



(11)

EP 3 572 551 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
29.06.2022 Patentblatt 2022/26

(21) Anmeldenummer: **19174701.3**

(22) Anmeldetag: **15.05.2019**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):

C23C 4/00 (2016.01)	C23C 4/04 (2006.01)
F01D 5/00 (2006.01)	F01D 5/12 (2006.01)
F01D 5/14 (2006.01)	F01D 5/28 (2006.01)
F01D 25/00 (2006.01)	C23C 16/02 (2006.01)
C23C 16/06 (2006.01)	C23C 4/073 (2016.01)
C23C 4/134 (2016.01)	C23C 28/00 (2006.01)
C23C 28/02 (2006.01)	

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):

C23C 4/02; C23C 4/01; C23C 4/11; C23C 4/134;
C23C 10/48; C23C 10/60; C23C 28/321;
C23C 28/3215; C23C 28/3455; F23R 3/002;
F23R 3/005; F23R 3/06; F01D 5/186; F01D 5/288;
F05D 2230/90; (Forts.)

(54) **VERFAHREN ZUR BESCHICHTUNG EINES SUBSTRATES MIT EINER HOHLRAUMSTRUKTUR**
METHOD FOR COATING A SUBSTRATE WITH A HOLLOW STRUCTURE
PROCÉDÉ DE REVÊTEMENT D'UN SUBSTRAT À L'AIDE D'UNE STRUCTURE CREUSE

(84) Benannte Vertragsstaaten:

AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR

(30) Priorität: **23.05.2018 DE 102018112353**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
27.11.2019 Patentblatt 2019/48

(73) Patentinhaber:

- **Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG**
15827 Blankenfelde-Mahlow (DE)
- **Forschungszentrum Jülich GmbH**
52425 Jülich (DE)

(72) Erfinder:

- **Schrüfer, Susanne**
15827 Berlin (DE)
- **Wobst, Tanja**
15827 Berlin (DE)

- **Vaßen, Robert**
52134 Herzogenrath (DE)
- **Mauer, Georg**
47918 Tönisvorst (DE)
- **Laufs, Ralf**
52428 Jülich (DE)
- **Rauwald, Karl-Heinz**
52428 Jülich (DE)

(74) Vertreter: **Maikowski & Ninnemann**
Patentanwälte Partnerschaft mbB
Postfach 15 09 20
10671 Berlin (DE)

(56) Entgegenhaltungen:

EP-A1- 3 150 741 DE-A1-102005 060 243
US-A1- 2011 159 260

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 3 572 551 B1

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC): (Forts.)
F05D 2240/11; F05D 2260/202; F05D 2260/95;
F23R 2900/00018; F23R 2900/03041; Y02T 50/60

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Beschichtung eines Substrates mit einer Hohlraumstruktur mit den Merkmalen des Anspruchs 1.

[0002] In vielen Bereichen der Technik, wie z.B. im Bereich von Flugzeugtriebwerken, werden Bauteile durch hohe Temperaturen beansprucht. In den meisten Fällen sind diese Bauteile heißen Gasen, wie z.B. Verbrennungsgasen in Ofen-Feuerungen oder in Brennkammern von Flugzeugtriebwerken, ausgesetzt. Daher ist die thermische Widerstandsfähigkeit solcher Bauteile von Bedeutung.

[0003] Ein Mittel zur Erhöhung der thermischen Widerstandsfähigkeit ist eine Beschichtung eines Substrates für ein Bauteil mit einer thermischen Schutzschicht (TBC Thermal Barrier Coating). Verfahren zur Beschichtung mit einer thermischen Schutzschicht sind z.B. aus folgenden Veröffentlichungen bekannt:

- EP 3 150 741 A1,
- Goral et al., The technology of Plasma Spray Physical Vapour Deposition, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering Vol. 55, No. 2, S. 689 ff,
- Goral et al., The PS-PVD method - formation of columnar TBCs on CMSX-4 superalloy, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering Vol. 55, No. 2, S. 907 ff,
- Mauer et al. Novel opportunities for thermal spray by PS-PVD, Surface & Coating Technology, Vol. 269 (2015), S. 53 ff,
- Mauer et al., Process diagnostic in suspension plasma spraying, Surface & Coating Technology, Vol. 205 (2010), S. 961 ff,
- DE 10 2005 060243 A1,
- US 2011/159260 A1.

[0004] Metallische Substrate, aus denen solche Bauteile aufgebaut werden, weisen u.U. Hohlraumstrukturen, wie z.B. Kühlkanäle, auf, wobei die internen Hohlraumstrukturen in Öffnungen an der Oberfläche der Substrate münden. Die Hohlraumstrukturen können beim Herstellungsprozess (z.B. durch ein additives Schichtaufbringungsverfahren; ALM (Additive Layer Manufacturing)) im Substrat aufgebaut werden oder die Hohlraumstrukturen werden nach der Herstellung des Substrates z.B. durch Laserbohren in ein gegossenes Substrat eingebracht.

[0005] Es besteht die Aufgabe, effiziente Verfahren zur Beschichtung von Substraten mit einer bereits vorhandenen, internen Hohlraumstruktur der beschriebenen Art zu schaffen.

[0006] Die Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

[0007] Dabei wird ein Substrat mit einer internen Hohlraumstruktur, insbesondere einer Kühlstruktur, beschichtet. Die Hohlraumstruktur weist dabei Öffnungen

in der Oberfläche des Substrats auf.

[0008] In einem ersten Schritt wird mindestens eine haftvermittelnde Schicht auf das Substrat aufgebracht. Dabei kann eine Diffusionsschicht (d.h. eingebracht durch ein Diffusionsverfahren) auf das Substrat aufgebracht werden oder eine andere metallische Schicht.

[0009] Die Diffusionsschicht dient u.a. der Haftvermittlung für die nachfolgend aufgebachte, mindestens eine thermische Schutzschicht.

[0010] Die mindestens eine thermische Schutzschicht wird unter Verwendung eines Suspension Plasma Spray (SPS) Verfahrens auf die mindestens eine Diffusionsschicht aufgebracht.

[0011] Dieses Verfahren ist gut dafür geeignet, die Öffnungen der bereits vorhandenen internen Hohlraumstruktur bei der Beschichtung nicht oder nur wenig zu blockieren. Dies liegt u.a. daran, dass die feinen Teilchen in dem vorhandenen Gasströmen der Verfahren so klein sind, dass sie vom Gasstrom mitgeführt werden. Das Freihalten der Öffnungen erspart aufwändige Nacharbeiten, wie z.B. das nachträgliche Aufbohren mit einem Laserbohrverfahren.

[0012] Das SPS Verfahren weist einen Gasstrom mit einer Strömungskomponente parallel zur Oberfläche des Substrates auf, d.h. die Hauptströmungsrichtung des Gasstroms ist nicht senkrecht auf das Substrat gerichtet. Dabei weist die Hauptströmungsrichtung des Gasstroms einen Winkel α zur Oberfläche des Substrats auf, der kleiner als 30° ist, insbesondere kleiner als 15° ist. Alternativ liegt die Hauptströmungsrichtung des Gasstroms parallel zur Oberfläche des Substrats. Bei einem flachen Auftreffwinkel oder gar einer parallelen, zum Substrat orientierten Hauptströmungsrichtung wird eine mögliche Blockade der Öffnungen der Hohlraumstrukturen minimiert.

[0013] In einer weiteren Ausführungsform ist der Gasstrom ein Prozessgasstrom und / oder Trägergasstrom des SPS Verfahrens. Damit erfolgt eine Interaktion zwischen dem Gasstrom und dem Substrat, indem ein direktes Abscheiden aus dem Gasstrom auf die Oberfläche des Substrats erfolgt. Dies reduziert die Abscheidung in Vertiefungen in der Oberfläche.

[0014] Dabei ist es insbesondere möglich, dass der Teilen beladene Gasstrom durch eine Stokes Zahl $St < 1$, insbesondere von $St < 0.1$, ganz insbesondere von $St < 0.01$, ganz insbesondere $St < 0.001$ charakterisiert wird. Die dimensionslose Stokes-Zahl St ist ein Maß für die Massenträgheit eines Teilchens für seine Bewegung in einem bewegten Fluid, hier einem Gas. Sie ist das Verhältnis der charakteristischen Zeit t_T , mit der sich durch Reibung die Geschwindigkeit des Teilchens der Geschwindigkeit des umgebenden Gases anpasst, zur charakteristischen Zeit t_p , in der das Gas selbst durch äußere Einflüsse seine Geschwindigkeit ändert.

[0015] In einer Ausführungsform wird die mindestens eine Diffusionsschicht durch ein Pack Aluminizing, ein PVD- Verfahren oder ein additives Schichtenverfahren aufgebracht. Alle diese Verfahren erlauben das effiziente

Aufbringen der dünnen Diffusionsschicht.

[0016] Diese kann in einer Ausführungsform einen Anteil an MCrAlY mit

M ausgewählt aus Nickel, Kobalt, Eisen und
Y ausgewählt aus Yttrium, Ytterbium, Lanthan oder einer Seltenen Erde

aufweisen oder aus dieser Substanz bestehen.

[0017] Es ist auch möglich, dass die mindestens eine Diffusionsschicht einen Anteil an einem X-Aluminid mit X ausgewählt aus Chrom, Platin und / oder Nickel oder Aluminium und Chrom, Platin und / oder Nickel aufweist oder aus diesen Substanzen besteht.

[0018] In einer Ausführungsform weist die mindestens eine thermische Schutzschicht einen Anteil aus Yttrium (z.B. in Form von Y_2O_3) und / oder stabilisiertem Zirkoniumoxid (ZrO_2) auf oder besteht aus dieser Substanz.

[0019] In einer weiteren Ausführungsform ist das Substrat metallisch und mindestens teilweise durch ein additives Schichtaufbringungsverfahren (ALM) oder durch ein Gussverfahren hergestellt. Diese Verfahren erlauben die Herstellung komplex geformter Bauteile, wie z.B. Turbinenschaufeln.

[0020] Da die Bauteile im Betrieb thermisch hoch belastet werden, weist das Substrat einen Anteil einer Hochtemperatur-Nickellegierung, insbesondere CMSX4, CMSX3, C 263, Mar M 002 und / oder C 1023 auf oder besteht aus einem solchen Material.

[0021] Ferner können Kanäle der Hohlraumstruktur und / oder die Öffnungen der Hohlraumstruktur einen mittleren Durchmesser zwischen 0,5 bis 1,5 mm, insbesondere 1 mm aufweisen. Diese Dimensionen erlauben die effiziente Verwendung der Hohlraumstruktur für Kühlzwecke.

[0022] Mit mindestens einer der Ausführungsformen für ein Verfahren zur Beschichtung ist ein Substrat mit einer Hohlraumstruktur im Inneren des Substrats herstellbar, wobei die Hohlraumstruktur Öffnungen in der Oberfläche des Substrats aufweist.

[0023] Ein dermaßen hergestelltes Substrat kann z.B. in einer Brennkammerschindel einer Brennkammer eines Flugzeugtriebwerkes, in einer Turbinenschaufel eines Flugzeugtriebwerkes oder in einem Liner einer Turbine in einem Flugzeugtriebwerk verwendet werden.

[0024] In Zusammenhang mit den in den Figuren dargestellten Ausführungsbeispielen wird die Erfindung erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1 eine schematische Teilschnittansicht eines Flugzeugtriebwerkes;

Fig. 2A eine schematische perspektivische Ansicht einer Ausführungsform eines Substrates mit einer internen Hohlraumstruktur;

Fig. 2B eine Schnittansicht des Substrats gemäß Fig. 2A, versehen mit einer Diffusionsschicht;

Fig. 2C eine Schnittansicht des beschichteten Substrats gemäß Fig. 2B, versehen mit einer thermischen Schutzschicht;

5 Fig. 3A eine Schnittansicht einer weiteren Ausführungsform eines Substrates mit einer Diffusionsschicht, die mittels eines SPS Verfahrens mit einer thermischen Schutzschicht beschichtet wird, wobei ein Gasstrom unter einem Winkel zur Oberfläche des Substrates geführt wird;

Fig. 3B eine Schnittansicht einer Ausführungsform eines Substrates mit einer Diffusionsschicht, die mittels eines SPS Verfahrens mit einer thermischen Schutzschicht beschichtet wird, wobei ein Gasstrom parallel zur Oberfläche des Substrates geführt wird.

20 **[0025]** Das Flugzeugtriebwerk 10 gemäß Fig. 1 zeigt ein grundsätzlich bekanntes Beispiel einer Turbomaschine. Diese ist lediglich ein Beispiel für eine Vorrichtung, in der Substrate 40 mit einer internen Hohlraumstruktur 41 (siehe Fig. 2) für thermisch belastete Bauteile verwendet werden. Grundsätzlich ist es auch möglich, solche Substrate 40 auch in anderen Vorrichtungen, wie z.B. Ofen-Feuerungen, zu verwenden.

25 **[0026]** Das Flugzeugtriebwerk 10 ist in an sich bekannter Weise meistens als Mehr-Wellen-Triebwerk ausgebildet und umfasst in Strömungsrichtung hintereinander einen Lufteinlass 11, einen in einem Fanghäuse 24 umlaufenden Fan 12 (entsprechend einem Niederdruckkompressor), einen Mitteldruckkompressor 13, einen Hochdruckkompressor 14, eine Brennkammer 15, eine Hochdruckturbine 16, eine Mitteldruckturbine 17 und eine Niederdruckturbine 18, sowie eine Abgasdüse 19, die sämtlich um eine zentrale Triebwerksachse 1 angeordnet sind.

30 **[0027]** Die Hochdruckturbine 16 ist dazu ausgebildet, den Hochdruckkompressor 14 über eine Hochdruckwelle 20 anzutreiben. Die Mitteldruckturbine 17 ist dazu ausgebildet, den Mitteldruckkompressor 13 über eine Mitteldruckwelle 21 anzutreiben. Die Niederdruckturbine 18 ist dazu ausgebildet, den Fan 12 über eine Niederdruckwelle 22 anzutreiben.

35 **[0028]** Alternative Ausführungsformen eines Flugzeugtriebwerks 10 können auch zwei Wellen statt drei Wellen aufweisen.

40 **[0029]** In einer hier nicht dargestellten Ausführungsform ist die Antriebswelle des Fans 12 mit einem Untersetzungsgetriebe gekoppelt, so dass der Fan 12 mit einer niedrigeren Drehzahl als die antreibende Turbine betrieben werden kann. Auch in solchen Getriebe-Fan Triebwerken werden thermisch belastete Bauteile mit Substraten 40 mit internen Hohlraumstrukturen 41 verwendet.

45 **[0030]** Bei der Ausführungsform, die in Fig. 1 dargestellt ist, strömt ein erster Teil des Luftstroms, der durch das Flugzeugtriebwerk 10 geht, durch den Mitteldruck-

kompressor 13 und den Hochdruckkompressor 14, wobei der Druck des Luftstroms erhöht wird. Dieser Luftstrom wird dann der Brennkammer 15 zugeführt und mit eingedüstem Brennstoff verbrannt. Die bei der Verbrennung entstehenden heißen Gase strömen durch die Hochdruckturbine 16, die Mitteldruckturbine 17 und die Niederdruckturbine 18 und treiben sie dadurch an. Schließlich strömen die heißen Gase aus der Abgasdüse 19 aus und erzeugen somit einen Teil des Schubs des Flugzeugtriebwerks 10.

[0031] Ein zweiter Teil des Luftstroms wird um den Hauptteil des Flugzeugtriebwerks herumgeführt und strömt durch einen Nebenstromkanal 23, der durch ein Fangehäuse 24 definiert wird. Dieser zweite Teil der Luft verlässt das Flugzeugtriebwerk 10 durch eine Fandüse 25 und erzeugt dabei einen größeren Teil des Schubs - verglichen mit dem austretenden Gas aus der Abgasdüse 19 - des Flugzeugtriebwerks 10.

[0032] In Fig. 2A bis 2C ist eine Ausführungsform eines Verfahrens zur Beschichtung eines Substrates 40 mit einer internen Hohlraumstruktur 41 schematisch dargestellt.

[0033] Dabei zeigt Fig. 2A eine Ausgangssituation, d.h. ein Substrat 40, das eine interne Hohlraumstruktur 41 aufweist. Die Darstellung gemäß Fig. 2A ist aus Gründen der Einfachheit in mehrfacher Hinsicht vereinfachend dargestellt. So ist das Substrat 40 vereinfachend als Würfel dargestellt, wobei grundsätzlich auch andere Substratformen, insbesondere komplexe Formen, die z.B. an die baulichen Gegebenheiten in dem Flugzeugtriebwerk 10 angepasst sind, verwendbar sind. Das dargestellte Substrat 40 gemäß Fig. 2A kann auch als Ausschnitt aus einem größeren Teil aufgefasst werden.

[0034] Die Hohlraumstruktur 41 im Inneren des Substrates 40 wird in der Ausführungsform gemäß Fig. 2A durch drei röhrenförmige Hohlräume (z.B. als zur Oberfläche O unter einem Winkel β geneigte Bohrungen, siehe Fig. 2B) mit Öffnungen 42 in zwei Oberflächen O des Substrates 40 symbolisiert. Grundsätzlich ist es auch möglich, dass eine Vielzahl von Bohrungen als Hohlraumstruktur 41 verwendet wird. Auch müssen die Bohrungen nicht alle in eine Richtung verlaufen. Es ist auch möglich, dass eine komplexe, amorphe oder Wabenstruktur im Inneren des Substrates 40 als Hohlraumstruktur 41 verwendet wird. Typischerweise liegen die mittleren Durchmesser der Hohlräume (in Fig. 1 der röhrenförmigen Hohlräume) im Bereich von 0,5 bis 1,5 mm. Die Hohlraumstruktur 41 kann z.B. Teil eines Kühlsystems sein, dass von einem Kühlmittel durchströmbar ist. So können Turbinenschaufeln mit einem inneren Kühlsystem ausgestattet sein.

[0035] Das Substrat 40 kann durch ein additives Herstellungsverfahren (ALM: Additive Layer Manufacturing) oder durch ein Gussverfahren hergestellt werden. Die Hohlraumstruktur 41 kann z.B. durch Laserbohrungen oder beim ALM aufgebaut werden.

[0036] Bei einer ALM Herstellung aus einem Pulverbett wird das Substrat 40 Schicht für Schicht aus einer

Nickel-Legierung (Beispiele werden unten angegeben) durch Lasersinterung oder Laserschmelzen aufgebaut. Typische Parameter sind dabei Temperaturen zwischen 900 und 1000 °C, Drücke zwischen 100 und 110 MPa und Zeiten bis zu 2 Stunden. Wenn es erforderlich erscheint, kann das Substrat 40 vor einer Beschichtung poliert oder geschliffen werden.

[0037] Das Substrat 40 kann aber auch durch ein Blown Powder ALM Verfahren oder ein Cold Spray Verfahren hergestellt werden.

[0038] In jedem Fall weist das Substrat 40 bereits vor den nachfolgenden Beschichtungen eine interne Hohlraumstruktur 41 auf.

[0039] Das Substrat 40 ist in der dargestellten Ausführungsform metallisch und ist mindestens teilweise durch ein Schichtaufbringungsverfahren oder durch ein Gussverfahren hergestellt. Dabei kann das Substrat 40 einen Anteil einer Hochtemperatur-Nickellegierung, insbesondere CMSX4, CMSX3, C 263, Mar M 002 oder C 1023 aufweisen oder aus einer solchem Material bestehen.

[0040] Eine typische Zusammensetzung für CMSX4 der Firma Cannon-Muskegon ist (außer Nickel):

6,5 Gew.-% Cr,
9,6 Gew.-% Co,
0,6 Gew.-% Mo,
6,4 Gew.-% W,
5,6 Gew.-% Al,
1,0 Gew.-% Ti,
6,5 Gew.-% Ta,
3,0 Gew.-% Re,
0,1 Gew.-% Hf.

[0041] Eine typische Zusammensetzung für CMSX3 der Firma Cannon-Muskegon ist (außer Nickel):

8,0 Gew.-% Cr,
4,8 Gew.-% Co,
0,6 Gew.-% Mo,
8,0 Gew.-% W,
5,6 Gew.-% Al,
1,0 Gew.-% Ti,
6,3 Gew.-% Ta,
0,1 Gew.-% Hf.

[0042] Eine typische Zusammensetzung für C 263 (außer Nickel):

16 Gew.-% Cr,
15 Gew.-% Co,
3 Gew.-% Mo,
1,25 Gew.-% W,
2,5 Gew.-% Al,
5,0 Gew.-% Ti,
0,025 Gew.-% C,
0,018 Gew.-% B,

[0043] Eine typische Zusammensetzung für Mar M002

der Firma Cannon-Muskegon ist (außer Nickel):

8,0 Gew.-% Cr,
10 Gew.-% Co,
10 Gew.-% W,
5,5 Gew.-% Al,
1,5 Gew.-% Ti,
2,6 Gew.-% Ta,
1,5 Gew.-% Hf,
0,15 Gew.-% C,
0,015 Gew.-% B,
0,03 Gew.-% Zr.

[0044] Eine typische Zusammensetzung für C 1023 ist (außer Nickel):

4,2 Gew.-% Al,
0,16 Gew.-% C,
10 Gew.-% Co,
15,5 Gew.-% Cr,
8,5 Gew.-% Mo,
3,6 Gew.-% Ti,
0,006 Gew.-% B.

[0045] Es sei angemerkt, dass diese Zusammensetzungen hier ohne Toleranzangaben angegeben sind, die dem Fachmann grundsätzlich bekannt sind.

[0046] In einem ersten Schritt wird eine Diffusionsschicht 31 auf das Substrat 40 aufgebracht, was in der Schnittansicht der Fig. 2B dargestellt ist.

[0047] In der dargestellten Ausführungsform erfolgt das Aufbringen einer Aluminid-Schicht als Diffusionsschicht 31 durch ein an sich bekanntes Pack Aluminizing, da diese Methode wirtschaftlich vorteilhaft ist.

[0048] Dafür wird das Substrat 41 zusammen mit einem aluminium-haltigen Pulver zyklisch bei Temperaturen zwischen 800 und 1000°C erhitzt. Das Pack Aluminizing dauert typischerweise mehrere Stunden, wobei anschließend eine thermische Nachbehandlung erfolgt, damit eine Diffusion in das Substrat 41 erfolgen kann.

[0049] In der dargestellten Ausführungsform wird eine einzige Diffusionsschicht 31 aufgetragen, wobei diese grundsätzlich auch eine Schichtenfolge aufweisen kann.

[0050] Eine mögliche Ausführungsform der Diffusionsschicht 31 kann einen Anteil an einem X-Aluminid mit X, ausgewählt aus Aluminium, Chrom, Platin und / oder Nickel, aufweisen oder aus diesen Substanzen bestehen. Somit kann insbesondere auch eine reine Aluminid-Schicht oder eine Schicht mit zwei oder mehr Komponenten aufgebracht werden.

[0051] Auch kann die mindestens eine Diffusionsschicht 31 einen Anteil an MCrAlY mit M, ausgewählt aus Nickel, Kobalt, Eisen und Y ausgewählt aus Yttrium, Ytterbium, Lanthan oder einer Seltenen Erde, aufweisen oder aus dieser Substanz bestehen.

[0052] Eine solche Schicht kann mittels eines ALM Verfahrens (Blown Powder) oder einem PVD Verfahren aufgebracht werden.

[0053] Die Diffusionsschicht 31 (z.B. mit einer Dicke von 10 bis 90 µm) erlaubt eine ausreichende Haftvermittlung, bietet einen Oxidationsschutz und stellt ausreichend vorbereitete Oberflächen für eine nachfolgende Beschichtung mit einer thermischen Schutzschicht 32 zur Verfügung.

[0054] Nach dem Aufbringen der Diffusionsschicht 31 wird eine thermische Schutzschicht 32 unter Verwendung eines Plasma-Spray PVD (PS-PVD) Verfahrens oder eines Suspension Plasma Spray (SPS) Verfahrens (Spritzwinkel α) auf die mindestens eine Diffusionsschicht 31 aufgebracht. Dies ist in Fig. 2C dargestellt.

[0055] Dabei ist erkennbar, dass die Verblockung der Öffnungen O verhältnismäßig klein ist.

[0056] Beide Verfahren setzen beim Abscheiden der thermischen Schutzschicht 32 die Öffnungen 42 der Hohlraumstruktur 41 nicht oder nur in geringem Maße zu, so dass z.B. nach dem Beschichten keine Nachbearbeitung der Öffnungen 42 mittels Laserbohren notwendig ist. Eine Nachbehandlung der Öffnungen 42, insbesondere mit einem Laser, führt zu einer thermischen Belastung und damit Schwächung der thermischen Schutzschicht 32 bei der Herstellung.

[0057] Beim PS-PVD wird der größte Teil des injizierten Pulvers in die Gasphase umgewandelt, was bewirkt, dass sich die Öffnungen 42 im Substrat weniger zusetzen.

[0058] Bei dem SPS Verfahren wird die Beschichtung aus einem Gasfluss (siehe Fig. 3) abgeschieden, der gegenüber der Oberfläche O des Substrats 40 geneigt oder parallel ausgerichtet sein kann (siehe Fig. 3A, 3B). Dies kann die Abscheidung von Beschichtungsmaterial in Öffnungen 42 reduzieren beziehungsweise verhindern.

[0059] Eine typische thermische Schutzschicht 32 setzt sich aus ein bis drei in etwa 0,1 mm bis 0,3 mm dicken Einzelschichten zusammen.

[0060] Die thermische Schutzschicht 32 reflektiert einfallende Heißgasstrahlung, bildet eine thermische Isolationsschicht zwischen dem Heißgas und dem Substrat 40 und bildet eine Schutzschicht gegen Heißgaskorrosion (Sulfidation). Die Gesamtdicke der thermischen Schutzschicht 32 erreicht 0,4 bis 0,5 mm und bedeutet für das darunter liegende Metall des Substrats 40 eine Temperaturentlastung zwischen 40 und 70 K.

[0061] Im Folgenden werden Ausführungsformen für die Abscheidung der thermischen Schutzschicht 32 mittels eines SPS Verfahrens beschrieben.

[0062] In Fig. 3A ist ein Substrat 40 dargestellt, auf das, wie im Zusammenhang mit Fig. 2B beschrieben, eine Diffusionsschicht 31 aufgebracht wurde.

[0063] Wenn ein Gasstrom G (z.B. der Trägergasstrom) des SPS Verfahrens mit der Hauptströmungsrichtung H nicht senkrecht zur Substratoberfläche O, sondern unter einem Winkel verwendet wird, wird das Zusetzen der Öffnungen 42 der Hohlraumstruktur 41 minimiert oder verhindert. Eine Verblockung der Öffnungen 42 von maximal 30% könnte in einer Ausführungsform akzeptiert werden.

[0064] In Fig. 3A ist dargestellt, dass die Hauptströmungsrichtung H des Gasstroms G unter einem Winkel von $\gamma=30^\circ$ auf die Oberfläche O des Substrats 40 trifft. Es sei angemerkt, dass die Hauptströmungsrichtung H des Gasstroms G nicht gleich dem Spritzwinkel α sein muss.

[0065] Damit weist der Gasstrom G in jedem Fall eine Strömungskomponente X parallel zur Oberfläche O des Substrates 40 auf. Es ist auch möglich, den Winkel α kleiner als 30° oder auch kleiner als 15° zu wählen.

[0066] Bei einem SPS Verfahren ist eine Beschichtung aus der Gasphase möglich, da die feinen Tropfen in der Suspension (z.B. Ethanol, Wasser) dem Gasstrom G folgen und sich direkt aus dem Gasstrom G abscheiden. Daher kann der Gasstrom G sogar parallel zur Oberfläche O des Substrats 40 ausgerichtet sein, wie dies in der Fig. 3B dargestellt ist. Bei dieser Ausführungsform ist das Risiko der Verblockung der Öffnungen 42 am geringsten.

Bezugszeichenliste

[0067]

1 Triebwerksachse

10 Flugzeugtriebwerk

11 Lufteinlass

12 Fan

13 Mitteldruckkompressor

14 Hochdruckkompressor

15 Brennkammer

16 Hochdruckturbine

17 Mitteldruckturbine

18 Niederdruckturbine

19 Abgasdüse

20 Hochdruckwelle

21 Mitteldruckwelle

22 Niederdruckwelle

23 Nebenstromkanal

24 Fangehäuse

25 Fandüse

31 Diffusionsschicht

32 thermische Schutzschicht

40 Substrat

41 Hohlraumstruktur

42 Öffnung

G Gasfluss

O Oberfläche

X Koordinatenrichtung parallel zur Oberfläche

α Spritzwinkel

β Neigung Hohlraumstruktur gegenüber Oberfläche

γ Winkel Gasfluss gegenüber Oberfläche

Patentansprüche

1. Verfahren zur Beschichtung eines Substrates (40) mit einer Hohlraumstruktur (41), insbesondere einer Kühlstruktur, im Inneren des Substrats (40), wobei die Hohlraumstruktur (41) Öffnungen (42) in der Oberfläche (O) des Substrats (40) aufweist, wobei

a) mindestens eine haftvermittelnde Schicht, insbesondere eine Diffusionsschicht (31) oder mindestens eine andere metallische Schicht auf das Substrat (40), insbesondere auf die Oberfläche (O) des Substrates (40), aufgebracht wird und anschließend

b) mindestens eine thermische Schutzschicht (32) unter Verwendung eines Suspension Plasma Spray (SPS) Verfahrens auf die mindestens eine Diffusionsschicht (31) aufgebracht wird,

dadurch gekennzeichnet, dass

die Hauptströmungsrichtung (H) des Gasstroms (G) parallel zur Oberfläche (O) des Substrats (40) liegt oder die Hauptströmungsrichtung (H) des Gasstroms (G) einen Winkel α zur Oberfläche (O) des Substrats (40) aufweist, der kleiner als 30° ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Hauptströmungsrichtung (H) des Gasstroms (G) einen Winkel α zur Oberfläche (O) des Substrats (40) aufweist, der kleiner als 15° ist

3. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Gasstrom (G) ein Prozessgasstrom und / oder ein Trägergasstrom ist.

4. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Teilchen beladene Gasstrom (G) eine Stokes Zahl von weniger als 1, insbesondere von weniger als 0.1, ganz insbesondere von weniger als 0.01, ganz insbesondere von weniger als 0.001 aufweist.

5. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die mindestens eine Diffusionsschicht (31) durch ein Pack Aluminizing, ein PVD- Verfahren oder ein additives Schichtenverfahren aufgebracht wird.

6. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die mindestens eine Diffusionsschicht (31) einen Anteil an MCrAlY, mit

M, ausgewählt aus Nickel, Kobalt, Eisen und Y, ausgewählt aus Yttrium, Ytterbium, Lanthan oder einer Seltenen Erde

aufweist oder aus dieser Substanz besteht.

7. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die mindestens eine Diffusionsschicht (31) einen Anteil an einem X-Aluminid mit
X, ausgewählt aus Chrom, Platin und / oder Nickel oder Aluminium und Chrom, Platin und / oder Nickel aufweist oder aus diesen Substanzen besteht. 5
8. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die mindestens eine metallische Schicht unter Verwendung eines Plasma-Spray PVD (PS-PVD) Verfahrens, eines Hohlkathoden-Sputter Verfahrens oder eines Suspension Plasma Spray (SPS) Verfahrens auf die mindestens eine Diffusionsschicht (31) aufgebracht wird. 10
9. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die mindestens eine thermische Schutzschicht (32) einen Anteil aus Yttrium und / oder stabilisiertem Zirkoniumoxid aufweist oder aus der Substanz besteht. 15
10. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Substrat (40) metallisch ist und mindestens teilweise durch ein Schichtaufbringungsverfahren oder durch ein Gussverfahren hergestellt ist. 20
11. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Substrat (40) einen Anteil einer Hochtemperatur-Nickellegierung, insbesondere CMSX4, CMSX3, C 263, Mar M 002 und / oder C 1023 aufweist oder aus einem solchem Material besteht. 25
12. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** Kanäle der Hohlraumstruktur (41) und / oder die Öffnungen (42) der Hohlraumstruktur (41) einen mittleren Durchmesser zwischen 0,5 bis 1,5 mm, insbesondere 1 mm, aufweisen. 30

Claims

1. Method for coating a substrate (40) with a cavity structure (41), in particular a cooling structure, inside the substrate (40), wherein the cavity structure (41) has openings (42) in the surface (O) of the substrate (40), wherein
a) at least one adhesion-promoting layer, in particular a diffusion layer (31) or at least one other metallic layer is applied to the substrate (40), in particular to the surface (O) of the substrate (40), 50

and subsequently

b) at least one thermally protective layer (32) is applied to the at least one diffusion layer (31) by using a suspension plasma spray (SPS) method,

characterized in that

the main flow direction (H) of the gas flow (G) is parallel to the surface (O) of the substrate (40) or the main flow direction (H) of the gas flow (G) has an angle α of less than 30° in relation to the surface (O) of the substrate (40).

2. Method according to Claim 1, **characterized in that** the main flow direction (H) of the gas flow (G) has an angle α of less than 15° in relation to the surface (O) of the substrate (40). 15
3. Method according to at least one of Claims 1 or 2, **characterized in that** the gas flow (G) is a process gas flow and/or a carrier gas flow. 20
4. Method according to at least one of the preceding claims, **characterized in that** the particle-laden gas flow (G) has a Stokes number of less than 1, in particular less than 0.1, more particularly less than 0.01, more particularly less than 0.001. 25
5. Method according to at least one of the preceding claims, **characterized in that** the at least one diffusion layer (31) is applied by pack aluminizing, a PVD method or an additive layering method. 30
6. Method according to at least one of the preceding claims, **characterized in that** the at least one diffusion layer (31) comprises a proportion of MCrAlY, with
M being selected from nickel, cobalt, iron and Y being selected from yttrium, ytterbium, lanthanum or a rare earth, 35
or consists of this substance.
7. Method according to at least one of the preceding claims, **characterized in that** the at least one diffusion layer (31) comprises a proportion of an X aluminide, with
X being selected from chromium, platinum and/or nickel or aluminium and chromium, platinum and/or nickel, or consists of these substances. 40
8. Method according to at least one of the preceding claims, **characterized in that** the at least one metallic layer is applied to the at least one diffusion layer (31) by using a plasma spray PVD (PS-PVD) method, a hollow cathode sputtering method or a suspension plasma spray (SPS) method. 45

9. Method according to at least one of the preceding claims, **characterized in that** the at least one thermally protective layer (32) comprises a proportion of yttrium and/or stabilized zirconium oxide, or consists of the substance.
10. Method according to at least one of the preceding claims, **characterized in that** the substrate (40) is metallic and is produced at least in part by a layer application method or by a casting method.
11. Method according to at least one of the preceding claims, **characterized in that** the substrate (40) comprises a proportion of a high-temperature nickel alloy, in particular CMSX4, CMSX3, C 263, Mar M 002 and/or C 1023, or consists of such a material.
12. Method according to at least one of the preceding claims, **characterized in that** channels of the cavity structure (41) and/or the openings (42) in the cavity structure (41) have a mean diameter of between 0.5 and 1.5 mm, in particular 1 mm.

Revendications

1. Procédé de revêtement d'un substrat (40) avec une structure alvéolaire (41), en particulier une structure de refroidissement, à l'intérieur du substrat (40), la structure alvéolaire (41) comportant des ouvertures (42) dans la surface (O) du substrat (40),
- a) au moins une couche favorisant l'adhérence, en particulier une couche de diffusion (31) ou au moins une autre couche métallique, étant appliquée sur le substrat (40), en particulier sur la surface (O) du substrat (40), puis
- b) au moins une couche de protection thermique (32) étant appliquée sur l'au moins une couche de diffusion (31) à l'aide d'un procédé de projection plasma en suspension (SPS),
- caractérisé en ce que** la direction d'écoulement principale (H) du flux de gaz (G) est parallèle à la surface (O) du substrat (40) ou la direction d'écoulement principale (H) du flux de gaz (G) formant par rapport à la surface (O) du substrat (40) un angle α qui est inférieure à 30°.
2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la direction d'écoulement principale (H) du flux de gaz (G) forme avec la surface (O) du substrat (40) un angle α inférieure à 15°.
3. Procédé selon au moins l'une des revendications 1 ou 2, **caractérisé en ce que** le flux de gaz (G) est un flux de gaz de traitement et/ou un flux de gaz porteur.

4. Procédé selon au moins l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le flux de gaz chargé de particules (G) a un nombre de Stokes inférieur à 1, notamment inférieur à 0,1, tout particulièrement inférieur à 0,01, tout particulièrement inférieur à 0,001.
5. Procédé selon au moins l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'au moins une couche de diffusion (31) est appliquée par une aluminisation en paquet, un procédé PVD ou un procédé de couches additives.
6. Procédé selon au moins l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'au moins une couche de diffusion (31) comporte une proportion de MCrAlY, avec
- M choisi parmi le nickel, le cobalt, le fer et
- Y choisi parmi l'yttrium, l'ytterbium, le lanthane ou une terre rare

ou est en cette substance.

7. Procédé selon au moins l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'au moins une couche de diffusion (31) comporte une proportion d'un X-aluminure avec
- X choisi parmi le chrome, le platine et/ou le nickel ou l'aluminium et le chrome, le platine et/ou le nickel ou est en ces substances.
8. Procédé selon au moins l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'au moins une couche métallique est appliquée sur l'au moins une couche de diffusion (31) à l'aide d'un procédé PVD par pulvérisation plasma (PS-PVD), un procédé de pulvérisation à cathode creuse ou un procédé de pulvérisation plasma en suspension (SPS).
9. Procédé selon au moins l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'au moins une couche de protection thermique (32) comporte une proportion d'yttrium et/ou d'oxyde de zirconium stabilisé ou est en ladite substance.
10. Procédé selon au moins l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le substrat (40) est métallique et est réalisé au moins partiellement par un procédé d'application de couche ou par un procédé de coulée.
11. Procédé selon au moins l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le substrat (40) comporte une proportion d'un alliage de nickel à haute température, notamment CMSX4, CMSX3, C 263, Mar M 002 et/ou C 1023, ou est en

un tel matériau.

12. Procédé selon au moins l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les canaux de la structure alvéolaire (41) et/ou les ouvertures (42) de la structure alvéolaire (41) ont un diamètre moyen compris entre 0,5 à 1,5 mm, en particulier 1 mm.

5
10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

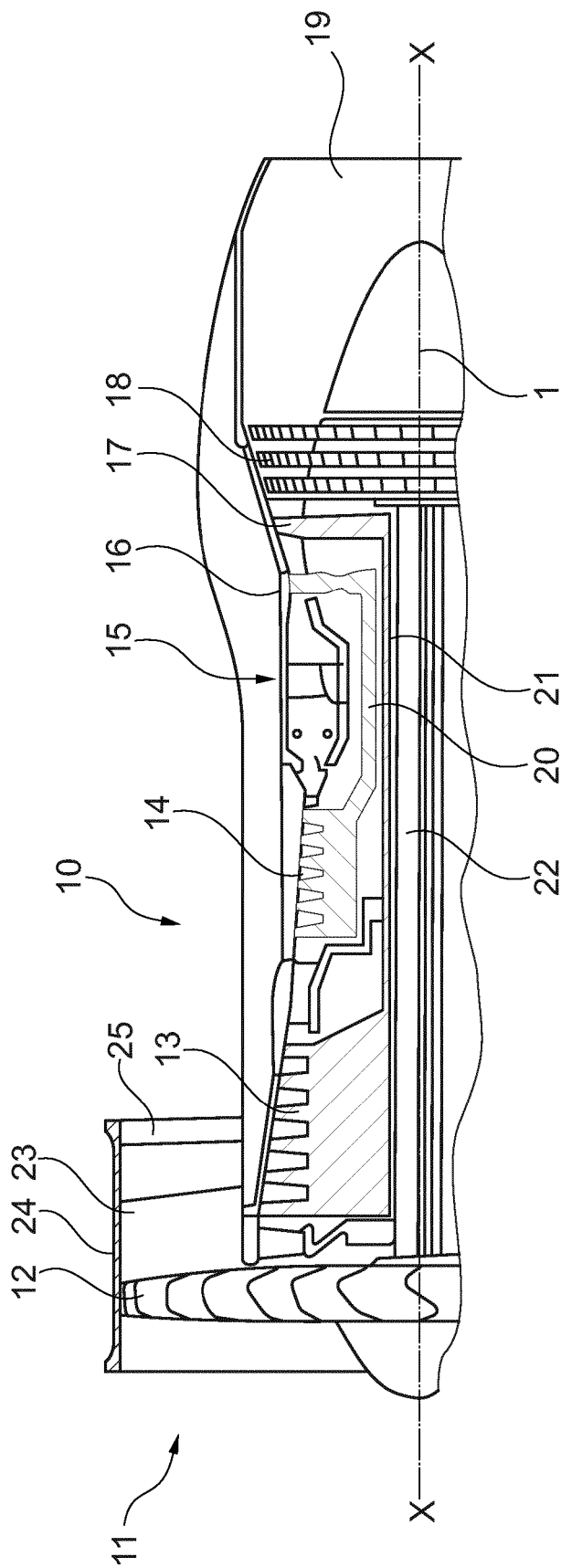


Fig. 1

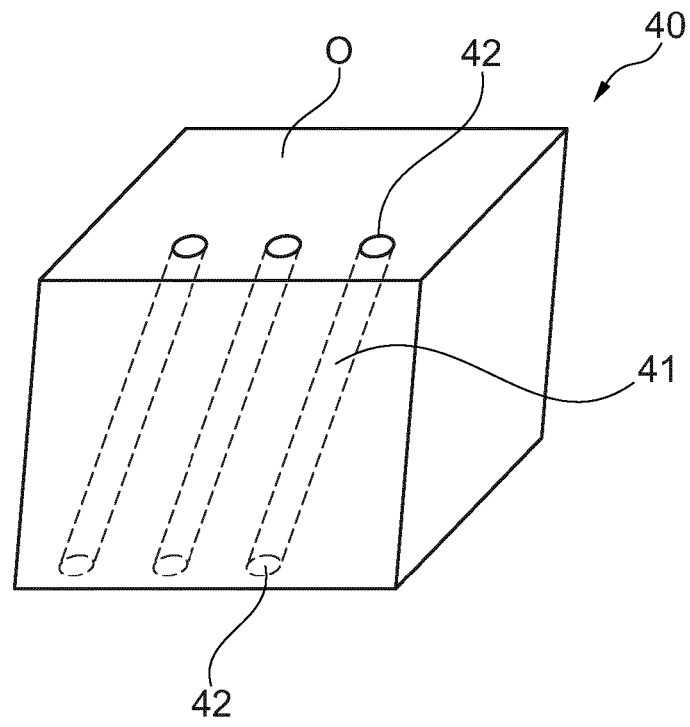


Fig. 2A

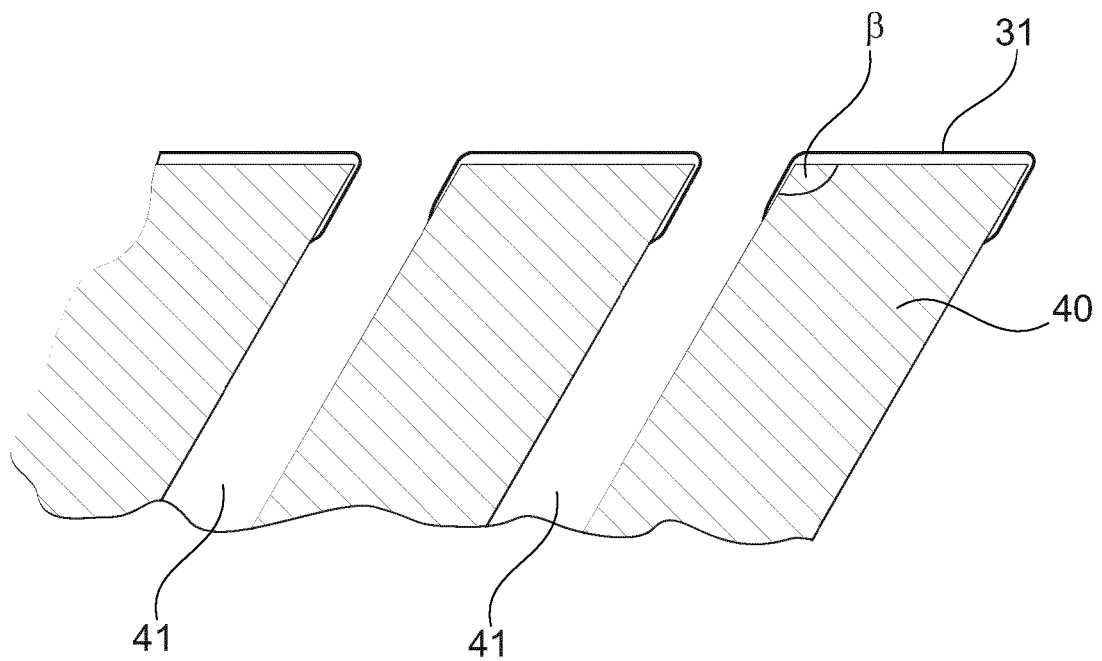


Fig. 2B

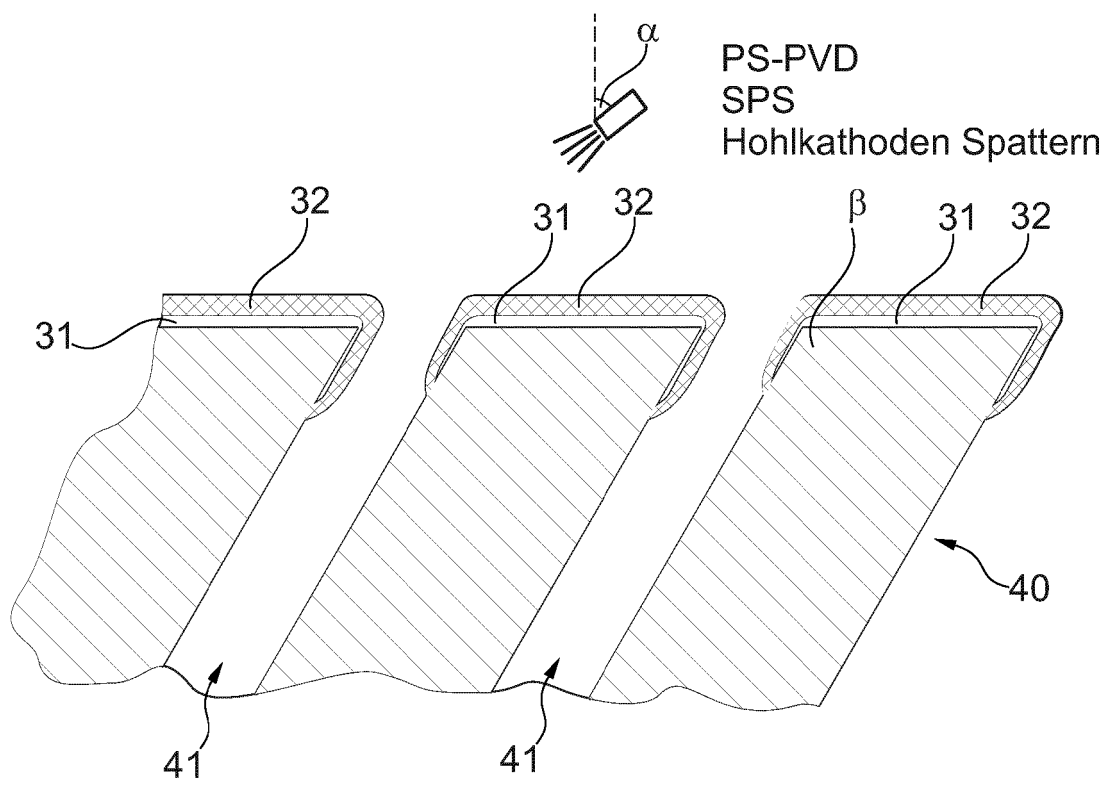
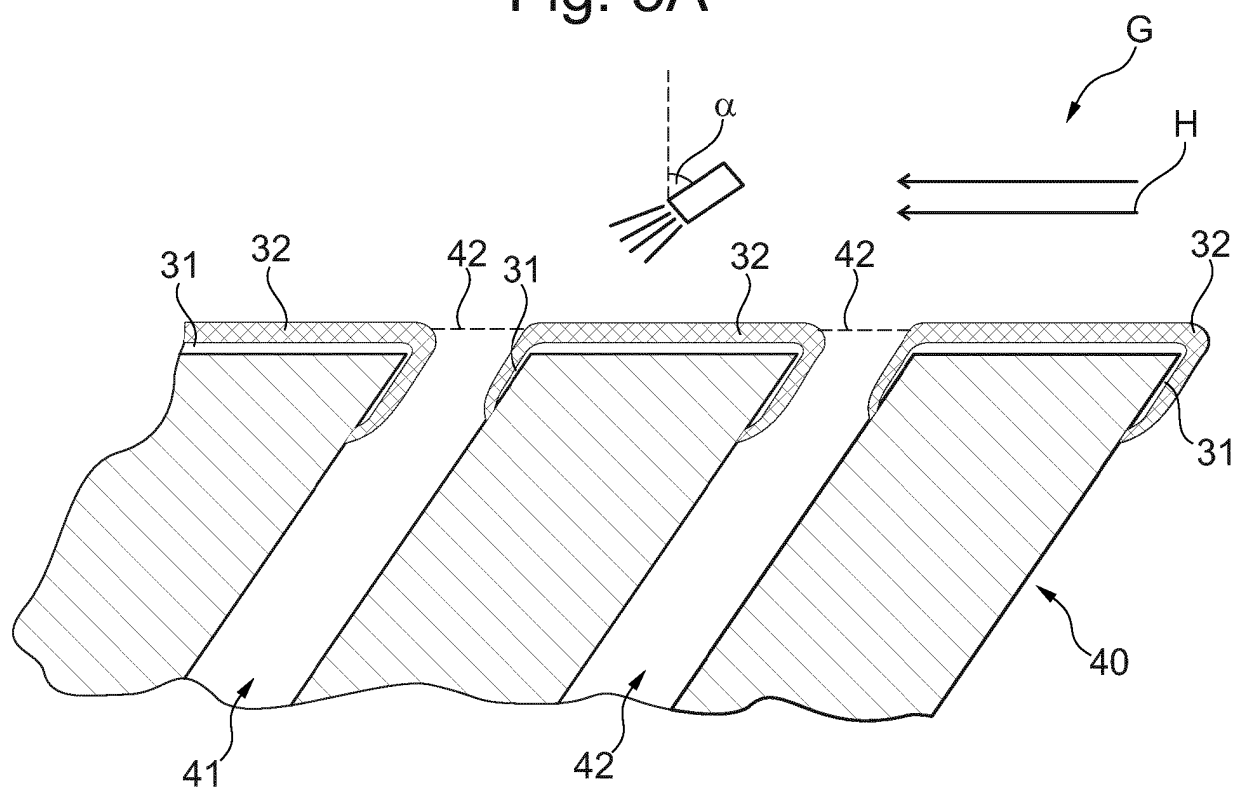
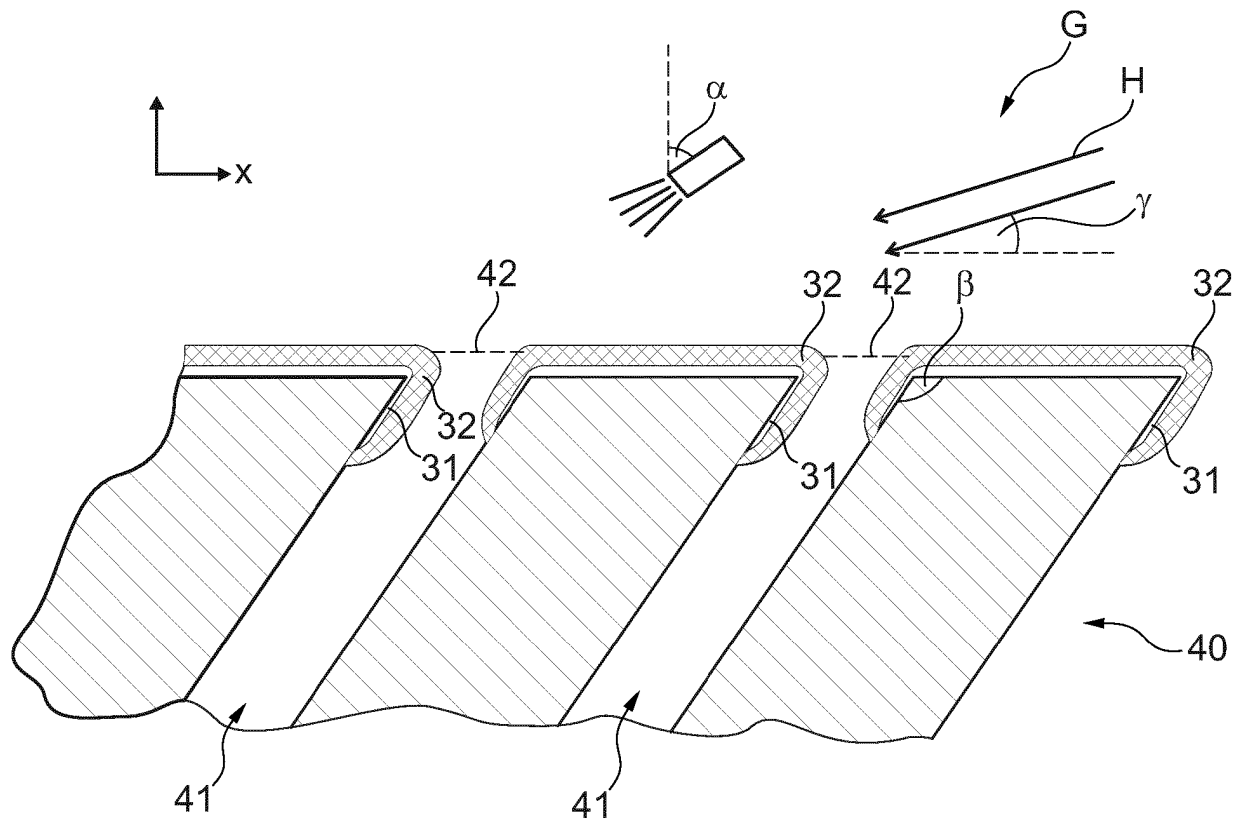


Fig. 2C



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 3150741 A1 [0003]
- DE 102005060243 A1 [0003]
- US 2011159260 A1 [0003]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **GORAL et al.** The technology of Plasma Spray Physical Vapour Deposition. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 55 (2), 689 [0003]
- **GORAL et al.** The PS-PVD method - formation of columnar TBCs on CMSX-4 superalloy. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 55 (2), 907 [0003]
- **MAUER et al.** Novel opportunities for thermal spray by PS-PVD. *Surface & Coating Technology*, 2015, vol. 269, 53 [0003]
- **MAUER et al.** Process diagnostic in suspension plasma spraying. *Surface & Coating Technology*, 2010, vol. 205, 961 [0003]