



(11) **EP 1 857 764 A2**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
21.11.2007 Patentblatt 2007/47

(51) Int Cl.:
F28F 13/18^(2006.01) C23C 4/12^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **07107709.3**

(22) Anmeldetag: **08.05.2007**

(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 MT NL PL PT RO SE SI SK TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL BA HR MK YU

(71) Anmelder: **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**
51147 Köln (DE)

(72) Erfinder: **Schäfer, Dirk**
70569, Stuttgart (DE)

(30) Priorität: **16.05.2006 DE 102006023882**

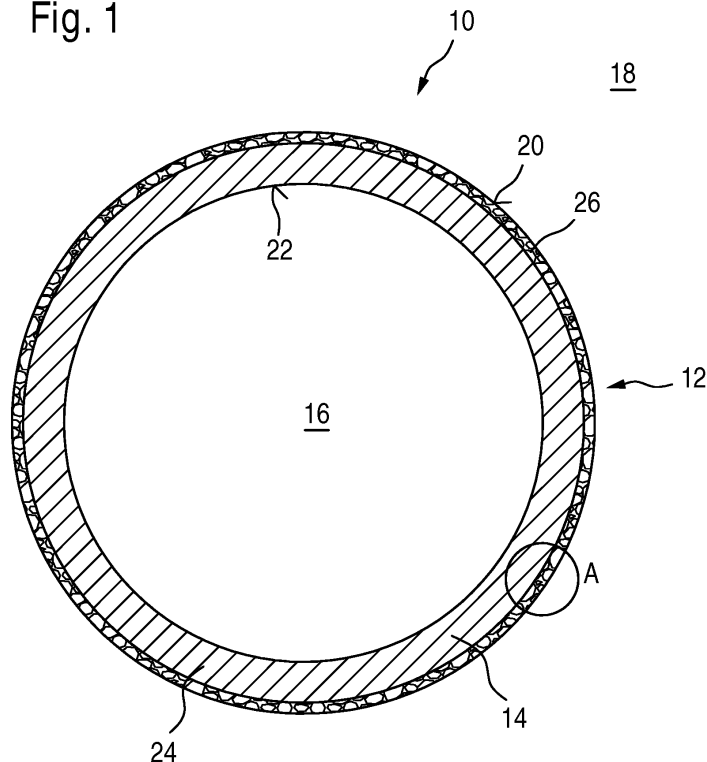
(74) Vertreter: **Hoeger, Stellrecht & Partner**
Patentanwälte
Uhlandstrasse 14 c
70182 Stuttgart (DE)

(54) **Wärmeübertragungsvorrichtung und Verfahren zur Herstellung einer Wärmeübertragungsvorrichtung**

(57) Um eine Wärmeübertragungsvorrichtung (10), umfassend mindestens ein Wärmeübertragungsflächenelement (14) mit einem Grundkörper (24), eine erste Seite (20), an welcher ein erstes Fluid zur Wärmeaufnahme vorbeiführbar ist, und eine zweite Seite (22), welche be-

heizbar ist, wobei an dem Grundkörper (24) an der ersten Seite (20) eine Porenstruktur (26) angeordnet ist, bereit-zustellen, bei welcher der Wärmeübergangskoeffizient optimiert ist, ist vorgesehen, dass die Porenstruktur (26) zum Grundkörper (24) hin eine kleinere Porosität aufweist als zu einer äußeren Oberfläche hin.

Fig. 1



EP 1 857 764 A2

Beschreibung

- 5 **[0001]** Die Erfindung betrifft eine Wärmeübertragungsvorrichtung, umfassend mindestens ein Wärmeübertragungsflächenelement mit einem Grundkörper, eine erste Seite, an welcher ein erstes Fluid zur Wärmeaufnahme vorbeiführbar ist, und eine zweite Seite, welche beheizbar ist, wobei an dem Grundkörper an der ersten Seite eine Porenstruktur angeordnet ist.
- [0002]** Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur Herstellung einer Wärmeübertragungsvorrichtung, welche mindestens ein Wärmeübertragungsflächenelement mit einer Porenstruktur aufweist, wobei die Porenstruktur an einem Grundkörper angeordnet ist.
- 10 **[0003]** Es hat sich gezeigt, dass man einen hohen Wärmeübergangskoeffizienten bei Wärmeübertragungsvorrichtungen mit Phasenwechsel Flüssigkeit-Dampf erhält, wenn im Bereich des Blasensiedens gearbeitet wird. Dazu müssen potentielle Keimstellen für die Blasenbildung vorhanden sein. Solche potentiellen Keimstellen lassen sich über eine Porenstruktur bereitstellen.
- [0004]** Aus der DE 101 22 574 A1 ist ein Bauteil zum Stoff- und Wärmetransport mit einem Basiskörper und mit einer 15 einen Stoff- und Wärmetransport unterstützenden Schicht auf mindestens einer Bauteilfläche bekannt, wobei die Beschichtung durch ein Vakuumplasmastritzverfahren erzeugt ist. Pulverpartikel sind zur Erzeugung einer Porenstruktur oberflächlich angeschmolzen. Durch den Grad des Anschmelzens ist der Anteil an offenen und geschlossenen Poren eingestellt.
- [0005]** Aus der US 4,753,849 ist eine porös beschichtete Verdampferöhre bekannt.
- 20 **[0006]** Die DE 40 36 932 A1 offenbart ein Verfahren zur Herstellung einer Wärmeübertragungsfläche, bei welchem ein Gemisch aus Partikeln eines Metallpulvers und eines Polymethylmetacrylatpulvers auf ein metallisches Substrat flammgespritzt wird. Die Partikel des Polymethylmetacrylatpulvers bilden zwischen Partikeln des Metallpulvers kleine Zwischenräume. Der hergestellte Überzug wird erhitzt, um die Partikel des Polymethylmetacrylatpulvers vom Überzug zu entfernen und an Stellen, die vorher von diesen Partikeln besetzt waren, Leerräume auszubilden.
- 25 **[0007]** Aus der EP 0 264 338 A2 ist ein Bauteil für einen Wärmeübertrager bekannt, welches eine poröse Beschichtung umfasst, wobei die Poren durch Entfernung eines flüchtigen Materials erzeugt wurden.
- [0008]** Wärmeübertragungsvorrichtungen sind auch bekannt aus den Veröffentlichungen Asano, H., Schäfer, D., Bouyer, E., Müller-Steinhagen, H., Henne, R., 2003, "Improved Heat Transfer by RF Plasma Produced Structured Surfaces", International Thermal Spray Conference (ITSC 2003), pp. 559-566; Asano, H., Schäfer, D., Bouyer, E., Müller-Steinhagen, H. (ITW), "Development of Plasma Spray-Coated Tubes for Compact Evaporators", Fourth International Conference on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industry, Crete Island, Greece, September 30 29 - October 3, 2003, Engineering Conferences International, (2003); Schäfer, D., Asano, H., Müller-Steinhagen, H., Tamme, R., "Neue Hochleistungsflächen für Kältemittelverdampferöhre", DKV Tagung, Bonn, 19. - 21.11.2003, DKV, DKV-Tagungsbericht 2003, S. 207-220, (2003); Schäfer, D., Müller-Steinhagen, H., Tamme, R., "Einfluss Plasma-beschichteter Rohre im Rohrbündel-Verdampfer", DKV, Bremen, 17. - 19.11.2004, DKV, 257-266, (2004); Schäfer, D., Tammer, R., Müller-Steinhagen, H. and Müller, M., "Experimental Results with Novel Plasma Coated Tubes in Compact Tube Bundels", Proceedings of the Heat SET 2005 Conference, Grenoble, France, ISBN 2-9502555-0-7, pp. 487-492 (2005).
- 35 **[0009]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Wärmeübertragungsvorrichtung der eingangs genannten Art bereitzustellen, bei welcher der Wärmeübergangskoeffizient optimiert ist.
- [0010]** Diese Aufgabe wird bei der eingangs genannten Wärmeübertragungsvorrichtung erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass die Porenstruktur zum Grundkörper hin eine kleinere Porosität aufweist als zu einer äußeren Oberfläche hin.
- [0011]** Bei der erfindungsgemäßen Lösung weist die Porenstruktur eine nicht-homogene Porenverteilung auf, d. h. eine nicht-homogene Porosität auf. Dadurch, dass zu einer äußeren Oberfläche hin die Porosität größer ist als zu einem 40 Grundkörper hin, steht an der äußeren Oberfläche eine größere Anzahl von potentiellen Keimstellen bereit. Dadurch lässt sich der Wärmeübergang zwischen der Oberfläche und einer Dampfblase verbessern. Dies ist auf eine effektive Kontaktfläche und das beschleunigte Wachstum und Abriss einer Blase über die Ablösefrequenz zurückzuführen.
- [0012]** Die Wärmeleitfähigkeit nahe dem Grundkörper ist verbessert und die Turbulenz nahe der äußeren Oberfläche ist erhöht. Aufsteigende Dampfblasen und der steigende Volumenanteil am Dampf in Richtung der äußeren Oberfläche 45 haben verbesserte Aufstiegsmöglichkeiten und das erste Fluid hat eine bessere Nachströmmöglichkeit. Dadurch lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient im Vergleich zu einer Porenstruktur mit homogener Porosität verbessern.
- [0013]** Die zweite Seite kann über ein zweites Fluid beheizt sein oder beispielsweise auch elektrisch beheizt sein.
- [0014]** Insbesondere ist es vorgesehen, dass die Porosität der Porenstruktur gradiert ist, um einen verbesserten Wärmeübergang zu erhalten.
- 55 **[0015]** Ganz besonders vorteilhaft ist es, wenn die Porosität von dem Grundkörper weg zu der äußeren Oberfläche hin zunimmt. Dadurch lässt sich die Wärmeleitfähigkeit nahe dem Grundkörper verbessern und der Turbulenzgrad nahe der äußeren Oberfläche lässt sich erhöhen.
- [0016]** Es ist grundsätzlich möglich, dass die Porenstruktur beispielsweise einstückig an dem Grundkörper durch

Ätzen, Sintern oder maschinell zerspanende Bearbeitung hergestellt ist. Die Porenstruktur lässt sich auf einfache Weise herstellen, wenn diese auf dem Grundkörper und insbesondere als Beschichtung auf dem Grundkörper ausgebildet ist. Eine solche Beschichtung lässt sich durch bekannte Verfahren wie atmosphärisches Plasmaspritzen, Lichtbogen-Drahtspritzen, Hochgeschwindigkeitsflammspritzen oder Induktionsplasmabeschichten herstellen.

[0017] Ganz besonders vorteilhaft ist es, wenn die Porenstruktur flächig an dem Grundkörper angeordnet ist. Dadurch ist dafür gesorgt, dass das erste Fluid in thermischem Kontakt mit der Porenstruktur bei der Vorbeiströmung an der ersten Seite des Wärmeübertragungsflächenelements kommt.

[0018] Günstig ist es, wenn die Porenstruktur eine im Wesentlichen einheitliche Dicke aufweist. Sie lässt sich dann auf einfache Weise herstellen.

[0019] Vorteilhafterweise ist die Dicke der Porenstruktur im Bereich zwischen 5 μm und 500 μm und insbesondere im Bereich zwischen 10 μm und 300 μm . Es ist dann eine Porenstruktur bereitgestellt, welche mit hohem Ablösewiderstand an dem Grundkörper angeordnet ist und optimierte Keimbildungseigenschaften für Siedebblasen aufweist.

[0020] Günstig ist es, wenn die mittlere Porengröße im Bereich zwischen 1 μm und 200 μm und insbesondere im Bereich zwischen 1 μm und 100 μm liegt. Dadurch lässt sich auf optimierte Weise die Blasenbildung von Siedebblasen fördern.

[0021] Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, wenn die Porenstruktur in einem Dickenbereich von 0 % bis 20 % der Gesamtdicke, ausgehend von dem Grundkörper, eine Porosität und insbesondere mittlere Porosität im Bereich zwischen 0 % und 30 % aufweist.

[0022] Ferner ist es günstig, wenn die Porenstruktur in einem Dickenbereich zwischen 20 % und 70 % der Gesamtdicke, ausgehend von dem Grundkörper, eine Porosität von 20 % bis 60 % aufweist. Es lässt sich dann eine gradierte Porenstruktur herstellen, bei welcher die Porosität zu dem Grundkörper hin kleiner ist als zu der äußeren Oberfläche hin.

[0023] Ferner ist es günstig, wenn die Porosität in einem Dickenbereich zwischen 70 % und 100 % der Gesamtdicke, ausgehend von dem Grundkörper, mindestens um 10 % größer ist als die Porosität in einem Dickenbereich zwischen 20 % und 70 % der Gesamtdicke. Dadurch lässt sich die Bildung von Siedebblasen optimieren, wobei guter Wärmeübergang gewährleistet ist und sich die Porenstruktur auf einfache Weise herstellen lässt. Vorzugsweise ist die Porosität in dem genannten Dickenbereich kleiner als 80 %.

[0024] Günstig ist es, wenn die Porosität der Porenstruktur höchstens 80 % beträgt und insbesondere in einer oberen Lage der Porenstruktur höchstens 80 % beträgt.

[0025] Beispielsweise ist die Porenstruktur mehrlagig ausgebildet, wobei sich unterschiedliche Lagen in der Porosität unterscheiden. Eine solche Porenstruktur lässt sich auf einfache Weise herstellen, indem die Lagen beispielsweise als unterschiedliche Teilschichten sukzessive hergestellt werden.

[0026] Ganz besonders vorteilhaft ist es, wenn die Oberflächenrauigkeit R_a mindestens 8 μm beträgt. Dadurch lässt sich die Siedebblasenbildung an der Oberfläche optimieren.

[0027] Ganz besonders vorteilhaft ist es, wenn die Porenstruktur aus einem Material hoher Wärmeleitfähigkeit und insbesondere metallischer Wärmeleitfähigkeit hergestellt ist. Dadurch lässt sich ein großer Wärmeübertragungskoeffizient erreichen.

[0028] Ferner ist es günstig, wenn der Grundkörper aus einem metallischen Material hergestellt ist. Dadurch lässt sich der Wärmeübergang von der ersten Seite auf die zweite Seite optimieren.

[0029] Insbesondere ist die Porenstruktur mittels eines einkomponentigen Pulvermaterials hergestellt. Der Herstellungsprozess ist dadurch vereinfacht, da keine zweite Komponente herausgelöst werden muss.

[0030] Vorteilhafterweise sind die erste Seite und die zweite Seite des mindestens einen Wärmeübertragungsflächenelements einander abgewandt. Dadurch lässt sich auf optimierte Weise Wärme von der ersten Seite auf die zweite Seite übertragen.

[0031] Bei einer Ausführungsform ist es vorgesehen, dass an der zweiten Seite ein zweites Fluid zur Wärmeabgabe vorbeiführbar ist. Beispielsweise ist das Wärmeübertragungsflächenelement als Rohr ausgebildet, in dessen Innenraum das zweite Fluid vorbeiführbar ist. Es ist beispielsweise auch möglich, dass das Wärmeübertragungsflächenelement plattenförmig ausgebildet ist, wobei an einer Seite das zweite Fluid vorbeigeführt wird.

[0032] Es kann vorgesehen sein, dass das mindestens eine Wärmeübertragungsflächenelement geschlossen ausgebildet ist. Beispielsweise ist das Wärmeübertragungsflächenelement als Rohr realisiert. Innerhalb des Rohrs lässt sich ein zweites Fluid führen, wobei das erste Fluid an einer Außenseite des Rohrs vorbeigeführt wird. Die Strömungsführung kann auch umgekehrt sein, d. h. das erste Fluid wird innerhalb des Rohrs geführt und das zweite Fluid wird an einer Außenseite des Rohrs vorbeigeführt.

[0033] Es ist auch möglich, dass das mindestens eine Wärmeübertragungsflächenelement offen ausgebildet ist und beispielsweise als Wärmeübertragungsplatte ausgebildet ist. Die Wärmeübertragungsplatte bildet dann einen Teil eines Plattenwärmeübertragers.

[0034] Günstig ist es, wenn das erste Fluid eine verdampfbare Flüssigkeit ist. Es lässt sich dann ein hoher Wärmeübertragungskoeffizient erreichen.

[0035] Der Wärmeübertragungskoeffizient lässt sich optimieren, wenn das erste Fluid im Bereich des Blasensiedens

vorliegt.

[0036] Der Erfindung liegt ferner die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Herstellung einer Wärmeübertragungsvorrichtung der eingangs genannten Art bereitzustellen, mittels welchem eine Wärmeübertragungsvorrichtung herstellbar ist, welche einen optimierten Wärmeübertragungskoeffizienten aufweist.

[0037] Diese Aufgabe wird bei dem eingangs genannten Verfahren erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass ausgehend von dem Grundkörper zu einer äußeren Oberfläche hin die Porenstruktur mit zunehmender Porosität hergestellt wird.

[0038] Das erfindungsgemäße Verfahren weist die bereits im Zusammenhang mit der erfindungsgemäßen Wärmeübertragungsvorrichtung erläuterten Vorteile auf.

[0039] Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens wurden ebenfalls bereits im Zusammenhang mit der erfindungsgemäßen Wärmeübertragungsvorrichtung erläutert.

[0040] Insbesondere ist die Porenstruktur als Beschichtung auf den Grundkörper aufgebracht. Die Porenstruktur lässt sich dadurch auf einfache Weise herstellen.

[0041] Ganz besonders vorteilhaft ist es, wenn die Porenstruktur mehrlagig aufgebracht wird. Dadurch lässt sich auf einfache Weise eine gradierte Porenstruktur herstellen, bei welcher die Porosität zu dem Grundkörper hin geringer ist als zu einer äußeren Oberfläche hin.

[0042] Vorteilhafterweise werden Lagen sukzessive aufgebracht, wobei sich unterschiedliche Lagen in ihren Eigenschaften und insbesondere in ihrer Porosität unterscheiden.

[0043] Vorteilhafterweise nimmt die Porosität in sukzessive aufgetragenen Lagen bezogen auf die vorher aufgetragene Lage zu, um eine gradierte Porenverteilung mit erhöhter Porosität zu einer äußeren Oberfläche hin zu erreichen.

[0044] Ganz besonders vorteilhaft ist es, wenn die Beschichtung mit einem Pulvermaterial und insbesondere mit einem einkomponentigen Pulvermaterial hergestellt wird. Es lässt sich dadurch auf einfache Weise eine Porenstruktur mit definierter Porosität herstellen.

[0045] Beispielsweise werden als Pulvermaterial Pulverpartikel mit einer mittleren Korngröße zwischen 40 μm und 350 μm und insbesondere zwischen 50 μm und 200 μm eingesetzt.

[0046] Ganz besonders vorteilhaft ist es, wenn die Beschichtung mittels Hochfrequenzplasmaspritzen (Induktionsplasmaspritzen) aufgebracht wird. Beim Hochfrequenzplasmaspritzen wird ein großvolumiger Plasmastrahl erzeugt, welcher einen geringen radialen Temperaturgradienten aufweist. Ein solcher Plasmastrahl hat eine geringe Geschwindigkeit (im Vergleich zu einem Gleichstromplasmastrahl). Dadurch reduziert sich die kinetische Energie beim Aufprall von geschmolzenen oder beinahe geschmolzenen Pulverpartikeln auf die zu beschichtende Oberfläche.

[0047] Günstig ist es, wenn die Porosität über Variation des aufgetragenen Materials und/oder einer Plasmastrahlgeschwindigkeit und/oder einer Beschichtungszeit und/oder der Leistung eines Hochfrequenzgenerators und/oder des Abstands zwischen Probe und einer Plasmadüse und/oder des Drucks und/oder Gasbeimischung eingestellt wird. Dadurch lässt sich eine definierte Porenstrukturgradierung einstellen.

[0048] Günstig ist es, wenn der Druck beim Aufbringen im Bereich zwischen 80 mbar und 1 bar liegt und insbesondere zwischen 200 mbar und 300 mbar liegt. Dadurch lässt sich eine optimierte Porenstruktur erzeugen.

[0049] Die nachfolgende Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen dient im Zusammenhang mit der Zeichnung der näheren Erläuterung der Erfindung. Es zeigen:

Figur 1 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Wärmeübertragungsvorrichtung;

Figur 2 eine schematische Darstellung des Bereichs A gemäß Figur 1 in Schnittdarstellung;

Figur 3 ein Schnittbild einer Porenstruktur aus Cu;

Figur 4 eine rasterelektronenmikroskopische Oberflächenaufnahme eines Ausführungsbeispiels einer Porenstruktur aus Cu;

Figur 5(a), 5(b), 5(c) Messdiagramme der Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten von der Wärmestromdichte eines Ausführungsbeispiels einer Wärmeübertragungsvorrichtung, welche als Rohr ausgebildet ist, bei verschiedenen Zusammensetzungen der Porenstruktur (Messwerte A, B, C, D, E) bei verschiedenen Temperaturen und Drücken; und

Figur 6 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer Vorrichtung zur Herstellung einer Wärmeübertragungsvorrichtung.

[0050] Ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Wärmeübertragungsvorrichtung 10 ist ein Rohr 12, welches in Figur 1 in einer Schnittansicht gezeigt ist. Die Wärmeübertragungsvorrichtung 10 umfasst ein Wärmeübertragungs-

flächenelement 14, welches geschlossen ist. Das Wärmeübertragungsflächenelement 14 trennt einen Innenraum 16 von einem Außenraum 18. Die Bezeichnung Außenraum 18 bezieht sich dabei auf das Wärmeübertragungsflächenelement 14. Der Außenraum 18 kann selber beispielsweise Teil eines Innenraums eines Rohrs sein, in welchem das erste Fluid geführt ist.

5 **[0051]** Das Wärmeübertragungsflächenelement 14 erstreckt sich in einer Längsrichtung, welche quer zur Zeichenebene der Figur 1 ist.

[0052] Das Wärmeübertragungsflächenelement 14 hat eine erste Seite 20, welche in den Außenraum 18 weist. An der ersten Seite 20 ist ein erstes Fluid zur Wärmeaufnahme vorbeiführbar.

10 **[0053]** Es ist dabei vorgesehen, dass das erste Fluid eine verdampfbare Flüssigkeit ist, wobei das erste Fluid im Zustand des Blasensiedens vorliegt.

[0054] Das Wärmeübertragungsflächenelement 14 weist ferner eine zweite Seite 22 auf, welche dem Innenraum 16 zugewandt ist; durch die zweite Seite 22 ist der Innenraum 16 gebildet. Die zweite Seite 22 und die erste Seite 20 sind einander abgewandt. Die zweite Seite 22 ist beheizbar. Beispielsweise ist an der zweiten Seite 22 ein zweites Fluid zur Wärmeabgabe vorbeiführbar.

15 **[0055]** Über das Wärmeübertragungsflächenelement 14 wird Wärme von dem zweiten Fluid auf das erste Fluid übertragen. Das zweite Fluid ist eine Flüssigkeit oder ein Gas. Grundsätzlich ist es auch möglich, dass die zweite Seite 22 beispielsweise elektrisch beheizt ist.

20 **[0056]** Das Wärmeübertragungsflächenelement 14 weist einen Grundkörper 24 auf. Dieser ist bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel rohrförmig ausgebildet. Insbesondere ist er aus einem Material hoher Wärmeleitfähigkeit und insbesondere metallischer Wärmeleitfähigkeit hergestellt. Es ist vorzugsweise vorgesehen, dass der Grundkörper 24 aus einem metallischen Material wie beispielsweise Kupfer hergestellt ist.

25 **[0057]** An der zweiten Seite 22 ist an dem Grundkörper 24 in den Außenraum 18 weisend eine Porenstruktur 26 angeordnet. Die Porenstruktur ist dabei flächig an dem Grundkörper 24 angeordnet und bedeckt diesen insbesondere vollständig, so dass das erste Fluid über die Porenstruktur 26 in thermischem Kontakt mit dem Wärmeübertragungsflächenelement 14 steht.

[0058] Es ist grundsätzlich möglich, dass die Porenstruktur 26 einstückig an dem Grundkörper 24 angeordnet ist.

[0059] Bei einer vorteilhaften Ausführungsform ist die Porenstruktur 26 als Beschichtung auf dem Grundkörper 24 ausgebildet.

30 **[0060]** Die Porenstruktur weist eine im Wesentlichen einheitliche Dicke auf, welche im Bereich zwischen 5 μm und 500 μm und insbesondere im Bereich zwischen 10 μm und 300 μm liegt.

[0061] Es hat sich gezeigt, dass sich hohe Wärmeübergangskoeffizienten an einer Wärmeübertragungsvorrichtung 10 erzielen lassen, wenn bei dem ersten Fluid der Zustand des Blasensiedens vorliegt. Die Porenstruktur 26 stellt potentielle Keimstellen für die Blasenbildung bereit.

35 **[0062]** Erfindungsgemäß ist es vorgesehen, dass die Porenstruktur 26 einen gradierten Schichtaufbau aufweist. Dies ist in Figur 2 schematisch dargestellt. Die Porosität zu dem Grundkörper 24 hin ist kleiner als zu einer äußeren Oberfläche 30 hin, welche dem Außenraum 18 zuweist. Die Porosität nimmt dadurch in einer Richtung 31 von dem Grundkörper 24 weg zu.

40 **[0063]** Die Porenstruktur 26 ist vorzugsweise aus einem Material mit hoher thermischer Leitfähigkeit und insbesondere mit metallischer thermischer Leitfähigkeit hergestellt. Mögliche Materialien sind beispielsweise Kupfer, Aluminium, Edelstahl, Titan, Graphit oder Graphit-Plastik.

[0064] Es ist dabei grundsätzlich auch möglich, dass die Porengröße von dem Grundkörper 24 weg in der Porenstruktur 26 zu der äußeren Oberfläche 30 hin zunimmt.

45 **[0065]** Eine variierende Porosität der Porenstruktur 26 lässt sich beispielsweise dadurch erreichen, dass die Beschichtung 28 mehrlagig hergestellt wird. Dies ist in Figur 2 durch die Lagen 32, 34 und 36 angedeutet. Diese Lagen 32, 34, 36 werden sukzessive hergestellt, d. h. zuerst wird die Lage 32 auf dem Grundkörper 24 hergestellt, danach die Lage 34 auf der Lage 32 und anschließend die Lage 36 auf der Lage 34. Die Lagen 32, 34 und 36 unterscheiden sich vor allem durch ihre Porosität. Diese wird durch die Art und Weise der Herstellung eingestellt.

[0066] Die (mittlere) Porengröße in der Porenstruktur 26 liegt vorzugsweise im Bereich zwischen 1 μm und 200 μm und insbesondere zwischen 1 μm und 100 μm .

50 **[0067]** Bei einem Ausführungsbeispiel ist es vorgesehen, dass die Porenstruktur 26 in einem Dickenbereich von 0 % bis 20 % der Gesamtdicke, welcher der Lage 32 in Figur 2 entspricht, eine Porosität im Bereich zwischen 0 % und 30 % aufweist. In einem Dickenbereich zwischen 20 % und 70 % der Gesamtdicke, welcher der Lage 34 entspricht, liegt die Porosität zwischen 20 % und 60 %. In einem Dickenbereich zwischen 70 % und 100 % der Gesamtdicke, entsprechend der Lage 36, ist die Porosität um mindestens 10 % größer als die Porosität in einem Dickenbereich zwischen 20 % und 70 % der Gesamtdicke (entsprechend der Lage 34). Jedoch ist in dem Dickenbereich zwischen 70 % und 100 % die Porosität nicht größer als 80 %.

55 **[0068]** Die oben genannten Angaben bezüglich der Dickenbereiche müssen nicht unbedingt mit den Lagenbereichen zusammenfallen.

[0069] Durch die Porenstruktur 26 mit ihrer höheren Porosität an der äußeren Oberfläche 30 wird eine vergrößerte Anzahl an optimalen potentiellen Keimstellen bereitgestellt. Weiterhin wird der Wärmeübergang zwischen der äußeren Oberfläche 30 und einer Dampfblase verbessert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die effektive Kontaktfläche vergrößert ist und das Wachstum und der Abriss einer Siedeblase über die Ablösefrequenz beschleunigt ist.

[0070] Durch die gradierte Porosität der Porenstruktur 26 mit geringerer Porosität zu dem Grundkörper 24 hin ist die Wärmeleitfähigkeit nahe an dem Grundkörper 24 verbessert. Durch die höhere Porosität an der äußeren Oberfläche 30 ist der Turbulenzgrad nahe der äußeren Oberfläche 30 erhöht. Damit haben aufsteigende Dampfblasen und der steigende Volumenanteil an Dampf in Richtung der äußeren Oberfläche 30 verbesserte Aufstiegsmöglichkeiten. Dadurch wiederum hat das erste Fluid eine bessere Nachströmmöglichkeit.

[0071] Die Oberflächenrauigkeit Ra (gemäß DIN 4768) ist größer als 8 µm.

[0072] In Figur 3 ist ein Schnittbild eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Porenstruktur 26 gezeigt. Das Material der Porenstruktur 26 ist Kupfer. Die Porosität ist gradiert, d. h. sie nimmt in der Richtung 31 zu. Insbesondere ist die Porosität zu dem Grundkörper 24 hin hier kleiner als zu der äußeren Oberfläche 30 zu.

[0073] Figur 4 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Oberflächenaufnahme der Porenstruktur gemäß Figur 3 (Vergrößerung 3500: 1). Man erkennt eine Pore mit einem Porendurchmesser von 14 µm.

[0074] Bei konkreten Ausführungsbeispielen der Erfindung wurden Kupferrohre mit einer porösen Beschichtung versehen. Die Kupferrohre wiesen einen Außendurchmesser von 18 mm und eine Länge von 350 mm auf.

[0075] Es wurden Rohre mit folgenden Eigenschaften hergestellt:

Rohr	Beschichtung	Oberflächenrauigkeit Ra [mm] (DIN4768)	Schichtdicke t _c [mm]	Gesamt-Porosität e ₀ [%]
glatt		0,247		
A	Inconel 625	14,1	175,7	73,4
B		20,4	193,5	77,9
C		11,8	142,5	63,3
D	Kupfer	12,6	165,4	42,1
E		9,0	50,8	63,4

[0076] Die Porenstruktur wurde dabei mit gradierter Porosität hergestellt. Die in der Tabelle angegebene Spalte mit der Porosität bezieht sich auf die Gesamt-porosität.

[0077] Die Figuren 5(a), 5(b) und 5(c) zeigen Messergebnisse des Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der Wärmestromdichte. Die Messwerte der Figur 5(a) wurden für eine Temperatur T_s von 20°C und einem Druck P_s von 572,3 kPa aufgenommen. Die Messwerte des Diagramms von Figur 5(b) wurden bei einer Temperatur von T_s von 0°C und einem Druck P_s von 292,2 kPa aufgenommen. Die Messwerte gemäß Figur 5(c) wurden bei einer Temperatur T_s von -20°C und einem Druck P_s von 129,9 kPa aufgenommen. In dem Zweiphasengemisch (zweites Fluid) war Tetrafluorethan (R134a) enthalten.

[0078] In den Figuren 5(a) bis (c) ist mit dem Bezugszeichen 38 die theoretische Kurve für ein glattes Rohr angedeutet. Man erkennt, dass durch das Vorsehen einer Porenstruktur 26 (mit gradiertem Aufbau) ein deutlich höherer Wärmeübergangskoeffizient erreichbar ist.

[0079] Ferner ist zum Vergleich mit dem Bezugszeichen 40 die theoretische Kurve für freie Konvektion (ohne Blasen-sieden) dargestellt.

[0080] Den höchsten Wärmeübergangskoeffizienten erhält man für kleine Wärmestromdichten mit dem Rohr A. Für größere Wärmestromdichten werden die Rohre D und E vorteilhafter.

[0081] Bei der Herstellung einer Porenstruktur 26 aus Kupferpartikeln hat sich gezeigt, dass Keimstellen einer Porengröße 0,2 µm und 100 µm gebildet wurden, die näherungsweise homogen in der Porenstruktur 26 verteilt sind. Die kleineren Poren sind eventuell auf Einschlüsse im Kupfer zurückzuführen und die größeren Poren auf Agglomerate. Die gradierte Struktur ist durch die Restporen hergestellt.

[0082] Die Porenstruktur 26 mit gradiertem Aufbau lässt sich grundsätzlich durch verschiedene Verfahren wie beispielsweise Sintern, Ätzen oder maschinell zerspanend herstellen.

[0083] Bei einem vorteilhaften Verfahren wird die Beschichtung 28 mehrlagig über Hochfrequenzplasmaspritzen (Induktionsplasmaspritzen) hergestellt. In Figur 6 ist schematisch eine entsprechende Vorrichtung gezeigt. Diese Vorrichtung umfasst einen Vakuumkessel 42, in welchem eine zu beschichtende Probe 44 positionierbar ist. Bei der Probe 44 handelt es sich beispielsweise um ein Rohr. Die Probe 44 ist in dem Vakuumkessel 42 beweglich angeordnet. Insbesondere ist sie drehbar (in Figur 6 durch das Bezugszeichen 46 angedeutet) und längsverschieblich (in Figur 6 durch

das Bezugszeichen 48 angedeutet), um eine gleichmäßige Beschichtung einer Oberfläche 49 der Probe 44 zu erhalten.

[0084] An den Vakuumkessel 42 ist ein Hochfrequenz-Plasmabrenner 50 angeschlossen, über welchen sich ein Plasmastrahl 52 herstellen lässt. Der Hochfrequenz-Plasmabrenner 50 umfasst dazu eine oder mehrere Induktionsspulen 54, durch welche ein Arbeitsgas (wie beispielsweise Argon, Helium oder Wasserstoff) zur Plasmabildung angeregt wird. Eine typische Anregungsfrequenz der Induktionsspule 54 liegt bei 500 kHz.

[0085] In das Plasma wird mittels eines Trägergases wie beispielsweise Argon ein Pulvermaterial eingeführt. Es lässt sich dadurch ein Plasmastrahl mit dem Pulver herstellen. Der Plasmastrahl 52 wird auf die Probe 44 gerichtet, um die Beschichtung aufzubringen. Das Pulver lässt sich auf die Probe 44 aufschmelzen, um die Porenstruktur 26 herzustellen.

[0086] Es ist vorgesehen, dass vor dem Einbringen der Probe 44 in den Vakuumkessel 42 diese sandgestrahlt wird und gereinigt wird.

[0087] Die Druckbedingungen bei der Beschichtung der Probe 44 in dem Vakuumkessel 42 liegen typischerweise bei 80 mbar bis 1 bar und vorzugsweise bei 200 mbar bis 300 mbar.

[0088] Um eine gradierte Porenstruktur 26 herzustellen, werden sukzessive unterschiedliche Lagen aufgebracht. Die Lagen unterscheiden sich in ihrer Porosität. Die Porosität lässt sich dadurch einstellen, dass unterschiedliche Pulvermaterialien und/oder unterschiedliche Beschichtungszeiten und/oder unterschiedliche Geschwindigkeiten des Plasmastrahls 52 eingestellt werden. Ferner ist eine Einstellung der Porosität möglich über Leistungsvariation des Hochfrequenzgenerators und/oder Variation des Abstands zwischen einer Plasmadüse und der Probe 44 und/oder Druckvariation und/oder Gasbeimischungen.

[0089] Nach der Herstellung einer Lage wird abhängig von der Schichtdicke eine Ruhezeit eingehalten, bevor die nächste Lage sukzessiv hergestellt ist. Eine typische Größenordnung einer solchen Ruhezeit liegt bei 2 min.

[0090] Durch das Aufbringen einer Lage auf eine darunter liegende Lage wird die darunter liegende Lage auch weiter verdichtet.

[0091] Ein Vorteil des Hochfrequenzplasmaspritzens liegt darin, dass sich ein großvolumiger Plasmastrahl 52 herstellen lässt, welcher einen geringen radialen Temperaturgradienten aufweist. Die Geschwindigkeit des Plasmastrahls 52 ist im Vergleich zu einem Gleichstromplasmastrahl relativ gering. Dadurch ist die kinetische Energie beim Aufprall von geschmolzenen oder beinahe geschmolzenen Pulverpartikeln auf die zu beschichtende Oberfläche der Probe 44 relativ gering.

[0092] Beispielsweise wurden Pulver verwendet wie das Kupferpulver Alpha Aeser, Lot 4323214, -155 +45 µm oder kommerzielles Inconell 625, -150 +45 µm.

[0093] Die Wärmeübertragungsvorrichtung kann beispielsweise auch als Plattenwärmeübertrager ausgebildet sein, wobei dann das entsprechende Wärmeübertragungsflächenelement eine Wärmeübertragungsplatte ist.

Patentansprüche

1. Wärmeübertragungsvorrichtung, umfassend mindestens ein Wärmeübertragungsflächenelement (14) mit einem Grundkörper (24), eine erste Seite (20), an welcher ein erstes Fluid zur Wärmeaufnahme vorbeiführbar ist, und eine zweite Seite (22), welche beheizbar ist, wobei an dem Grundkörper (24) an der ersten Seite (20) eine Porenstruktur (26) angeordnet ist,

dadurch gekennzeichnet, dass die Porenstruktur (26) zum Grundkörper (24) hin eine kleinere Porosität aufweist als zu einer äußeren Oberfläche (30) hin.

2. Wärmeübertragungsvorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porosität der Porenstruktur (26) gradiert ist.

3. Wärmeübertragungsvorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porosität von dem Grundkörper (24) weg zu der äußeren Oberfläche (30) hin zunimmt.

4. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porenstruktur (26) als Beschichtung auf dem Grundkörper (24) ausgebildet ist.

5. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porenstruktur (26) flächig an dem Grundkörper (24) angeordnet ist.

6. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porenstruktur (26) eine im Wesentlichen einheitliche Dicke aufweist.

7. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die

EP 1 857 764 A2

Dicke der Porenstruktur (26) im Bereich zwischen 5 μm und 500 μm liegt.

- 5
8. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die mittlere Porengröße im Bereich zwischen 1 μm und 200 μm liegt.
9. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porenstruktur (26) in einem Dickenbereich von 0 % bis 20 % der Gesamtdicke, ausgehend von dem Grundkörper (24), eine Porosität im Bereich zwischen 0 % und 30 % aufweist.
10. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porenstruktur (26) in einem Dickenbereich zwischen 20 % und 70 % der Gesamtdicke, ausgehend von dem Grundkörper (24), eine Porosität von 20 % bis 60 % aufweist.
- 15
11. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porosität in einem Dickenbereich zwischen 70 % und 100 % der Gesamtdicke, ausgehend von dem Grundkörper (24), mindestens um 10 % größer ist als die Porosität in einem Dickenbereich zwischen 20 % und 70 % der Gesamtdicke.
- 20
12. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porosität der Porenstruktur (26) höchstens 80 % beträgt.
13. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porenstruktur (24) mehrlagig ausgebildet ist, wobei sich unterschiedliche Lagen (32, 34, 36) in der Porosität unterscheiden.
- 25
14. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Oberflächenrauigkeit mindestens 8 μm beträgt.
- 30
15. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porenstruktur (26) aus einem Material hoher Wärmeleitfähigkeit hergestellt ist.
16. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Grundkörper (24) aus einem metallischen Material hergestellt ist.
- 35
17. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porenstruktur (26) mittels eines einkomponentigen Pulvermaterials hergestellt ist.
- 40
18. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste Seite (20) und die zweite Seite (22) des mindestens einen Wärmeübertragungsflächenelements (14) einander abgewandt sind.
19. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** an der zweiten Seite (22) ein zweites Fluid zur Wärmeabgabe vorbeiführbar ist.
- 45
20. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das mindestens Wärmeübertragungsflächenelement (14) geschlossen ausgebildet ist.
21. Wärmeübertragungsvorrichtung nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet, dass** mittels des mindestens einen Wärmeübertragungsflächenelements (14) ein Rohr (12) gebildet ist.
- 50
22. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 18, **dadurch gekennzeichnet, dass** das mindestens eine Wärmeübertragungsflächenelement offen ausgebildet ist.
23. Wärmeübertragungsvorrichtung nach Anspruch 22, **dadurch gekennzeichnet, dass** mittels des mindestens einen Wärmeübertragungsflächenelements eine Wärmeübertragungsplatte gebildet ist.
- 55
24. Wärmeübertragungsvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das erste Fluid eine verdampfbare Flüssigkeit ist.

EP 1 857 764 A2

25. Wärmeübertragungsvorrichtung nach Anspruch 24, **dadurch gekennzeichnet, dass** das erste Fluid im Bereich des Blasensiedens vorliegt.
- 5 26. Verfahren zur Herstellung einer Wärmeübertragungsvorrichtung, welche mindestens ein Wärmeübertragungsflächenelement mit einer Porenstruktur aufweist, wobei die Porenstruktur an einem Grundkörper angeordnet ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** ausgehend von dem Grundkörper zu einer äußeren Oberfläche hin die Porenstruktur mit zunehmender Porosität hergestellt wird.
- 10 27. Verfahren nach Anspruch 26, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porenstruktur als Beschichtung auf den Grundkörper aufgebracht wird.
28. Verfahren nach Anspruch 27, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porenstruktur mehrlagig aufgebracht wird.
- 15 29. Verfahren nach Anspruch 28, **dadurch gekennzeichnet, dass** Lagen sukzessive aufgebracht werden.
30. Verfahren nach Anspruch 28 oder 29, **dadurch gekennzeichnet, dass** unterschiedliche Lagen sich in der Porosität unterscheiden.
- 20 31. Verfahren nach Anspruch 30, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porosität in sukzessive aufgetragenen Lagen bezogen auf die vorher aufgetragene Lage zunimmt.
32. Verfahren nach einem der Ansprüche 26 bis 31, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Beschichtung mit einem Pulvermaterial hergestellt wird.
- 25 33. Verfahren nach Anspruch 32, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Pulvermaterial einkomponentig ist.
34. Verfahren nach Anspruch 32 oder 33, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Pulvermaterial Pulverpartikel mit einer mittleren Korngröße aufweist, welche zwischen 40 μm und 350 μm liegt.
- 30 35. Verfahren nach einem der Ansprüche 26 bis 34, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Beschichtung mittels Hochfrequenzplasmaspritzen aufgebracht wird.
- 35 36. Verfahren nach Anspruch 35, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Porosität über Variation des aufgetragenen Materials und/oder einer Plasmastrahlgeschwindigkeit und/oder einer Beschichtungszeit und/oder der Leistung eines Hochfrequenzgenerators und/oder des Abstands zwischen Probe und einer Plasmadüse und/oder des Drucks und/oder Gasbeimischung eingestellt wird.
- 40 37. Verfahren nach einem der Ansprüche 26 bis 36, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Druck beim Aufbringen im Bereich zwischen 80 mbar und 1 bar liegt.

45

50

55

Fig. 1

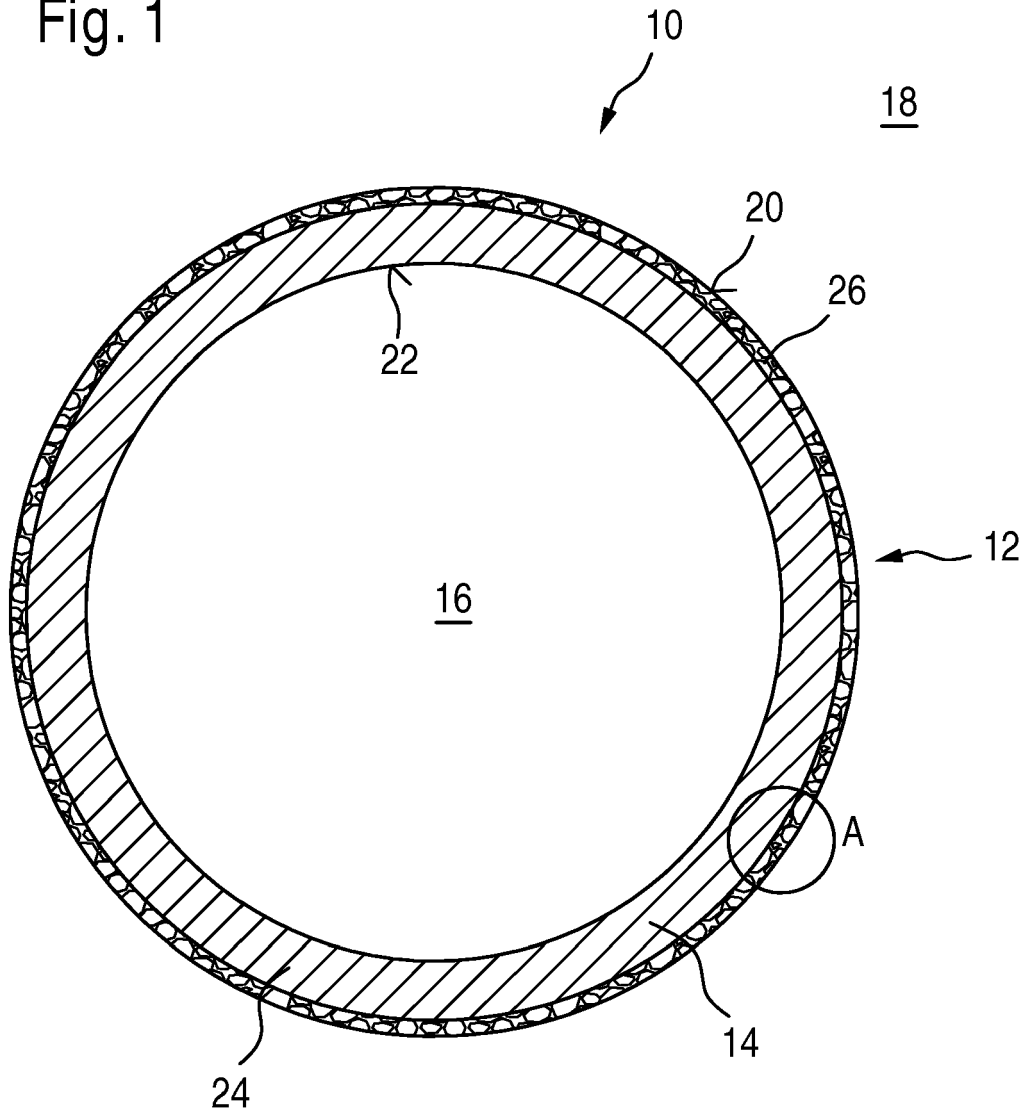


Fig. 2

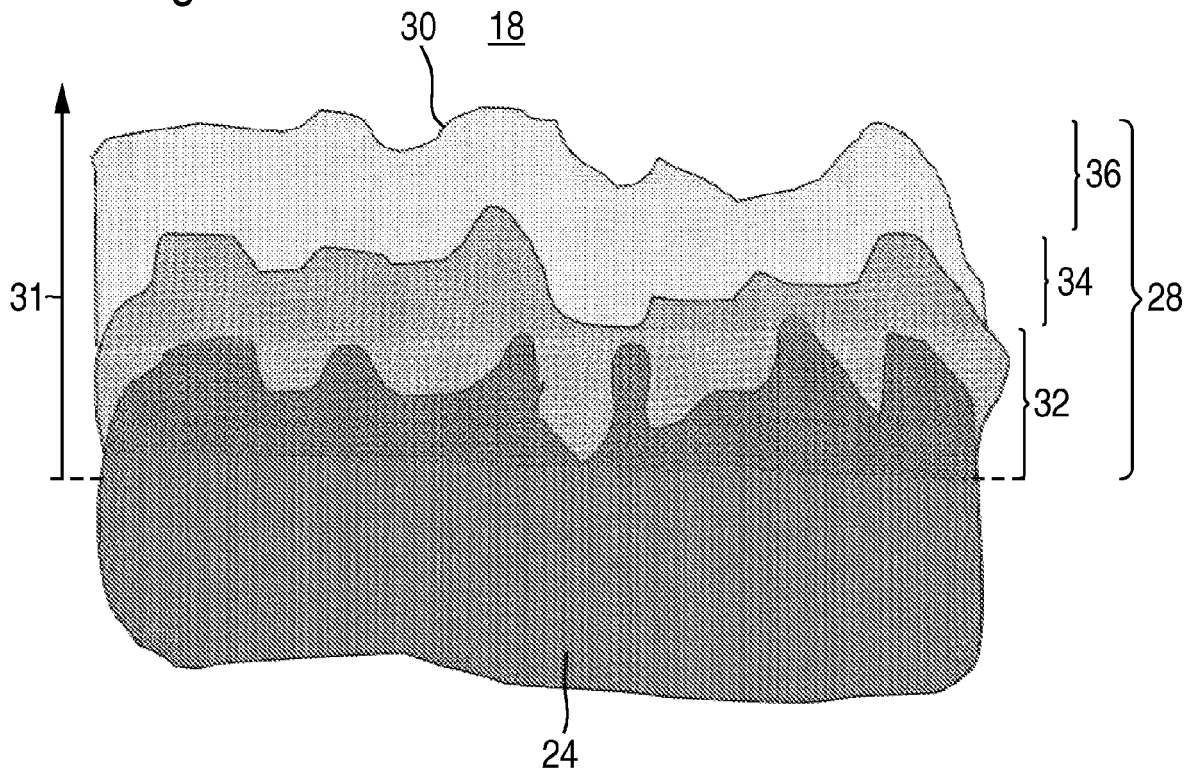


Fig. 3

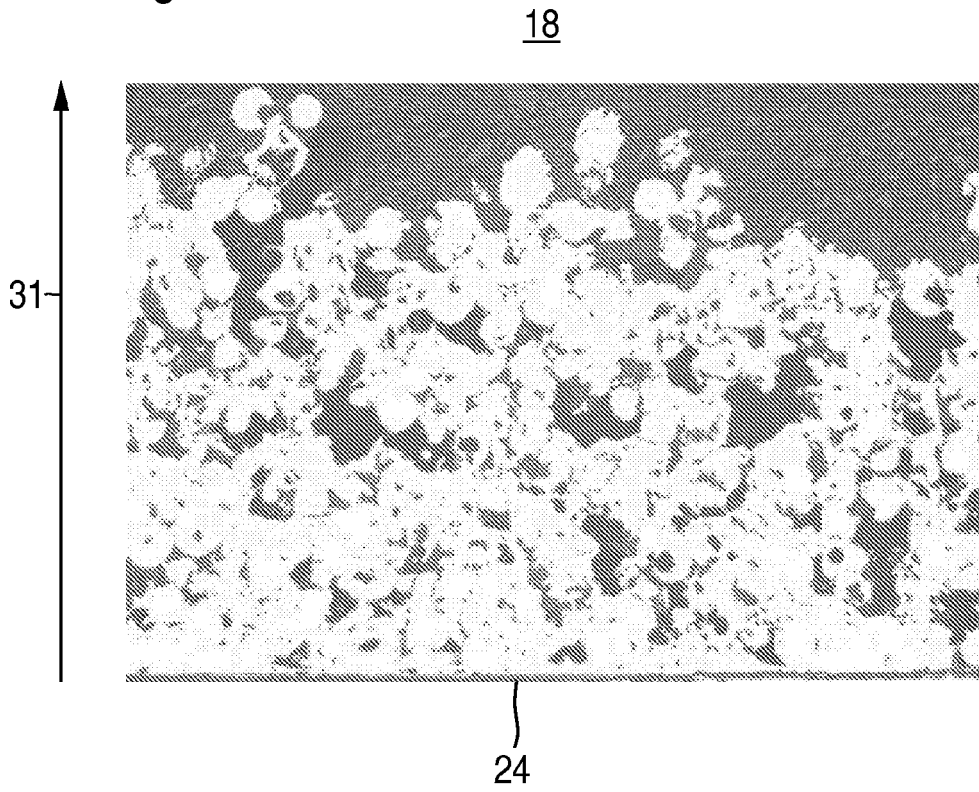


Fig. 4

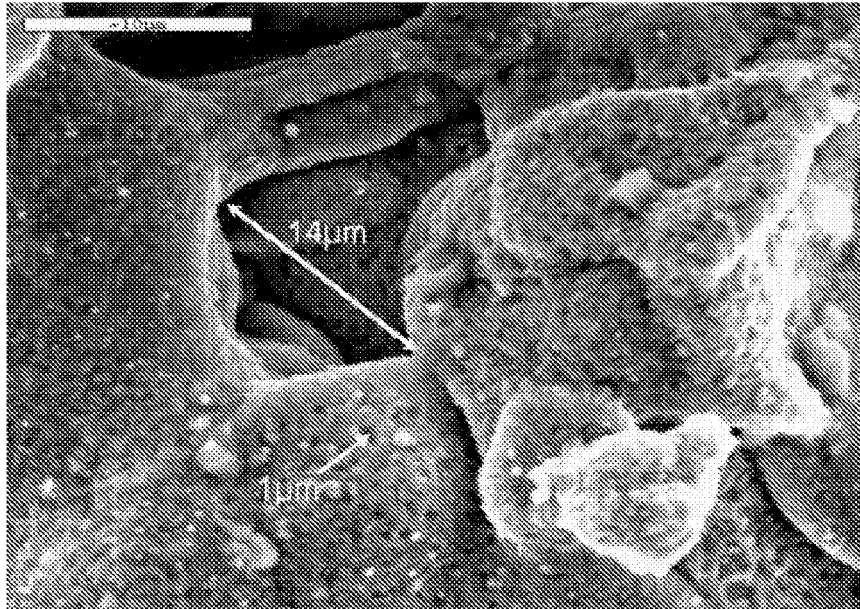


Fig. 5(a)

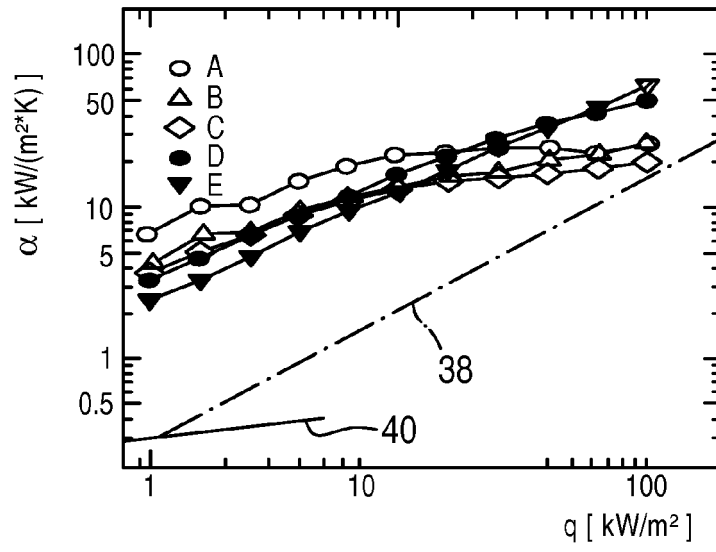


Fig. 5(b)

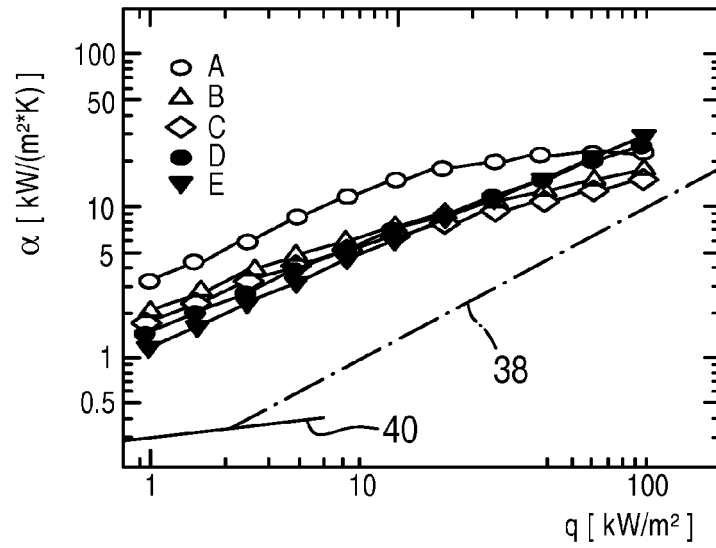
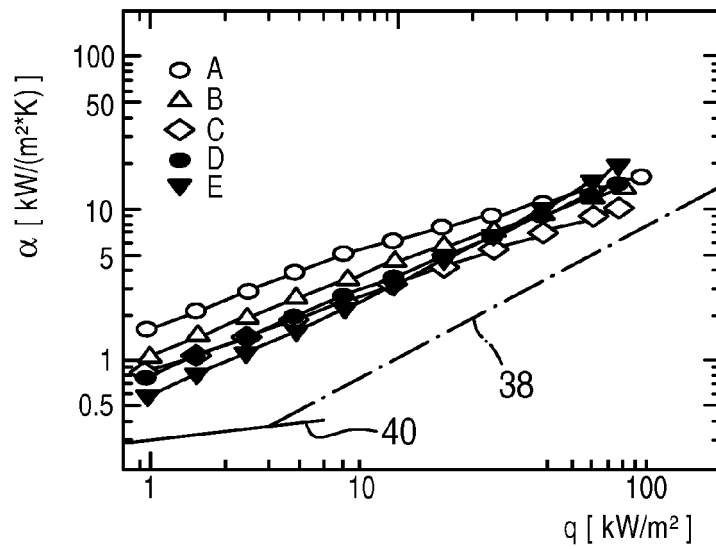


Fig. 5(c)



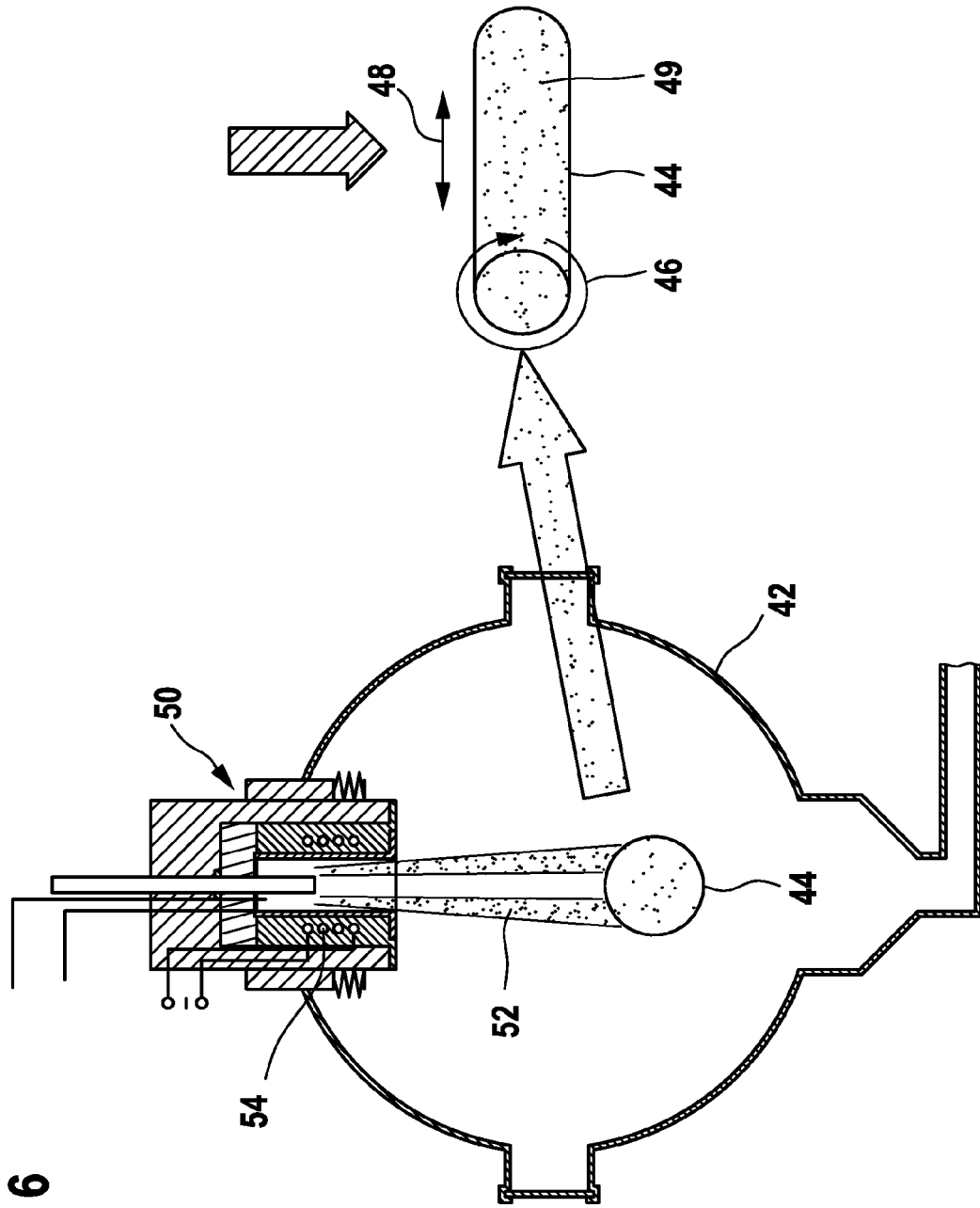


Fig. 6

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 10122574 A1 [0004]
- US 4753849 A [0005]
- DE 4036932 A1 [0006]
- EP 0264338 A2 [0007]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **ASANO, H. ; SCHÄFER, D. ; BOUYER, E. ; MÜLLER-STEINHAGEN, H. ; HENNE, R.** Improved Heat Transfer by RF Plasma Produced Structured Surfaces. *International Thermal Spray Conference (ITSC 2003, 2003, 559-566 [0008]*
- **SCHÄFER, D. ; BOUYER, E. ; MÜLLER-STEINHAGEN, H.** Development of Plasma Spray-Coated Tubes for Compact Evaporators. *Fourth International Conference on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industry, 29. September 2003 [0008]*
- **SCHÄFER, D. ; ASANO, H. ; MÜLLER-STEINHAGEN, H. ; TAMME, R.** Neue Hochleistungsflächen für Kältemittelverdampferrohre. *DKV Tagung, 2003, 207-220 [0008]*
- **SCHÄFER, D. ; MÜLLER-STEINHAGEN, H. ; TAMME, R.** Einfluss Plasma-beschichteter Rohre im Rohrbündel-Verdampfer. *DKV, Bremen, 2004 [0008]*
- Experimental Results with Novel Plasma Coated Tubes in Compact Tube Bundels. **SCHÄFER, D. ; TAMMER, R. ; MÜLLER-STEINHAGEN, H. ; MÜLLER, M.** Proceedings of the Heat SET 2005 Conference. 2005, 487-492 [0008]