



(10) **DE 10 2009 049 518 A1** 2011.04.21

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2009 049 518.5**

(22) Anmeldetag: **15.10.2009**

(43) Offenlegungstag: **21.04.2011**

(51) Int Cl.: **B23K 31/02 (2006.01)**

(71) Anmelder:

**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80686 München,
DE; Siemens Aktiengesellschaft, 80333 München,
DE**

**52066 Aachen, DE; Jambor, Torsten, 50937 Köln,
DE; Linnenbrink, Stefanie, 52372 Kreuzau, DE;
Melzer-Jokisch, Torsten, 15366 Neuenhagen,
DE; Ott, Michael, Dr., 45470 Mülheim, DE; Pirch,
Norbert, 52074 Aachen, DE; Wilkenhöner, Rolf,
Dr., 14532 Kleinmachnow, DE**

(72) Erfinder:

**Arjakine, Nikolai, 10555 Berlin, DE; Bostanjoglo,
Georg, Dr., 12161 Berlin, DE; Burbaum, Bernd,
52531 Übach-Palenberg, DE; Gasser, Andres,**

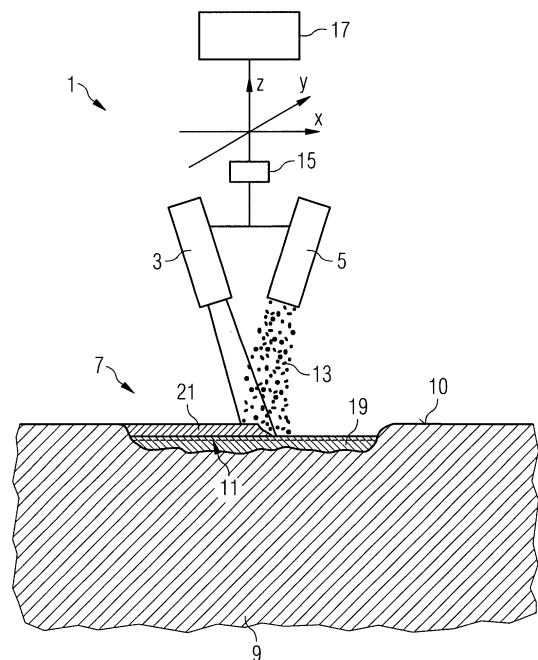
Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zum Schweißen von Werkstücken aus hochwarmfesten Superlegierungen**

(57) Zusammenfassung: Es wird eine Schweißvorrichtung zum Schweißen von Werkstücken (9) aus hochwarmfesten Superlegierungen zur Verfügung gestellt. Diese umfasst:

- eine Wärmequelle (3) zum Erzeugen einer Wärmeeintragszone (11) auf der Werkstückoberfläche (10);
- eine Zufuhreinrichtung (5) zum Zuführen von Schweißzusatzwerkstoff (13) in die Wärmeeintragszone und
- eine Transportvorrichtung (15) zum Erzeugen einer Relativbewegung zwischen der Wärmequelle (3) und Zufuhreinrichtung (5) einerseits sowie der Werkstückoberfläche (10) andererseits.

Die Schweißvorrichtung umfasst weiterhin eine Steuereinheit (17) mit einem Steuerprogramm, welches die Relativbewegung so durchführt, dass die Schweißleistung sowie der Durchmesser der Wärmeeintragszone (11) so eingestellt sind, dass die Abkühlrate bei der Erstarrung des Materials mindestens 8000 Kelvin pro Sekunde beträgt.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Schweißen von Werkstücken, insbesondere von Gasturbinenwerkstücken, beispielsweise von Gasturbinenschaufeln.

[0002] Laufschaufeln von Gasturbinen werden im Betrieb hohen Temperaturen und starken mechanischen Belastungen ausgesetzt. Für derartige Bauteile werden daher bevorzugt Nickelbasis-Superlegierungen verwendet, die durch Ausscheidung einer γ' -Phase gefestigt werden können. Dennoch können mit der Zeit Risse in den Laufschaufeln auftreten, die sich im Laufe der Zeit weiter ausdehnen. Solche Risse können etwa aufgrund der extremen mechanischen Belastung beim Betrieb einer Gasturbine entstehen, sie können aber auch bereits während des Herstellungsprozesses auftreten. Da das Herstellen von Turbinenschaufeln und anderen Werkstücken aus derartigen Superlegierungen aufwändig und kostenintensiv ist, ist man bestrebt, möglichst wenig Ausschuss in der Herstellung zu produzieren und eine lange Lebensdauer der hergestellten Produkte sicher zu stellen.

[0003] Im Betrieb befindliche Gasturbinenschaufeln werden regelmäßig gewartet und gegebenenfalls ausgetauscht, wenn aufgrund betriebsbedingter Beanspruchung ein einwandfreies Funktionieren nicht mehr ohne Weiteres sicher gestellt werden kann. Um einen weiteren Einsatz ausgetauschter Turbinenschaufeln zu ermöglichen, werden diese soweit möglich wieder aufgearbeitet. Sie können dann erneut in einer Gasturbine zum Einsatz kommen. Im Rahmen einer derartigen Wiederaufarbeitung kann bspw. ein Auftragsschweißen in beschädigten Bereichen nötig sein, um die ursprüngliche Wandstärke wieder herzustellen.

[0004] Auch Turbinenschaufeln, die bereits beim Herstellungsprozess Risse erhalten haben, können bspw. mit Auftragschweißen einsatztauglich gemacht werden, so dass der Ausschuss bei der Herstellung vermindert werden kann.

[0005] Die γ' -verstärkten Nickelbasis-Superlegierungen sind jedoch mittels konventioneller Schweißverfahren mit artgleichen Zusatzwerkstoffen derzeit nur schwer schweißbar. Ursache hierfür ist, dass Mikroseigerungen, also mikroskopische Entmischungen der Schmelze, vermieden werden müssen. Zudem kann der Schweißprozess selbst zum Generieren von Rissen im geschweißten Bereich während nachfolgender Wärmebehandlungen führen. Ursache hierfür sind Schweißeigenstressungen durch plastische Verformungen während des Wärmeeintrags beim Schweißen.

[0006] Um die schwierige Schweißbarkeit der γ' -gehärteten Nickelbasis-Superlegierungen zu umgehen, wird häufig mit duktilen Schweißzusatzstoffen, etwa mit Nickelbasislegierungen ohne γ' -Härtung, geschweißt. Ein typischer Vertreter einer solchen Nickelbasislegierung ohne γ' -Härtung ist beispielsweise IN625. Die Duktilität des nicht γ' -gehärteten Zusatzwerkstoffes erlaubt den Abbau von Schweißspannungen durch plastische Verformungen während der ersten Wärmebehandlung nach dem Schweißen. Allerdings besitzen die ungehärteten Legierungen im Vergleich zu γ' -gehärteten Nickelbasis-Superlegierungen geringere Hochtemperaturfestigkeit (sowohl geringe Zugfestigkeit als auch geringe Zeitstandfestigkeit). Es werden daher bevorzugt Schweißverfahren ohne duktile Zusatzwerkstoffe verwendet. Diese Verfahren können in zwei Klassen eingeteilt werden, nämlich Verfahren, in denen eine Überalterung des Grundmaterials zur Erhöhung der Duktilität mittels Vergröberung der γ' -Phase erfolgt, und Verfahren, in welchen der Schweißprozess bei einem vorgewärmten Substrat durchgeführt wird. Das Durchführen des Schweißprozesses an einem vorgewärmten Substrat vermindert die Schweißeigenstressungen durch Erholung während des Schweißprozesses.

[0007] Ein Schweißprozess mit vorangehender Überalterung ist beispielsweise in US 6,120,624 beschrieben, ein Schweißprozess, der an einem vorgewärmten Werkstück durchgeführt wird, beispielsweise in US 5,319,179.

[0008] Die beiden genannten Schweißverfahren ohne duktile Schweißzusatzwerkstoffe sind jedoch ebenfalls mit Nachteilen behaftet. So wird beispielsweise bei einer vor dem Schweißprozess durchgeführten Überalterung eine entsprechende Wärmebehandlung der γ' -härzbaren Nickelbasis-Superlegierung vor dem Schweißen durchgeführt, um die Überalterung der γ' -Phase zu bewirken. Dabei wird die Duktilität des Grundwerkstoffes deutlich erhöht. Diese Erhöhung der Duktilität ermöglicht es, den Werkstoff bei Raumtemperatur zu schweißen. Zudem kann er kaltgerichtet werden. Weiterhin ermöglicht eine derartige Wärmebehandlung den Einsatz von Nickelbasis-Superlegierungen wie beispielsweise Rene41 oder Haynes282 als Schweißzusatzstoff. Diese bilden zwar γ' -Phasen im Gefüge, aber jedoch nur mit einem deutlich geringeren Volumenanteil als die typischen γ' -haltigen Nickelbasis-Superlegierungen, die heutzutage für Gasturbinen-Heißgaskomponenten wie etwa Gasturbinenschaufeln Verwendung finden (beispielsweise IN738LC, IN939, Rene80, IN 6203DS, PWA1483SX, Alloy 247, etc.). Deshalb können selbst dann, wenn eine Überalterung vor dem Schweißprozess erfolgt ist, keine voll-strukturellen Schweißungen erfolgen.

[0009] Wenn eine Vorwärmung der Turbinenschaufel erfolgt, wird die Temperaturdifferenz und der damit auftretende Spannungsgradient zwischen der Schweißstelle und dem Rest der Turbinenschaufel verringert, wodurch die Bildung von Schweißrissen in Bauteilen aus Nickelbasis-Superlegierungen vermieden werden kann. Solche Verfahren, in denen eine Vorheizung der Turbinenschaufel auf Temperaturen zwischen 900°C und 1000°C mittels Induktionsspulen erfolgt, müssen jedoch unter Schutzgas durchgeführt werden, was den Schweißprozess kompliziert und verteuert. Zudem kann dieses Verfahren in Folge mangelnder Zugänglichkeit des in einem Schutzgasbehälter befindlichen Werkstückes nicht an allen Bereichen des Werkstückes durchgeführt werden.

[0010] Es besteht daher Bedarf an einem alternativen Schweißverfahren zum Auftragschweißen, welches sich insbesondere für γ' -gehärtete Nickelbasis-Superlegierungen eignet und die oben genannten Nachteile nicht oder nur in verringertem Maße aufweist. Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, eine zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens geeignete Schweißvorrichtung zur Verfügung zu stellen.

[0011] Die erste Aufgabe wird durch ein Verfahren zum Auftragschweißen nach Anspruch 1 gelöst, die zweite Aufgabe durch eine Schweißvorrichtung nach Anspruch 12.

[0012] Die abhängigen Ansprüche enthalten vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung und können vorteilhafterweise beliebig miteinander kombiniert werden.

[0013] In dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Schweißen von Werkstücken aus hochwarmfesten Superlegierungen erfolgt ein Aufbringen von Schweißzusatzwerkstoff auf die Werkstückoberfläche mittels einer Wärmeeintragszone und einer Zufuhrzone zur Zufuhr des Schweißzusatzwerkstoffes in die Wärmeeintragszone. Die Wärmeeintragszone und die Zufuhrzone werden während des Schweißens über die Werkstückoberfläche bewegt. Die Bewegung kann entlang einer Schweißrichtung erfolgen, bspw. auf einem linearen Pfad oder auf einem um die Schweißrichtung oszillierenden Pfad. Im erfindungsgemäßen Verfahren sind die Schweißparameter so gewählt, dass die Abkühlrate bei der Erstarrung des Materials mindestens 8000 K/s beträgt.

[0014] Die zum Einstellen der Abkühlrate von mindestens 8000 K/s bei der Erstarrung des Materials zur Verfügung stehenden Hauptparameter sind die Verfahrensparameter bzgl. der Schweißleistung und dem Durchmesser der Wärmeeintragszone, bspw. in Form einer Laserleistung und einem Durchmesser des Laserstrahls, der Vorschub (die Prozessge-

schwindigkeit) und ggf. der Strom an zugeführtem Schweißzusatzwerkstoff. In Abhängigkeit von der Art der verwendeten Laserquelle lässt sich durch geeignete Anpassung dieser Parameter die geforderte Abkühlrate für das zu schweißende Material einstellen. Die Prozessgeschwindigkeit kann hierbei mindestens 250 mm/min, insbesondere mehr als 500 mm/min, betragen. Beispielsweise können bei einer Prozessgeschwindigkeit von mehr als 500 mm/min die Verfahrensparameter bzgl. der Schweißleistung und dem Durchmesser der Wärmeeintragszone so eingestellt werden, dass die Abkühlrate bei der Erstarrung des Materials mindestens 8000 K/s beträgt.

[0015] Durch die hohe Abkühlrate und hohe Erstarrungsgeschwindigkeit wird der Verteilungskoeffizient soweit erhöht, dass Mikroseigerungen, d. h. mikroskopische Entmischungen der Schmelze, weitgehend vermieden werden. Die Schmelze im Schweißgut erstarrt dendritisch, also in einer baumartigen Struktur, wobei die Wachstumsrichtungen der Dendriten entlang der Schweißspur variieren, da die Orientierung der möglichen Wachstumsrichtungen der Dendriten zum Temperaturgradienten auf der Erstarrungsfront variiert. Diejenige Wachstumsrichtung mit der geringsten Neigung zum Temperaturgradienten bzw. mit der kleinsten Wachstumsgeschwindigkeit setzt sich durch. Darüber hinaus bilden sich Keime vor der Erstarrungsfront, die während der Erstarrung von der Erstarrungsfront eingeholt werden. Diese Keime initiieren Dendritenwachstumsrichtungen, die statistisch verteilt sind.

[0016] Das erfindungsgemäße Verfahren eignet sich bspw. zum Schweißen von Werkstücken aus einer γ' -haltigen Nickelbasis-Superlegierung mittels eines Schweißzusatzwerkstoffes, der ein γ' -bildendes Nickelbasis-Superlegierungsmaterial ist. Es können dann eine hohe Festigkeit im Schweißgut aufgrund der Verwendung artgleichen Zusatzwerkstoffes und eine akzeptable Schweißqualität, d. h. eine sehr geringe Anzahl an Rissen und eine sehr geringe mittlere Risslänge, erzielt werden. Aufgrund der Möglichkeit den Schweißprozess bei Raumtemperatur mit einer lokal am Schmelzbad sich befindenden Schutzgasatmosphäre durchzuführen, erreicht das erfindungsgemäße Schweißverfahren eine hohe Wirtschaftlichkeit.

[0017] Das Verfahren kann insbesondere als Auftragschweißverfahren, in dem das Aufbringen von Schweißzusatzwerkstoff lagenweise erfolgt, ausgebildet sein. Hierbei können die Schweißrichtungen von aufeinander folgenden Lagen gegeneinander gedreht sein, insbesondere um 90°. Durch die Drehung der Schweißrichtung von unterschiedlichen Lagen können Anbindungsfehler zwischen den Lagen vermieden werden, insbesondere dann, wenn die Wärmeeintragszone und die Zufuhrzone zudem entlang der Schweißrichtung auf einer um die Schweißrich-

tung oszillierenden Bahn über die Werkstückoberfläche bewegt werden.

[0018] Die unregelmäßig verteilte Dendritenorientierung findet sich hauptsächlich in der oberen Hälfte der Schweißspur. Vorteilhafterweise wird daher im erfindungsgemäßen Verfahren eine zuvor aufgetragene Lage in weniger als der Hälfte ihrer Lagenstärke wieder aufgeschmolzen. Dabei wird die Kristallstruktur der wieder aufgeschmolzenen Bereiche beim Erstarren übernommen. Durch die geringe Wiederaufschmelztiefe wird gewährleistet, dass die Erstarrungsfront auf einen Bereich mit unregelmäßig verteilten Dendritenorientierungen aufsetzt. Dies führt im Resultat bei einer Mehrlagenschweißung dazu, dass ein Polykristall mit Körnern generiert wird, deren Durchmesser im Mittel sehr klein sind. Korngrenzen stellen allgemein eine Schwachstelle bezüglich der Rissbildung bei transienten Spannungen während des Schweißprozesses oder einer nachfolgenden Wärmebehandlung dar. Durch die geringe Ausdehnung einer Korngrenze in der Ebene und deren unregelmäßige Orientierung in dem mit dem erfindungsgemäßen Verfahren geschweißten Schweißgut wird das Schweißgut gegenüber der Rissbildung unempfindlicher, so dass der Schweißprozess bei Raumtemperatur durchgeführt werden kann.

[0019] Das erfindungsgemäße Verfahren kann sowohl bei polykristallinen als auch bei gerichtet erstarrten oder einkristallinen Substraten angewandt werden. In allen genannten Fällen kann eine γ' -haltige Nickelbasis-Superlegierung als Schweißzusatzstoff benutzt werden.

[0020] Im Rahmen des erfindungsgemäßen Schweißverfahrens kann auf das Aufbringen des Schweißzusatzwerkstoffes eine Wärmebehandlung erfolgen. Mit einer an das Schweißgut angepassten Wärmebehandlung kann so die gewünschte γ' -Morphologie eingestellt werden. Dies dient zur weiteren Verbesserung der Festigkeit des Schweißgutes.

[0021] Eine erfindungsgemäße Schweißvorrichtung zum Schweißen von hochwarmfesten Superlegierungen, die zum Durchführen des erfindungsgemäßen Verfahrens geeignet ist, umfasst eine Wärmequelle zum Erzeugen einer Wärmeeintragszone auf der Werkstückoberfläche, eine Zufuhreinrichtung zum Zuführen von Schweißzusatzwerkstoffen die eine Wärmequelle und eine Transportvorrichtung zum Erzeugen einer Relativbewegung zwischen der Wärmeeintragszone und der Zufuhreinrichtung einerseits sowie der Werkstückoberfläche andererseits. Die Transportvorrichtung ist vorteilhafterweise mit der Wärmequelle und der Zufuhrrichtung für den Schweißzusatzwerkstoff verbunden, um zum Herbeiführen der Relativbewegung die Wärmequelle und die Zufuhreinrichtung zu bewegen. Dies ist in der Regel weniger aufwändig als ein Bewegen des Werk-

stücks. Als Wärmequelle kann in der erfindungsgemäßen Schweißvorrichtung insbesondere ein Laser zur Anwendung kommen. Die erfindungsgemäße Schweißvorrichtung umfasst zudem eine Steuereinheit mit einem Steuerprogramm, welches die Schweißparameter so einstellt, dass die Abkühlrate bei der Erstarrung des Materials mindestens 8000 Kelvin pro Sekunde beträgt. Insbesondere die Steuereinheit die Schweißparameter bzgl. der Schweißleistung sowie dem Durchmesser der Wärmeeintragszone so einstellen, dass die Abkühlrate bei der Erstarrung des Materials mindestens 8000 Kelvin pro Sekunde beträgt. Das Schweißen kann hierbei mit einer Prozessgeschwindigkeit von mindestens 250 mm pro Minute, insbesondere mit einer Prozessgeschwindigkeit von mehr als 500 mm pro Minute durchgeführt werden.

[0022] Die Relativbewegung kann insbesondere so gesteuert sein, dass die Wärmeeintragszone und die Zufuhrzone entlang einer Schweißrichtung auf einem um die Schweißrichtung oszillierenden Pfad über die Werkstückoberfläche bewegt werden. Außerdem kann die Steuereinheit die Relativbewegung mit oder ohne Oszillation so durchführen, dass die Schweißrichtungen bei aufeinander folgenden Lagen gegeneinander verdreht sind, bspw. um 90°.

[0023] Die erfindungsgemäße Schweißvorrichtung ermöglicht das Durchführen des erfindungsgemäßen Schweißverfahrens durch Verwendung eines Steuerprogramms, welches die im Rahmen des Verfahrens beschriebenen Schweißparameter, etwa die Bahn der Relativbewegung zwischen Wärmequelle und Zufuhreinrichtung einerseits sowie dem Werkstück andererseits, die Prozessgeschwindigkeit, die Laserleistung, den Strahldurchmesser, etc., für den Schweißprozess enthält. Die im Rahmen des Verfahrens beschriebenen Verfahrensparameter und Mechanismen helfen, die Bildung von Rissen wie etwa Erstarrungsrissen oder Wiederaufschmelzrissen, im Grundwerkstoff und der Schmelze zu unterdrücken. Dies insbesondere auch dann, wenn sowohl der Grundwerkstoff als auch der Schweißzusatzwerkstoff γ' -bildende Nickelbasis-Superlegierungen sind. Daraus resultiert eine Qualität der mit dem erfindungsgemäßen Verfahren und der erfindungsgemäßen Schweißvorrichtung erzielbaren Schweißung, die für eine strukturelle Schweißung, etwa zum Zwecke der Reparatur oder Fügung in einem hoch belasteten Bereich einer Turbinenschaufel oder eines anderen Werkstückes, akzeptabel ist.

[0024] Weitere Merkmale, Eigenschaften und Vorteile der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die beiliegenden Figuren.

[0025] [Fig. 1](#) zeigt beispielhaft eine Gasturbine in einem Längsteilschnitt.

[0026] [Fig. 2](#) zeigt eine Turbinenschaufel in einer perspektivischen Ansicht.

[0027] [Fig. 3](#) zeigt eine Gasturbinenbrennkammer in einer teilweise geschnittenen perspektivischen Darstellung.

[0028] [Fig. 4](#) zeigt in einer schematischen Darstellung die erfindungsgemäße Schweißvorrichtung.

[0029] [Fig. 5](#) zeigt die Schweißbahn für eine erste Lage an Schweißzusatzmaterial.

[0030] [Fig. 6](#) zeigt die Schweißbahn für eine zweite Lage an Schweißzusatzmaterial.

[0031] Die [Fig. 1](#) zeigt beispielhaft eine Gasturbine **100** in einem Längsteilschnitt.

[0032] 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.

[0033] Entlang des Rotors **103** folgen aufeinander ein Ansauggehäuse **104**, ein Verdichter **105**, eine beispielsweise torusartige Brennkammer **110**, insbesondere Ringbrennkammer, mit mehreren coaxial angeordneten Brennern **107**, eine Turbine **108** und das Abgasgehäuse **109**.

[0034] Die Ringbrennkammer **110** kommuniziert mit einem beispielsweise ringförmigen Heißgaskanal **111**. Dort bilden beispielsweise vier hintereinander geschaltete Turbinenstufen **112** die Turbine **108**.

[0035] 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**.

[0036] 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.

[0037] An dem Rotor **103** angekoppelt ist ein Generator oder eine Arbeitsmaschine (nicht dargestellt).

[0038] 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.

[0039] 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 Hitzeschild-elementen am meisten thermisch belastet.

[0040] Um den dort herrschenden Temperaturen standzuhalten, können diese mittels eines Kühlmittels gekühlt werden.

[0041] Ebenso können Substrate der Bauteile eine gerichtete Struktur aufweisen, d. h. sie sind einkristallin (SX-Struktur) oder weisen nur längsgerichtete Körner auf (DS-Struktur).

[0042] Als Material für die Bauteile, insbesondere für die Turbinenschaufel **120**, **130** und Bauteile der Brennkammer **110** werden beispielsweise eisen-, nickel- oder kobaltbasierte Superlegierungen verwendet.

[0043] 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.

[0044] Ebenso können die Schaufeln **120**, **130** Beschichtungen gegen Korrosion (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, Scandium (Sc) und/oder zumindest ein Element der Seltenen Erden bzw. Hafnium). 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.

[0045] Auf der MCrAlX kann noch eine 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 Kaiziumoxid und/oder Magnesiumoxid.

[0046] Durch geeignete Beschichtungsverfahren wie z. B. Elektronenstrahlverdampfen (EB-PVD) werden stängelförmige Körner in der Wärmedämmschicht erzeugt.

[0047] 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.

[0048] Die [Fig. 2](#) zeigt in perspektivischer Ansicht eine Laufschaufel **120** oder Leitschaufel **130** einer Strömungsmaschine, die sich entlang einer Längsachse **121** erstreckt.

[0049] Die Strömungsmaschine kann eine Gasturbine eines Flugzeugs oder eines Kraftwerks zur Elektrizitätserzeugung, eine Dampfturbine oder ein Kompressor sein.

[0050] 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.

[0051] Als Leitschaufel **130** kann die Schaufel **130** an ihrer Schaufelspitze **415** eine weitere Plattform aufweisen (nicht dargestellt).

[0052] Im Befestigungsbereich **400** ist ein Schaufelfuß **183** gebildet, der zur Befestigung der Laufschaufeln **120**, **130** an einer Welle oder einer Scheibe dient (nicht dargestellt).

[0053] Der Schaufelfuß **183** ist beispielsweise als Hammerkopf ausgestaltet. Andere Ausgestaltungen als Tannenbaum- oder Schwalbenschwanzfuß sind möglich.

[0054] Die Schaufel **120**, **130** weist für ein Medium, das an dem Schaufelblatt **406** vorbeiströmt, eine Anströmkante **409** und eine Abströmkante **412** auf.

[0055] Bei herkömmlichen Schaufeln **120**, **130** werden in allen Bereichen **400**, **403**, **406** der Schaufel **120**, **130** beispielsweise massive metallische Werkstoffe, insbesondere Superlegierungen verwendet.

[0056] 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.

[0057] Die Schaufel **120**, **130** kann hierbei durch ein Gussverfahren, auch mittels gerichteter Erstarrung, durch ein Schmiedeverfahren, durch ein Fräsverfahren oder Kombinationen daraus gefertigt sein.

[0058] Werkstücke mit einkristalliner Struktur oder Strukturen werden als Bauteile für Maschinen eingesetzt, die im Betrieb hohen mechanischen, thermi-

schen und/oder chemischen Belastungen ausgesetzt sind.

[0059] 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.

[0060] 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.

[0061] 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).

[0062] Solche Verfahren sind aus der US-PS 6,024,792 und der EP 0 892 090 A1 bekannt.

[0063] 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 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.

[0064] Die Dichte liegt vorzugsweise bei 95% der theoretischen Dichte.

[0065] Auf der MCrAlX-Schicht (als Zwischenschicht oder als äußerste Schicht) bildet sich eine schützende Aluminiumoxidschicht (TGO = thermal grown oxide layer).

[0066] Vorzugsweise weist die Schichtzusammensetzung Co-30Ni-28Cr-8Al-0,6Y-0,7Si oder Co-28Ni-24Cr-10Al-0,6Y auf. Neben diesen kobaltbasierten Schutzbeschichtungen werden auch vorzugsweise nickelbasierte Schutzschichten verwendet wie Ni-10Cr-12Al-0,6Y-3Re oder Ni-12Co-21Cr-11Al-0,4Y-2Re oder Ni-25Co-17Cr-10Al-0,4Y-1,5Re.

[0067] 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.

[0068] Die Wärmedämmschicht bedeckt die gesamte MCrAlX-Schicht.

[0069] Durch geeignete Beschichtungsverfahren wie z. B. Elektronenstrahlverdampfen (EB-PVD) werden stängelförmige Körner in der Wärmedämmschicht erzeugt.

[0070] 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. Die Wärmedämmschicht ist also vorzugsweise poröser als die MCrAlX-Schicht.

[0071] Wiederaufarbeitung (Refurbishment) bedeutet, dass Bauteile **120**, **130** nach ihrem Einsatz gegebenenfalls von Schutzschichten befreit werden müssen (z. B. durch Sandstrahlen). Danach erfolgt eine Entfernung der Korrosions- und/oder Oxidationsschichten bzw. -produkte. Gegebenenfalls werden auch noch Risse im Bauteil **120**, **130** repariert. Danach erfolgt eine Wiederbeschichtung des Bauteils **120**, **130** und ein erneuter Einsatz des Bauteils **120**, **130**.

[0072] Die Schaufel **120**, **130** kann hohl oder massiv ausgeführt sein. Wenn die Schaufel **120**, **130** gekühlt werden soll, ist sie hohl und weist ggf. noch Filmkühlöcher **418** (gestrichelt angedeutet) auf.

[0073] Die [Fig. 3](#) zeigt eine Brennkammer **110** einer Gasturbine. 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.

[0074] 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 Hitzeschildelementen **155** gebildeten Innenauskleidung versehen.

[0075] 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.

[0076] 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.

[0077] 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.

[0078] Durch geeignete Beschichtungsverfahren wie z. B. Elektronenstrahlverdampfen (EB-PVD) werden stängelförmige Körner in der Wärmedämmschicht erzeugt.

[0079] 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.

[0080] Wiederaufarbeitung (Refurbishment) bedeutet, dass 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. Gegebenenfalls werden auch noch Risse in dem Hitzeschildelement **155** repariert. Danach erfolgt eine Wiederbeschichtung der Hitzeschildelemente **155** und ein erneuter Einsatz der Hitzeschildelemente **155**.

[0081] 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.

[0082] [Fig. 4](#) zeigt in einer stark schematisierten Darstellung eine erfindungsgemäße Schweißvorrichtung **1**.

[0083] Diese umfasst einen Laser **3** und eine Pulverzufuhreinrichtung **5**, mit der ein pulverförmiger Schweißzusatzwerkstoff auf den zu schweißenden Bereich eines Werkstücks **9** aufgebracht werden kann. Mittels der Laserstrahlung wird eine Wärmeeintragszone **11** auf der Werkstückoberfläche gebildet, in welche auch das Pulver **13** von der Pulverzufuhreinrichtung **5** eingebracht wird. Der Laser ist vorzugsweise ein 300 W-Laser, insbesondere ein Nd-YAG Laser, ganz insbesondere mit $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$. Die Laserleistung beträgt zwischen 100 W und 300 W und vorzugsweise zwischen 100 W und 200 W, ganz insbesondere zwischen 100 W und 150 W. So wird vorteilhafterweise das Schweißmaterial gut aufgeschmolzen und auch der Untergrund angeschmolzen, damit sich eine dichte Schweißstelle ergibt.

[0084] Der Laser **3** und die Pulverzufuhreinrichtung **5** sind an einer Scaneinrichtung **15** angeordnet, welche ein Verschieben des Lasers **3** und der Pulverzufuhreinrichtung **5** in zwei Dimensionen entlang der Bauteiloberfläche (x- und y-Richtungen in [Fig. 4](#)) mit dem zu schweißenden Bereich **7** ermöglicht. Die Prozessgeschwindigkeit mindestens 250 mm/min beträgt, insbesondere 400 mm/min–600 mm/min, ganz insbesondere 500 mm/min. So ist ein vorteilhafter Wärmeeintrag in das Schweißmaterial und das Substrat möglich.

[0085] Weiterhin ermöglicht die Scanvorrichtung **15** des vorliegenden Ausführungsbeispiels ein Verschieben des Lasers **3** und der Pulverzufuhreinrichtung **5** senkrecht zur Bauteiloberfläche (z-Richtung in [Fig. 4](#)). Mit Hilfe der Scaneinrichtung **15** kann somit die Wärmeeintragszone und die Auftreffzone des Pulvers entlang eines vorgegebenen Pfades verschoben werden. Als Scaneinrichtung kann bspw. ein Roboterarm Verwendung finden. Der Durchmesser des Laserstrahls beträgt insbesondere 500 μm bis 700 μm , ganz insbesondere 600 μm . Somit kann das zugeführte Schweißmaterial vorteilhaft erwärmt werden.

[0086] Die Steuerung der von der Scaneinrichtung **15** vermittelten Bewegung erfolgt durch eine Steuereinheit **17**, die auch die übrigen Parameter des Schweißprozesses steuert. Im Unterschied zum vorliegenden Ausführungsbeispiel kann die Steuerung der übrigen Parameter des Schweißprozesses aber auch durch eine zusätzliche Steuerung, also getrennt von der Steuerung des Bewegungsablaufes, erfolgen. Weiterhin kann im Unterschied zum dargestellten Ausführungsbeispiel statt der Scaneinrichtung **15**

zum Bewegen des Lasers **3** und der Pulverzufuhreinrichtung **5** auch eine bewegliche Bauteilhalterung Verwendung finden. Im Rahmen der Erfindung ist lediglich die Relativbewegung zwischen dem Laser **3** sowie der Pulverzufuhreinrichtung **5** einerseits und dem Werkstück **9** von Bedeutung.

[0087] Das erfindungsgemäße Verfahren zum Auftragschweißen einer Werkstückoberfläche kann zum Materialauftrag, insbesondere zum mehrlagigen Materialauftrag, auf den zu schweißenden Bereich **7** eines Bauteils **9** Verwendung finden. Das Bauteil **9** braucht dabei weder vorgewärmt, noch mittels einer Wärmebehandlung überaltert zu werden.

[0088] Nachfolgend wird das Verfahren anhand eines Auftragschweißens auf der Oberfläche **10** einer Turbinenschaufel **9** als Werkstück beschrieben. Die Turbinenschaufel des vorliegenden Ausführungsbeispiels besteht aus einer γ' -verstärkten Nickelbasis-Superlegierung, beispielsweise aus IN738LC, IN939, Rene80, IN6203DS, PWA1483SX, Alloy 247, etc. Der zu schweißende Bereich **7** in der Oberfläche **10** der Turbinenschaufel **9** wird lagenweise auftraggeschweißt, wobei die Wärmeeintragszone zusammen mit dem Auftreffbereich für das Pulver **13** entlang einer Schweißrichtung über den zu schweißenden Bereich **7** der Turbinenschaufel **9** bewegt werden. Das Pulver **13** ist im vorliegenden Fall ein Pulver aus einer γ' -haltigen Nickelbasis-Superlegierung, bspw. aus IN738LC, IN939, Rene80, IN6203DS, PWA1483, Alloy 247, etc.

[0089] Der Pfad P1, den die Wärmeeintragszone **11** sowie der Auftreffbereich des Pulvers **13** beim Auftragschweißen der ersten Lage auf dem zu schweißenden Bereich **7** zurücklegen, ist schematisch in [Fig. 5](#) dargestellt. Die Figur zeigt die Turbinenschaufel **9** mit dem zu schweißenden Bereich **7** und der Schweißrichtung S1 beim Auftragschweißen der ersten Lage **19**. Die Wärmeeintragszone **11**, die gleichzeitig den Auftreffbereich für das Pulver **13** darstellt, wird jedoch nicht linear entlang der Schweißrichtung S1 verschoben, sondern sie oszilliert während der Verschiebung entlang der Schweißrichtung gleichzeitig in eine Richtung senkrecht zur Schweißrichtung. Dadurch folgen die Wärmeeintragszone **11** und der Auftreffbereich des Pulvers **13** einen mäanderförmigen Pfad P1 über den zu schweißenden Bereich **7**.

[0090] Für das Auftragschweißen der zweiten Lage **21** ([Fig. 4](#)) werden der Laser **3** und die Pulverzufuhreinrichtung **5** ein wenig entlang der z-Richtung der Scaneinrichtung **15** verschoben. Außerdem wird im vorliegenden Ausführungsbeispiel die Schweißrichtung S2 gegenüber der Schweißrichtung S1 für die erste Lage um 90° gedreht. Der Pfad P2 der Wärmeeintragszone **11** und des Auftreffbereiches für das Pulver **13** beim Auftragschweißen der zweiten Lage **21** ist in [Fig. 6](#) dargestellt. Auch beim Auftragschweißen

der zweiten Lage **21** oszilliert die Wärmeeintragszone **11** zusammen mit dem Auftreffbereich des Pulvers **13** in einer Richtung senkrecht zur Schweißrichtung S2. Insgesamt ergibt sich daher ein mäanderförmiger Pfad P2 der Wärmeeintragszone **11** und des Auftreffbereichs für das Pulver **13** über den zu schweißenden Bereich **7**.

[0091] Die im Rahmen des Ausführungsbeispiels beschriebenen Pfade stellen nur eine von verschiedenen möglichen Varianten dar. Grundsätzlich gibt es mehrere Möglichkeiten die Schweißung durchzuführen: 1. unidirektionales oder 2. bidirektionales (z. B. mäanderförmiges) Auftragschweißen. Bei jeder dieser Varianten können die Spuren (Pfade) der 2. Lage parallel versetzt oder senkrecht zu den Spuren (Pfad) der ersten Lage geschweißt werden. Alle diese Varianten können im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Anwendung kommen.

[0092] Beim Verfahren des Lasers und der Pulverzufuhrereinheit kann die Oszillation so gewählt werden, dass mit einem einzigen Pfad entlang der Schweißrichtung der gesamte zu schweißende Bereich **7** überstrichen wird, wie dies in [Fig. 5](#) dargestellt ist, oder so, dass nur ein Teil des zu schweißenden Bereiches **7** überstrichen wird und zum Auftragschweißen des gesamten Bereiches mehrere nebeneinander verlaufende Pfade P2 in Schweißrichtung S2 abgefahren werden, wie dies in [Fig. 6](#) dargestellt ist.

[0093] Das Verfahren der Wärmeeintragszone **11** und des Auftreffbereichs des Pulvers **13** entlang des Pfades P1 bzw. P2 erfolgt im vorliegenden Ausführungsbeispiel mit einer Prozessgeschwindigkeit von mindestens 500 mm/min. Die Laserleistung, der Strahldurchmesser und der Pulverstrom sind dabei so gewählt, dass die Abkühlrate des überstrichenen Bereiches bei der Erstarrung größer als 8000 K/s ist. Beim Auftragen der zweiten Lage **21** sind die Prozessparameter bezüglich Laserleistung und Strahldurchmesser außerdem so gewählt, dass die Wiederaufschmelztiefe, bis in welche die erste Lage **19** wieder aufgeschmolzen wird, weniger als 50% der Spurhöhe der ersten Lage **19**, beträgt. Die Wiederaufschmelztiefe ist in [Fig. 4](#) gestrichelt angedeutet. Grundsätzlich sind auch andere als die im vorliegenden Beispiel angegebene Prozessgeschwindigkeit möglich, wobei dann die übrigen Parameter Laserleistung, Strahldurchmesser und Pulverstrom entsprechend angepasst werden müssen.

[0094] Durch die hohe Abkühlrate und die hohe Erstarrungsgeschwindigkeit wird der Verteilungskoeffizient soweit erhöht, dass Mikroseigerungen weitgehend vermieden werden. Die durch die Wärmeeintragszone **11** herbeigeführte Schmelze erstarrt dendritisch, wobei die Kristallstruktur von der in dem wieder aufgeschmolzenen Bereich vorliegenden Kristallstruktur übernommen wird. Dabei variieren die

Wachstumsrichtungen der Dendriten entlang eines Pfades P1, P2. Ursache hierfür ist, dass die Orientierung der möglichen Wachstumsrichtungen der Dendriten zum Temperaturgradienten variiert, wobei sich die Wachstumsrichtung mit der geringsten Neigung zum Temperaturgradienten bzw. mit der kleinsten Wachstumsgeschwindigkeit durchsetzt. Außerdem initiieren Keime, die sich vor der Erstarrungsfront bilden und die während der Erstarrung von der Erstarrungsfront eingeholt werden, Dendritenwachstumsrichtungen, die statistisch verteilt sind. Diese unregelmäßig verteilten Dendritenorientierungen finden sich vorwiegend in der oberen Hälfte einer Lage **19**. Mit der geringen Wiederaufschmelztiefe wird daher gewährleistet, dass die Erstarrungsfront auf einen Bereich mit unregelmäßig verteilten Dendritenorientierungen aufsetzt, was bei einer Mehrlagenauftragschweißung dazu führt, dass ein Polykristall mit Körnern generiert wird, deren Durchmesser im Mittel sehr klein sind. Dadurch wird der geschweißte Bereich der Turbinenschaufel **9** gegenüber Rissbildung unempfindlich.

[0095] Nachdem das Auftragen der erforderlichen Anzahl von Lagen **19**, **21** erfolgt ist, kann die Turbinenschaufel **9** einer Wärmebehandlung unterzogen werden die dazu führt, dass sich die gewünschte γ' -Morphologie einstellt. Dies dient der weiteren Verbesserung der Festigkeit des geschweißten Bereiches der Turbinenschaufel **9**.

[0096] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren kann eine Auftragschweißung bei Zimmertemperatur und ohne vorherige Überalterung des zu schweißenden Bauteils erfolgen, wobei die Entstehung von Erstarrungsrissen und Wiederaufschmelzrissen unterdrückt ist. Dies führt im Ergebnis zu einer Qualität der Schweißung, die für eine strukturelle Schweißung insbesondere von hochbelasteten Bereichen von Gasturbinenschaufeln, aber auch von anderen Bauteilen, akzeptabel ist. Gleichzeitig erfolgt nur eine sehr geringe Beeinflussung des Grundwerkstoffes, da aufgrund der kleinen Wärmeeinflusszone (es erfolgt kein Vorheizen) und der Unterdrückung von Wiederaufschmelzrissen in der Wärmeeinflusszone nur ein sehr geringer Wärmeeintrag in das Substrat erfolgt.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 6120624 [0007]
- US 5319179 [0007]
- EP 1204776 B1 [0043, 0056]
- EP 1306454 [0043, 0056]
- EP 1319729 A1 [0043, 0056]
- WO 99/67435 [0043, 0056]
- WO 00/44949 [0043, 0056]
- EP 0486489 B1 [0044, 0063, 0076]
- EP 0786017 B1 [0044, 0063, 0076]
- EP 0412397 B1 [0044, 0063, 0076]
- EP 1306454 A1 [0044, 0063, 0076]
- US 6024792 [0062]
- EP 0892090 A1 [0062]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Schweißen von Werkstücken (9) aus hochwarmfesten Superlegierungen, in dem ein Aufbringen von Schweißzusatzwerkstoff (13) auf die Werkstückoberfläche (10) mittels einer Wärmeeintragszone (11) und einer Zufuhrzone zur Zufuhr des Schweißzusatzwerkstoffes in die Wärmeeintragszone (11) erfolgt, wobei die Wärmeeintragszone (11) und die Zufuhrzone einerseits und die Werkstückoberfläche (10) andererseits relativ zueinander bewegt werden, **dadurch gekennzeichnet**,

dass zumindest die Schweißparameter Schweißleistung, Prozessgeschwindigkeit, Durchmesser eines Schweißstrahls so gewählt sind, dass die Abkühlrate bei der Erstarrung des Materials mindestens 8000 Kelvin pro Sekunde (K/s) beträgt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Schweißparameter bezüglich der Schweißleistung sowie dem Durchmesser der Wärmeeintragszone so eingestellt sind, dass die Abkühlrate bei der Erstarrung des Materials mindestens 8000 Kelvin pro Sekunde (K/s) beträgt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Prozessgeschwindigkeit mindestens 250 mm/min beträgt, insbesondere 400 mm/min–600 mm/min, ganz insbesondere 500 mm/min.

4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, bei dem die Schweißnaht durch lageweises Aufbringen von Schweißzusatzwerkstoff (13) erzeugt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem die vorherige Lage (19) aufgeschmolzen wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass eine zuvor aufgetragene Lage (19) in weniger als der Hälfte ihre Lagenstärke wieder aufgeschmolzen wird.

7. Verfahren nach Anspruch 2, 4, 5 oder Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass für jede Lage (19, 21) die Wärmeeintragszone (11) und die Zufuhrzone entlang einer Schweißrichtung (S1, S2) relativ zur Werkstückoberfläche (10) bewegt werden und die Schweißrichtungen (S1, S2) von aufeinander folgenden Lagen (19, 21) gegeneinander gedreht sind.

8. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Wärmeeintragszone (11) und die Zufuhrzone

entlang einer Schweißrichtung (S1, S2) auf einem um die Schweißrichtung oszillierenden Pfad (P1, P2) relativ zur Werkstückoberfläche (10) bewegt werden.

9. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass das Werkstück (9) eine γ' -haltigen Nickelbasis-Superlegierung aufweist, insbesondere daraus besteht und der Schweißzusatzwerkstoff (13) ein γ' -bildendes Nickelbasis-Superlegierungsmaterial ist.

10. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass auf das Aufbringen des Schweißzusatzwerkstoffes (13) eine Wärmebehandlung folgt.

11. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 10, bei dem ein 300 W-Laser verwendet wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11, bei dem ein Nd-YAG Laser verwendet wird, insbesondere mit $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$.

13. Verfahren nach Anspruch 11 oder 12, bei dem die Laserleistung 100 W bis 300 W, insbesondere 100 W bis 200 W, ganz insbesondere 100 W bis 150 W beträgt.

14. Verfahren nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, bei dem der Durchmesser eines Laserstrahls 500 μm bis 800 μm , insbesondere 600 μm beträgt.

15. Verfahren nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, bei dem eine polykristalline Schweißnaht (19, 21) erzielt wird.

16. Schweißvorrichtung zum Schweißen von Werkstücken (9) aus hochwarmfesten Superlegierungen, welche umfasst:

- eine Wärmequelle (3) zum Erzeugen einer Wärmeeintragszone (11) auf der Werkstückoberfläche (10);
- einer Zufuhreinrichtung (5) zum Zuführen von Schweißzusatzwerkstoff (13) in die Wärmeeintragszone (11) und
- einer Transportvorrichtung (15) zum Erzeugen einer Relativbewegung zwischen der Wärmequelle (3) und Zufuhreinrichtung (5) einerseits sowie der Werkstückoberfläche (10) andererseits, gekennzeichnet durch eine Steuereinheit (17), welche die Schweißparameter so einstellen kann, dass die Abkühlrate bei der Erstarrung des Materials mindestens 8000 Kelvin pro Sekunde beträgt.

17. Schweißvorrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuereinheit (17)

die Schweißparameter bzgl. der Schweißleistung sowie dem Durchmesser der Wärmeeintragszone (11) so einstellen kann, dass die Abkühlrate bei der Erstarrung des Materials mindestens 8000 Kelvin pro Sekunde beträgt.

18. Schweißvorrichtung nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuereinheit (17) die Relativbewegung mit einer Prozessgeschwindigkeit mindestens 250 mm pro Minute durchführen kann.

19. Schweißvorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 16 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass das Steuerprogramm die Wärmeeintragszone (11) und die Zufuhrzone entlang einer Schweißrichtung (S1, S2) auf einem um die Schweißrichtung (S1, S2) oszillierenden Pfad (P1, P2) über die Werkstückoberfläche (10) bewegt.

20. Schweißvorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 16 bis 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Wärmequelle (3) ein Laser ist.

21. Schweißvorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 20, dadurch gekennzeichnet, dass das Steuerprogramm bei einem lagenweisen Schweißen die Schweißrichtungen (S1, S2) von aufeinander folgenden Lagen (19, 21) gegeneinander drehen kann.

22. Schweißvorrichtung nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche 16 bis 21, die einen 300 W-Laser aufweist, insbesondere ein Nd-YAG Laser, ganz insbesondere mit $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

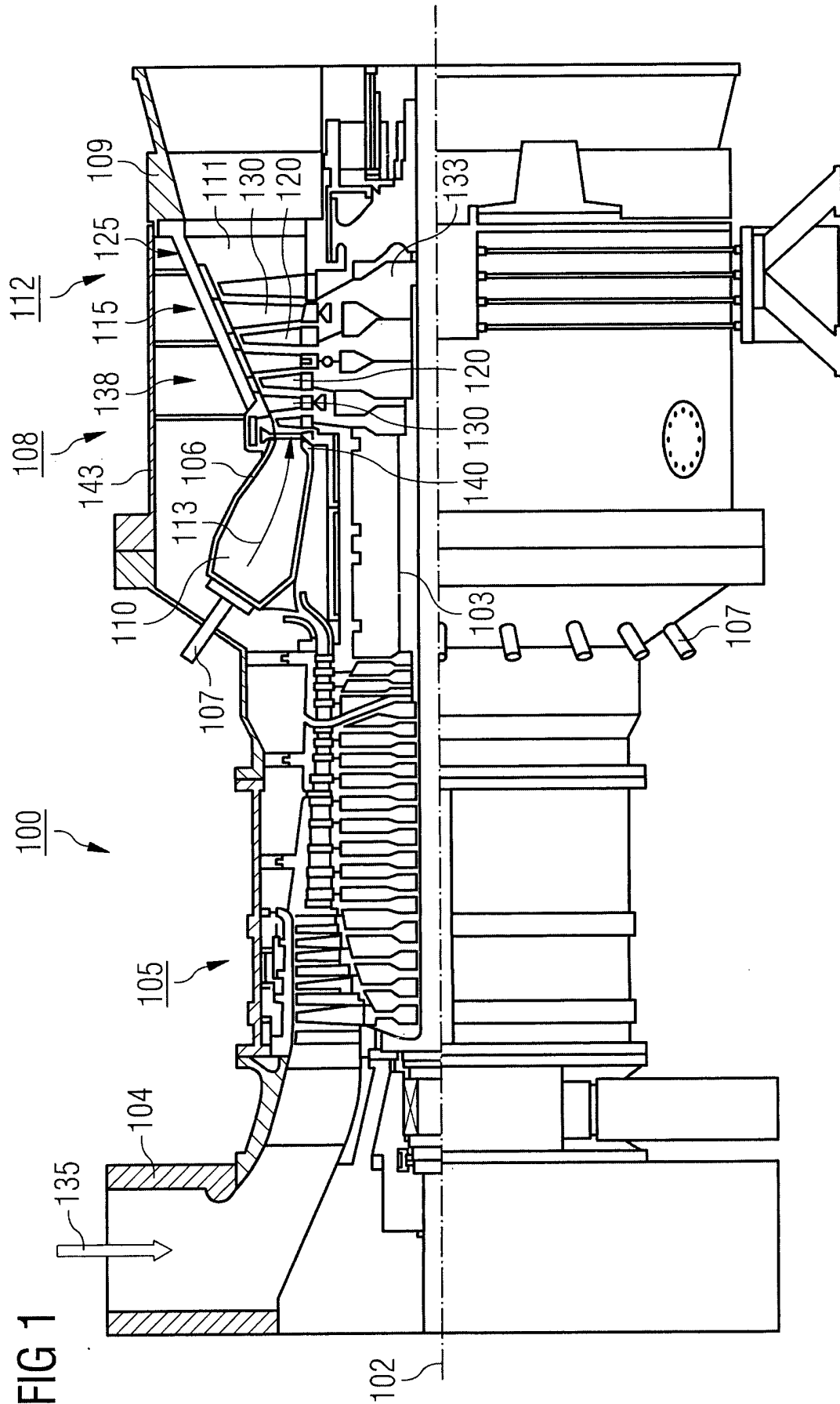


FIG 2

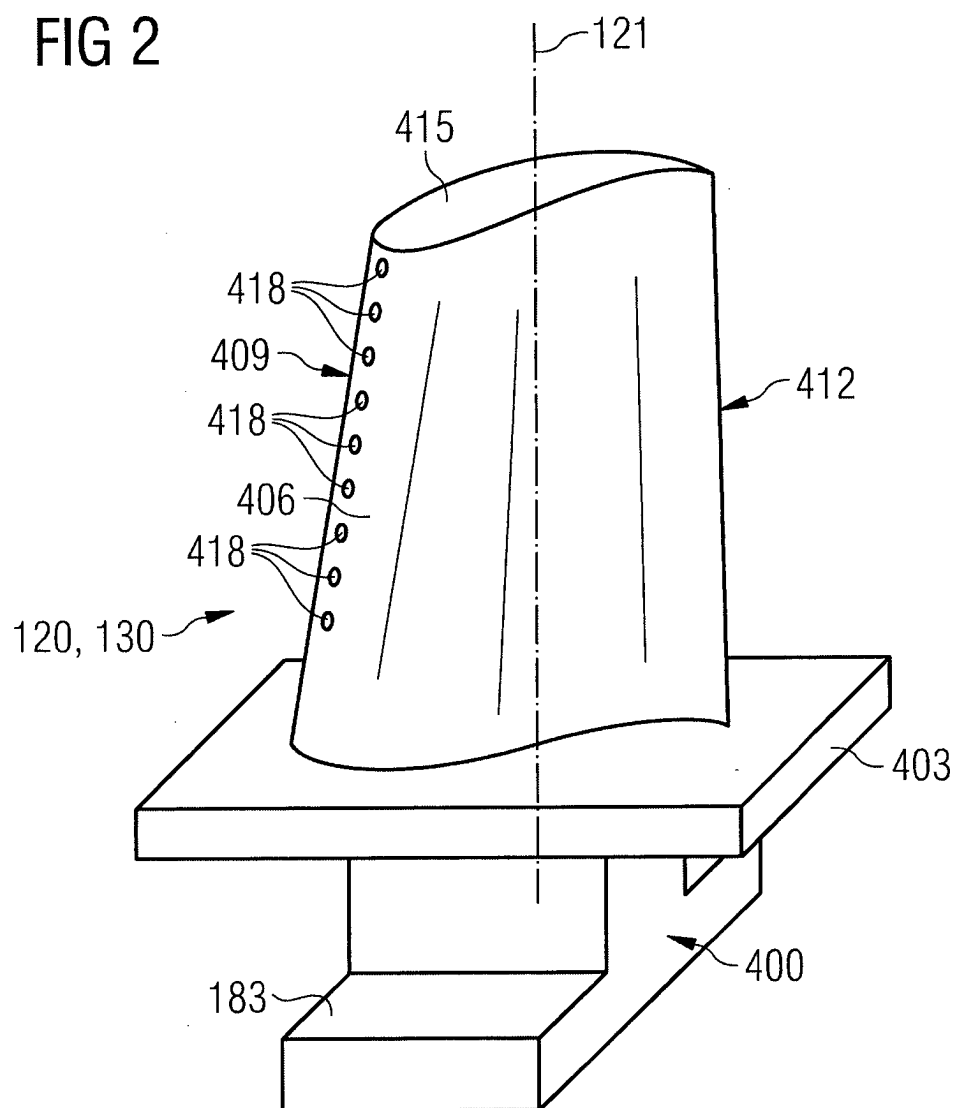


FIG 3

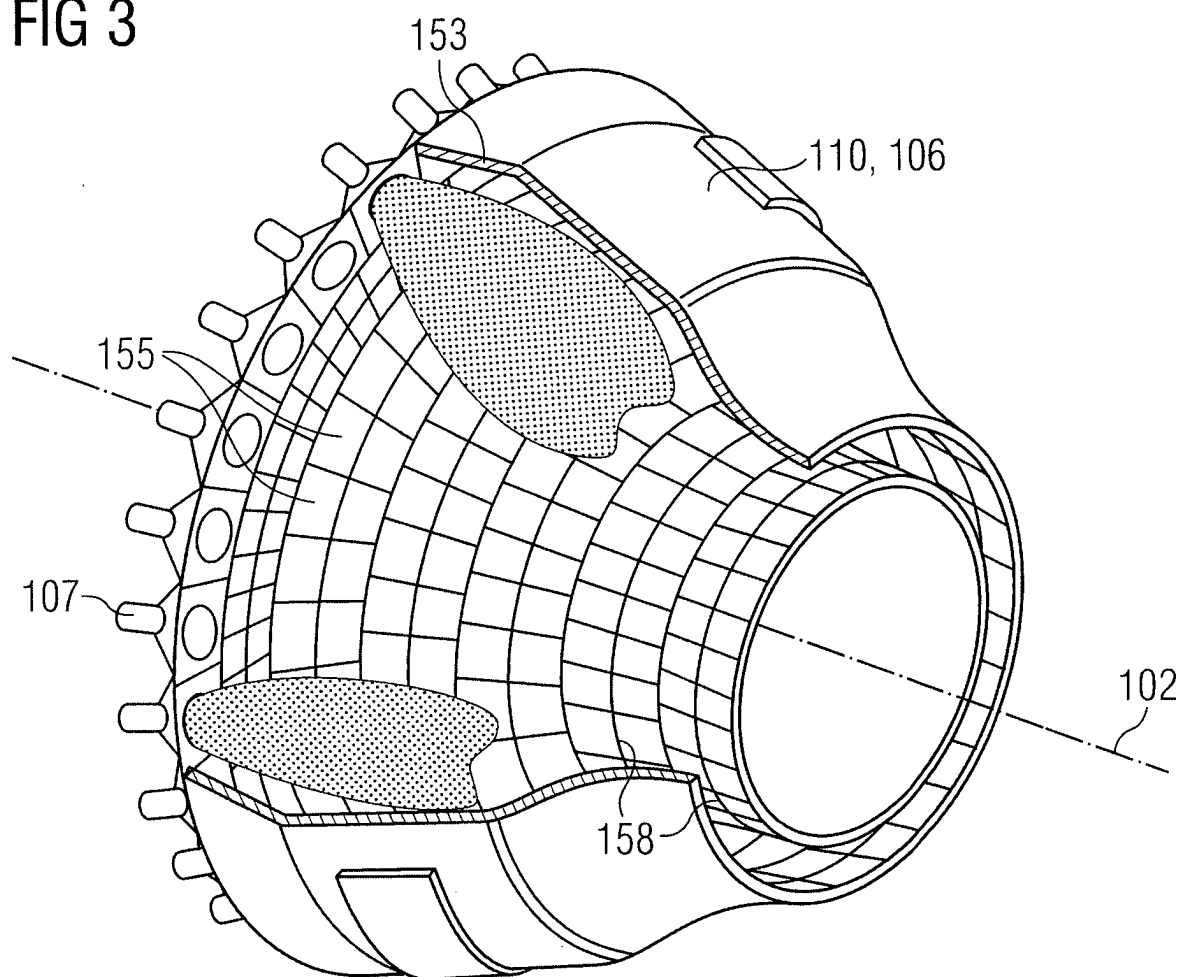


FIG 4

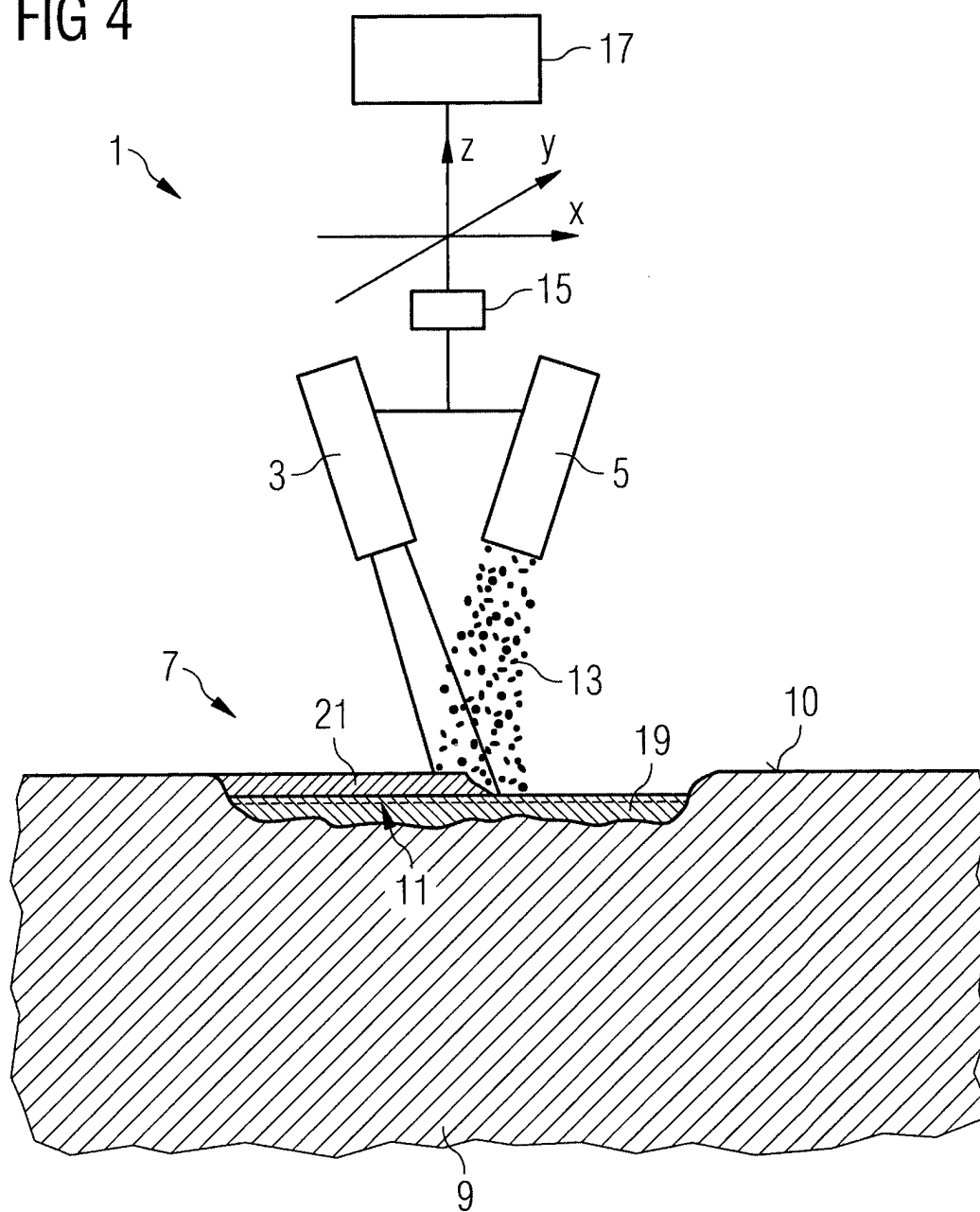


FIG 5

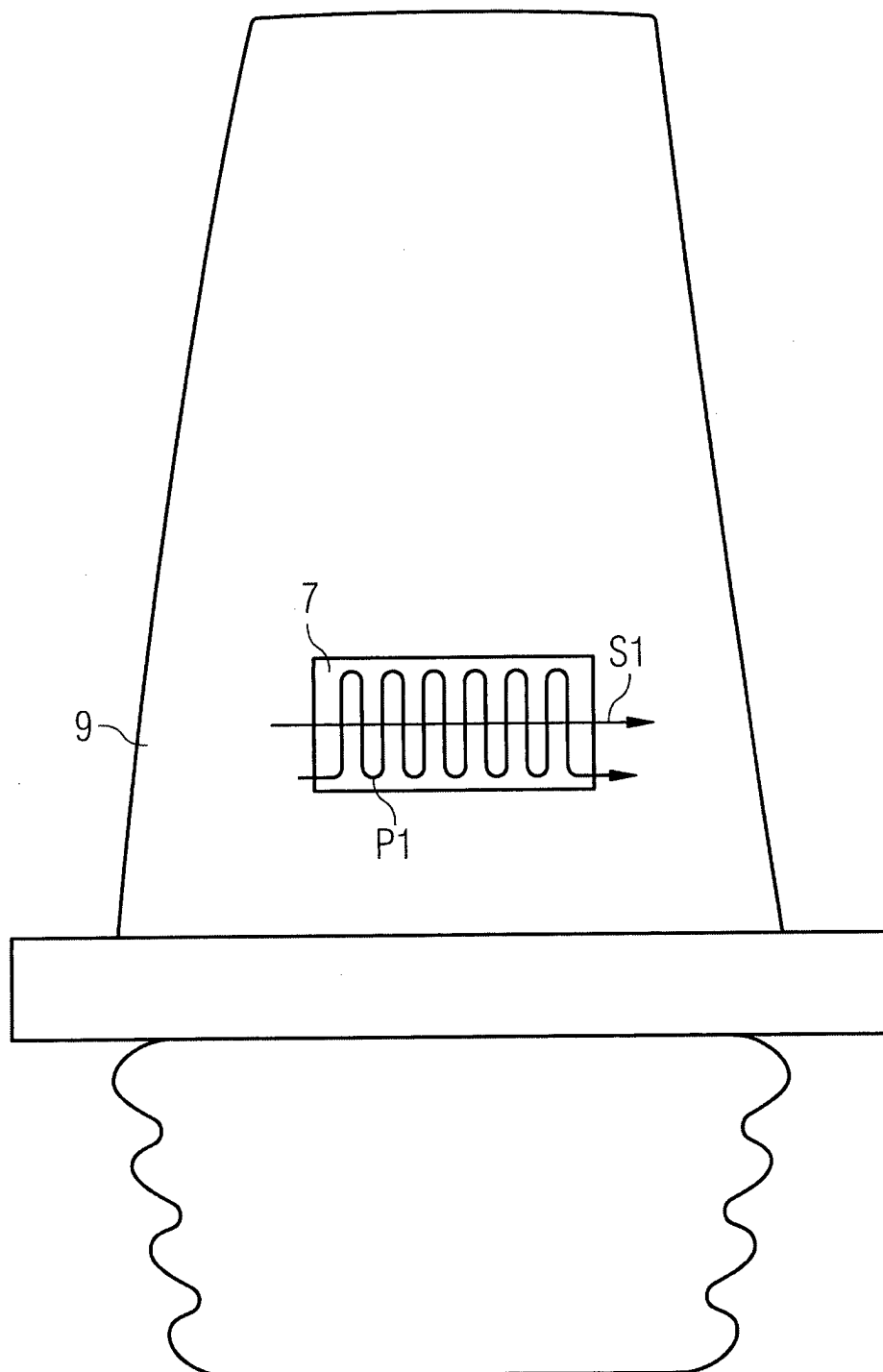


FIG 6

