



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
31.10.2007 Patentblatt 2007/44

(51) Int Cl.:
C21D 1/78 (2006.01) C22F 1/10 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **06008688.1**

(22) Anmeldetag: **26.04.2006**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI SK TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL BA HR MK YU

(71) Anmelder: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**
80333 München (DE)

(72) Erfinder:
• **Ott, Michael**
45478 Mülheim an der Ruhr (DE)
• **Wilkenhöner, Rolf, Dr.**
14532 Kleinmachow (DE)

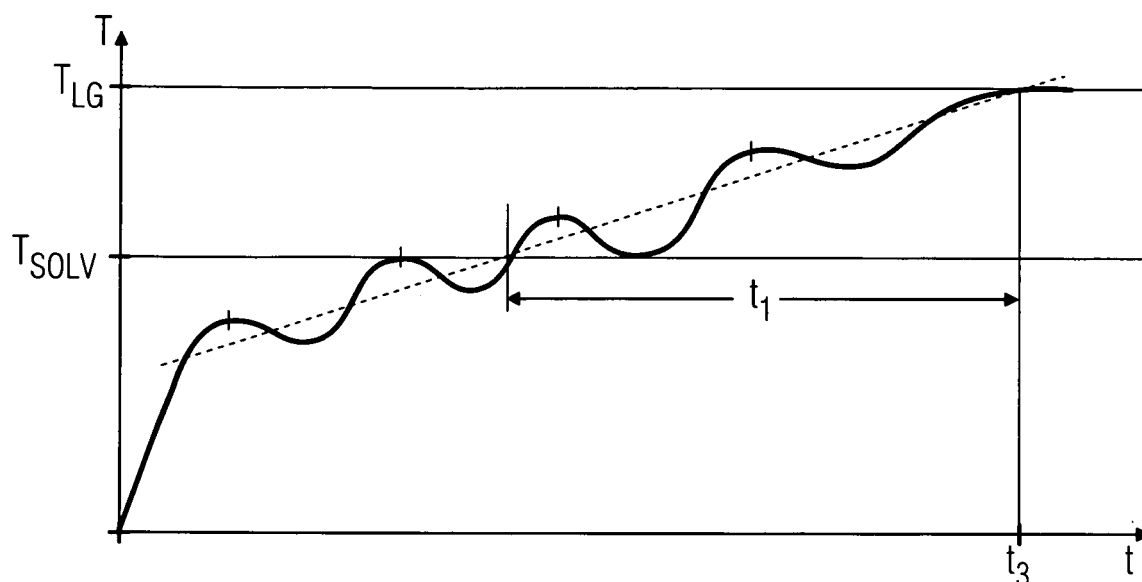
(54) **Pendelförmiges Wärmebehandlungsverfahren für eine Superlegierung**

(57) Gerichtet erstarrte Superlegierungen können oft nicht wärmebehandelt werden, da die Wärmebehandlung zur Rekristallation führt.

Durch den erfindungsgemäßen Temperaturverlauf während einer Wärmebehandlung, die pendelförmig ausgebildet ist, kann eine Rekristallation bei der Wärmebe-

handlung vermieden werden, weil mechanische Spannungen durch die wiederkehrende Abfolge Lösen und Ausscheiden der Ausscheidung abgebaut werden. Als Ausführungsbeispiel wird die Anwendung des Verfahrens auf eine Ni-Basis Superlegierung mit γ' -Ausscheidung offenbart. Während der Wärmebehandlung wird die Volllösungsglühtemperatur nicht überschritten.

FIG 1



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Wärmebehandlungsverfahren eines Werkstoffs, der eine Ausscheidung aufweist.

[0002] Nickelbasissuperlegierungen, die insbesondere für Gasturbinenbauteile, wie Turbinenschaufeln oder Brennkammereinsätze verwendet werden, weisen eine γ' -Phase auf, die im Rahmen einer Revision, d.h. während des Refurbishment einer sog. γ' -Lösungsglühung unterzogen werden, um die ursprünglichen Materialeigenschaften wieder herzustellen.

Dies ist bei Bauteilen mit ausgerichtet erstarrten Nickelbasissuperlegierungen nicht ohne Schwierigkeiten möglich. Die γ' -Lösungsglühung führt bei mechanisch verformter Oberfläche, wie etwa im Bereich der Laufschaufelfüße zu einer Rekristallation der γ' -Phase an der Bauteiloberfläche. Da gerichtet erstarrte Nickelbasissuperlegierungen im Gegensatz zu konventionellen Nickelbasissuperlegierungen keine oder nur wenig Korngrenzen festigende Elemente aufweisen, ist die durch die Rekristallation erzeugte Kornneubildung auf der Bauteiloberfläche eine nicht tolerierbare Materialschwächung.

[0003] Es ist daher Aufgabe der Erfindung, oben genanntes Problem zu überwinden.

[0004] Die Aufgabe wird gelöst durch ein Wärmebehandlungsverfahren gemäß Anspruch 1, bei dem durch Lösen der Ausscheidung, Ausscheiden der Ausscheidung und wiederum das Lösen und der Ausscheidung die mechanischen Spannungen abgebaut werden, so dass keine Rekristallation auftreten kann.

[0005] In den Unteransprüchen sind weitere vorteilhafte Maßnahmen aufgelistet, die beliebig in vorteilhafter Art und Weise miteinander kombiniert werden können.

[0006] Es zeigen

Figur 1 - 12 Ausführungsbeispiele des Temperaturverlaufs erfindungsgemäßer Wärmebehandlungsverfahren,

Figur 13 eine Liste von Superlegierungen

Figur 14 eine Gasturbine,

Figur 15 perspektivisch eine Turbinenschaufel und

Figur 16 perspektivisch eine Brennkammer.

[0007] Die erfindungsgemäße Wärmebehandlung wird insbesondere für Nickelbasissuperlegierungen durchgeführt. Solche DX- oder SX-Nickelbasis-Superlegierungen (Figur 13) werden insbesondere für Turbinenschaufeln 120, 130 (Fig. 14, 15), Brennkammerelemente 155 (Fig. 16) für Turbinen, insbesondere für Gasturbinen 100 (Fig. 14) verwendet.

Die Wärmebehandlung kann auch mit Flugzeugturbinkomponenten (insbesondere Schaufeln) durchgeführt werden.

[0008] Beispielhaft wird das Verfahren der Wärmebehandlung für Nickel-Superlegierungen erläutert, die die γ' Phase aufweisen, also eine γ' -Lösungsglühung.

Vor der Wärmebehandlung kann auch eine Fluoridionenreinigung (FIC) durchgeführt werden, die zum einen dazu benutzt werden kann, Risse von Oxiden zu reinigen, aber auch um insbesondere die Bauteiloberfläche an metallischen Elementen des Werkstoffes des Substrats, insbesondere an Aluminium und/oder Titan wie Superlegierungen zu verarmen, da diese beiden Elemente γ' -Bildner sind. Eine Verarmung der γ' -Phase wie Superlegierungen im Bereich der Bauteiloberfläche setzt die in der Oberfläche durch mechanische Belastung entstandenen Eigenspannungen herab. Durch die Herabsetzung dieser Spannung wird die Treibkraft für die Kornneubildung (Rekristallation) reduziert.

Die dazu erforderliche FIC-Reinigung wird vorzugsweise bei Temperaturen um 1000°C mit HF/H₂-Gemischen durchgeführt.

[0009] Die γ' -Lösungsglühung zur vollständigen Auflösung der Ausscheidung (hier γ') nach dem Stand der Technik weist für Superlegierungen eine γ' -Volllösungsglühtemperatur T_{LG} auf, die nach folgender Formel berechnet wird:

$$T_{LG} = 1299,315 + 3,987 W - 3,624 Ta + 2,424 Ru + 0,958 Re - 6,362 Cr - 4,943 Ti - 2,602 Al - 2,415 Co - 2,224 Mo.$$

[0010] Im Folgenden wird eingegangen auf den zeitlichen Lösungsglühtemperaturverlauf $T(t)$.

In den Figuren ist der Temperaturverlauf $T(t)$ über die Zeit t aufgetragen, wobei die Temperatur T_{LG} die oben beschriebene Volllösungsglühtemperatur darstellt und die Auflösungstemperatur T_{SOLV} eine materialspezifische Temperatur darstellt, ab der sich die Ausscheidung erst auflösen kann, aber eine komplette Auflösung der Ausscheidungen zu lange dauert.

[0011] Die Zeitdauer t_1 , vorzugsweise mindestens 1h, ist die Zeit vom erstmaligen Überschreiten der Temperatur T_{SOLV} bis zu dem Zeitpunkt t_3 , ab dem die Temperatur T vorzugsweise konstant auf der Volllösungsglühtemperatur T_{LG} verharrt. Die Verweildauer auf der Volllösungsglühtemperatur beträgt vorzugsweise mindestens 1 Stunde (1h).

[0012] In Figur 1 fängt die Pendelbewegung der Temperatur T schon unterhalb der Temperatur T_{SOLV} an und steigt dann stetig (siehe gestrichelte ansteigende Linie) und pendelförmig bis zur Temperatur T_{LG} an.

[0013] Nach Überschreiten der Temperatur T_{SOLV} kann die Temperatur T_{SOLV} durch die pendelförmige Bewegung unterschritten werden (in Fig.1 nicht der Fall). Vorzugsweise ab einer bestimmten Zeit t_3 , verharrt die Temperatur T konstant auf der Volllösungsglühtemperatur T_{LG} , auf der sie vorzugsweise mindestens 1h verharrt.

[0014] In Figur 1 sind vier lokale Maxima des Temperaturverlaufs zu erkennen, d.h. es sind vier Pendelbewegungen vorhanden. Es können aber auch fünf oder mehr Pendelbewegungen erzeugt werden.

[0015] In Figur 2 verläuft der Temperaturverlauf ähnlich wie in Figur 1, jedoch beginnt die pendelförmige Bewegung erst oberhalb der Temperatur T_{SOLV} . Die Temperatur T_{SOLV} wird durch die pendelförmige Bewegung vorzugsweise nicht unterschritten. Vorzugsweise ab ei-

ner bestimmten Zeit t_3 verharrt die Temperatur T konstant auf der Volllösungsglühtemperatur T_{LG} , auf der sie vorzugsweise mindestens 1h verharrt.

In Figur 2 sind drei lokale Maxima zu erkennen, so dass hier drei Pendelbewegungen vorliegen.

[0016] In Figur 3 steigt (nicht pendelförmig) die Temperatur T über die Temperatur T_{SOLV} an und sinkt hier beispielsweise einmal wieder unter die Temperatur T_{SOLV} und steigt dann pendelförmig bis zur Temperatur T_{LG} an.

Vorzugsweise ab einer bestimmten Zeit t_3 , verharrt die Temperatur T konstant auf der Volllösungsglühtemperatur T_{LG} , auf der sie vorzugsweise mindestens 1h verharrt. In Figur 3 sind drei lokale Maxima zu erkennen, so dass hier drei Pendelbewegungen vorliegen.

[0017] In der stetig ansteigenden Pendelbewegung (siehe gestrichelte Linien) der Temperatur T gemäß Figuren 1, 2, 3 kann die Temperatur einmal oder mehrmals von einer Temperatur oberhalb T_{SOLV} unter die Temperatur T_{SOLV} pendeln.

[0018] In Figur 4 steigt (nicht pendelförmig) die Temperatur T über die Temperatur T_{SOLV} bis zur Lösungsglühtemperatur T_{LG} an und pendelt zwischen diesen zwei Temperaturen T_{LG} , T_{SOLV} hin und her.

[0019] Der pendelförmige Temperaturverlauf $T(t)$ verläuft dann vorzugsweise gleichmäßig, erkennbar an der waagrecht verlaufenden gestrichelten Linie.

Vorzugsweise ab einer bestimmten Zeit t_3 , verharrt die Temperatur T konstant auf der Volllösungsglühtemperatur T_{LG} , auf der sie vorzugsweise mindestens 1h verharrt. In Figur 4 sind zwei Pendelbewegungen dargestellt.

Es können jedoch drei oder mehr Pendelbewegungen durchgeführt werden.

[0020] In Figur 5 steigt (nicht pendelförmig) die Temperatur T auch bis zur Volllösungsglühtemperatur T_{LG} an und fällt dann ab, wobei jedoch die Temperatur T_{SOLV} nicht erreicht wird (Unterschied $\Delta T > 0$).

Der pendelförmige Temperaturverlauf $T(t)$ verläuft dann vorzugsweise gleichmäßig, erkennbar an der waagrecht verlaufenden gestrichelten Linie.

Vorzugsweise ab einer bestimmten Zeit t_3 , verharrt die Temperatur T konstant auf der Volllösungsglühtemperatur T_{LG} , auf der sie vorzugsweise mindestens 1h verharrt. In Figur 5 sind drei lokale Maxima zu erkennen, so dass hier drei Pendelbewegungen vorliegen.

[0021] In Figur 6 steigt (nicht pendelförmig) die Temperatur T über die Temperatur T_{SOLV} hinaus bis zu einer Temperatur unterhalb der Temperatur T_{LG} an und pendelt dann zwischen diesen zwei Werten hin und her. Der pendelförmige Temperaturverlauf $T(t)$ verläuft dann vorzugsweise gleichmäßig, erkennbar an der waagrecht verlaufenden gestrichelten Linie.

Vorzugsweise ab einer bestimmten Zeit t_3 , verharrt die Temperatur T konstant auf der Volllösungsglühtemperatur T_{LG} , auf der sie vorzugsweise mindestens 1h verharrt. In Figur 6 sind zwei Pendelbewegungen dargestellt.

Es können jedoch auch drei oder mehr Pendelbewegungen durchgeführt werden.

[0022] In Figur 7 steigt (nicht pendelförmig) die Temperatur T über die Temperatur T_{SOLV} hinaus bis zu einer Temperatur unterhalb der Temperatur T_{LG} an und pendelt zwischen dieser Temperatur unterhalb T_{LG} und einer Temperatur oberhalb T_{SOLV} hin und her. Der pendelförmige Temperaturverlauf $T(t)$ verläuft dann vorzugsweise gleichmäßig, erkennbar an der waagrecht verlaufenden gestrichelten Linie.

Vorzugsweise ab einer bestimmten Zeit t_3 , verharrt die Temperatur T konstant auf der Volllösungsglühtemperatur T_{LG} , auf der sie vorzugsweise mindestens 1h verharrt. In Figur 7 sind drei lokale Maxima zu erkennen, so dass hier drei Pendelbewegungen vorliegen.

[0023] Abweichend zu den Figuren 4, 6 schwingt die Temperatur T in Figur 8, 9 auch unter die Temperatur T_{SOLV} .

In Figur 8 erreicht die Temperatur immer einen maximalen Wert der Volllösungsglühtemperatur T_{LG} , wohingegen in Figur 9 der maximale Wert des Temperaturverlaufs eine Temperatur oberhalb T_{SOLV} , aber unterhalb der Volllösungsglühtemperatur T_{LG} erreicht.

Vorzugsweise ab einer bestimmten Zeit t_3 , verharrt die Temperatur T in Figur 8, 9 konstant auf der Volllösungsglühtemperatur T_{LG} , auf der sie vorzugsweise mindestens 1h verharrt. In Figur 8 sind zwei Pendelbewegungen dargestellt.

Es können jedoch auch drei oder mehr Pendelbewegungen durchgeführt werden.

In Figur 9 sind zwei Pendelbewegungen dargestellt.

Es können jedoch auch drei oder mehr Pendelbewegungen durchgeführt werden.

[0024] In Figur 10 steigt (nicht pendelförmig) die Temperatur T über die Temperatur T_{SOLV} an und pendelt zwischen diesem Wert und einem niedrigeren Wert ($\geq T_{SOLV}$) hin und her. Der pendelförmige Temperaturverlauf $T(t)$ verläuft dann vorzugsweise gleichmäßig, erkennbar an der waagrecht verlaufenden gestrichelten Linie.

[0025] Danach steigt die Temperatur nach einer bestimmten Zeit t_2 insbesondere pendelförmig auf die Volllösungsglühtemperatur T_{LG} an.

Vorzugsweise ab einer bestimmten Zeit t_3 , verharrt die Temperatur T konstant auf der Volllösungsglühtemperatur T_{LG} , auf der sie vorzugsweise mindestens 1h verharrt. In Figur 10 sind vier lokale Maxima vorhanden, so dass vier pendelförmige Bewegungen vorliegen. Es können aber auch fünf oder mehr Pendelbewegungen durchgeführt werden.

[0026] In Figur 12 ist ein weiteres Ausführungsbeispiel für den erfindungsgemäßen pendelförmigen Temperaturverlauf $T(t)$ dargestellt.

Der Mittelwert der Temperatur T , um den die Temperatur schwankt wird hier schrittweise erhöht, bis ab einer Zeit t_3 die Temperatur konstant auf Temperatur T_{LG} eingestellt wird.

[0027] Anfangs schwingt die Temperatur T um die Temperatur T_{SOLV} , steigt dann auf eine höhere Temperatur an, so dass die Temperatur T_{SOLV} vorzugsweise

nicht mehr unterschritten wird, pendelt und steigt wiederum in einem dritten oder in weiteren Schritten weiter an, wobei hier die maximale Temperatur T_{LG} erreicht wird oder ein Abstand zur Temperatur T_{LG} vorhanden ist.

Vorzugsweise ab einer bestimmten Zeit t_3 , verharrt die Temperatur T konstant auf der Volllösungsglühtemperatur T_{LG} , auf der sie vorzugsweise mindestens 1h verharrt.

[0028] In den Figuren 1 bis 12 sind die Pendelbewegungen nur vorzugsweise wellen- oder sinusförmig dargestellt, sie können auch dreieckförmig (Figur 11), rechteckig (nicht dargestellt) oder anders ausgebildet sein.

[0029] Ebenso kann bei den pendelförmigen Bewegungen auch die Temperatur T_{LG} durch die Pendelbewegung ein oder mehrmals überschritten werden.

[0030] Vorteilhaft ist es auch, wenn die Volllösungsglühtemperatur nicht überschritten wird, abgesehen von einer ungewollten Überschreitung beim Einregeln der Temperatur auf die Volllösungsglühtemperatur.

[0031] Figur 13 zeigt eine Liste von nickelbasierten DS- oder SX-Superlegierungen, die mit dem erfindungsgemäßen Verfahren behandelt werden können.

Für den Werkstoff IN 6203 DS beträgt die Temperatur T_{SOLV} 1100°C, die Temperatur T_{LG} 1150°C.

Für den Werkstoff IN 792 DS beträgt die Temperatur T_{SOLV} 1140°C und die Temperatur T_{LG} 1230°C.

Der Werkstoff PWA 1483 SX weist eine Temperatur T_{SOLV} von 1150°C und eine Temperatur T_{LG} von 1250°C auf.

[0032] Die Figur 14 zeigt beispielhaft eine Gasturbine 100 in einem Längsteilschnitt.

Die Gasturbine 100 weist im Inneren einen um eine Rotationsachse 102 drehgelagerten Rotor 103 mit einer Welle 101 auf, der auch als Turbinenläufer bezeichnet wird.

Entlang des Rotors 103 folgen aufeinander ein Ansauggehäuse 104, ein Verdichter 105, eine beispielsweise torusartige Brennkammer 110, insbesondere Ringbrennkammer, mit mehreren koaxial angeordneten Brennern 107, eine Turbine 108 und das Abgasgehäuse 109.

Die Ringbrennkammer 110 kommuniziert mit einem beispielsweise ringförmigen Heißgaskanal 111. Dort bilden beispielsweise vier hintereinander geschaltete Turbinenstufen 112 die Turbine 108.

Jede Turbinenstufe 112 ist beispielsweise aus zwei Schaufelringen gebildet. In Strömungsrichtung eines Arbeitsmediums 113 gesehen folgt im Heißgaskanal 111 einer Leitschaufelreihe 115 eine aus Laufschaufeln 120 gebildete Reihe 125.

[0033] Die Leitschaufeln 130 sind dabei an einem Innengehäuse 138 eines Stators 143 befestigt, wohingegen die Laufschaufeln 120 einer Reihe 125 beispielsweise mittels einer Turbinenscheibe 133 am Rotor 103 angebracht sind.

An dem Rotor 103 angekoppelt ist ein Generator oder eine Arbeitsmaschine (nicht dargestellt).

[0034] Während des Betriebes der Gasturbine 100 wird vom Verdichter 105 durch das Ansauggehäuse 104

Luft 135 angesaugt und verdichtet. Die am turbinenseitigen Ende des Verdichters 105 bereitgestellte verdichtete Luft wird zu den Brennern 107 geführt und dort mit einem Brennmittel vermischt. Das Gemisch wird dann unter Bildung des Arbeitsmediums 113 in der Brennkammer 110 verbrannt. Von dort aus strömt das Arbeitsmedium 113 entlang des Heißgaskanals 111 vorbei an den Leitschaufeln 130 und den Laufschaufeln 120. An den Laufschaufeln 120 entspannt sich das Arbeitsmedium 113 impulsübertragend, so dass die Laufschaufeln 120 den Rotor 103 antreiben und dieser die an ihn angekoppelte Arbeitsmaschine.

[0035] Die dem heißen Arbeitsmedium 113 ausgesetzten Bauteile unterliegen während des Betriebes der Gasturbine 100 thermischen Belastungen. Die Leitschaufeln 130 und Laufschaufeln 120 der in Strömungsrichtung des Arbeitsmediums 113 gesehen ersten Turbinenstufe 112 werden neben den die Ringbrennkammer 110 auskleidenden Hitzeschildelementen am meisten thermisch belastet.

Um den dort herrschenden Temperaturen standzuhalten, können diese mittels eines Kühlmittels gekühlt werden.

Ebenso können Substrate der Bauteile eine gerichtete Struktur aufweisen, d.h. sie sind einkristallin (SX-Struktur) oder weisen nur längsgerichtete Körner auf (DS-Struktur).

Als Material für die Bauteile, insbesondere für die Turbinenschaufel 120, 130 und Bauteile der Brennkammer 110 werden beispielsweise eisen-, nickel- oder kobaltbasierte Superlegierungen verwendet.

Solche Superlegierungen sind beispielsweise aus der EP 1 204 776 B1, EP 1 306 454, EP 1 319 729 A1, WO 99/67435 oder WO 00/44949 bekannt; diese Schriften sind bzgl. der chemischen Zusammensetzung der Legierungen Teil der Offenbarung.

[0036] Die Leitschaufel 130 weist einen dem Innengehäuse 138 der Turbine 108 zugewandten Leitschaufelfuß (hier nicht dargestellt) und einen dem Leitschaufelfuß gegenüberliegenden Leitschaufelkopf auf. Der Leitschaufelkopf ist dem Rotor 103 zugewandt und an einem Befestigungsring 140 des Stators 143 festgelegt.

[0037] Die Figur 15 zeigt in perspektivischer Ansicht eine Laufschaufel 120 oder Leitschaufel 130 einer Strömungsmaschine, die sich entlang einer Längsachse 121 erstreckt.

[0038] Die Strömungsmaschine kann eine Gasturbine eines Flugzeugs oder eines Kraftwerks zur Elektrizitätserzeugung, eine Dampfturbine oder ein Kompressor sein.

[0039] Die Schaufel 120, 130 weist entlang der Längsachse 121 aufeinander folgend einen Befestigungsbereich 400, eine daran angrenzende Schaufelplattform 403 sowie ein Schaufelblatt 406 und eine Schaufelspitze 415 auf.

Als Leitschaufel 130 kann die Schaufel 130 an ihrer Schaufelspitze 415 eine weitere Plattform aufweisen (nicht dargestellt).

[0040] Im Befestigungsbereich 400 ist ein Schauffelfuß 183 gebildet, der zur Befestigung der Laufschaufeln 120, 130 an einer Welle oder einer Scheibe dient (nicht dargestellt).

Der Schauffelfuß 183 ist beispielsweise als Hammerkopf ausgestaltet. Andere Ausgestaltungen als Tannenbaum- oder Schwalbenschwanzfuß sind möglich.

Die Schaufel 120, 130 weist für ein Medium, das an dem Schauffelblatt 406 vorbeiströmt, eine Anströmkante 409 und eine Abströmkante 412 auf.

[0041] Bei herkömmlichen Schaufeln 120, 130 werden in allen Bereichen 400, 403, 406 der Schaufel 120, 130 beispielsweise massive metallische Werkstoffe, insbesondere Superlegierungen verwendet.

Solche Superlegierungen sind beispielsweise aus der EP 1 204 776 B1, EP 1 306 454, EP 1 319 729 A1, WO 99/67435 oder WO 00/44949 bekannt; diese Schriften sind bzgl. der chemischen Zusammensetzung der Legierung Teil der Offenbarung.

Die Schaufel 120, 130 kann hierbei durch ein Gussverfahren, auch mittels gerichteter Erstarrung, durch ein Schmiedeverfahren, durch ein Fräsverfahren oder Kombinationen daraus gefertigt sein.

[0042] Werkstücke mit einkristalliner Struktur oder Strukturen werden als Bauteile für Maschinen eingesetzt, die im Betrieb hohen mechanischen, thermischen und/oder chemischen Belastungen ausgesetzt sind.

Die Fertigung von derartigen einkristallinen Werkstücken erfolgt z.B. durch gerichtetes Erstarren aus der Schmelze. Es handelt sich dabei um Gießverfahren, bei denen die flüssige metallische Legierung zur einkristallinen Struktur, d.h. zum einkristallinen Werkstück, oder gerichtet erstarrt.

Dabei werden dendritische Kristalle entlang dem Wärmefluss ausgerichtet und bilden entweder eine stängelkristalline Kornstruktur (kolumnar, d.h. Körner, die über die ganze Länge des Werkstückes verlaufen und hier, dem allgemeinen Sprachgebrauch nach, als gerichtet erstarrt bezeichnet werden) oder eine einkristalline Struktur, d.h. das ganze Werkstück besteht aus einem einzigen Kristall. In diesen Verfahren muss man den Übergang zur globulitischen (polykristallinen) Erstarrung meiden, da sich durch ungerichtetes Wachstum notwendigerweise transversale und longitudinale Korngrenzen ausbilden, welche die guten Eigenschaften des gerichtet erstarrten oder einkristallinen Bauteiles zunichte machen.

Ist allgemein von gerichtet erstarrten Gefügen die Rede, so sind damit sowohl Einkristalle gemeint, die keine Korngrenzen oder höchstens Kleinwinkelkorngrenzen aufweisen, als auch Stängelkristallstrukturen, die wohl in longitudinaler Richtung verlaufende Korngrenzen, aber keine transversalen Korngrenzen aufweisen. Bei diesen zweitgenannten kristallinen Strukturen spricht man auch von gerichtet erstarrten Gefügen (directionally solidified structures).

Solche Verfahren sind aus der US-PS 6,024,792 und der EP 0 892 090 A1 bekannt; diese Schriften sind bzgl. des

Erstarrungsverfahrens Teil der Offenbarung.

[0043] Ebenso können die Schaufeln 120, 130 Beschichtungen gegen Korrosion oder Oxidation aufweisen, z. B. (MCrAlX; M ist zumindest ein Element der Gruppe Eisen (Fe), Kobalt (Co), Nickel (Ni), X ist ein Aktivenelement und steht für Yttrium (Y) und/oder Silizium und/oder zumindest ein Element der Seltenen Erden, bzw. Hafnium (Hf)). Solche Legierungen sind bekannt aus der EP 0 486 489 B1, EP 0 786 017 B1, EP 0 412 397 B1 oder EP 1 306 454 A1, die bzgl. der chemischen Zusammensetzung der Legierung Teil dieser Offenbarung sein sollen.

Die Dichte liegt vorzugsweise bei 95% der theoretischen Dichte.

Auf der MCrAlX-Schicht (als Zwischenschicht oder als äußerste Schicht) bildet sich eine schützende Aluminiumoxidschicht (TGO = thermal grown oxide layer).

[0044] Auf der MCrAlX kann noch eine Wärmedämmschicht vorhanden sein, die vorzugsweise die äußerste Schicht ist, und besteht beispielsweise aus ZrO_2 , $Y_2O_3-ZrO_2$, d.h. sie ist nicht, teilweise oder vollständig stabilisiert durch Yttriumoxid und/oder Kalziumoxid und/oder Magnesiumoxid.

Die Wärmedämmschicht bedeckt die gesamte MCrAlX-Schicht. Durch geeignete Beschichtungsverfahren wie z.B. Elektronenstrahlverdampfen (EB-PVD) werden stängelförmige Körner in der Wärmedämmschicht erzeugt.

Andere Beschichtungsverfahren sind denkbar, z.B. atmosphärisches Plasmaspritzen (APS), LPPS, VPS oder CVD. Die Wärmedämmschicht kann poröse, mikro- oder makrorissbehaftete Körner zur besseren Thermochockbeständigkeit aufweisen. Die Wärmedämmschicht ist also vorzugsweise poröser als die MCrAlX-Schicht.

[0045] Die Schaufel 120, 130 kann hohl oder massiv ausgeführt sein.

[0046] Wenn die Schaufel 120, 130 gekühlt werden soll, ist sie hohl und weist ggf. noch Filmkühllöcher 418 (gestrichelt angedeutet) auf.

[0047] Die Figur 16 zeigt eine Brennkammer 110 der Gasturbine 100. Die Brennkammer 110 ist beispielsweise als so genannte Ringbrennkammer ausgestaltet, bei der eine Vielzahl von in Umfangsrichtung um eine Rotationsachse 102 herum angeordneten Brennern 107 in einen gemeinsamen Brennkammerraum 154 münden, die Flammen 156 erzeugen. Dazu ist die Brennkammer 110 in ihrer Gesamtheit als ringförmige Struktur ausgestaltet, die um die Rotationsachse 102 herum positioniert ist.

[0048] Zur Erzielung eines vergleichsweise hohen Wirkungsgrades ist die Brennkammer 110 für eine vergleichsweise hohe Temperatur des Arbeitsmediums M von etwa 1000°C bis 1600°C ausgelegt. Um auch bei diesen, für die Materialien ungünstigen Betriebsparametern eine vergleichsweise lange Betriebsdauer zu ermöglichen, ist die Brennkammerwand 153 auf ihrer dem Arbeitsmedium M zugewandten Seite mit einer aus Hitze-

schildelementen 155 gebildeten Innenauskleidung versehen.

[0049] Aufgrund der hohen Temperaturen im Inneren der Brennkammer 110 kann zudem für die Hitzeschildelemente 155 bzw. für deren Halteelemente ein Kühlsystem vorgesehen sein. Die Hitzeschildelemente 155 sind dann beispielsweise hohl und weisen ggf. noch in den Brennkammerraum 154 mündende Kühllöcher (nicht dargestellt) auf.

[0050] Jedes Hitzeschildelement 155 aus einer Legierung ist arbeitsmediumsseitig mit einer besonders hitzebeständigen Schutzschicht (MCrAlX-Schicht und/oder keramische Beschichtung) ausgestattet oder ist aus hochtemperaturbeständigem Material (massive keramische Steine) gefertigt.

Diese Schutzschichten können ähnlich der Turbinenschaufeln sein, also bedeutet beispielsweise MCrAlX: M ist zumindest ein Element der Gruppe Eisen (Fe), Kobalt (Co), Nickel (Ni), X ist ein Aktivelement und steht für Yttrium (Y) und/oder Silizium und/oder zumindest ein Element der Seltenen Erden, bzw. Hafnium (Hf). Solche Legierungen sind bekannt aus der EP 0 486 489 B1, EP 0 786 017 B1, EP 0 412 397 B1 oder EP 1 306 454 A1, die bzgl. der chemischen Zusammensetzung der Legierung Teil dieser Offenbarung sein sollen.

[0051] Auf der MCrAlX kann noch eine beispielsweise keramische Wärmedämmschicht vorhanden sein und besteht beispielsweise aus ZrO_2 , Y_2O_3 - ZrO_2 , d.h. sie ist nicht, teilweise oder vollständig stabilisiert durch Yttriumoxid und/oder Kalziumoxid und/oder Magnesiumoxid. Durch geeignete Beschichtungsverfahren wie z.B. Elektronenstrahlverdampfen (EB-PVD) werden stängelförmige Körner in der Wärmedämmschicht erzeugt.

Andere Beschichtungsverfahren sind denkbar, z.B. atmosphärisches Plasmaspritzen (APS), LPPS, VPS oder CVD. Die Wärmedämmschicht kann poröse, mikro- oder makrorissbehaftete Körner zur besseren Thermoschockbeständigkeit aufweisen.

[0052] Wiederaufarbeitung (Refurbishment) bedeutet, dass Turbinenschaufeln 120, 130, Hitzeschildelemente 155 nach ihrem Einsatz gegebenenfalls von Schutzschichten befreit werden müssen (z.B. durch Sandstrahlen). Danach erfolgt eine Entfernung der Korrosions- und/oder Oxidationsschichten bzw. -produkte. Bei der Lösungsglühung wird das erfindungsgemäße Verfahren verwendet. Gegebenenfalls werden auch noch Risse in der Turbinenschaufel 120, 130 oder dem Hitzeschildelement 155 repariert. Danach erfolgt eine Wiederbeschichtung der Turbinenschaufeln 120, 130, Hitzeschildelemente 155 und ein erneuter Einsatz der Turbinenschaufeln 120, 130 oder der Hitzeschildelemente 155.

Patentansprüche

1. Wärmebehandlungsverfahren für einen Werkstoff, der eine lösbare Ausscheidung aufweist, die ab einer Auflösungstemperatur (T_{SOLV}) zumin-

dest teilweise in einer Matrix des Werkstoffs aufgelöst werden kann, bei dem der Werkstoff zumindest zeitweise oberhalb der Auflösungstemperatur (T_{SOLV}) wärmebehandelt wird,

dadurch gekennzeichnet, dass

der Temperaturverlauf ($T(t)$) für die Wärmebehandlung zumindest zeitweise pendelförmig verläuft.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die pendelförmige Bewegung des Temperaturverlaufs ($T(t)$) schon unterhalb der Auflösungstemperatur (T_{SOLV}) beginnt und sich zumindest zeitweise oberhalb der Auflösungstemperatur (T_{SOLV}) fortsetzt.
3. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet,** die pendelförmige Bewegung des Temperaturverlaufs ($T(t)$) erst oberhalb der Auflösungstemperatur (T_{SOLV}) beginnt.
4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet,** **dass** es eine Volllösungsglühstemperatur (T_{LG}) gibt, bei der die Ausscheidung vollständig in der Matrix gelöst wird und **dass** die Temperatur (T) zwischen der Temperatur (T_{SOLV}) und der Temperatur (T_{LG}) hin und her pendelt.
5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Temperaturverlauf ($T(t)$) zwischen der Temperatur (T_{LG}) und einer Temperatur oberhalb der Temperatur (T_{SOLV}) hin und her pendelt.
6. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Temperaturverlauf ($T(t)$) unterhalb der Temperatur (T_{LG}) und der Temperatur (T_{SOLV}) hin und her pendelt.
7. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Temperatur (T) unterhalb der Temperatur (T_{LG}) und oberhalb der Temperatur (T_{SOLV}) pendelt.
8. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet,** **dass** es eine Volllösungsglühstemperatur (T_{LG}) gibt, bei der die Ausscheidung vollständig in der Matrix gelöst wird und **dass** die Temperatur (T) zwischen der Volllösungsglühstemperatur (T_{LG}) und einer Temperatur (T) unterhalb der Auflösungstemperatur (T_{SOLV}) hin und her pendelt.

9. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3,
dadurch gekennzeichnet, dass es eine Volllösungsglühtemperatur (T_{LG}) gibt, bei der die Ausscheidung vollständig in der Matrix gelöst wird,
5 **dass** die Temperatur bis zur einer Temperatur unterhalb (T_{LG}) ansteigt und in einem weiteren Schritt pendelförmig bis zur Volllösungsglühtemperatur (T_{LG}) ansteigt.
10. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 9,
dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur (T) für die Wärmebehandlung anfangs bis zu einer Temperatur unterhalb der Auflösungstemperatur (T_{SOLV}) ansteigt und dann pendelförmig ansteigt.
15
11. Verfahren nach Anspruch 1, 3 oder 9,
dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur für die Wärmebehandlung zumindest bis zur Auflösungstemperatur (T_{SOLV}) ansteigt und dann pendelförmig ansteigt.
20
12. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 9, 10 oder 11,
dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur (T) anfangs ein oder mehrmals von einer Temperatur oberhalb der Auflösungstemperatur (T_{SOLV}) unterhalb der Auflösungstemperatur (T_{SOLV}) pendelt.
25 **30**
13. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 9, 10 oder 11,
dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur (T) von einer Temperatur oberhalb der Auflösungstemperatur (T_{SOLV}) nicht unterhalb der Auflösungstemperatur (T_{SOLV}) pendelt.
35
14. Verfahren nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass eine Pendelbewegung definiert ist durch zwei lokale Maxima in dem Temperaturverlauf ($T(t)$) und **40** **dass** der pendelförmige Temperaturverlauf ($T(t)$) zumindest zwei, insbesondere zumindest drei Pendelbewegungen aufweist.
45
15. Verfahren nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass die pendelförmige Bewegung der Temperatur (T) **50** mindestens 1h dauert.
16. Verfahren nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass **55** die Pendelbewegung des Temperaturverlaufs ($T(t)$) sinusförmig ausgebildet ist.
17. Verfahren einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass die Pendelbewegung des Temperaturverlaufs ($T(t)$) dreieckförmig verläuft.
18. Verfahren nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass ab einer bestimmten Zeit (t_3) die Temperatur (T) konstant auf die Volllösungsglühtemperatur (T_{LG}) eingestellt wird.
19. Verfahren nach Anspruch 18,
dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur (T) mindestens eine Stunde (1h) auf der Volllösungsglühtemperatur (T_{LG}) verhartet.
20. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass vor der Wärmebehandlung eine Verarmung von metallischen Elementen des Werkstoffs, insbesondere durch eine Fluoridionenreinigung durchgeführt wird.
21. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass die Ausscheidung die γ' -Phase einer nickelbasierten Superlegierung ist.
22. Verfahren nach Anspruch 1, 5, 8, 9 18 oder 19,
dadurch gekennzeichnet, dass die Volllösungsglühtemperatur (T_{LG}) nicht überschritten wird.

FIG 1

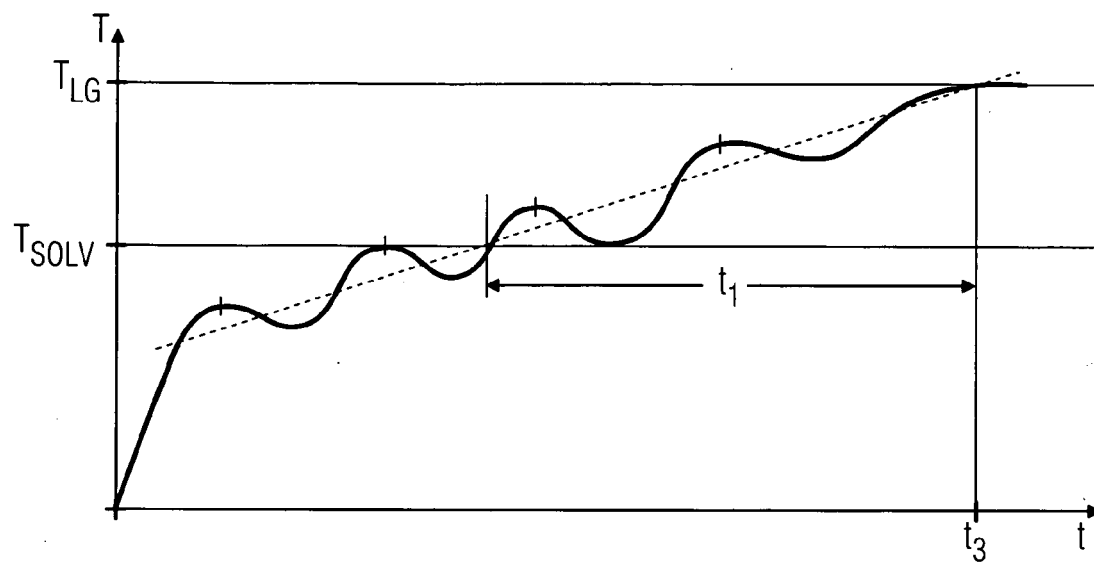


FIG 2

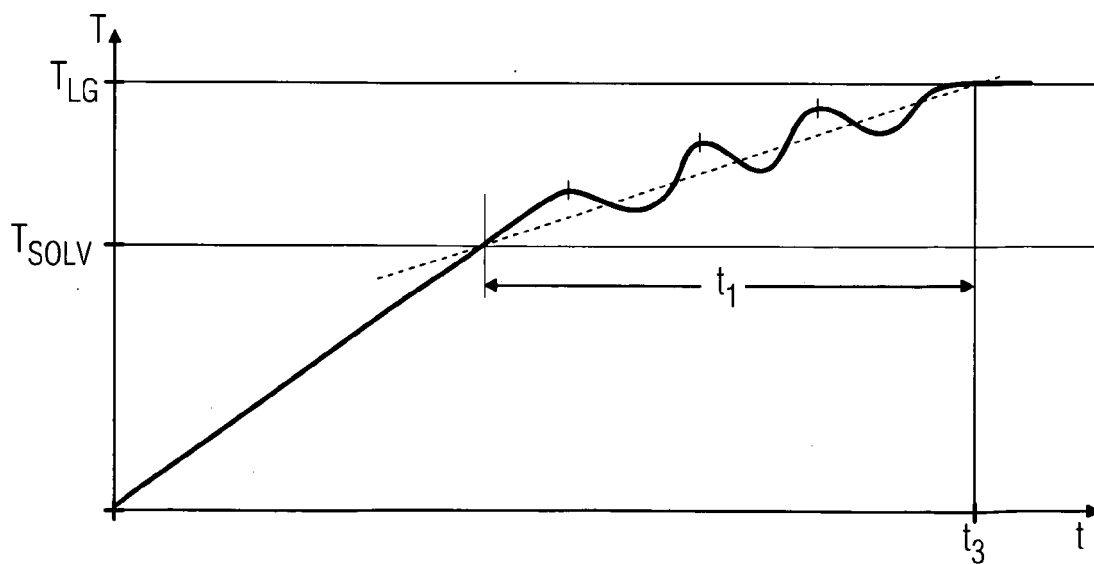


FIG 3

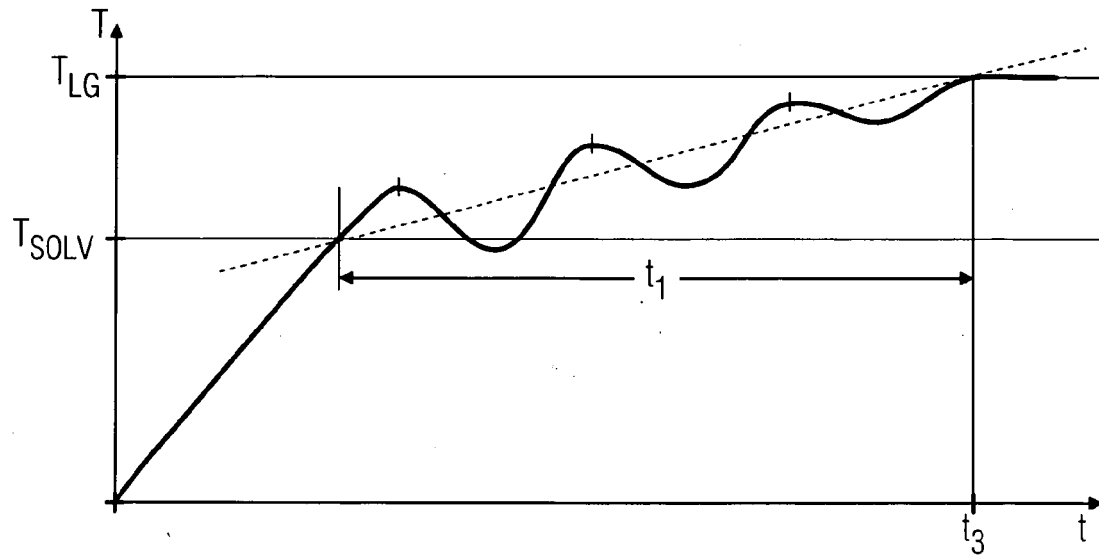


FIG 4

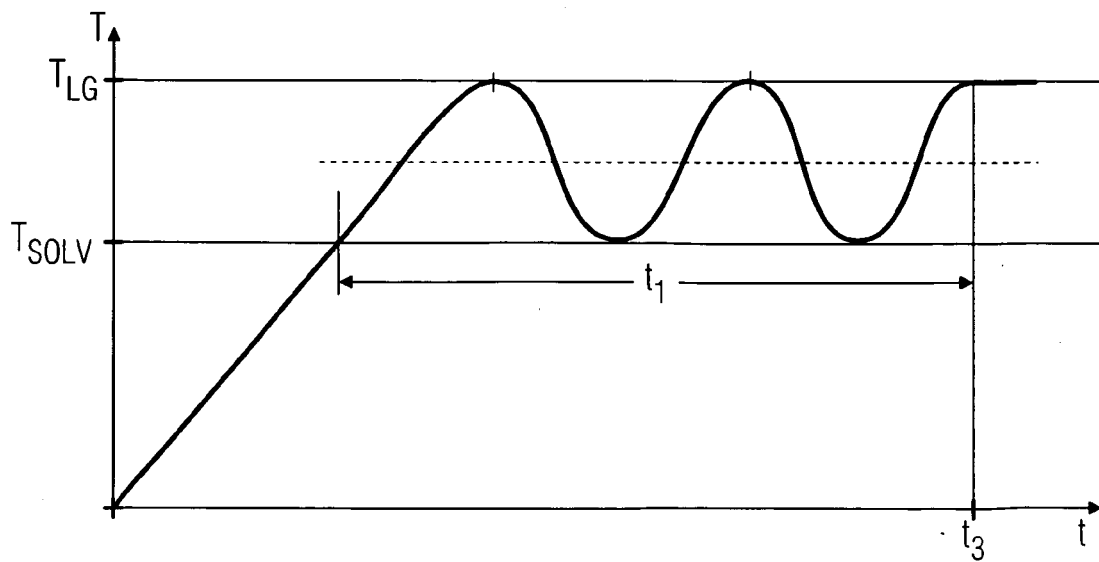


FIG 5

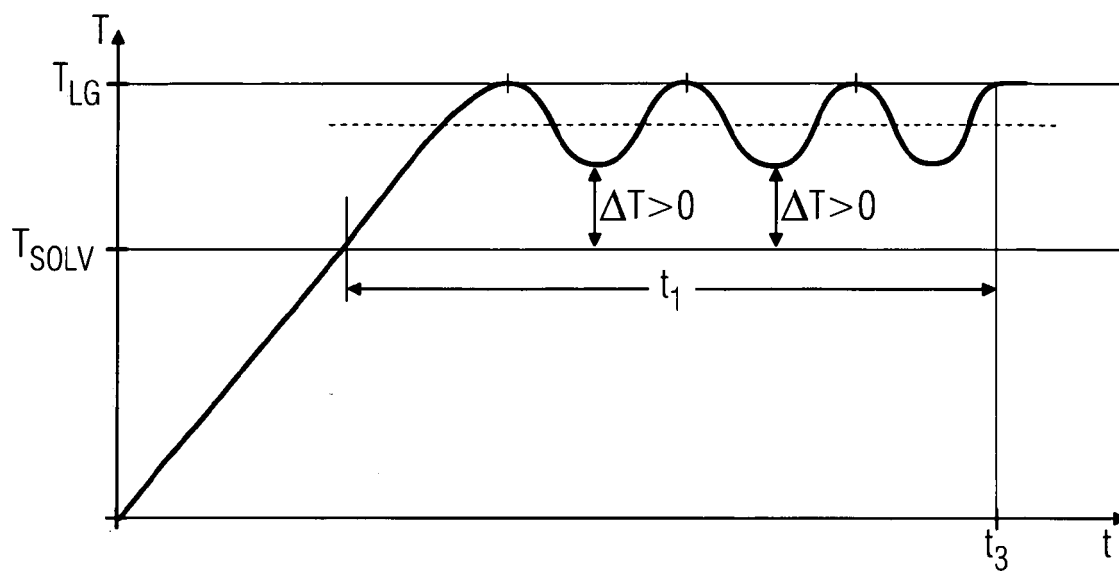


FIG 6

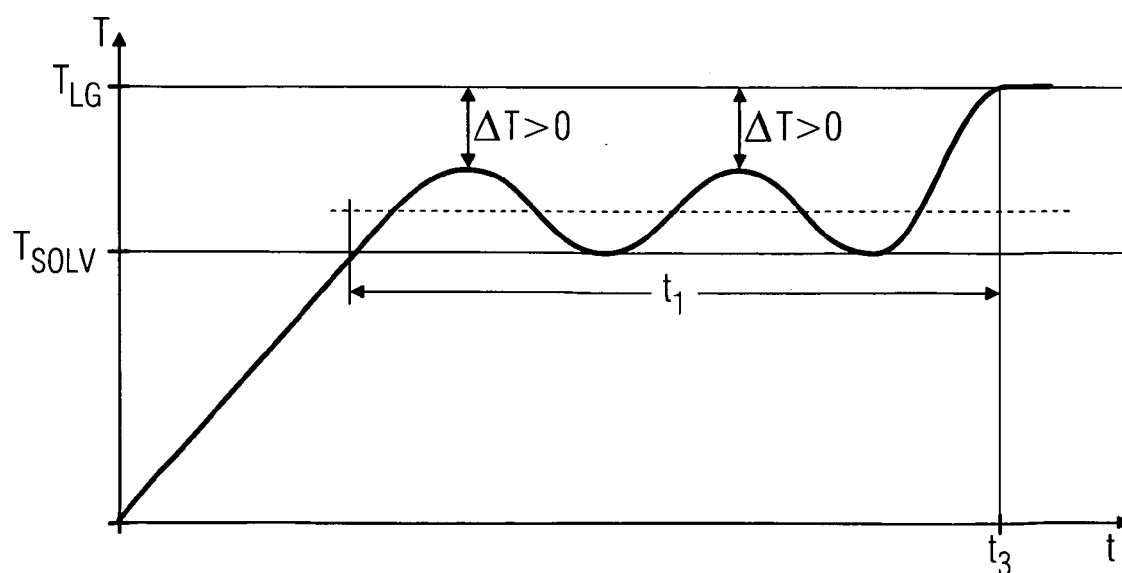


FIG 7

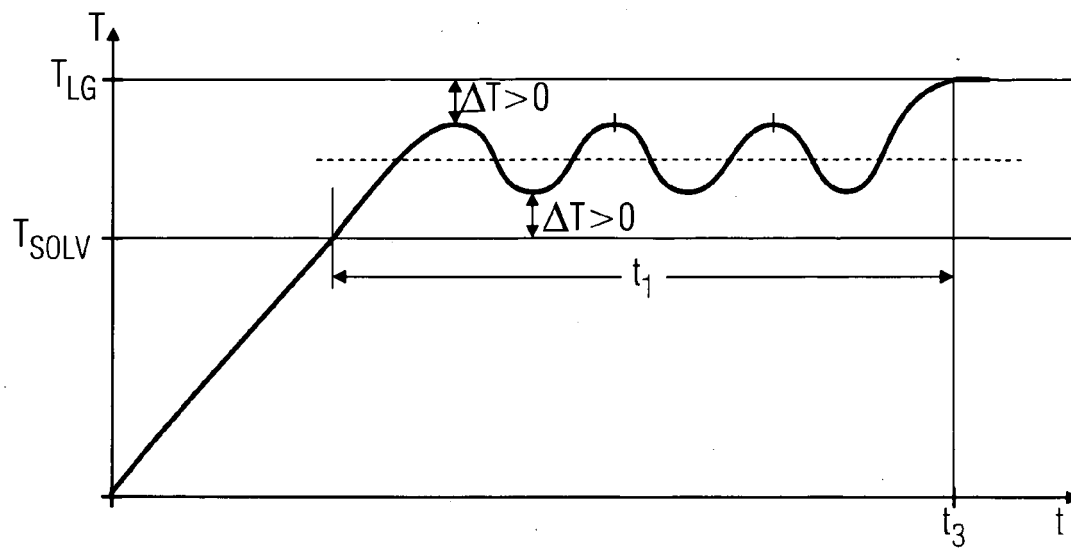


FIG 8

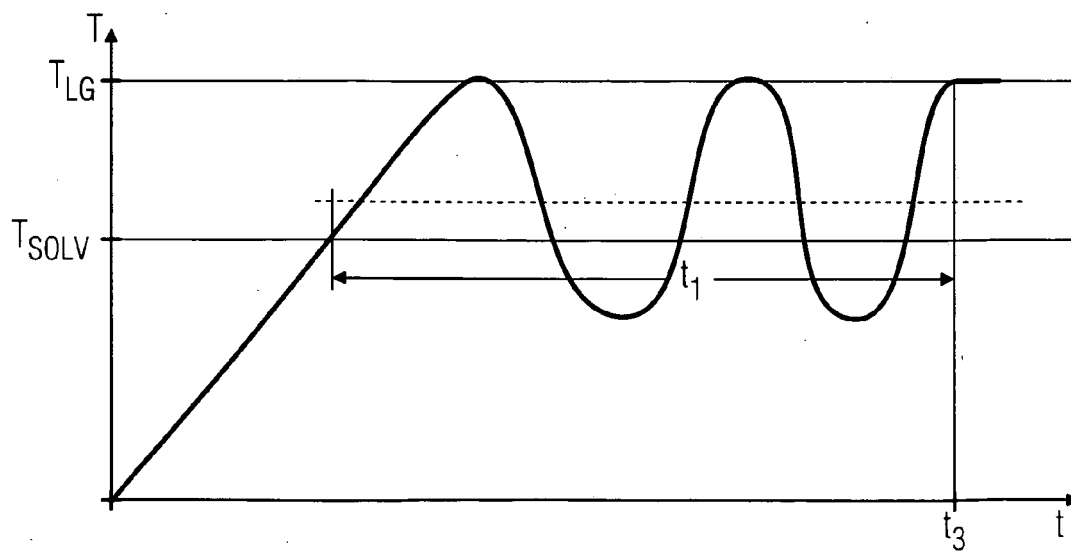


FIG 9

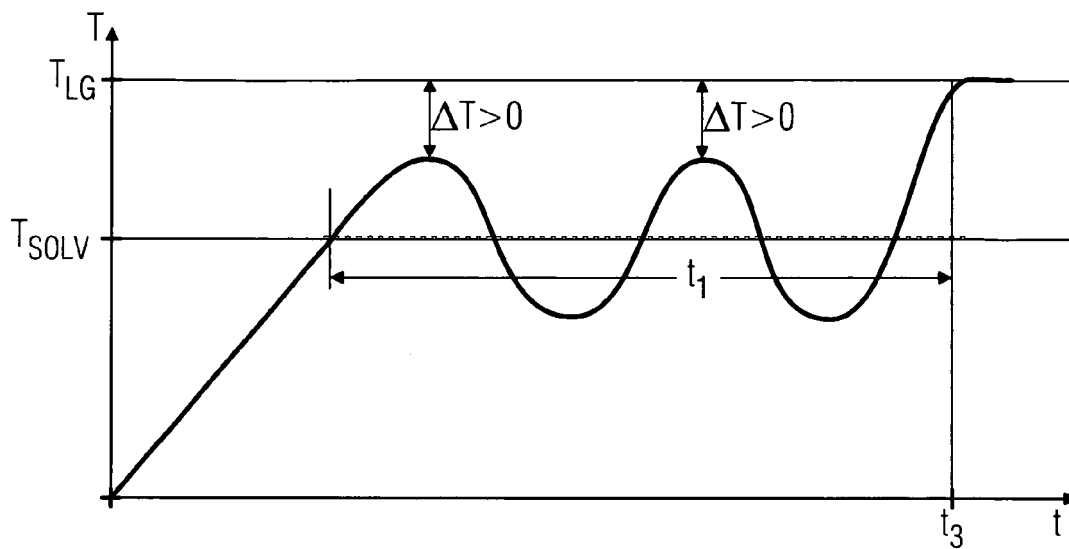


FIG 10

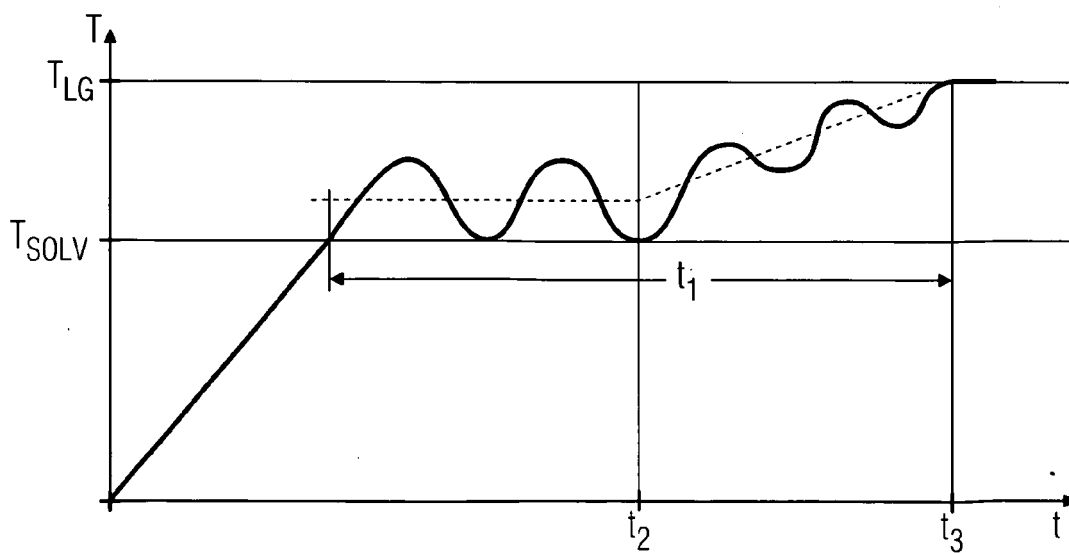


FIG 11

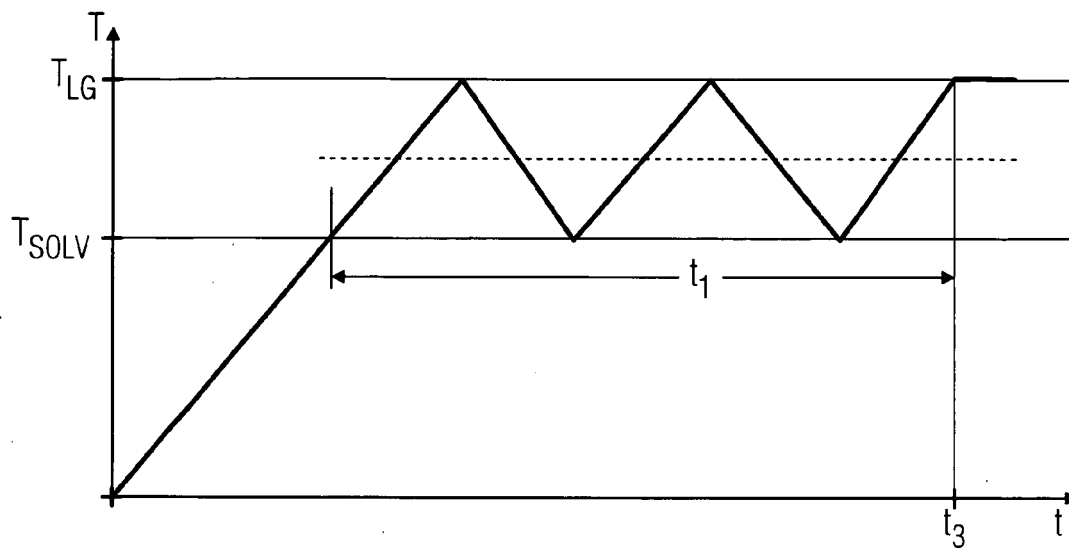


FIG 12

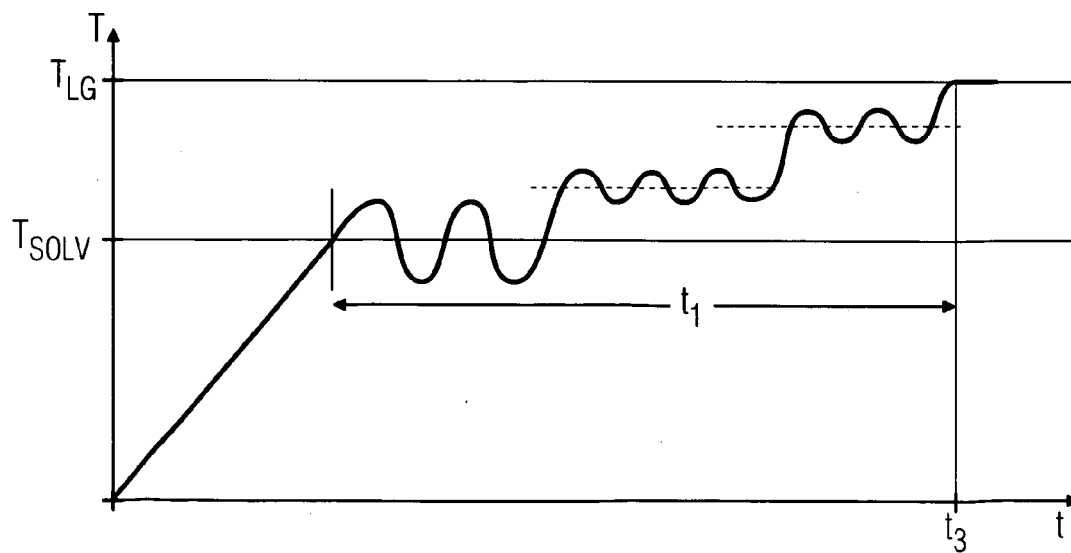


FIG 13

Werkstoff	chemische Zusammensetzung in %												
	C	Cr	Ni	Co	Mo	W	Ta	Nb	Al	Ti	B	Zr	Hf
Ni-Basis-Feingußlegierungen													
IN 6203 DS	0.15	22.0	Rest	19.0		2.0	1.1	0.8	2.3	3.5	0.010	0.10	0.75
IN 738 LC	0.10	16.0	Rest	8.5	1.7	2.6	1.7	0.9	3.4	3.4	0.010	0.10	
				9.5	1.5	3.8	2.8		3.0	4.9	0.012	0.03	
IN 792 DS	0.08	12.5	Rest	9.0	1.9	4.1	4.1		3.4	3.8	0.015	0.02	1.00
MAR M 247 LC DS	0.07	8.1	Rest	9.2	0.5	9.5	3.2		5.6	0.7	0.015	0.02	1.40
CMSX · 2	<.006	8.0	Rest	4.6	0.6	8.0	6.0		5.6	1.0	<.003	<.0075	
CMSX · 3	<.006	8.0	Rest	4.6	0.6	8.0	6.0		5.6	1.0	<.003	<.0075	0.10
CMSX · 4		6.0	Rest	10.0	0.6	6.0	6.0		5.6	1.0		Re=3.0	0.10
CMSX · 6	<.015	10.0	Rest	5.0	3.0	<.10	2.0	<.10	4.9	4.8	<.003	<.0075	0.10
PWA 1480 SX	<.006	10.0	Rest	5.0		4.0	12.0		5.0	1.5	<.0075	<.0075	
PWA 1483 SX	0.07	12.2	Rest	9.0	1.9	3.8	5.0		3.6	4.2	0.0001	0.002	

FIG 14

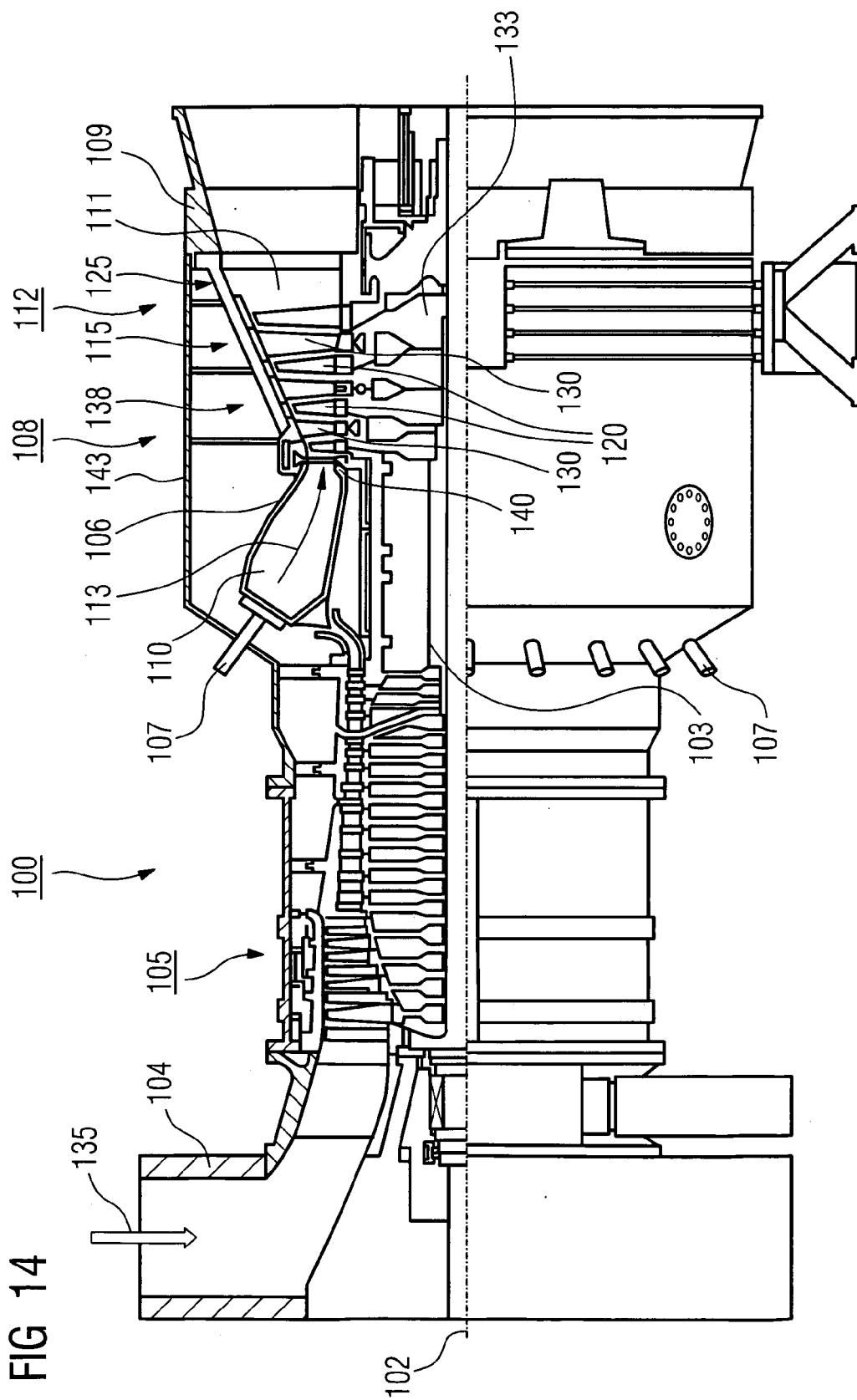


FIG 15

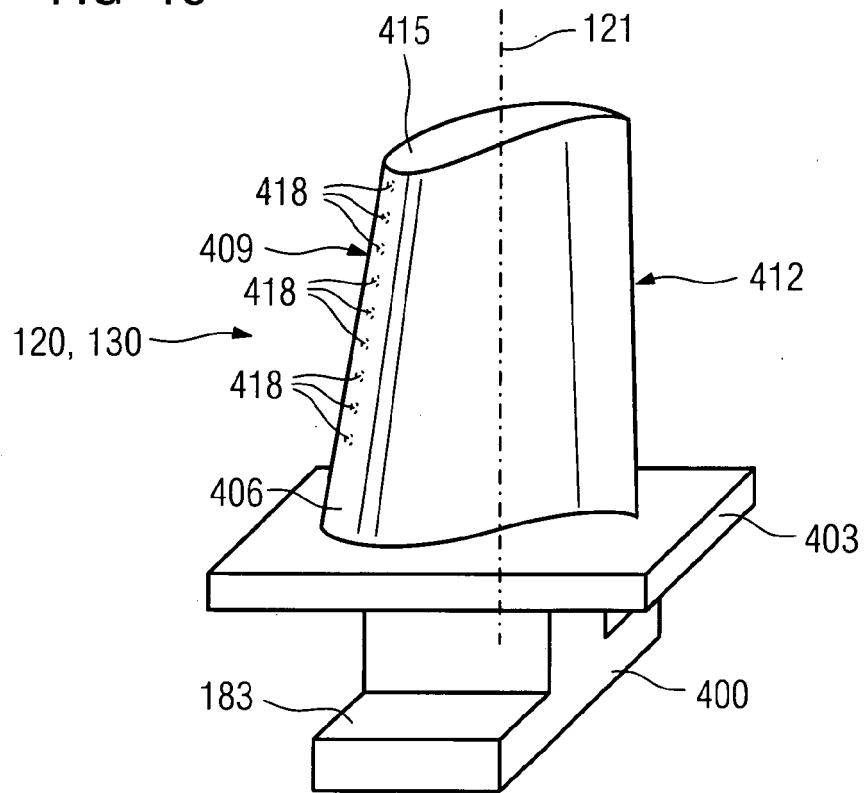
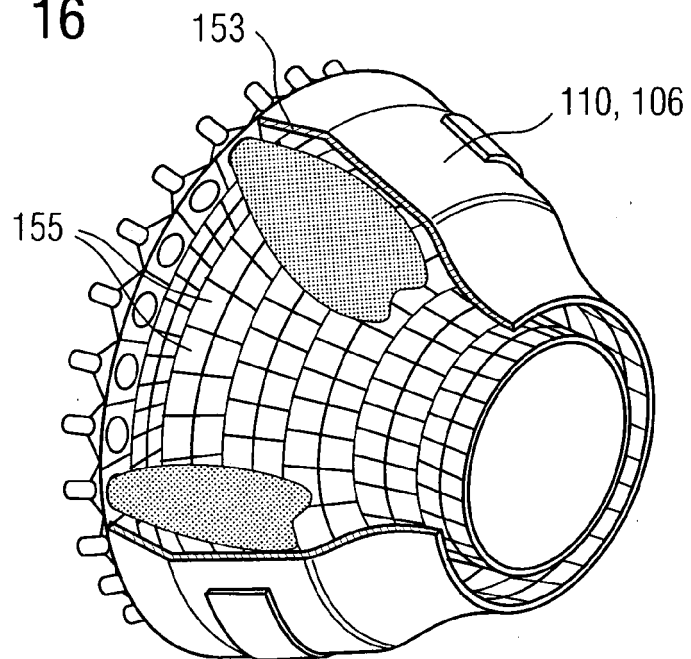


FIG 16





Europäisches
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 06 00 8688

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	US 5 551 999 A (GOSTIC ET AL) 3. September 1996 (1996-09-03) * Spalte 1, Zeilen 19-24; Abbildungen 1-6 * * Spalte 2, Zeilen 10-22 * * Spalte 3, Zeilen 43-45 * * Spalte 3, Zeilen 25-28 * * Spalte 4, Zeile 25 - Spalte 5, Zeile 15; Ansprüche 1-13 *	1-17,21, 22	INV. C21D1/78 C22F1/10
X	US 5 302 217 A (GOSTIC ET AL) 12. April 1994 (1994-04-12) * Spalte 2, Zeile 59 - Spalte 3, Zeile 16 * * Spalte 3, Zeile 35 - Spalte 4, Zeile 32; Ansprüche 1-7; Abbildung 1 *	1-8, 10-15, 17-19, 21,22	
X	US 5 074 925 A (GOSTIC WILLIAM J [US] ET AL) 24. Dezember 1991 (1991-12-24) * Spalte 3, Zeilen 10-20 * * Spalte 2, Zeilen 39-55 *	1,3-8, 14,15, 21,22	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) C21D C22F
A	US 2003/136811 A1 (PHILIP VINOD MOHAN [US]) 24. Juli 2003 (2003-07-24) * Absatz [0033] *	20	
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 12. Oktober 2006	Prüfer Rischard, Marc
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 06 00 8688

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.

Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

12-10-2006

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 5551999 A	03-09-1996	KEINE	
US 5302217 A	12-04-1994	KEINE	
US 5074925 A	24-12-1991	KEINE	
US 2003136811 A1	24-07-2003	US 2004050913 A1	18-03-2004

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

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

- EP 1204776 B1 [0035] [0041]
- EP 1306454 A [0035] [0041]
- EP 1319729 A1 [0035] [0041]
- WO 9967435 A [0035] [0041]
- WO 0044949 A [0035] [0041]
- US 6024792 A [0042]
- EP 0892090 A1 [0042]
- EP 0486489 B1 [0043] [0050]
- EP 0786017 B1 [0043] [0050]
- EP 0412397 B1 [0043] [0050]
- EP 1306454 A1 [0043] [0050]