe der Erfindung, die Herstellung von Bauteilen aus einem Verbundwerkstoff mit metallischer Matrix, die durch eingelagerte Fasern oder Partikel verstärkt ist (MMC), zu ermöglichen, womit sich hohe Festigkeiten und eine gute Anpassungsmöglichkeit an unterschiedliche Anforderungen erzielen lassen. Das Verfahren soll ferner eine möglichst kostengünstige und energiesparende Herstellung von Bauteilen ermöglichen, die fertigungsnahe geformt sind (Net-Shape-Abformung).

[0011] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1 gelöst.

[0012] Erfindungsgemäß wird innerhalb eines speziell ausgewählten Temperaturbereiches oberhalb der Soliduslinie und unterhalb der Liquiduslinie ein zwei- oder mehrphasiger Bereich ausgenutzt, in dem ein Flüssigphasenanteil vorhanden ist. Bei dieser Warmumformung im teilerstarrten Zustand wird ein ausgeprägtes Erstarrungsintervall der umzuformenden Legierung benötigt, d.h. ein Temperaturbereich, in dem sowohl feste als auch flüssige Phasenanteile nebeneinander vorliegen (vgl. Fig. 1). In diesem Temperaturbereich lässt sich durch Anwendung von Druck in einem Werkzeug eine endkonturnahe Umformung erreichen (Thixotropie = scherratenentfestigendes Verhalten).

[0013] Durch die Ausnutzung der Thixoumformung zur Herstellung von Verbundwerkstoffen, die durch eingelagerte Fasern verstärkt sind, lassen sich deutlich verbesserte Eigenschaften erzielen.

[0014] Da beschichtete Faserverbunde zur Herstellung des Halbzeugs verwendet werden, ergeben sich besonders vorteilhafte Eigenschaften der daraus hergestellten Teile. Insbesondere ergibt sich eine bessere Homogenität im Vergleich zu Einzellagen aus Faserverbunden und Matrixwerkstoff.

[0015] Ein weiterer Vorteil besteht in der gegenüber der Verwendung von Schmelzverfahren oder Schmelzinfilitrationsverfahren deutlich erniedrigten Temperatur und der deutlich verkürzten Formgebungszeit. Auf diese Weise ist es möglich, auf die Beschichtung der eingelagerten Fasern oder Partikel zu verzichten, da die eingelagerten Fasern durch den nur kurzen Schmelzvorgang bei relativ niedriger Temperatur kaum geschädigt werden.

[0016] Im Vergleich zum Squeeze-Casting lassen sich durch einen alternierenden Schichtenaufbau des Halbzeugs deutlich verkürzte Infiltrationswege der Schmelze erzielen. In Folge der verkürzten Prozesszeiten und des nur relativ kurzen Kontaktes des benötigten Werkzeuges mit der Schmelze ergeben sich deutlich verbesserte Werkzeugstandzeiten, was zu erheblichen Kosteneinsparungen beispielsweise im Vergleich zum Squeeze-Casting führt. Es lassen sich schnelle Prozesszeiten im Bereich von Millisekunden im Vergleich zu mehreren Sekunden beim Squeeze-Casting und zu mehreren Stunden beim Diffusion-Bonding erzielen. Weiterhin wird durch die Formgebung in einem Temperaturbereich un-

terhalb des Squeeze-Castings (etwa 100 K niedriger) eine Energieeinsparung in entsprechender Größe erzielt. Durch den verringerten Flüssigphasenanteil während der Formgebung wird eine Verkürzung der Erstarrungszeit im Werkzeug und damit eine Verringerung der Taktzeit ermöglicht. Auf Grund einer geeigneten Vorkonditionierung des Matrixwerkstoffes kann auf den gesamten Schmelzbetrieb (Schmelzöfen, Legierungsöfen, Entgasung, Legierungskontrolle, Gießöfen) verzichtet werden. Ferner fällt auf Grund des modifizierten Werkzeugkonzeptes deutlich weniger Kreislaufmaterial an, das vor dem erneuten Einbringen in den Produktionsprozess wieder eingeschmolzen werden muss.

[0017] Aufgrund fehlender Lufteinschlüsse bei der Thixoumformung, insbesondere beim Thixoschmieden, ist es ferner möglich, die Festigkeit des Matrixwerkstoffes durch eine geeignete Wärmebehandlung, insbesondere durch Lösungsglühen und Auslagern, zu erhöhen.

[0018] Ferner ist es beim Thixoschmieden möglich, das Bauteil stoffschlüssig mit anderen Bauteilen zu fügen.

[0019] Im Rahmen dieser Anmeldung wird unter dem Begriff "Halbzeug" die Vorform verstanden, die anschließend durch Thixoumformung innerhalb des Werkzeuges zum Bauteil ausgeformt wird.

[0020] Es kann sich bei diesem Halbzeug um ein Prepreg handeln, das aus einer einzelnen oder bevorzugt aus mehreren Laminatschichten besteht. Im Rahmen dieser Anmeldung wird daher unter Halbzeug immer der Oberbegriff verstanden, der ein Prepreg sowie andere auf sonstige Weise vorbereitete Vorformen einschließt, die innerhalb des Werkzeuges durch Thixoumformen zum Bauteil gefertigt werden.

[0021] Gemäß einer ersten Verfahrensvariante wird ein Prepreg durch Laminieren von Schichten aus beschichteten Faserverbunden und Matrixwerkstoff in Form von Blechen hergestellt.

[0022] Bei dieser besonders einfachen Verfahrensvariante werden einfach Schichten aus beschichtete Faserverbunden vorzugsweise alternierend mit den geeigneten Blechen durch Laminieren zusammengefügt, um die gewünschte Form des Halbzeuges bereitzustellen. In Folge der Thixoumformung reicht die Bereitstellung des Matrixmaterials in Form von Blechen aus, ausreichend kurze Fließwege und dennoch gleichmäßige Benetzung der eingeschlossenen Fasern oder Partikel zu gewährleisten.

[0023] In vorteilhafter Weiterbildung dieser Verfahrensvariante werden die Bleche in Form von kaltgewalzten Blechen bereitgestellt. Hierbei kommt es bei der Erwärmung auf Grund der durch den Kaltwalzvorgang induzierten Versetzungsdichte zu einer feinkörnigen Rekristallisation mit globularem Gefüge, was sich günstig auf die sich ergebenden Eigenschaften des Bauteils auswirkt.

[0024] In zweckmäßiger Weiterbildung der Erfindung Ausführung werden mehrere beschichtete Faserverbunde zu einem Prepreg laminiert.

[0025] Auf diese Weise lässt sich eine Near-Net-Shape-Geometrie annähern und es lassen sich gezielte Eigenschaftscharakteristika erreichen.

[0026] Die Beschichtung des Faserverbundes mit dem metallischen Matrixwerkstoff kann gemäß einer ersten Verfahrensvariante durch ein Siebdruckverfahren erfolgen.

[0027] Eine weitere Verfahrensvariante zur Beschichtung eines Faserverbundes mit dem metallischen Matrixwerkstoff besteht in einer Applikation durch elektrostatische Aufladung.

[0028] Eine weitere Verfahrensvariante zur Beschichtung eines Faserverbundes mit metallischem Matrixwerkstoff besteht in einer elektrophoretischen Abscheidung (EPD) aus einer wässrigen Suspension mit Unterstützung eines elektrischen Feldes.

[0029] Hierbei wird die zu beschichtende Faserstruktur elektrisch leitend als Elektrode geschaltet und die ladungstragenden Metallpulverteilchen werden durch das elektrische Feld getrieben auf der Faser- bzw. Gewebeerfläche als gleichmäßige Schicht abgeschieden. Eine derartige Verfahrensführung ist insbesondere bei Faserverbunden geeignet, die von Natur aus elektrisch leitfähig sind, wie beispielsweise C-Fasern. Jedoch lassen sich andere Fasern, die nicht ohne weiteres elektrisch leitfähig sind, bei Verwendung geeigneter Zwischenschichten gleichfalls verarbeiten.

[0030] Mit einem derartigen Verfahren werden bevorzugt Metallteilchen verwendet, die eine Korngröße mit einem Durchmesser zwischen 10 nm und 100 µm aufweisen, bevorzugt mit Größen zwischen 100 nm und 10 µm. Durch die Verwendung von oberflächen aktiven flüssigen oder gelösten Hilfsstoffen lassen sich gezielte Ladungsverteilungen der Feststoffpartikel in der Suspension einstellen, die einen konzentrations- und feldstärkeabhängigen Stofftransport zur Schichtabscheidung erlauben. Auf diese Weise lassen sich die Eigenschaften des hieraus später hergestellten Bauteils in weiten Grenzen variieren und an die jeweiligen Anforderungen anpassen.

[0031] Gemäß einer weiteren Variante der Erfindung wird ein Faserverbund durch thermisches Spritzen mit dem metallischen Matrixwerkstoff beschichtet. Hierbei kommt grundsätzlich atmosphärisches Plasmaspritzen (APS), Lichtbogendrahtspritzen, Drahtflammspritzen oder Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen in Frage. Vorzugsweise erfolgt das thermische Spritzen jedoch durch Elektrolichtbogendrahtspritzen oder Pulver-Plasmaspritzen, insbesondere durch atmosphärisches Plasmaspritzen.

[0032] Faserverbunde, die mit thermisch gespritzten Metallschichten versehen sind, bieten gegenüber der Verwendung von alternierenden Lagen aus Blechen und Faserverbunden den Vorteil einer feinkörnigeren Gefügeausbildung. Während etwa die Korngrößen bei thixotrop umformbaren Al-Si-Blechen im Bereich von 2 bis 20 µm liegen, liegen die Abmessungen der einzelnen Phasen im thermisch gespritzten AlSi-Schichtgefüge durch

die hohe Abkühlgeschwindigkeit beim Schichtauftrag im Submikrometer-Bereich. Dadurch kann bei der thixotropen Umformung eine verbesserte Imprägnierbarkeit der metallischen Phase in das Fasergerüst erreicht werden.

[0033] Das Volumenverhältnis von Matrixwerkstoff zu Fasern wird beim thermischen Spritzen vorzugsweise zwischen 0,3 und 8,0, insbesondere zwischen 0,8 und 3,0 eingestellt.

[0034] Bei sämtlichen Verfahrensvarianten der Erfindung wird gewährleistet, dass bei der Herstellung des Halbzeuges aus Schichten für die metallische Matrix und die eingelagerten Verstärkungsschichten nur auf eine niedrige Temperatur erwärmt werden. Selbst bei der Beschichtung durch thermisches Spritzen lässt sich durch eine geeignete Verfahrensführung gewährleisten, dass das Halbzeug auf eine Temperatur von höchstens 300°C nur wenige Sekunden erwärmt wird. Hierbei kann diese Zeitdauer auf höchstens fünf Sekunden oder auf höchstens zwei Sekunden oder sogar darunter beschränkt werden. Durch diese Maßnahmen ist erfindungsgemäß gewährleistet, dass die Faserverbunde auch während der Halbzeugherstellung nicht degradiert oder chemisch angegriffen werden.

[0035] Vorzugsweise wird hierzu der Faserverbund während des thermischen Spritzens gekühlt, insbesondere unter Verwendung von flüssigem Kohlendioxid.

[0036] Durch gezielte Kühlungsmaßnahmen lässt sich selbst eine kurzzeitige Erwärmung des Faserverbundes während der Beschichtung auf Temperaturen begrenzen, die deutlich geringer als 300°C sind und vorzugsweise im Bereich von etwa 100 bis 200°C maximal liegen.

[0037] Gemäß einer bevorzugten Weiterbildung der Erfindung wird der Faserverbund während des thermischen Spritzens auf einer Trägervorrichtung unter Zugspannung gehalten.

[0038] Auf diese Weise lassen sich Unterschiede kompensieren, die durch die erheblich stärkere thermische Ausdehnung des metallischen Matrixwerkstoffes im Vergleich zu den eingelagerten Fasern bedingt sind. Insbesondere können auf diese Weise Verbundwerkstoffe hergestellt werden, bei denen eingelagerte Langfasern unter Belastung auf Zug beansprucht werden, ohne dass zuvor die Matrix selbst in unerwünschter Weise beansprucht wird.

[0039] Zwecks einer Beschichtung in einem industriellen Maßstab kann die Trägervorrichtung eine Förderung des Faserverbundes in kontinuierlicher Weise oder im Taktbetrieb in eine Beschichtungsebene zur thermischen Spritzbeschichtung erlauben.

[0040] Hierzu kann der Faserverbund über eine Wickeleinrichtung geführt werden.

[0041] Des Weiteren ist es möglich, den Faserverbund bei Verwendung einer derartigen Wickeleinrichtung zunächst auf einer ersten Seite zu beschichten und anschließend auf der gegenüberliegenden Seite zu beschichten.

[0042] Gemäß einer bevorzugten Weiterbildung der Erfindung wird zwischen der Oberfläche des Faserver-

bundes und dem Düsenaustritt bei der Beschichtung durch Plasmaspritzen ein Spritzabstand von 50 bis 200 mm eingehalten, während bei einer Beschichtung durch Elektrolichtbogenspritzen ein Spritzabstand von 80 bis 300 mm eingehalten wird.

[0043] Unter Verwendung derartiger Verfahrensparameter lassen sich besonders günstige Beschichtungen von Faserverbunden erzielen, mit denen einerseits eine gleichmäßige Beschichtung erreicht wird und andererseits eine zu starke thermische Belastung der Faserverbunde vermieden wird.

[0044] Gemäß einer weiteren Verfahrensvariante der Erfindung wird eine Mischung aus dem Matrixwerkstoff und aus Kurzfasern granuliert oder pelletiert.

[0045] Hierbei werden bevorzugt Fasern mit einer Länge zwischen 0,5 und 20 mm, vorzugsweise zwischen 2 und 6 mm verwendet.

[0046] Das Volumenverhältnis von Matrixwerkstoff zu Fasern beträgt hierbei vorzugsweise zwischen 0,3 und 5, vorzugsweise zwischen 1 und 2.

[0047] Gemäß einer weiteren Verfahrensvariante wird eine Mischung aus dem Matrixwerkstoff und aus pulverförmigen Partikeln granuliert oder pelletiert.

[0048] Die Erzeugung von Granulaten oder Pellets unter Verwendung von Kurzfasern oder pulverförmigen Partikeln kann vorteilhaft genutzt werden, um spezielle gradierte Schichten zu erzeugen oder aber um beispielsweise Lagerwerkstoffe herzustellen.

[0049] Gemäß einer weiteren Ausführung der Erfindung wird die durch Granulieren oder Pelletieren erzeugte Mischung durch ein geeignetes Beschichtungsverfahren auf einen Faserverbund aufgetragen. Hierzu kann wiederum das thermische Spritzen, ein Siebdruckverfahren oder ein anderes zuvor erwähntes Verfahren genutzt werden.

[0050] Um gezielte Festigkeitsverbesserungen der erfindungsgemäß hergestellten Bauteile zu ermöglichen, wird bevorzugt wenigstens eine Schicht mit einem Faserverbund aus Langfasern zur Herstellung eines Prepregs verwendet. Unter Langfasern wird in diesem Zusammenhang eine Faserlänge von mindestens 1 mm oder ein Aspektverhältnis (Verhältnis von Länge zu Durchmesser) der Faser von mindestens 50, vorzugsweise von mindestens 100, besonders bevorzugt von mindestens 150 verstanden.

[0051] Es versteht sich, dass die Schichtenfolge bei der Laminierung von Prepregs in geeigneter Weise variiert werden kann, um die Eigenschaften des herzustellenden Bauteils in gezielter Weise zu beeinflussen. So können in geeigneter Weise mit Matrixwerkstoff beschichtete Faserverbunde aus Langfasern miteinander laminiert werden. Gleichzeitig können Schichten aus Matrixwerkstoff in Form von Blechen bzw. Folien eingefügt werden. Des Weiteren können Zwischenschichten aus Granulaten oder Pellets eingefügt werden. Schließlich ist auch die Kombination von beschichteten Faserverbunden mit Vorformen denkbar, die aus durch Pelletieren oder Granulieren hergestellten Mischungen aus Matrix-

werkstoff und Kurzfasern oder Partikeln hergestellt sind.

[0052] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung wird ein durch Laminieren hergestelltes Prepreg mit einer äußeren Schicht aus Matrixwerkstoff versehen.

[0053] Auf diese Weise kann erreicht werden, dass die Oberfläche des hergestellten Bauteils weitgehend frei von eingelagerten Fasern oder Partikeln ist.

[0054] Die Faserverbunde können in den verschiedensten Formen genutzt werden, um bestimmte Eigenschaften des hergestellten Bauteils zu gewährleisten. So können Faserverbunde als Gelege aus unidirektionalen Langfasern (UD) genutzt werden, es können Spinnvliese ("unwoven") oder gewebte Faserverbunde in Form von 2D-Faserverbunden, 3D-Faserverbunden, in Form von Gewirken oder Gestriicken verwendet werden.

[0055] Hierbei kann ferner das Halbzeug aus gradierten Schichten hergestellt werden, um eine gezielte Eigenschaftsbeeinflussung an besonders beanspruchten Stellen des Bauteils oder in Vorzugsbeanspruchungsrichtungen zu erzielen. Auf diese Weise kann das Verhältnis von Matrixwerkstoff zu Fasern gezielt über den Bauteilquerschnitt verändert werden.

[0056] Dies ist besonders vorteilhaft, um thermisch bzw. mechanisch lokal besonders stark beanspruchte Bauteile, wie etwa Kolben oder dgl., herstellen zu können.

[0057] Als Matrixwerkstoff sind grundsätzlich alle Werkstoffe geeignet, die eine thixotrope Umformung erlauben.

[0058] Bevorzugt werden hierzu Aluminiumlegierungen oder Kupferlegierungen verwendet, insbesondere Legierungen, die aus den Hauptbestandteilen Aluminium, Magnesium und Kupfer bestehen oder die aus den Hauptbestandteilen Kupfer und Zinn oder Zink bestehen.

[0059] In diesem Zusammenhang sind als Matrixwerkstoff Legierungen bevorzugt, die aus Legierungen des Typs AlMg4,5Mn0,4 (AA 5182), des Typs AlMgSi1 (EN AW-6082), des Typs AlSi7Mg (EN AW-356, EN-AW-357), des Typs AlSi3 (AA 208, AA 296), des Typs AlSi12 (AA 336, AA 384), des Typs CuZn40A12 oder des Typs CuSn13, 5A10,3 bestehen.

[0060] Bei der Verwendung von Kupferlegierungen steht die Verschleiß reduzierende Wirkung von Verstärkungsfasern im Vordergrund. Mit diesen Werkstoffen lassen sich insbesondere vorteilhafte Lagerwerkstoffe herstellen, wozu insbesondere eine Kombination mit Kohlenstofffasern oder -partikeln in einer graphitnahen Modifikation geeignet ist, da sich so Notlaufeigenschaften erzielen lassen.

[0061] Gemäß einer weiteren Verfahrensvariante wird der metallische Matrixwerkstoff selbst durch eingelagerte Partikel verstärkt, die vorzugsweise als Oxidkeramiken, als Karbide, als Nitride, als Metalle oder Legierungen oder als tribologisch wirksame Stoffe ausgebildet sind.

[0062] Zur Faserverstärkung des MMC werden erfindungsgemäß Fasern verwendet, die aus Kohlenstoff, Si-

litziumkarbid, Aluminiumoxid, Mullit bestehen. Auch Modifikationen dieser Fasern mit Stickstoff, Titan, Bor, Kohlenstoff oder Silizium und deren Verbindungen sind denkbar.

[0063] Obwohl in Folge der verkürzten Prozesszeiten und der erniedrigten Prozesstemperaturen grundsätzlich keine Beschichtung der verwendeten Fasern notwendig ist, können gemäß einer weiteren Verfahrensvariante auch an ihrer Oberfläche beschichtete Fasern verwendet werden, insbesondere mit Diffusionssperr- oder Schutzschichten versehene Fasern oder mit Haftvermittlerschichten versehene Fasern.

[0064] Auf diese Weise lassen sich die Eigenschaften des herzustellenden Bauteils in einem noch größeren Umfang an die jeweiligen Anforderungen anpassen. So können etwa durch Verwendung von Haftvermittlern die Grenzflächenhaftungen zwischen eingelagerten Fasern und der metallischen Matrixphase verbessert werden. Gleichzeitig können auch solche Fasern eingelagert werden, die an sich mit der verwendeten Matrixphase weniger kompatibel sind.

[0065] Zur Beschichtung der Fasern eignen sich insbesondere Siliziumkarbid, Siliziumnitrid, Titankarbid, Tannitrid, Kohlenstoff oder Mischphasen oder Verbindungen hieraus.

[0066] Erfindungsgemäß werden bevorzugt Fasern mit einem Durchmesser zwischen 0,5 und 150 μm , besonders bevorzugt zwischen 5 und 20 μm verwendet.

[0067] Wie bereits erwähnt, können die Fasern sowohl als Langfasern oder Endlosfasern als auch in Form von Kurzfasern ("chopped fibers") verwendet werden.

[0068] Wie bereits erwähnt, wird bei der erfindungsgemäßen Thixoumformung das Halbzeug in Abhängigkeit vom verwendeten Matrixmaterial auf ein bestimmtes Temperaturintervall erwärmt, innerhalb dessen der Matrixwerkstoff einen definierten Flüssigphasenanteil aufweist.

[0069] Wird beispielsweise die Legierung AlSi7Mg verwendet, so wird zur Thixoumformung das Halbzeug auf eine Temperatur zwischen 574 und 584°C aufgeheizt, wobei sich ein Flüssigphasenanteil zwischen 43 und 51 Volumenprozent einstellt. Wird etwa die Legierung AlMgSi1 verwendet, so erfolgt zur Thixoumformung eine Aufheizung auf eine Temperatur zwischen 635°C und 645°C, wobei sich ein Flüssigphasenanteil zwischen etwa 15 und 35 % einstellt. Bei Verwendung der Legierung CuZn40Al2 erfolgt eine Aufheizung auf einen Temperaturbereich zwischen 871°C und 875°C, wobei sich ein Flüssigphasenanteil zwischen etwa 20 und 40 % ergibt.

[0070] Die Thixoumformung geschieht vorzugsweise als Thixoschmieden innerhalb eines geeigneten Werkzeuges (Gesenk) mit kontrollierter Stößelgeschwindigkeit und Presskraft. Stößelgeschwindigkeit und Presskraft sind hierbei verfahrensspezifisch angepasst. Es sind Stößelgeschwindigkeiten bis zu 800 mm/s möglich. Die Auftreffgeschwindigkeit des Werkzeugoberteils auf das Werkstück wird in Abhängigkeit von dem verwendeten

ten Faser-Matrix-Verhältnis, der Bauteilkomplexität und des Bauteilvolumens vorzugsweise zwischen 10 mm/s und 300 mm/s eingestellt.

[0071] Um eine vorzeitige Erstarrung des metallischen Werkstoffs zu verhindern, wird das Werkzeug vorzugsweise auf Temperaturen zwischen 100°C und 400°C erwärmt.

[0072] Insbesondere durch eine Erhöhung der Stößelgeschwindigkeit nach dem Aufsetzen kann eine besonders schnelle Infiltration erreicht werden, und zwar im Bereich von deutlich unterhalb einer Sekunde unter hohem Druck. So ergibt sich eine kurze Berührzeit zwischen metallischer Schmelze und Faserwerkstoff, was zu einem reduzierten chemischen Angriff der Schmelze auf die Fasern führt und so zu verbesserten Eigenschaften des hergestellten Bauteiles führt.

[0073] Ferner ist es möglich, zur Verringerung der Oxidbildung die Thixoumformung unter Schutzgasatmosphäre durchzuführen.

[0074] Zur Thixoumformung wird gemäß einer ersten Verfahrensvariante das Halbzeug in einer Form vorverdichtet. Als Form wird hierbei vorzugsweise das später zur Thixoumformung verwendete Werkzeug genutzt.

[0075] Das vorverdichtete Halbzeug kann nun außerhalb des Werkzeuges vorgeheizt werden, was etwa induktiv, in einem Umluftofen mit Schutzgasatmosphäre, mit Infrarotstrahlern oder mit Lasern erfolgen kann, wird dann im vorgeheizten Zustand in das Werkzeug eingeführt und sodann thixotrop umgeformt, insbesondere thixogeschmiedet.

[0076] Die bevorzugten Matrixwerkstoffe erlauben eine Aufheizung des Halbzeuges bis auf die zum thixotropen Umformen notwendige Temperatur bei einer noch ausreichenden Festigkeit des Halbzeuges, die eine Handhabung des Halbzeuges zum Einlegen in die Form erlaubt, was beispielsweise automatisch geschehen kann. Erst durch den anschließend beim Thixoschmieden über den Stempel aufgebrachten Druck verliert das Halbzeug seine Scherfestigkeit, so dass das Material in kürzester Zeit ausgeformt wird.

[0077] Gemäß einer Verfahrensvariante erfolgt eine Aufheizung der Halbzeuge innerhalb des Werkzeuges auf eine Temperatur oberhalb der Soliduslinie, jedoch unterhalb der Liquiduslinie des Matrixmaterials. Dabei kann der geschichtete Werkstoff durch einen geringen Druck in Anlage an die Werkzeugwandung gebracht werden. Dadurch wird der Wärmeübergang verbessert und so die Aufheizzeit reduziert. Unmittelbar anschließend erfolgt hieran die thixotrope Umformung vorzugsweise durch Schmieden.

[0078] Bei beiden Verfahrensvarianten erfolgt vorzugsweise eine kontrollierte Abkühlung des thixotrop umgeformten Bauteils innerhalb des Werkzeuges zur Erzielung einer gerichteten Erstarrung der metallischen Matrix.

[0079] So hergestellte Verbundwerkstoffe sind erfindungsgemäß vorzugsweise als fertigungsnah geformte (net shaped) hochfeste Konstruktionsbauteile mit hoher

spezifischer Steifigkeit oder mit hohem spezifischen Elastizitätsmodul einsetzbar. Daneben ergibt sich ein vorteilhafter Einsatz als Lagerwerkstoffe.

[0080] Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die Zeichnung. Es zeigen:

Fig. 1 ein Phasendiagramm Al-Si mit ausgewählten Bereichen für eine thixotrope Umformung für die Knetlegierung AlMgSi1 und die Gusslegierung AlSi7Mg;

Fig. 2 ein Prepreg, das aus einem Schichtenverbund von alternierenden Schichten aus Faserschichten und Blechen (Folien) besteht;

Fig. 3 ein Prepreg, das aus einer Folge von mit metallischem Matrixwerkstoff beschichteten Faserverbunden besteht;

Fig. 4 ein globolithisches Gefüge einer Al-Si-Legierung;

Fig. 5 einen Querschnitt durch einen mit einer Metallmatrix infiltrierten Al-Si-Verbundwerkstoff mit eingelagerten C-Fasern nach einem Thixo-Schmiedevorgang und

Fig. 6 eine schematische Darstellung einer Wickelanlage zur thermischen Spritzbeschichtung von Fasergeweben im industriellen Maßstab.

[0081] In Fig. 1 ist ein Phasendiagramm des bevorzugten eutektischen Systems Al-Si (mit Magnesiumzusätzen) dargestellt. Der Festanteil in dem dunkel schraffierten Bereich ist α (Al). Als für eine thixotrope Umformung geeignete Legierungen sind die Knetlegierung AlMgSi1 und die Gusslegierung AlSi7Mg eingetragen. Für eine thixotrope Umformung wird ein enger Temperaturbereich benötigt, der für die Knetlegierung AlMgSi1 zwischen der Soliduslinie und der Liquiduslinie liegt und in Fig. 1 durch den rechteckig eingezeichneten Temperaturbereich gekennzeichnet ist, der zwischen 635 und 645°C liegt. In diesem Bereich ergibt sich ein Liquidanteil (L) von 15 bis 35 %. Zur thixotropen Umformung der Gusslegierung AlSi7Mg ergibt sich dagegen ein Temperaturbereich, der unmittelbar oberhalb der Eutektikalen liegt und wiederum durch ein Rechteck bezeichnet ist. Dieses Temperaturfenster liegt zwischen 574°C und 584°C. Hierbei ergibt sich ein Liquidanteil (L) von etwa 43 bis 51 %.

[0082] Derartige Zusammenhänge für die thixotrope Umformung von Leichtmetalllegierungen sind grundsätzlich bekannt (vgl. Siegert, K.; Messmer, G.; Baur, J.; Wolf, A.: "Thixoschmieden von Aluminiumbauteilen", in: Tagungsband zur 7. sächsischen Fachtagung Umformtechnik, Chemnitz, 2000; Baur, J., Messmer, G.:

"Automated Thixoforging Unit, in: Proceedings to the 7. Int. Conf. on Semi-Solid-Processing of Alloys and Composites, Tsukuba, Japan, September 24-28, 2002).

[0083] Die Thixoumformung derartiger Leichtmetallwerkstoffe wurde insbesondere zur Herstellung von Formbauteilen entwickelt, die eine fertigungsnahe Formgebung aufweisen. Im Temperaturbereich, bei dem die Thixoumformung erfolgt, liegt das betreffende Halbzeug noch mit einer ausreichenden Festigkeit vor, die eine Handhabung des Halbzeuges (beim Thixoschmieden auch "Bolzen" genannt) ermöglicht. Die betreffenden Legierungen weisen idealerweise ein globolithisches Gefüge auf, das ein Festphasenskelett ausbildet und so die gute Handhabbarkeit des erwärmten Halbzeuges beim Einlegen in das Werkzeug (die Pressform) sorgt (vgl. Fig. 4). Dieses Festphasenskelett bricht bei Scherbelastung auf und sorgt somit für eine Reduzierung der Fließspannung, so dass hohe Fließstrecken im Werkzeug und eine endkonturnahere Umformung gewährleistet werden.

[0084] Erfindungsgemäß werden nun MMCs mit einem metallischen Matrixwerkstoff, der durch eingelagerte Fasern oder Partikel verstärkt ist, hergestellt, indem ein Halbzeug, in dem die Fasern oder Partikel in einem metallischen Matrixwerkstoff enthalten sind, vorbereitet wird und das Halbzeug durch Thixoumformen in einem Werkzeug bei einer Temperatur oberhalb der Solidustemperatur und unterhalb der Liquidustemperatur des metallischen Matrixwerkstoffes ausgeformt wird.

[0085] Dabei reicht grundsätzlich ein loser Verbund von Fasern einerseits und metallischem Matrixwerkstoff andererseits aus, um ++ beim Thixoumformvorgang bei nur kurzer Umformzeit einen hochwertigen, praktisch porrenfreien Verbundwerkstoff zu erzeugen.

[0086] Grundsätzlich sind hierzu mehrere Verfahrenslinien möglich.

[0087] Bei einer ersten Verfahrenslinie, die in Fig. 2 schematisch dargestellt ist die allerdings nicht in Rahmen der Erfindung liegt, wird ein insgesamt mit der Ziffer 10 bezeichnetes Halbzeug durch Laminieren aus alternierenden Blech- und Fasergewebelagen hergestellt. Ein Faserverbund 12 besteht beispielsweise aus Karbonfasern, die in Form eines Gewebes angeordnet sind. Zur Herstellung des Halbzeuges 10 werden Faserverbunde 12 alternierend mit dünnen Blechen 14 aus dem Matrixwerkstoff, beispielsweise AlSi7Mg, laminiert. In Abhängigkeit von dem gewünschten Volumenverhältnis zwischen Fasern und Matrixwerkstoff werden die Dicken d_1 der Faserverbunde 12 und d_2 der Bleche 14 angepasst. Zweckmäßigerweise wird das Halbzeug 10 durch eine äußere Lage 18 aus Matrixwerkstoff eingeschlossen, um sicherzustellen, dass bei der späteren Thixoumformung möglichst keine Fasern an die Oberfläche des Bauteils gelangen. Ein derartiges Halbzeug oder Prepreg wird in eine geeignete Gesenkform eingelegt und hierin im geeigneten Temperaturbereich durch Thixoschmieden unter Verwendung eines Stößels umgeformt.

[0088] Hierbei kann zunächst innerhalb des Werkzeu-

ges in noch kaltem Zustand eine Vorkompaktierung erfolgen und anschließend das Halbzeug 10 außerhalb der Gesenkform auf die zur Thixoumformung notwendige Temperatur vorgeheizt werden. Dies kann durch schnelles Aufheizen des vorverdichteten Halbzeuges induktiv oder alternativ in einem Umluft-Ofen mit Schutzgasatmosphäre oder mit Hochleistungs-Infrarotstrahlern oder mittels Laser durchgeführt werden. Danach erfolgt eine schnelle Überführung in die zweckmäßigerweise vorgeheizte Gesenkform (100 bis 400°C). Dieser Vorgang kann manuell, semi- oder vollautomatisiert erfolgen. Anschließend wird der Thixo-Schmiedevorgang durchgeführt. Hierzu trifft der Stößel mit verfahrensspezifisch angepasster Stößelgeschwindigkeit von bis zu 800 mm/s auf die Oberfläche des Halbzeuges auf. Die Auftreffgeschwindigkeit des Stößels auf das Halbzeug wird in Abhängigkeit des Faser-Matrix-Verhältnisses, der Bauteilkomplexität und des Bauteilvolumens vorzugsweise zwischen 10 mm/s und 300 mm/s eingestellt. Um eine vorzeitige Erstarrung des metallischen Matrixwerkstoffes zu verhindern, wird auch der Stößel zweckmäßigerweise entsprechend vorgeheizt.

[0089] Alternativ kann die Aufheizung des Halbzeuges auch innerhalb des Gesenkwerkzeuges erfolgen. Dabei kann das geschichtete Halbzeug durch einen geringen Druck in Anlage an die Werkzeugwandung gebracht werden, wodurch der Wärmeübergang verbessert und die Aufheizzeit reduziert wird. Unmittelbar anschließend erfolgt die thixotrope Umformung durch Thixoschmieden.

[0090] Bei der Verwendung von Blechen (Folien) werden vorzugsweise kaltgewalzte Bleche verwendet, da sich durch die hohe Versetzungsdichte bei der späteren Wiedererwärmung im Zuge der Thixoumformung eine feinkörnige Rekristallisation mit globularem Gefüge ergibt.

[0091] Eine zweite erfindungsgemäße verfahrensvariante zur Herstellung eines Halbzeuges besteht in der Beschichtung von einzelnen Faserverbunden, die anschließend durch Übereinanderlegen zu einem Prepreg laminiert werden und zweckmäßigerweise wiederum von einer äußeren Blechschicht oder Folienschicht aus Matrixwerkstoff umgeben sind.

[0092] Diese Verfahrensvariante wird nachfolgend an Hand von Fig. 3 und 6 näher erläutert.

[0093] Eine dritte nicht im Rahmen der Erfindung liegende Alternative zur Herstellung des Halbzeuges besteht in der Herstellung einer Mischung aus Kurzfasern oder pulverförmigen Verstärkungspartikeln mit metallischen Matrixpulvern. Anschließend erfolgt eine Formgebung durch Trockenpressen oder eine Weiterverarbeitung wiederum durch Auftragung auf einen Faserverbund durch ein Beschichtungsverfahren.

[0094] Bei der zweiten Verfahrensvariante eignet sich zur Beschichtung des Faserverbundes grundsätzlich eine Applikation durch elektrostatische Aufladung, eine Applikation durch Siebdruckverfahren oder eine elektro-phoretische Abscheidung (EPD) auf die Faserstruktur.

[0095] Mittels EPD wird eine elektrisch leitende oder

elektrisch leitend gemachte Faserstruktur als Elektrode geschaltet, und die ladungstragenden Metallpulverteilchen werden durch ein elektrisches Feld getrieben auf der Faser- oder Gewebeoberfläche als gleichmäßige Schicht abgeschieden. Dabei weisen die Metallteilchen eine Korngröße mit Durchmessern zwischen 10 nm und 100 µm auf, bevorzugt mit Größen zwischen 100 nm und 10 µm. Durch die Verwendung von oberflächenaktiven flüssigen oder gelösten Hilfsstoffen lässt sich eine gezielte Ladungsverteilung der Feststoffpartikel in der Suspension einstellen, die einen konzentrations- und feldstärkeabhängigen Stofftransport zur Schichtabscheidung erlaubt.

[0096] Ein besonders bevorzugtes Beschichtungsverfahren besteht in der Beschichtung durch thermisches Spritzen. Hierbei steht insbesondere Elektrolichtbogen-drahtspritzen und Pulver-Plasmaspritzen, bevorzugt atmosphärisches Plasmaspritzen (APS) im Vordergrund.

[0097] Während des thermischen Spritzbeschichtens der Fasern wird hierbei durch gezielte Kühlmaßnahmen ein Temperaturanstieg des Faserverbundes weitgehend vermieden, so dass in der Regel Temperaturen von höchstens 100°C eingehalten, werden können und somit eine Schädigung der Fasern ausgeschlossen ist. Hierzu kann simultan mittels Kühlmittelinjektoren und weiteren geeigneten Vorrichtungen lokal, vorzugsweise unter Verwendung von Druckluft und ggf. von flüssigem Kohlendioxid (CO₂) gekühlt werden.

[0098] Des Weiteren ist es bei dieser Verfahrensvariante bevorzugt, Lang- oder Endlosfasern bzw. daraus hergestellte Faserverbunde (Gelege, Gewebe oder Gestricke) verstreckt bzw. zugvorgespannt auf eine geeignete Trägervorrichtung 30 (vgl. Fig. 6) aufzubringen und eine oder mehrere Schichten Matrixmetall durch thermisches Spritzen aufzutragen. Mit einer Wickelanlage 30 gemäß Fig. 6 lässt sich von einer Rolle 34, die zu beschichtende Faserverbundlagen enthält, das Faserverbundmaterial kontinuierlich oder taktweise abwickeln, in einer Beschichtungsebene (linke gewölbte Fläche in Fig. 6) beschichten und anschließend nach der Beschichtung wieder auf eine Rolle 32 aufwickeln. Bei geeigneter Dimensionierung und Beschichtungsdicke kann hierbei zunächst eine Beschichtung auf einer ersten Oberseite erfolgen und anschließend eine Beschichtung auf der gegenüberliegenden Oberfläche.

[0099] Ein besonderer Vorteil liegt in der gezielten Vorspannung der Gewebe in der Beschichtungsebene, die darüber hinaus regelbar ausgeführt sein kann, um eine gleiche, bleibende Vorspannung zu gewährleisten. Dadurch werden thermisch und konvektiv erzeugte Spannungen in der Faserstruktur mechanisch kompensiert. Zur Beschichtung kann ein 5-Achsen-Roboter-gestütztes Bewegungssystem verwendet werden, das einen Lichtbogen- oder Plasmabrenner in einer Weise derart bewegt, dass NC-gesteuerte Bewegungsabläufe mit dem Ziel einer gleichmäßigen Beschichtung aus vorher gespeicherten Programmen abgerufen und reproduzierbar und prozessstabil realisiert werden können. Hierbei

werden Spritzabstände von 50 bis 200 mm zwischen Düsenaustritt und Faseroberfläche bevorzugt zwischen 100 und 140 mm bei APS und zwischen 120 und 160 mm beim Elektrolichtbogenspritzen verwendet.

[0100] Wie in Fig. 3 dargestellt, werden derartige Lagen 22 aus Faserverbunden, die beidseitig mit Matrixmetall 24 beschichtet sind, miteinander zu einem Prepreg laminiert und vorzugsweise außen wiederum durch ein Blech bzw. eine Folie 18 aus Matrixmetall eingeschlossen, um so ein Halbzeug 20 herzustellen. Die Beschichtungsdicke d_3 kann beim vorherigen Beschichtungsvorgang in geeigneter Weise gesteuert werden. Hierzu können einfache oder mehrfache Schichten aufgetragen werden und die Schichtdicke natürlich durch die Überfahrgeschwindigkeit bzw. Verweildauer und die übrigen Spritzparameter beeinflusst werden. Sind größere Lagen von Matrixmetall erwünscht, so können auch einzelne Metallbleche bzw. Folien zwischengelegt werden.

[0101] Bei der dritten Verfahrensvariante durch Granulieren bzw. Pelletieren werden Mischungen aus Matrixmetallpulvern und Kurzfasern oder Verstärkungspartikelpulvern hergestellt. Diese granulierten oder pelletierten Mischungen können anschließend zu einem Grünkörper durch Kaltpressen kompaktiert werden, der anschließend als Halbzeug verwendet wird. Sofern das Matrixmetall eine ausreichende Duktilität aufweist, kann das Kaltpressen ohne Presshilfsmittel erfolgen. Bei geringerer Duktilität des Metallmatrixwerkstoffes werden geeignete sich bei der späteren Aufheizung leicht verflüchtigende Binderhilfsmittel (z.B. Paraffin) zugesetzt.

[0102] Eine weitere Verfahrensvariante besteht in der Auftragung der durch Granulieren oder Pelletieren hergestellten Mischungen durch ein geeignetes Beschichtungsverfahren auf Faserverbunde, was wiederum beispielsweise durch thermisches Spritzen erfolgen kann.

[0103] Wie eingangs bereits erwähnt, können zur Erzeugung von speziellen Bauteileigenschaften, die an spezielle örtliche thermische oder mechanische Beanspruchungen angepasst sind, gradierte Schichten verwendet werden, wozu das gesamte Spektrum bei der Verarbeitung von Faserverbunden ausgenutzt werden kann.

[0104] Die besonders günstige Verteilung, die sich bei einem Infiltrationsvorgang durch Thixoschmieden bei einem derartigen Verbundwerkstoff ergibt, ist aus Fig. 5 zu ersehen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Bauteils aus einem Verbundwerkstoff (MMC) mit einem metallischem Matrixwerkstoff, der durch eingelagerte Fasern oder Partikel verstärkt ist, umfassend die folgenden Schritte:

- Herstellen eines Halbzeuges (10; 20), in dem

die Fasern (16) oder Partikel und der metallische Matrixwerkstoff (14; 24) enthalten sind und

- Thixoumformen des Halbzeuges (10; 20) in einem Werkzeug bei einer Temperatur oberhalb der Solidustemperatur und unterhalb der Liquidustemperatur des metallischen Matrixwerkstoffes (14; 24),

dadurch gekennzeichnet, dass der Schritt des Herstellens eines Halbzeuges (10; 20) ein Beschichten eines Faserverbundes mit dem metallischen Matrixwerkstoff oder mit einer granulierten oder pelletierten Mischung aus Matrixwerkstoff und Kurzfasern oder pulverförmigen Partikeln durch ein Verfahren umfasst, das ausgewählt ist aus der Gruppe, die gebildet ist durch

- Beschichten des Faserverbundes durch thermisches Spritzen, vorzugsweise durch atmosphärisches Plasmaspritzen (APS), Drahtflammspritzen oder durch Elektrolichtbogenspritzen;

- Beschichten des Faserverbundes durch ein Siebdruckverfahren mit dem metallischen Matrixwerkstoff;

- Beschichten des Faserverbundes durch elektrostatische Aufladung mit dem metallischen Matrixwerkstoff;

- Beschichten des Faserverbundes mit dem metallischen Matrixwerkstoff durch elektrophoretische Abscheidung aus einer wässrigen Suspension mit Unterstützung eines elektrischen Feldes.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Folge von Schichten (12, 14; 22) zu einem Prepreg (10; 20) laminiert wird, die mit Matrixwerkstoff beschichtete Faserverbunde (22) oder mit Mischungen aus Matrixwerkstoff und Kurzfasern oder Partikeln beschichtete Faserverbunde (22) enthalten, sowie Bleche aus Matrixwerkstoff (14) oder Mischungen aus Matrixwerkstoff und Kurzfasern oder Partikeln enthalten.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mischungen aus Matrixwerkstoff (14) und Kurzfasern oder Partikeln durch Granulieren oder Pelletieren hergestellt werden.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Volumenverhältnis von Matrixwerkstoff zu Fasern zwischen 0,3 und 8,0, vorzugsweise zwischen 0,8 und 3,0 eingestellt wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** während der Herstellung des Halbzeuges der Faserverbund für

eine Zeitdauer von höchstens 5 Sekunden, vorzugsweise von höchstens 2 Sekunden, auf eine Temperatur von höchstens 300 °C erwärmt wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Faserverbund während des thermischen Spritzens auf einer Trägervorrichtung (30) unter Zugspannung gehalten wird. 5
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** beim Schritt des Pelletierens oder Granulierens Fasern mit einer Länge zwischen 0,5 und 20 mm, vorzugsweise zwischen 2 und 6 mm, verwendet werden, und dass vorzugsweise ein Volumenverhältnis von Matrixwerkstoff zu Fasern zwischen 0,3 und 5, besonders bevorzugt zwischen 1 und 2 verwendet wird. 10
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** wenigstens eine Schicht mit einem Faserverbund aus Langfasern einer Länge von mindestens einem Millimeter oder aus Langfasern mit einem Aspektverhältnis (Verhältnis von Länge zu Durchmesser) von mindestens 50, vorzugsweise von mindestens 100, besonders bevorzugt von mindestens 150, zur Herstellung eines Prepregs verwendet wird. 15
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Matrixwerkstoff eine Aluminiumlegierung oder eine Kupferlegierung verwendet wird, insbesondere eine Legierung, die aus den Hauptbestandteilen Aluminium, Magnesium und Silizium besteht oder aus den Hauptbestandteilen Kupfer und Zinn oder Zink besteht, vorzugsweise eine Legierung, die aus der Gruppe ausgewählt wird, die gebildet ist durch Legierungen des Typs AlMg4,5Mn0,4, AlMgSi1, AlSi7Mg, AlSi3, AlSi12, CuZn40A12 und CuSn13,5A10,3. 20
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der metallische Matrixwerkstoff durch eingelagerte Partikel, die vorzugsweise als Oxidkeramiken, Carbide, Nitride, Metalle oder Legierungen oder tribologisch wirksame Werkstoffe ausgebildet sind, verstärkt wird. 25
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** Fasern verwendet werden, die aus Kohlenstoff, Siliziumcarbid, Aluminiumoxid, Mullit bestehen oder Modifikationen dieser Fasern mit Stickstoff, Titan, Bor, Kohlenstoff oder Silizium oder deren Verbindungen enthalten, wobei die Fasern vorzugsweise an ihrer Oberfläche beschichtet sind, insbesondere mit Diffusionssperrend- und Schutzschichten oder Haftvermittlerschichten 30

versehen sind.

12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit Siliziumcarbid, Siliziumnitrid, Titancarbid, Titanitrid, Kohlenstoff oder Mischphasen oder Verbindungen hieraus beschichtete Fasern verwendet werden. 35
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Halbzeug bei Verwendung der Legierung AlSi7Mg zum Thixoomformen auf eine Temperatur zwischen 574 und 584 °C aufgeheizt wird, bei Verwendung der Legierung AlMgSi1 auf eine Temperatur zwischen 635 und 645 °C aufgeheizt wird, und bei Verwendung der Legierung CuZn40A12 auf eine Temperatur zwischen 871 und 875 °C aufgeheizt wird. 40
14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Werkzeug vorgeheizt wird, vorzugsweise auf eine Temperatur zwischen 100 und 400 °C. 45
15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Bauteil nach der thixotropen Umformung innerhalb des Werkzeuges bis unter die Solidustemperatur abgekühlt wird. 50

Claims

1. Method for producing a component from a composite material (MMC) having a metallic matrix material which is reinforced by embedded fibers or particles, the method comprising the steps of: 55

- providing a semi-finished product (10; 20) in which the fibers (16) or particles and the metallic matrix material (14; 24) are contained, and
- thixoforming the semi-finished product (10; 20) within a tool at a temperature above the solidus temperature and below the liquidus temperature of the metallic matrix material (14; 24);

characterized in that the step of providing a semi-finished product (10; 20) comprises a coating of a fibrous structure with the metallic matrix material or with a granulatized or palletized mixture of a matrix material and short fibers or powdered particles, using a process which is selected from the group which is formed by:

- coating a fibrous structure by thermal spraying, preferably by atmospheric plasma spraying (APS), wire flame spraying, or by electric arc spraying;
- coating the fibrous structure with the metallic

- matrix material by a screen printing process;
 - coating the fibrous structure with the metallic matrix material by electrostatic charging;
 - coating the fibrous structure with the metallic matrix material by electrophoretic deposition from an aqueous suspension, at the aid of an electric field.
2. Method according to claim 1, **characterized in that** a succession of layers (12, 14; 22) is laminated to form a prepreg (10; 20) which contains fiber composite structures (22) coated with matrix material, or with mixtures of matrix material and short fibers or particles, as well as metal sheets of matrix material (14) or mixtures of matrix material and short fibers or particles.
3. Method according to claim 2, **characterized in that** the mixtures of matrix material (14) and short fibers or particles are prepared by granulatizing or pelletizing.
4. Method according to any of the preceding claims, **characterized in that** the proportion by volume of matrix material and fibers is adjusted to between 0.3 and 8.0, preferably to between 0.8 and 3.0.
5. Method according to any of the preceding claims, **characterized in that** during production of the semi-finished product the fibrous structure is heated up to a temperature of maximally 300° Celsius for a period of maximally 5 seconds, preferably of maximally 2 seconds.
6. Method according to any of the preceding claims, **characterized in that** the fibrous structure is maintained under tensile stress during thermal spraying on a carrier device (30).
7. Method according to any of claims 3 to 6, **characterized in that** during the step of pelletizing or granulatizing fibers are used having a length between 0.5 and 20 mm, preferably between 2 and 6 mm, and wherein preferably a proportion by volume of matrix material and fibers between 0.3 and 5, especially preferred between 1 and 2, is used.
8. Method according to any of the preceding claims, **characterized in that** at least one layer comprising a fibrous structure of long fibers having a length of at least one millimeter, or of long fibers having an aspect ratio (ratio between length and diameter) of at least 50, preferably of at least 100, especially preferred of at least 150, is used for preparing the prepreg.
9. Method according to any of the preceding claims, **characterized in that** an aluminium alloy or a copper alloy is used as the matrix material, in particular an alloy is used made of the main constituents aluminium, magnesium and silicon, or made of the main constituents copper, and tin or zinc, preferably an alloy is used which is selected from the group formed by alloys of the type AlMg4.5Mn0.4, AlMgSi1, AlSi7Mg, AlSi3, AlSi12, CuZn40A12, and CuSn13.5A10.3.
10. Method according to any of the preceding claims, **characterized in that** the metallic matrix material is reinforced by embedded particles, which are preferably configured as oxide ceramics, carbides, nitrides, metals or alloys or tribologically active materials.
11. Method according to any of the preceding claims, **characterized in that** fibers are used that consist of carbon, silicon carbide, aluminium oxide, mullite or that contain modifications of these fibers with nitrogen, titanium, boron, carbon or silicon or compounds thereof, wherein the fibers are preferably coated on their surface, in particular with diffusion barrier layers and protective layers or primer layers.
12. Method according to claim 11, **characterized in that** fibers are used that are coated with silicon carbide, silicon nitride, titanium carbide, titanium nitride, carbon or mixed phases or compounds thereof.
13. Method according to any of the preceding claims, **characterized in that** the semi-finished product is heated up for the thixoforming process to a temperature of between 574 and 584° Celsius when using the alloy AlSi7Mg, to a temperature of between 635 and 645° Celsius when using the alloy AlMgSi1, and to a temperature of between 871 and 875° Celsius when using the alloy CuZn40A12.
14. Method according to any of the preceding claims, **characterized in that** the tool is preheated, preferably to a temperature of between 100 and 400° Celsius.
15. Method according to any of the preceding claims, **characterized in that** following the thixotropic transformation the component is cooled down within the tool to a temperature below the solidus temperature.

Revendications

1. Procédé de production d'un composant en matériau composite (MMC) à matrice métallique, qui est renforcée par des fibres ou des particules intégrées, comprenant les étapes suivantes :
- fabrication d'un semi-produit (10 ; 20), dans

lequel sont contenues les fibres (16) ou les particules et la matrice métallique (14 ; 24) et
 - thixoformage du semi-produit (10 ; 20) dans un outil à une température au-dessus de la température de solidus et en dessous de la température de liquidus de la matrice métallique (14 ; 24),

caractérisé en ce que l'étape de la fabrication d'un semi-produit (10 ; 20) comprend un revêtement d'un matériau composite renforcé par des fibres avec la matrice métallique ou avec un mélange granuleux ou de pellets composé de la matrice métallique et de fibres courtes ou de particules poudreuses grâce à un procédé qui est sélectionné dans le groupe constitué par

- revêtement du matériau composite renforcé par des fibres par projection thermique, de préférence par projection atmosphérique au plasma (APS), par projection par fils métalliques ou par projection par arc électrique ;
- revêtement du matériau composite renforcé par des fibres avec la matrice métallique par un procédé de sérigraphie ;
- revêtement du matériau composite renforcé par des fibres avec la matrice métallique par charge électrostatique ;
- revêtement du matériau composite renforcé par des fibres avec la matrice métallique par séparation électrophorétique à partir d'une suspension aqueuse assistée d'un champ électrique.

2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'**une succession de couches (12, 14 ; 22) est laminée pour former une feuille pré-imprégnée (10 ; 20), qui contient des matériaux composites renforcés par des fibres (22) revêtus de matrice métallique ou des composites en fibres (22) revêtus de mélanges composés de la matrice métallique et de fibres courtes ou de particules, contenant également des tôles en matrice métallique (14) ou des mélanges composés de la matrice métallique et de fibres courtes ou de particules.
3. Procédé selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** les mélanges de la matrice métallique (14) et de fibres courtes ou de particules sont fabriqués par procédés de granulation ou de pelletisation.
4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le rapport volumique de la matrice métallique aux fibres est réglé entre 0,3 et 8,0, de préférence entre 0,8 et 3,0.
5. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que**, pendant la fabrication

du semi-produit, le matériau composite renforcé par des fibres est réchauffé pour une durée de 5 secondes maximum, de préférence de 2 secondes maximum, à une température de 300° C maximum.

6. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le matériau composite renforcé par des fibres est maintenu par effort de traction pendant la projection thermique sur un dispositif support (30).
7. Procédé selon l'une des revendications 3 à 6, **caractérisé en ce que** l'on utilise, lors de l'étape de la transformation en pellets ou en granulés, des fibres d'une longueur comprise entre 0,5 et 20 mm, de préférence entre 2 et 6 mm, et **en ce que** l'on utilise de préférence un rapport de volume de matrice métallique par rapport aux fibres situé entre 0,3 et 5, encore mieux entre 1 et 2.
8. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'on utilise au moins une couche avec un matériau composite renforcé par des fibres en fibres longues d'une longueur d'au moins un millimètre ou en fibres longues avec un rapport d'aspect (rapport de la longueur au diamètre) d'au moins 50, de préférence d'au moins 100, encore mieux d'au moins 150, pour la fabrication d'une feuille pré-imprégnée.
9. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'on utilise comme matrice métallique un alliage d'aluminium ou un alliage de cuivre, en particulier un alliage, qui se compose des éléments principaux d'aluminium, de magnésium et de silicium ou des éléments principaux de cuivre et d'étain ou de zinc, de préférence un alliage qui est sélectionné à partir du groupe constitué par des alliages du type AlMg4, 5Mn0,4, AlMgSi1, AlSi7Mg, AlSi3, AlSi12, CuZn40Al12 et CuSn13, SA10,3.
10. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la matrice métallique est renforcée par des particules intégrées, qui sont constituées de préférence de céramiques oxydées, de carbures, de nitrures, de métaux ou d'alliages ou de matériaux à effet tribologique.
11. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'on utilise des fibres, qui se composent de carbone, de carbure de silicium, d'oxyde d'aluminium, de mullite ou contiennent des modifications de ces fibres avec de l'azote, du titane, du bore, du carbone ou du silicium ou de leurs composés, les fibres étant revêtues de préférence à leur surface, en particulier de couches anti-diffusion et de couches de protection ou de couches d'agent ad-

hésif.

12. Procédé selon la revendication 11 **caractérisé en ce que** l'on utilise des fibres revêtues de carbure de silicium, de nitrure de silicium, de carbure de titane, de nitrure de titane, de carbone ou de phases mixtes ou composés à partir de celles-ci. 5
13. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le semi-produit est chauffé lors de l'utilisation de l'alliage AlSi7Mg pour le thixoformage à une température située entre 574 et 584° C, lors de l'utilisation de l'alliage AlMgSi1 à une température située entre 635 et 645° C, et lors de l'utilisation de l'alliage CuZn40Al2 à une température située entre 871 et 875° C. 10 15
14. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'outil est préchauffé, de préférence à une température située entre 100 et 400° C. 20
15. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le composant est refroidi après le formage thixotrope à l'intérieur de l'outil en dessous de la température de solidus. 25

30

35

40

45

50

55

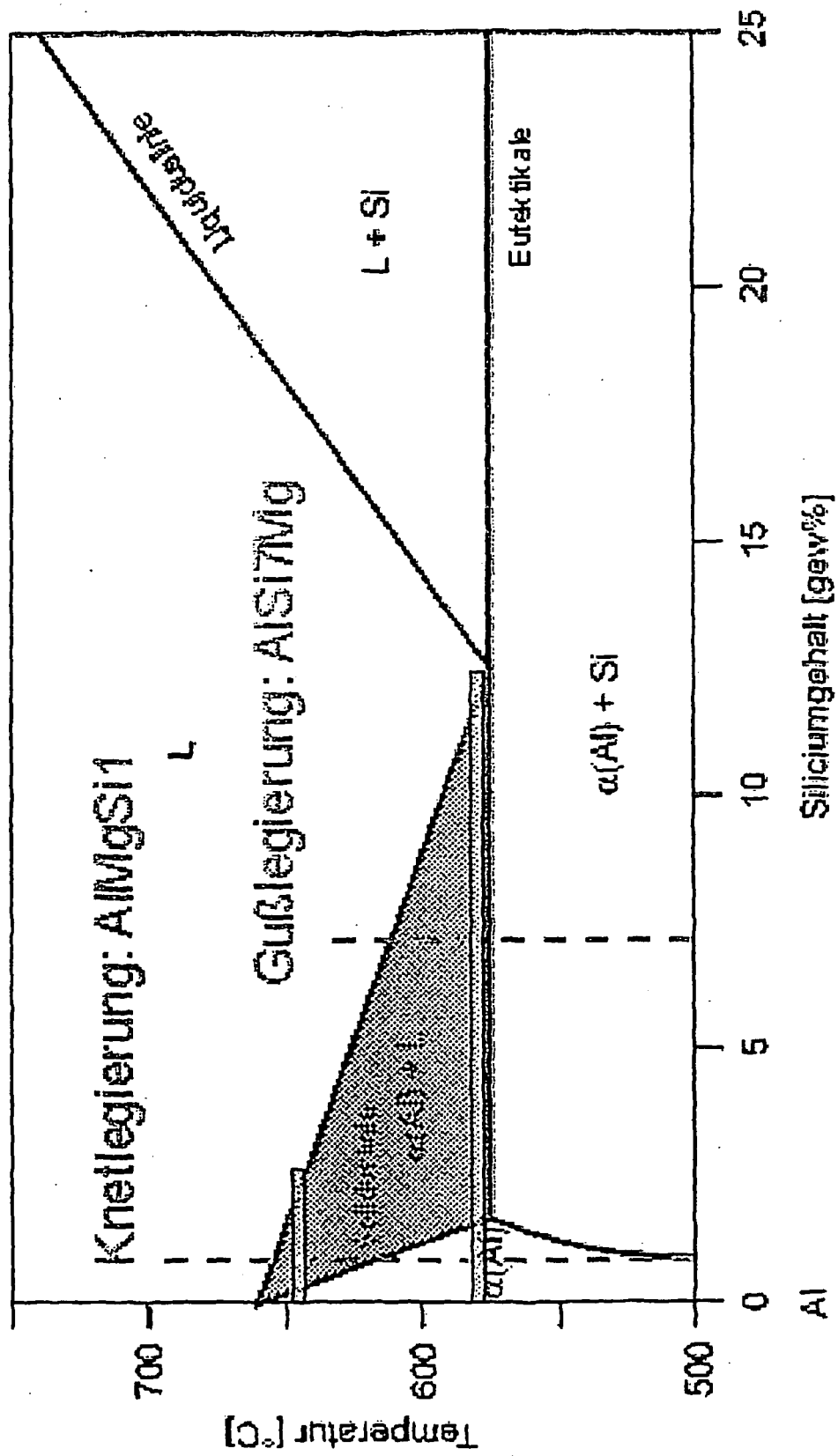


Fig. 1

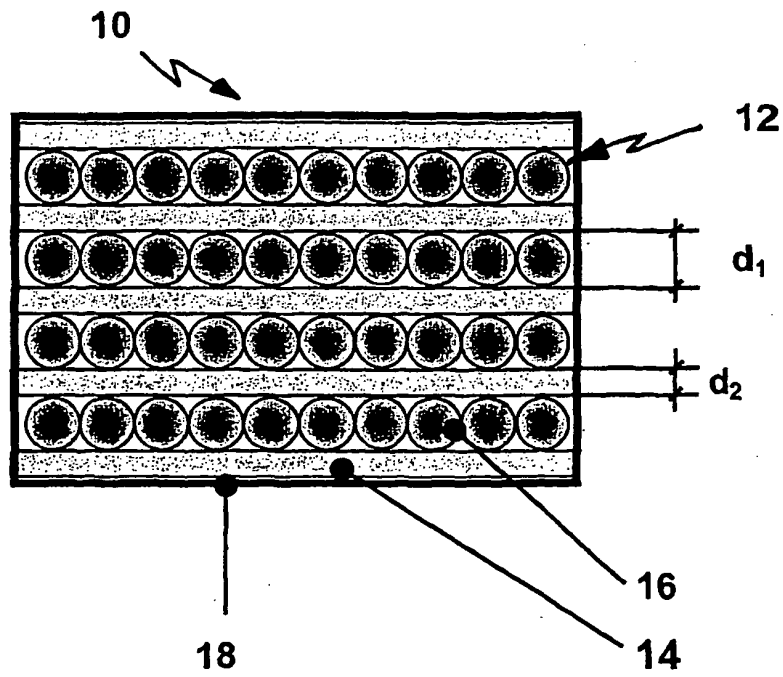


Fig. 2

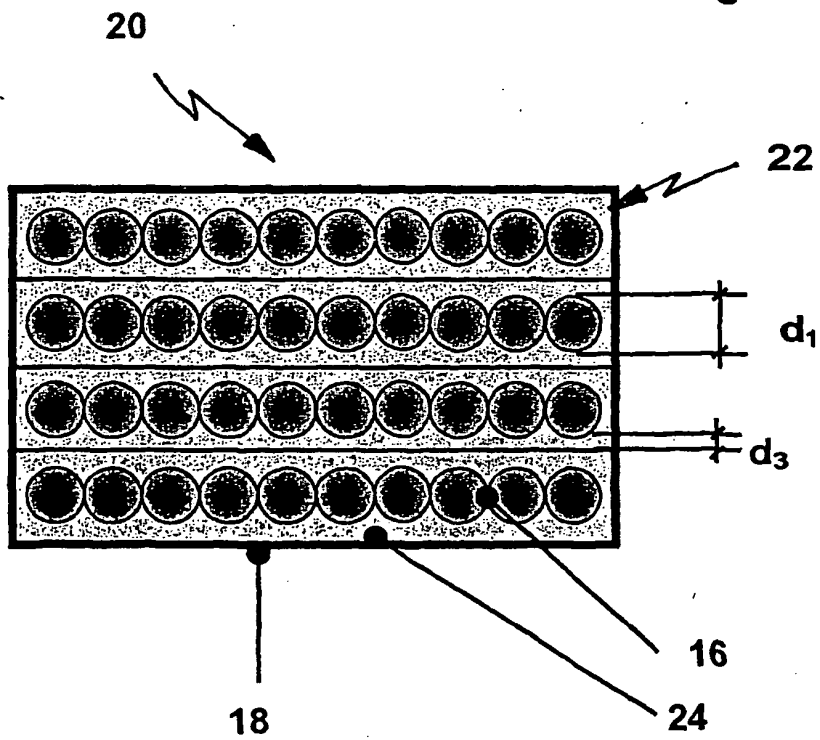


Fig. 3

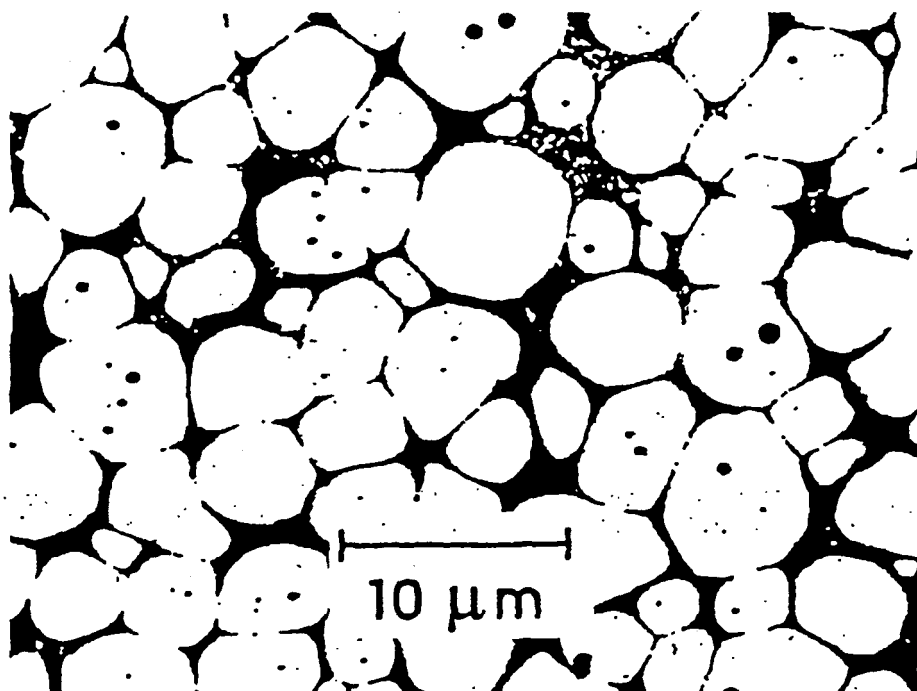


Fig. 4

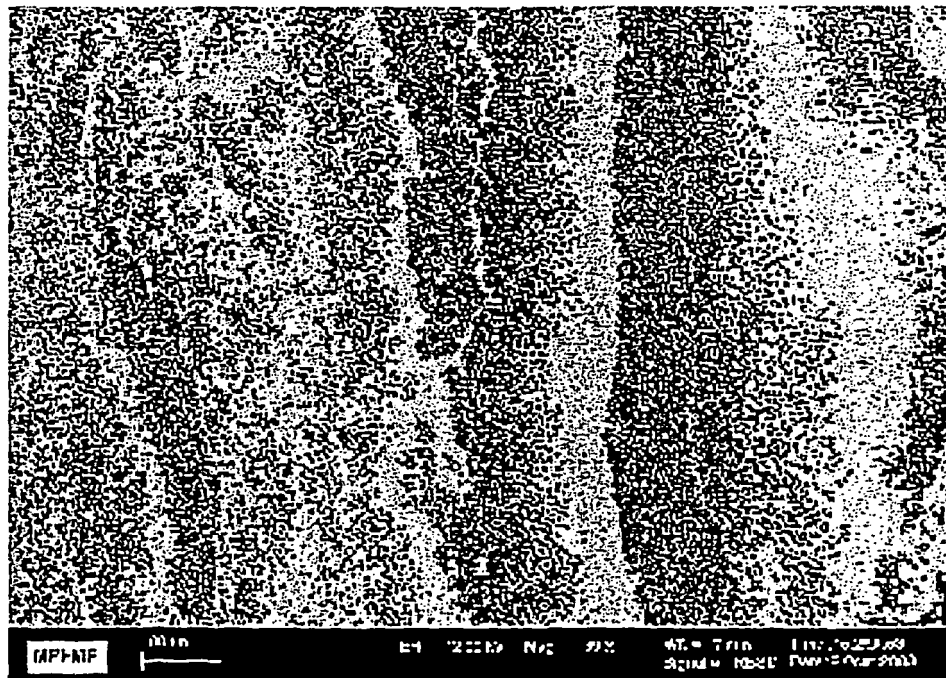


Fig. 5

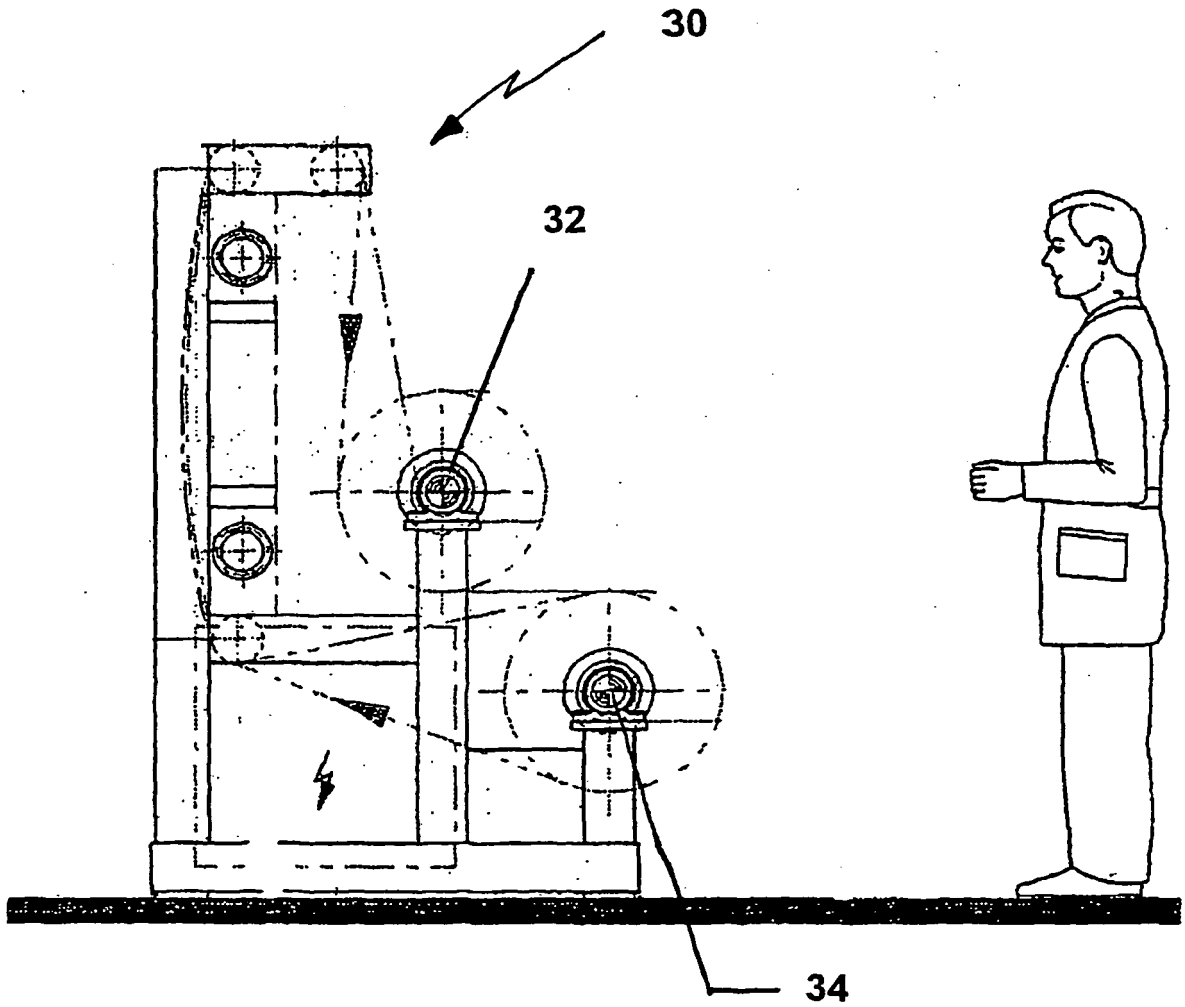


Fig. 6

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- US 6151198 A [0002]
- US 6135195 A [0004]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **S.W. YOUN et al.** Mechanical characteristics evaluation of hollow shape part with metal matrix composites fabricated by thixoforging process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 130, 574-580 [0005]
- EAA European Aluminium Association. **FROYNE, L. ; VERLINDEN, B.** Talat Lecture. 1994, 1402 [0008]
- **K.; MESSMER ; G.; BAUR, J. ; WOLF, A.** Thixoschmieden von Aluminiumbauteilen. *Tagungsband zur 7. sächsischen Fachtagung Umformtechnik, Chemnitz*, 2000, vol. 7 [0082]
- **BAUR. J. ; MESSMER, G.** Automated Thixoforging Unit, in: *Proceedings to the 7. Int. Conf. on Semi-Solid-Processing of Alloys and Composites*, 24. September 2002 [0082]