



(10) **DE 10 2021 106 305 A1** 2022.09.22

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2021 106 305.1**

(22) Anmeldetag: **16.03.2021**

(43) Offenlegungstag: **22.09.2022**

(51) Int Cl.: **F16L 9/00** (2006.01)

B23K 26/342 (2014.01)

B23K 9/04 (2006.01)

B23K 5/18 (2006.01)

(71) Anmelder:

**Karlsruher Institut für Technologie (Körperschaft
des öffentlichen Rechts), 76131 Karlsruhe, DE**

(72) Erfinder:

**Neuberger, Heiko, 76351 Linkenheim-
Hochstetten, DE; Ruck, Sebastian, Dr., 76137
Karlsruhe, DE; Arbeiter, Frederik, Dr., 76137
Karlsruhe, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	27 33 611	A1
AT	014 885	U1
AT	43 425	E
US	4 183 378	A

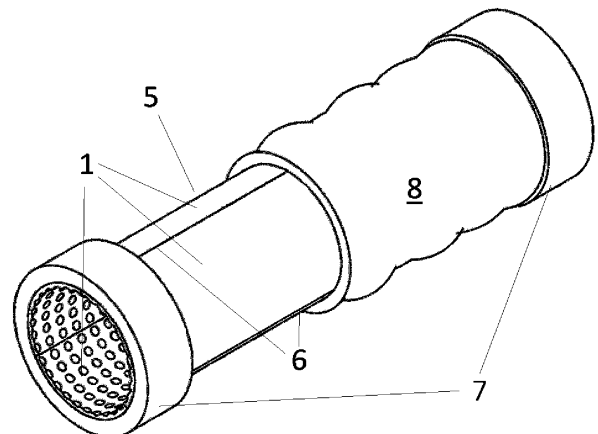
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die Bezugnahme auf die (fehlenden) Zeichnungen gilt als nicht erfolgt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung von Rohren mit topographischen Innenstrukturen**

(57) Zusammenfassung: Verfahren zur Herstellung eines Rohrs mit einem Innenrohr (5) mit innen angeordneten topographischen Strukturen und mit einer außen angeordneten Beschichtung (8), umfassend eine Bereitstellung von mindestens zwei Rohrschalensegmenten (1) mit jeweils einer Innenwandung, einer Außenwandung und einer umlaufenden Stoßfläche, die passgenau unter Ausbildung des Innenrohrs aneinander setzbar sind, ein Auf- oder Einbringen der topographischen Strukturen auf der Innenwandung der Rohrschalensegmente, ein Aneinandersetzen der Rohrschalensegmente über die Stoßflächen zu dem Innenrohr unter Bildung von Stoßlinien (6), eine Fixierung der im Innenrohr eingebundenen Rohrschalensegmente durch Ansetzen von Fixierungsmitteln (7) sowie ein Additives Aufbringen der Beschichtung aus einem metallischen Material auf der Außenwandung der Rohrschalensegmente über die Stoßlinien hinweg zu einem zusammenhängenden Rohrkörper.



Beschreibung

[0001] Verfahren zur Herstellung eines Rohres, vorzugsweise aus Metall, weiter bevorzugt eines Wärmetauschröhrs oder -Rohrelements, mit an der Innenwandung angeordneten topographischen Strukturen sowie ein Rohr gemäß dem ersten bzw. dem vierzehnten Patentanspruch.

[0002] Die eingangs genannten Rohre sind in der Regel aus Metall. Sie dienen insbesondere der Durchleitung von Fluiden wie z.B. Flüssigkeiten und/oder Gasen, aber auch Suspensionen, Emulsionen, Aerosole oder Flüssigkeitsgemische (im Folgenden auch Arbeitsfluid genannt) durch einen Wärmetauscher, eine Brennkammer, einen Rauchgasabzug oder eine andere Wärme aufnehmendes oder abgebendes Vorrichtung oder Medium. Üblicherweise bilden die Rohrwandungen der Rohre zumindest abschnittsweise die Wärmeaustauschflächen des Wärmetauschers, wobei man grundsätzlich bestrebt ist, die Oberflächen zugunsten einer guten Wärmeanbindung an das jeweils angrenzende Medium wie das vorgenannte Fluid zu gestalten. An den Außenflächen bieten es sich hierfür angesetzte oder eingeformte Kühlrippen oder Fluidführungselemente an, um eine möglichst intensive Anströmung durch ein Wärmeübertragungsmedium oder Anbindung von Strahlungswärme anzustreben. Im Innern sind herkömmliche zylindrische Rohre dagegen meist glatt oder unstrukturiert, insbesondere fertigungsbedingt bei kleinen Rohrrinnendurchmessern. Es ist auch allgemein bekannt, dass für eine bessere thermische Anbindung der Wärmeaustauschflächen an das durchgeleitete Fluid deren spezifische Kontaktfläche vergrößert wird. Beispielsweise wird dies meist durch eine Aufzweigung des Durchströmungsquerschnitts auf mehrere Einzelrohre mit kleinerem Durchmesser umgesetzt.

[0003] Auf der anderen Seite sind Rohre mit strukturierten Innenwandungsflächen bekannt. Beispielsweise kommen in der Kälte/Klima-Industrie umlaufende geometrische Strukturen ähnlich des Profils der Innenseite eines Gewehrlaufes zum Einsatz. Drallrohre werden in Wärmetauschern von Kraftwerken eingesetzt; auch sie besitzen eine unebene Innenoberfläche. Die Strukturierung dient der turbulenzsteigernden Beeinflussung der Strömung durch das Rohr in der Weise, dass die isolierende Strömungsgrenzschicht an den Innenwandungsflächen reduziert wird.

[0004] Der Einsatz von Oberflächenstrukturen wie beispielsweise Rippen, Dimples und Pins auf Wärmetauscheroberflächen führt zu einer erhöhten Wärmeübertragung zwischen Arbeitsfluid und Komponentenwand und ist eine bewährte Methode hohe Wärmestromdichten und hohe Arbeitsfluidtemperaturen unter Einhaltung komponentenspezifischer

Maximaltemperaturen in thermisch hochbelasteten Bauteilen zu realisieren. Je nach Art der vorliegenden thermischen Randbedingungen an der Wärme abgebenden oder aufnehmenden Wand führt eine verbesserte Wärmeübertragung zu einer Reduktion der Komponentenmaterialtemperatur oder ermöglicht eine schnellere Zunahme der adiabaten Mischungstemperatur des Arbeitsfluids in Hauptströmungsrichtung. Somit lässt sich die Komponentenlebensdauer verlängern, der thermische Anlagenwirkungsgrad steigern, die Wärmeübertragungsflächen reduzieren oder eine höhere Lastflexibilität der Komponente realisieren.

[0005] Trotz zusätzlicher Druck- und Reibungsverlusten (bei gleichem Massenstrom des Arbeitsfluids in Kanälen mit strukturierten Oberflächen, kann das Verhältnis von Wärmeübertragung zu benötigter Pumpleistung gesteigert werden. Hierbei spielt insbesondere die Konfiguration der Oberflächenstrukturen eine entscheidende Rolle. Rippenstrukturen zeichnen sich gegenüber anderen Oberflächenstrukturierungen durch eine sehr hohe Wärmeübertragung aus. Rippenstrukturen finden bereits Anwendung in Solarreceiver, in gasgekühlten Reaktorkomponenten, oder in luftgekühlten Gasturbinenschaufeln von konventionellen Gaskraftwerken. Hierbei werden die innendurchströmten Komponenten als Gußteil aus Einmalformen oder als Schweißkonstruktion bestehend aus mehreren Bauteilen hergestellt, auch additive Fertigungsverfahren finden zunehmend Anwendung.

[0006] Ferner beschreiben Ruck S., Arbeiter F.: Thermal Performance Augmentation by Rib-Arrays for Helium-gas-cooled First Wall Applications; Fusion Engineering and Design 124 (2017) S.306-310, Flügelstrukturen für eine verbesserte Wärmeübertragung in einem Kanal, der nach der Applikation verschlossen wird. Die Besonderheit an den sog. Semi-detached V-Ribs ist, dass diese nur an einer Stelle (z.B. in der Flügelmitte) mit der Kanalwand fest verbunden sind. Zwischen den Flügeln und der Kanalwand befindet sich ein Spalt mit einer Höhe von z.B. 0,1 mm, der bei einer Durchströmung des Kanals mit durchströmt wird. Der Effekt der bisher angewendeten Rohrrinnenstrukturen kann dadurch noch gesteigert werden indem eine großskalige Vermischung über die Grenzschicht an der Rohrwand hinaus erreicht wird.

[0007] Eine fertigungstechnische Umsetzung von komplexen strukturierten Oberflächen (insbesondere Flügelstrukturen wie Semi-detached V-Ribs, sich lokal ändernde Strukturen z.B. von Dimples zu Ribs oder beliebige Kombinationen daraus) innerhalb von Rohrleitungen der vorgenannten Art erfordert die Zugänglichkeit der Rohrrinnenwand, z.B. mit einem Werkzeug zur mechanischen oder elektrochemischen Bearbeitung, einem fokussierten Energie-

strahl (Laserstrukturieren) oder einer Vorrichtung (z.B. zum Positionieren und Fügen von z.B. Strömungsleitblechen) .

[0008] Eine Innenbearbeitung von vorgenannten Rohren ist jedoch mit zunehmender Rohrlänge und mit abnehmenden Rohrdurchmesser zunehmend aufwendig, wenn nicht ab einem gewissen Grad nicht mehr mit vertretbarem Aufwand durchführbar. Wesentlich ist die Zugänglichkeit zur Bearbeitung der Rohrrinnenfläche, was mit sinkendem Rohrdurchmesser (typische Größenordnung z.B. in Rohrbündelwärmetauschern liegen im Bereich von wenigen cm) zunehmend schwieriger ist.

[0009] Davon ausgehend liegt eine Aufgabe der Erfindung darin, ein Verfahren zur Herstellung von Rohren mit insbesondere komplexen Innenstrukturen vorzuschlagen, das die vorgenannten Einschränkungen in der Durchführbarkeit nicht aufweist.

[0010] Eine weitere Aufgabe liegt darin, ein Rohr, insbesondere ein Wärmetauschrrohr, mit Innenstrukturen vorzuschlagen, vorzugsweise mit dem vorgenannten Verfahren hergestellt.

[0011] Die Aufgabe wird mit einem Verfahren und einem Rohr mit den Merkmalen gemäß dem ersten bzw. dem vierzehnten Patentanspruch gelöst. Auf diese rückbezogene Unteransprüche geben vorteilhafte Ausgestaltungen wieder.

[0012] Zur Lösung der Aufgabe wird ein mehrschichtiger Aufbau des Rohres vorgesehen. Das Innenrohr ist dabei vorzugsweise vollständig durch mehrere, vorzugsweise zwei oder drei separate Rohrschalensegmente zusammengesetzt, wobei diese sich an deren Stoßflächen bündig berühren und so Stoßlinien bilden. Die Innenstrukturen werden zuvor auf den Innenflächen der Rohrschalensegmente aufgebracht, wobei die Rohrschalensegmente vorzugsweise schon beim Auf- oder Einbringen der topographischen Strukturen auf der Innenwandung bereits endkonturnah so vorgeformt vorliegen, dass sie ohne weitere Verformung zum Innenrohr an den Stoßflächen aneinander setzbar sind.

[0013] Durch die Aufteilung des Innenrohrs in separate Rohrschalensegmente wird die Innenwandung für eine Einbringung einer Strukturierung besser zugänglich. Durch deren bevorzugte endkonturnahe Vorverformung wird eine weitere Verformung der strukturierten Innenwandung und damit eine mögliche Belastung, Verformung oder Beschädigung der Strukturen bis zu Integration in das Innenrohr vermieden oder zumindest signifikant reduziert. Dies kommt insbesondere einer Realisierung von filigranen und/oder zusammengesetzten Strukturen sehr entgegen. Die Rohrschalensegmente werden vorzugsweise durch rinnenförmige Segmente gebildet, bei

denen mehrere dieser Segmente axial parallel zueinander angeordnet zum Innenrohr oder einem Innenrohrabschnitt zusammensetzbar sind. Alternativ oder ergänzend sind die Rohrschalensegmente durch kurze ringförmige Innenrohrabschnitte bildbar, die dann axial seriell zueinander angeordnet zum Innenrohr oder einem Innenrohrabschnitt zusammensetzbar sind.

[0014] Dieses durch die Rohrschalensegmente gebildete Innenrohr wird nach dem Zusammensetzen von außen auf der Außenwandung der Rohrschalensegmente mit einer zweiten Schicht, einer Beschichtung aus einem metallischen Material, über die Stoßlinien und Stoßflächen der Rohrschalensegmenten hinweg beschichtet, wobei ein zusammenhängender Rohrkörper entsteht und dieser über die Stoßflächen trotz möglicher Spalten, Fertigungstoleranzen oder Fehlstellungen hinweg geschlossen ist. Die Beschichtung erfolgt mittels additivem Aufbringen, zur Vermeidung von herstellungsbedingten Spannungszuständen und zur Reduzierung thermisch bedingter Degradation der Innenstrukturen bevorzugt bei Temperaturen unterhalb 500°C, weiter bevorzugt unterhalb 350°C. Spalte und Fehlerquellen werden durch die Beschichtung ausgefüllt und ausgeglichen.

[0015] Der Umfang des Innenrohrs erstreckt sich in jeder axialen Position des Innenrohrquerschnitts stets vorzugsweise über mindestens zwei Rohrschalensegmente. Ebenso liegt eine Ausgestaltung im Rahmen der Erfindung, bei der das Rohr auch axial in mehrere Rohrschalensegmente aufgeteilt wird, wobei die Stoßflächen zwischen diesen Rohrschalensegmenten axial und/oder in Umfangsrichtung vorzugsweise versetzt zueinander angeordnet sind. Entsprechend sind die Stoßlinien am Innenrohr axial und/oder in Umfangsrichtung orientiert, wobei die Stoßlinien nicht zwingend geradlinig ausgerichtet sind.

[0016] Die Lösung der Aufgabe umfasst folglich ein Verfahren zur Herstellung eines Rohrs mit einem Innenrohr mit innen angeordneten topographischen Strukturen und mit einer außen angeordneten Beschichtung, umfassend die folgenden Verfahrensschritte:

a) In einem ersten Schritt erfolgt eine Bereitstellung von mindestens zwei Rohrschalensegmenten der vorgenannten Art mit jeweils einer Innenwandung und einer Außenwandung, die passgenau zu dem Innenrohr aneinander setzbar sind. Das Innenrohr wird dann vorzugsweise nur durch die zusammengesetzten Rohrschalensegmente gebildet.

[0017] Das Herstellen der Schalensegmente erfolgt vorzugsweise mittels Urform-, Umform-, Abtrags- oder Trennverfahren.

[0018] Beim Urformen werden die Rohrschalensegmente bereits mit Semi-detached Ribs oder anderen Strukturen z.B. mittels Spritzgießen hergestellt. Vorteilhaft ist das Urformen insbesondere bei großer Stückzahl, wobei in Einzelfällen eine verfahrensbedingte Einschränkung bei der Werkstoffauswahl hingenommen werden muss.

[0019] Beim Trennen/Umformen werden die Rohrschalensegmente vorzugsweise aus Blech-coils ausgestanzt und entsprechend umgeformt. Einfache Oberflächenstrukturen können ggf. dabei mit eingepägt werden. Jedoch sind die Möglichkeit bei der Herstellung insbesondere von punktuell angebundenen Elementen wie z.B. Flügel oder Leitbleche begrenzt und erfordern ggf. weitere Verfahrensschritte, z.B. mittels Fügen.

[0020] Auch Laser- Plasma- oder Wasserstrahlschnitten kann zur Herstellung von Schalensegmenten angewendet werden, besonders wenn als Halbzeuge für Schalen- oder Ringsegmente nahtlose Rohre verwendet werden. Auch hier sind die Optionen zur direkten Einbringung von Flügel oder Leitblechen begrenzt und erfordern ggf. weitere Verfahrensschritte.

[0021] b) Es folgt sofern nicht fertigungsbedingt bereits in Verfahrensschritt a) integriert ein Auf- oder Einbringen der topographischen Strukturen auf der Innenwandung der Rohrschalensegmente. Dies erfolgt vorzugsweise mittels Füge-, Abtrags- oder Beschichtungsverfahren.

[0022] Beim Fügen werden beispielsweise die vorgenannten Flügelstrukturen punktuell gefügt, vorzugsweise geschweißt oder genietet (Fügen durch Umformen).

[0023] Ein Abtragsverfahren umfasst spangebende oder nicht spangebende Verfahren, die für eine Einarbeitung von Strukturen in die Innenwandung heranziehbar sind. Beispielsweise können Innenstrukturen an den Rohrschalensegmenten durch Erodieren, Laserstrukturieren, Fräsen usw. eingebracht werden. Abtragsverfahren sind jedoch weniger für die Herstellung der Semi-detached Ribs geeignet.

[0024] c) Es erfolgt ein Aneinandersetzen der Rohrschalensegmente über ihre Stoßflächen zu dem Innenrohr unter Bildung der vorgenannten Stoßlinien. Dabei bilden die Rohrschalensegmente vorzugsweise das gesamte Innenrohr aus, wobei sie mit ihren Rändern, d.h. ihren Stoßflächen vorzugsweise überlappungsfrei aneinander liegen und die Stoßlinien bilden. Im Rahmen einer bevorzugten Ausgestaltung liegen die Rohrschalensegmente dabei formschlüssig wie zueinander passende Puzzle-teile aneinander an, was wiederum eine entspre-

chende geometrische Ausgestaltung der Rohrschalenelemente in deren Randbereichen und damit Stoßflächen erfordert. Im Rahmen einer bevorzugten alternativen Ausgestaltung weisen die Stoßflächen zwischen zwei Rohrschalenelemente formschlüssige Führungselemente oder Überlappungsbereiche zu benachbarten Stoßflächen auf und bewirken auf diese Weise ein formschlüssiges Aneinanderlegen der Rohrschalenelemente.

[0025] d) Es folgt eine Fixierung der im Innenrohr eingebundenen Rohrschalensegmente durch Ansetzen von Fixierungsmitteln, vorzugsweise um das Innenrohr umlaufende Schellen. Die Fixierung erfolgt vorzugsweise zumindest jeweils an den Endbereichen des Rohrs und/oder im Falle einer axial seriellen Aufreihung mehrerer Rohrschalensegmente, die entsprechenden umlaufenden Stoßlinien überbrückend. Wird das Innenrohr wie zuvor ausgeführt durch mehrere axial seriell aufgereihte kurze ringförmige Innenrohrabschnitte als Rohrschalensegmente gebildet oder ist eine axiale Einspannung der Rohrsegmente im Innenrohr erforderlich, umfasst das hierzu erforderliche Fixierungsmittel einen durch das Innenrohr geführte Zuganker mit Aufnahmeelementen für die Innenrohrenden.

[0026] e) Anschließend wird ein additives Aufbringen der Beschichtung aus einem metallischen Material auf der Außenwandung der Rohrschalensegmente über die Stoßflächen hinweg zu einem zusammenhängenden Rohrkörper vorgeschlagen. Das additive Aufbringen erfolgt vorzugsweise mittels eines Auftragsschweißverfahren, wobei das metallische Material in Pulver- oder Drahtform bereitgestellt wird und durch eine Wärmequelle, vorzugsweise einem Energiestrahle oder einer Lichtbogenentladung geschmolzen wird. Damit entsteht eine durchgängige Beschichtung auf dem durch die Stoßlinien weiterhin unterteilten Innenrohr, wobei der vorgenannte Energiestrahle und/oder Lichtbogenentladung die Stoßflächen mit erwärmt und ggf. einen Diffusions-schweißprozess in Gang setzt. Eine alternative Ausgestaltung sieht ein Aufbringen der Beschichtung mittels Kaltgasspritzen oder thermisches Spritzen vor, wobei das metallische Material in Pulverform bereitgestellt wird. Kaltgasspritzen erfolgt in besonders vorteilhafter Weise bei Temperaturen unter 400°C, weiter bevorzugt unter 300°C, d.h. bei Prozesstemperaturen, die die Rohrschalensegmente und die Strukturen praktisch unbeeinflusst lässt.

[0027] Vorzugsweise wird insbesondere dann eine Verfahrenserweiterung vorgeschlagen, wenn die Fixierungselemente über Bereiche der Außenwandungen der Rohrschalensegmente angesetzt sind und diese Bereiche damit überdecken. Diese überdeckten Bereiche auf der Außenwandung der Rohrschalensegmente werden beim vorgenannten additiven Aufbringen der Beschichtung aus einem

metallischen Material nicht beschichtet. Wenn diese Fixierungselemente nicht in der Beschichtung eingebunden sind und da auch verbleiben sollen, wird eine nachfolgende Nachbearbeitung vorgeschlagen, umfassend die nachfolgenden Verfahrensschritte:

f) Entfernung der Fixierungsmittel, wobei die bis dahin überdeckten Bereiche der Außenwandungen freigegeben werden.

g) Additives Aufbringen des metallischen Material in den vorgenannten Bereichen der Außenwandungen, die bei einer Entfernung der Fixierungsmittel freigelegt werden, als Teil der Beschichtung. Vorzugsweise erfolgt dies mit demselben oder dem gleichen metallischen Beschichtungsmaterial und dem gleichen Beschichtungsverfahren.

[0028] Die vorgenannte Beschichtung auf dem Innenrohr wird vorzugsweise anschließend thermisch und/oder mechanisch nachbearbeitet.

[0029] Eine thermische Nachbearbeitung dient einerseits der Reduzierung der Eigenspannungen in der Beschichtung, die insbesondere bei Beschichtungsverfahren bei Temperaturen deutlich unterhalb der Schmelztemperatur und deutlich unter der für eine Diffusionsumlagerung erforderliche Temperatur (Sintertemperatur) des metallischen Beschichtungsmaterials (vorzugsweise kleiner 50% der Schmelztemperatur in K, vorzugsweise kleiner 500°C, weiter bevorzugt kleiner 350°C) zu erwarten ist, insbesondere bei einem Kaltgasspritzen. Die Temperierung erfolgt vorzugsweise bei Temperaturen zwischen der Sintertemperatur und der Schmelztemperatur des metallischen Materials.

[0030] Eine mechanische Nachbearbeitung dient insbesondere der Einstellung einer vorgebbaren äußeren Geometrie der Mantelfläche des zusammenhängenden Rohrkörpers durch Materialabtrag auf der Beschichtung. Vorzugsweise umfasst diese Nachbearbeitung mittels spangebenden Überarbeiten, vorzugsweise durch ein Überdrehen oder Überschleifen, der Beschichtung, wobei weiter eine rotationssymmetrische konzentrisch zum Rohr angeordnete Beschichtungsoberfläche entsteht.

[0031] Eine bearbeitete Beschichtungsoberfläche weist gegenüber einer unbearbeiteten Beschichtungsoberfläche vorzugsweise eine glattere und gleichmäßigere Oberfläche auf. Vorzugsweise ist diese auch konzentrisch zum Innenrohr angeordnet, sodass die Beschichtung eine näherungsweise gleiche Schichtdicke über der Außenfläche des Innenrohrs aufweist. Hiermit allein werden schon in vorteilhafter Weise von der Beschichtungsoberfläche ausgehende Kerbwirkungen sowie Spannungssingularitäten in der Beschichtung reduziert.

[0032] Vorzugsweise ist dieser mechanischen Bearbeitung noch eine thermische Nachbearbeitung vorausgegangen, vorzugsweise mit bekannten Vorgehen und Parametern eines Spannungsarmglühens oder einer weiteren diffusionsumlagerungsbehafteten Nachverdichtung der Beschichtung.

[0033] Alternativ oder optional dient die vorgenannte mechanisch bearbeitete Beschichtungsoberfläche vorzugsweise auch als Auflagefläche einer nachfolgend über die Beschichtungsoberfläche konzentrisch übergeschobenen und/oder aufgedruckten drucktragenden Struktur. Eventuelle Überdrücke im Innenrohr werden vorzugsweise überwiegend durch diese Struktur mechanisch aufgefangen, das darunter angeordnete geschlitzte Innenrohr und die Beschichtung in vorteilhafter Weise entlastet. Die Drucktragende Struktur ist vorzugsweise ein nahtloses Rohr mit einem Innendurchmesser, der größer oder gleich dem Außendurchmesser der zylindrischen Beschichtungsoberfläche ist.

[0034] Vorzugsweise endet die drucktragende Struktur oder das nahtlose Rohr und das Innenrohr und die Beschichtung zumindest an einer Stirnseite, vorzugsweise an beiden Stirnseiten axial an gleicher Position; sie bilden weiter bevorzugt dann eine bzw. zwei gemeinsame Stirnseite(n).

[0035] Ist die drucktragende Struktur, vorzugsweise ein nahtloses Rohr, über die Beschichtungsoberfläche geschoben, wird vorzugsweise vorgeschlagen, deren Stirnseiten mit dem Innenrohr vorzugsweise im Vakuum zu verschweißen. Zwischen Innenrohr und drucktragender Struktur oder nahtlosem Rohr entsteht ein abgeschlossenes Innenraumvolumen. Durch ein bevorzugt heißisostatisches Verpressen des nahtlosen Rohres mit der Beschichtungsoberfläche setzt sich eine diffusionsgetriebene stoffliche Umlagerung wie z.B. ein Diffusionsverschweißen oder eine Sinterung in Gang, was zu einer Verdichtung und/oder stoffschlüssigen Verbindung zwischen Beschichtungsoberfläche mit der darüber angeordneten Innenfläche der drucktragenden Struktur führt.

[0036] Die Lösung der Aufgabe umfasst ferner ein Rohr mit einem Innenrohr mit innen an der Innenwandung angeordneten topographischen Strukturen und einer auf dem Innenrohr aufgesetzten Beschichtung. Das Innenrohr wird dabei durch mindestens zwei Rohrschalensegmente mit jeweils einer Innenwandung und einer Außenwandung, die passgenau mit ihren vorzugsweise umlaufenden Stoßflächen und vorzugsweise ohne weitere Deformation unter Bildung von Stoßlinien zu einem Rohrabschnitt aneinandergesetzt sind, gebildet. An den Innenwandungen der Rohrschalensegmente sind topographische Strukturen angeordnet. Die Beschichtung besteht aus einem metallischen Material und ist auf der Außenwandung der Rohrschalensegmente über

die Stoßflächen hinweg aufgebracht und bildet eine nach außen weisende Beschichtungsoberfläche. Das Rohr wird vorzugsweise nach dem vorgenannten Verfahren hergestellt. Die Rohrschalensegmente sind dabei bevorzugt aus einem Metall, weiter bevorzugt aus Stahl, einer Eisenbasislegierung oder einer Nickelbasislegierung. Nickelbasislegierungen zeichnen sich insbesondere durch eine ausgeprägte Korrosionsbeständigkeit und erhöhte Temperaturbeständigkeit aus, was insbesondere bei einem Einsatz in Receivern vorteilhaft ist.

[0037] Die Erfindung wird anhand von nachfolgenden Ausführungsbeispielen, den folgenden Figuren und Beschreibungen näher erläutert. Alle dargestellten Merkmale und deren Kombinationen sind nicht nur auf diese Ausführungsbeispiele und deren Ausgestaltungen begrenzt. Vielmehr sollen diese stellvertretend für weitere mögliche, aber nicht explizit als Ausführungsbeispiele dargestellte weitere Ausgestaltungen kombinierbar angesehen werden. Es zeigen

Fig. 1a bis Fig. i schematische Darstellungen des Verfahrens und des Rohrs eines ersten Ausführungsbeispiels mit perspektivischer Ansichten der Zwischenprodukte,

Fig. 2a und b schematische Darstellungen eines zweiten Ausführungsbeispiels mit alternativen Ausgestaltungen der Rohrschalensegmente, der topographischen Strukturen und der Fixierungselemente sowie

Fig. 3a bis e eine Ausführungsform des Rohrs in mehreren Ansichten und Schnittdarstellungen, bei der die Rohrschalensegmente durch kurze ringförmige Innenrohrabschnitte gebildet sind.

[0038] Das Verfahren zur Herstellung eines Rohrs eines ersten Ausführungsbeispiels sowie Ausgestaltungen dieses zeigen **Fig. 1a bis Fig. i**. Dargestellt werden die Verfahrensschritte anhand von Zwischenprodukten.

[0039] **Fig. 1a** repräsentiert die ersten Verfahrensschritte, der Bereitstellung von mindestens zwei, dargestellt drei gleiche und in Endkontur vorgebogenen Rohrschalensegmenten 1 mit jeweils einer Innenwandung, einer Außenwandung und einer umlaufenden Stoßfläche 2, die passgenau unter Ausbildung des Innenrohrs aneinander setzbar sind. An den Innenwandungen wurden, hervorgehoben durch eine schematische Darstellung in der Detailansicht 3, topographische Strukturen 4 auf- oder eingebracht.

[0040] Anschließend werden in einem zweiten Verfahrensschritt die vorgenannten Rohrschalensegmente 1 über die Stoßflächen zu dem Innenrohr 5 unter Bildung von Stoßlinien 6 zusammengesetzt. **Fig. 1b** zeigt das zusammengesetzte Innenrohr,

wobei die im Innenrohr eingebundenen Rohrschalensegmente anschließend durch Ansetzen von Fixierungsmitteln 7 im Beispiel durch um die Innenrohrenden greifenden Schellen fixiert werden (**Fig. 1c**).

[0041] Die Verbindung zwischen den einzelnen Rohrsegmenten 1 erfolgt per Materialauftrag, im Beispiel durch Additives Aufbringen der Beschichtung 8 aus einem metallischen Material auf der Außenwandung der Rohrschalensegmente 1 über die Stoßlinien 6 hinweg zu einem zusammenhängenden Rohrkörper. **Fig. 1d** repräsentiert diesen Verfahrensschritt vor seinem Abschluss, d.h. mit nur teilweise zwischen den beiden Fixierungsmitteln 7 über das Innenrohr 5 die Stoßlinien 6 überbrückender aufgetragener Beschichtung 8.

[0042] Zwischen Innenrohr 5 und den Fixierungsmitteln 7 befinden sich keine Beschichtungsanteile, wie nach einer optionalen Abnahme der Fixierungsmittel vom ansonsten beschichteten Innenrohr in **Fig. 1e** erkennbar ist. Allein durch die Entfernung der Fixierungsmittel werden die bis dahin überdeckten Bereiche der Außenwandungen freigegeben. Aus dem Innenrohr und der Beschichtung entsteht ein zusammenhängender Rohrkörper 9.

[0043] **Fig. 1f** zeigt beispielhaft einen Rohrkörper 9, bei dem an einem Ende die Beschichtung 8 an einem Rohrende über die von einem entfernten Fixierungsmittel freigegebene Außenwandung des Innenrohrs erstreckt. Am anderen Ende ist zur Verdeutlichung der Position noch ein Fixierungsmittel 7 über dem Innenrohr angeordnet. Zur Reduzierung des Rüstvorgangs wird aber vorzugsweise vorgeschlagen, für eine vorgesehene Beschichtung über die ganze Länge des Rohrkörpers alle Fixierungselemente zugleich - sofern nicht Stabilitätsgründe dagegensprechen - vom Innenrohr abzunehmen (vgl. **Fig. 1e**).

[0044] **Fig. 1g** repräsentiert nachfolgende bevorzugte Verfahrensschritte, bei denen die gesamte Länge des Rohrkörpers 9 erstreckende Beschichtung 8 und/oder die Stirnseiten 10 des Innenrohrs 5 mit der Beschichtung 8 einer mechanischen Nachbearbeitung unterzogen werden. Die mechanische Nachbearbeitung umfasst ein oder besteht aus einem weiter bevorzugt spangebendes bzw. spangebenden Überarbeiten, vorzugsweise ein Überdrehen oder Überschleifen. Ziel ist es, einerseits die Beschichtungsfläche in eine rotationssymmetrische konzentrisch zum Innenrohr angeordnete Form, vorzugsweise mit einer einheitlichen Schichtdicke oder Außendurchmesser zu überführen, andererseits die Stirnseiten von Innenrohr und Beschichtung unter Ausbildung jeweils einer Stirnfläche einheitlich abzulängen.

[0045] In einem optionalen weiteren Verfahrensschritt erfolgt ein konzentrisches Überschieben oder Aufpressen (ggf. Aufschumpfen unter Nutzung von thermischen Ausdehnungseffekten) eines einer drucktragenden Struktur über die Beschichtungsoberfläche der Beschichtung 8, wobei weiter bevorzugt die drucktragende Struktur ein nahtloses Rohr 12 mit einem Innendurchmesser und die Beschichtungsoberfläche zylindrisch mit einem Durchmesser kleiner oder gleich dem Innendurchmesser (bzw. bei Anwendung von Aufschumpfen zur Erzeugung eines Presssitzes ggf. auch geringfügig größer) ist (vgl. **Fig. 1h**). Wie in der Detailansicht 11 dargestellt, liegen Innenrohr 5, Beschichtung 8 und nahtloses Rohr 12 dann konzentrisch übereinander und bilden eine Schichtfolge.

[0046] In einem nachfolgenden optionalen weiteren Schritt wird diese Schichtfolge vorzugsweise stoffschlüssig miteinander verbunden, wobei ein einem ersten Teilschritt vorzugsweise ein stirnseitiges Verschweißen des nahtlosen Rohres mit der Beschichtungsoberfläche vorgeschlagen wird. Eine weitere Schweißung an der gegenüber liegenden Stirnseite im Vakuum ausgeführt bildet ein abgeschlossenes Innenraumvolumen mit Vakuum darin (bzw. eine geschlossene Kontaktfläche bei Anwendung von Aufschumpfen). **Fig. 1i** zeigt in einer Detailansicht 11 einer Stirnseite eine auf der Stirnfläche umlaufenden Schweißnaht 13, die das Innenrohr 5 bei Überbrückung der Beschichtung mit dem nahtlosen Rohr 12 dichtend verbindet.

[0047] Es folgt ein heißisostatisches Verpressen (HIP) des nahtlosen Rohres mit der Beschichtungsoberfläche, wobei das Innenrohr und das nahtlose Rohr vom anliegenden Druck zusammengedrückt wird. Die einstellbare Temperatur liegt vorzugsweise zwischen der Sinter- und der Schmelztemperatur des metallischen Materials der Beschichtung, vorzugsweise zwischen dem 0,7- und 1,0-fachen Schmelztemperatur. Bei dieser Temperatur erfolgt Oberflächendiffusion, d.h. ein diffusionsgetriebener Materialtransport und damit eine weitere Verdichtung in der Beschichtung. Andererseits erfolgt damit durch Materialumlagerung eine stoffliche Verbindung insbesondere zwischen der Beschichtungsoberfläche und dem darüber angeordneten nahtlosen Rohr.

[0048] **Fig. 2a** und die Detailzeichnung **Fig. 2b** zeigen eine alternative bevorzugte Ausgestaltung folgender Details:

- Die topographischen Strukturen auf der Innenwandung der Rohrschalensegmente sind als aufgesetzte Strömungsleitbleche 14, die über umlaufend angeordnete Nuten 15 gegen Anschlägen entsprechend einer späteren Durchströmungsrichtung 16 angeordnet positioniert werden. Diese Strömungsleitbleche bieten in vorteilhafter Weise eine vergleichsweise

große spezifische Oberfläche für eine Wärmeübertragung an. Außerdem dienen sie der Strömungsleitung und -stabilisierung einer durch das Innenrohr durchleitbare Fluidströmung im Bereich der Innenwandung, d.h. - wie im Querschnitt 17 in **Fig. 2a** besonders deutlich erkennbar - gerade in den randnahen Bereichen, in denen sich bevorzugt eine wärmdämmende Strömungsgrenzschicht ausbildet.

- Sofern die Stoßflächen der Rohrschalensegmente 1 als ineinandergreifende Formelemente 18 ausgestaltet sind, ermöglichen sie in besonders vorteilhafter Weise ein Zusammensetzen der Rohrschalensegmente wie bei einem Puzzle. Sie sind je nach Ausgestaltung auch als Fixierungselemente oder zumindest als die Fixierungselemente unterstützende Gestaltung heranziehbar. Besonders vorteilhaft ist diese Ausgestaltung auch dann, wenn das Innenrohr sich wie abgebildet aus mehreren sowohl axial als auch in Umfangsrichtung, d.h. tangential hintereinander angeordneten Rohrschalensegmenten zusammensetzen.

- Die einzelnen Rohrschalensegmente sind mit den vorgenannten Formelementen zumindest temporär über eine geeignete Vorrichtung (in **Fig. 2a** und b nicht dargestellt) gegeneinander über Innenkonus und Aussenkonus positionierbar und mit definiertem Druck gegeneinander in axialer Richtung während dem Materialauftrag unter Rotation um die Hauptachse mittels Kaltgasspritzen fixierbar.

[0049] **Fig. 3a** bis e zeigen eine alternative Ausführungsform, bei denen die Rohrschalensegmente 1 durch ringförmige Innenrohrabschnitte 19 gebildet sind.

[0050] **Fig. 3a** zeigt einen einzelnen Innenrohrabschnitt mit zwei endseitig angeordneten ringförmigen Stoßflächen 2, jeweils einem Innenkonus 20 und einem Außenkonus 21, die bei einem seriellen Aneinandersetzen mehrerer Innenrohrabschnitte formschlüssig zu den jeweils benachbarten Außen- bzw. Innenkonus zusammenpassen und jeweils umlaufende Stoßlinien bilden (vgl. **Fig. 3b** bis **Fig. d**).

[0051] Ferner ist ein ringförmiges Strömungsleitblech 22 mit Abstandshalter 23 vorgesehen, das formschlüssig in entsprechende Aufnahmenuten 24 auf der Innenwandung des Innenrohrabschnitts 19 einsetzbar ist (vgl. **Fig. 3b** bis e) und durch ein Andocken eines benachbarten Innenrohrabschnitts gegen ein axiales Herauslösen aus seiner Position gesichert wird (vgl. **Fig. 3c** und e). Die axial in Reihe angeordneten Innenrohrabschnitte bilden in ihrer zusammengesetzten Gesamtheit das Innenrohr 5. **Fig. 3c** und e zeigen zudem eine die Stoßlinien 6 überbrückende Beschichtung auf dem Innenrohr.

Bezugszeichenliste

1	Rohrschalensegmenten
2	Stoßfläche
3	Detailansicht
4	topographische Strukturen
5	Innenrohr
6	Stoßlinien
7	Fixierungsmittel
8	Beschichtung
9	Rohrkörper
10	Stirnseite
11	Detailansicht
12	nahtloses Rohr
13	Schweißnaht
14	Strömungsleitbleche
15	Nut
16	Durchströmungsrichtung
17	Querschnitt
18	ineinandergreifende Formelemente
19	Innenrohrabschnitte
20	Innenkonus
21	Außenkonus
22	ringförmiges Strömungsleitblech
23	Abstandshalter
24	Aufnahmenuten

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Rohrs mit einem Innenrohr (5) mit innen angeordneten topographischen Strukturen (4) und mit einer außen angeordneten Beschichtung (8), umfassend die folgenden Verfahrensschritte:

- a) Bereitstellung von mindestens zwei Rohrschalensegmenten (1) mit jeweils einer Innenwandung, einer Außenwandung und einer umlaufenden Stoßfläche (2), die passgenau unter Ausbildung des Innenrohrs aneinander setzbar sind,
- b) Auf- oder Einbringen der topographischen Strukturen auf der Innenwandung der Rohrschalensegmente,
- c) Aneinandersetzen der Rohrschalensegmente über die Stoßflächen zu dem Innenrohr unter Bildung von Stoßlinien (6),
- d) Fixierung der im Innenrohr eingebundenen Rohrschalensegmente durch Ansetzen von Fixierungsmitteln (7) sowie
- e) Additives Aufbringen der Beschichtung aus einem

metallischen Material auf der Außenwandung der Rohrschalensegmente über die Stoßlinien hinweg zu einem zusammenhängenden Rohrkörper (9).

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Fixierungsmittel (7) über Bereiche der Außenwandungen der Rohrschalensegmente angesetzt sind und diese Bereiche damit überdecken, umfassend die weiteren folgenden nachfolgenden Verfahrensschritte:

f) Entfernung der Fixierungsmittel, wobei die bis dahin überdeckten Bereiche der Außenwandungen freigegeben werden sowie

g) Additives Aufbringen des metallischen Material in den Bereichen der Fixierungsmittel als Teil der Beschichtung (8).

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, umfassend eine nachfolgende thermische und/oder mechanische Nachbearbeitung der Beschichtung (8) und/oder der Stirnseiten (10) des Innenrohrs (5) mit der Beschichtung (8).

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die mechanische Nachbearbeitung ein spangebendes Überarbeiten, vorzugsweise ein Überdrehen oder Überschleifen, der Beschichtung (8) umfasst, wobei eine rotationssymmetrische konzentrisch zum Rohr angeordnete Beschichtungsoberfläche entsteht.

5. Verfahren nach Anspruch 4, umfassend nachfolgend ein konzentrisches Überschieben oder Aufpressen eines einer drucktragenden Struktur über die Beschichtungsoberfläche.

6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die drucktragende Struktur ein nahtloses Rohr (12) mit einem Innendurchmesser und die Beschichtungsoberfläche zylindrisch mit einem Durchmesser kleiner oder gleich dem Innendurchmesser ist.

7. Verfahren nach Anspruch 6, umfassend die weiteren folgenden nachfolgenden Verfahrensschritte:

h) Stirnseitigen Verschweißen des nahtlosen Rohres (12) mit der Beschichtungsoberfläche, der Beschichtung (8) und/ oder dem Innenrohr (5) vorzugsweise im Vakuum, wobei ein abgeschlossenes Innenraumvolumen entsteht, sowie

i) Heißisostatisches Verpressen des nahtlosen Rohres mit der Beschichtungsoberfläche.

8. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Auf- oder Einbringen der topographischen Strukturen (4) auf der Innenwandung der Rohrschalensegmente (1) mittels Urform-, Umform-, Trenn-, Füge-, Abtrags- oder Beschichtungsverfahren erfolgt.

9. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Fixierung zumindest jeweils an den Endbereichen des Innenrohrs (5) erfolgt.

10. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Fixierungsmittel (7) um das Innenrohr (5) umlaufende Schellen umfassen.

11. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das additive Aufbringen der Beschichtung (8) aus dem metallischen Material auf der Außenwandung mittels eines Auftragsschweißverfahren erfolgt, wobei das metallische Material in Pulver- oder Drahtform bereitgestellt wird und durch eine Wärmequelle, vorzugsweise einem Energiestrahle oder einer Lichtbogenentladung geschmolzen wird.

12. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Aufbringen der Beschichtung (8) aus dem metallischen Material auf der Außenwandung mittels Kaltgasspritzen oder thermisches Spritzen erfolgt, wobei das metallische Material in Pulverform bereitgestellt wird.

13. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rohrschalensegmente (1) beim Auf- oder Einbringen der topographischen Strukturen (4) auf der Innenwandung bereits endkonturnah vorgeformt vorliegen und ohne weitere Verformung zum Innenrohr (5) unter Bildung von Stoßlinien (6) aneinandergesetzt werden.

14. Rohr mit an der Innenwandung angeordneten topographischen Strukturen (4), umfassend:
a) mindestens zwei Rohrschalensegmente (1) mit jeweils einer Innenwandung, einer Außenwandung und einer umlaufenden Stoßfläche (2), die passgenau unter Bildung von Stoßlinien (6) zu einem Rohrabschnitt aneinandergesetzt sind,
b) topographische Strukturen auf der Innenwandung der Rohrschalensegmente sowie
c) eine Beschichtung (8) aus einem metallischen Material auf der Außenwandung der Rohrschalensegmente über die Stoßlinien hinweg mit einer Beschichtungsoberfläche.

15. Rohr nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rohrschalensegmente (1) aus Metall, vorzugsweise aus, Stahl einer Eisenbasislegierung oder Nickelbasiswerkstoffen sind.

16. Rohr nach Anspruch 14 oder 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Stoßflächen (2) formschlüssige Führungselemente oder überlappende Bereiche zu benachbarten Stoßflächen aufweisen.

17. Rohr nach einem der Ansprüche 14 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass die über der Beschichtungsoberfläche eine drucktragende Struktur übergeschoben oder aufgepresst ist.

18. Rohr nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass die drucktragende Struktur ein nahtloses Rohr mit einem Innendurchmesser ist und die Beschichtungsoberfläche rotationssymmetrisch konzentrisch, vorzugsweise zylindrisch um das Innenrohr (5) mit einem Durchmesser kleiner oder gleich dem Innendurchmesser ausgestaltet ist.

19. Rohr nach einem der Ansprüche 14 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rohrschalensegmente (1) Ringelemente (19) sind, die über die Stoßflächen (2, 20, 21) hintereinander zum Innenrohr aneinander setzbar sind.

20. Rohr nach einem der Ansprüche 13 bis 19, hergestellt nach einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13.

Es folgen 10 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig.1a

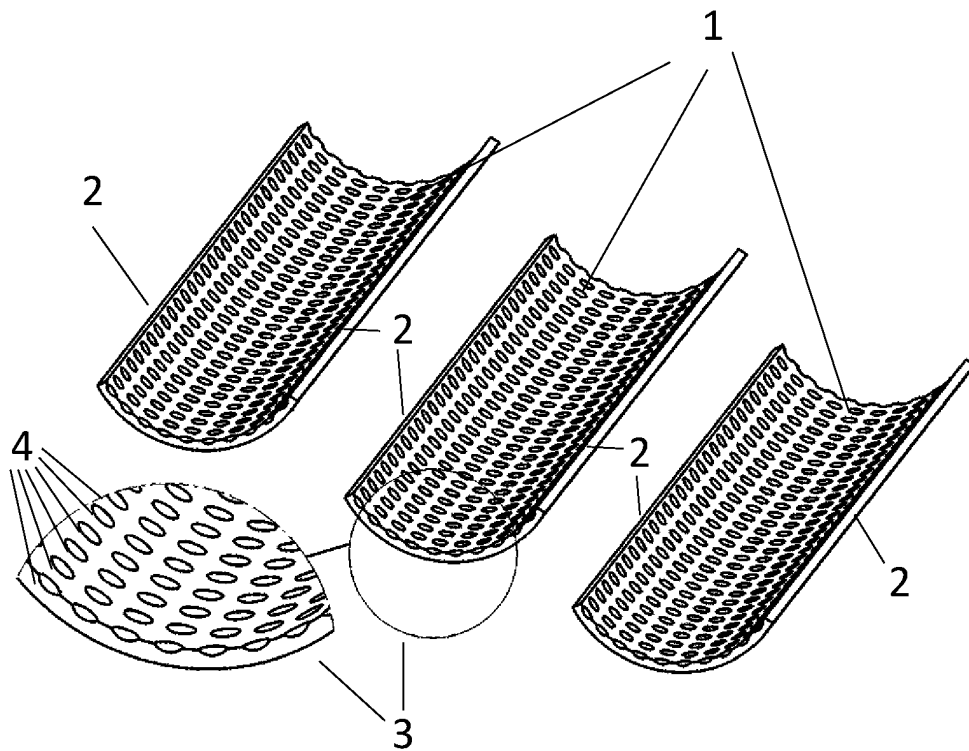


Fig.1b

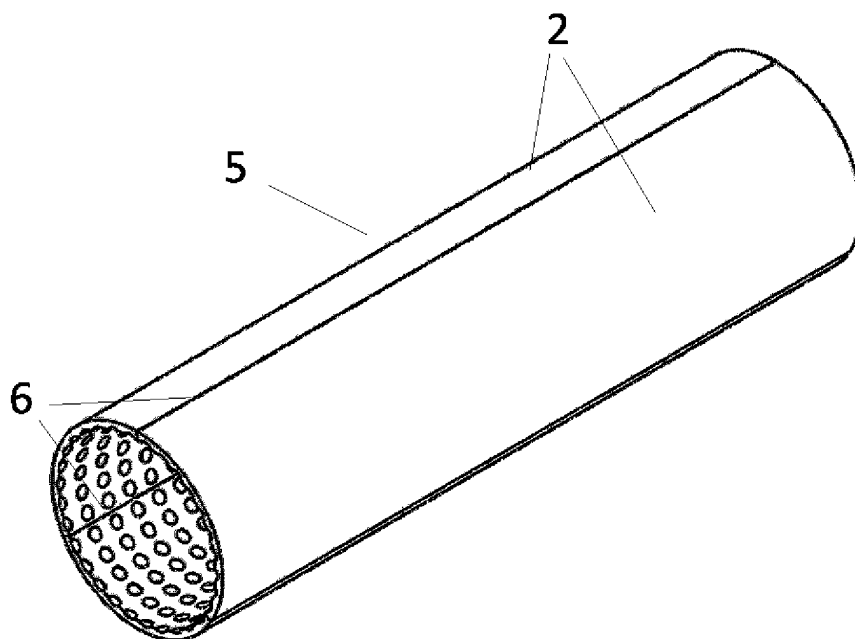


Fig.1c

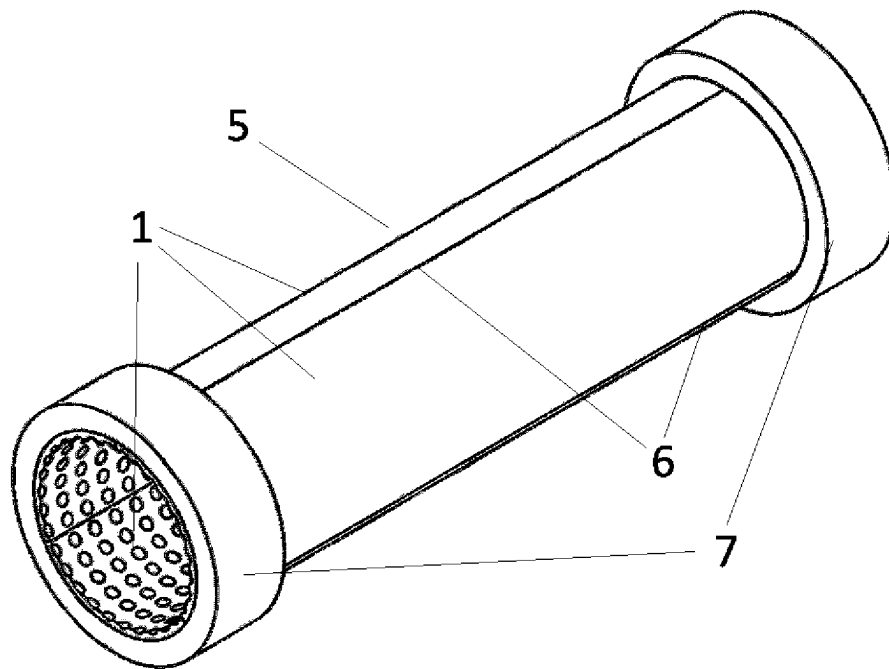


Fig.1d

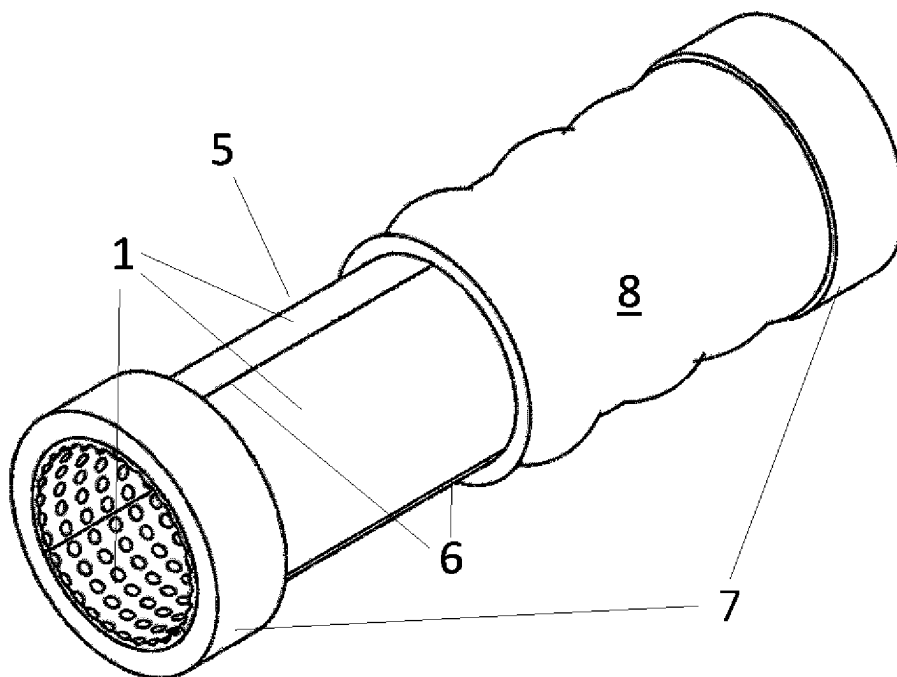


Fig.1e

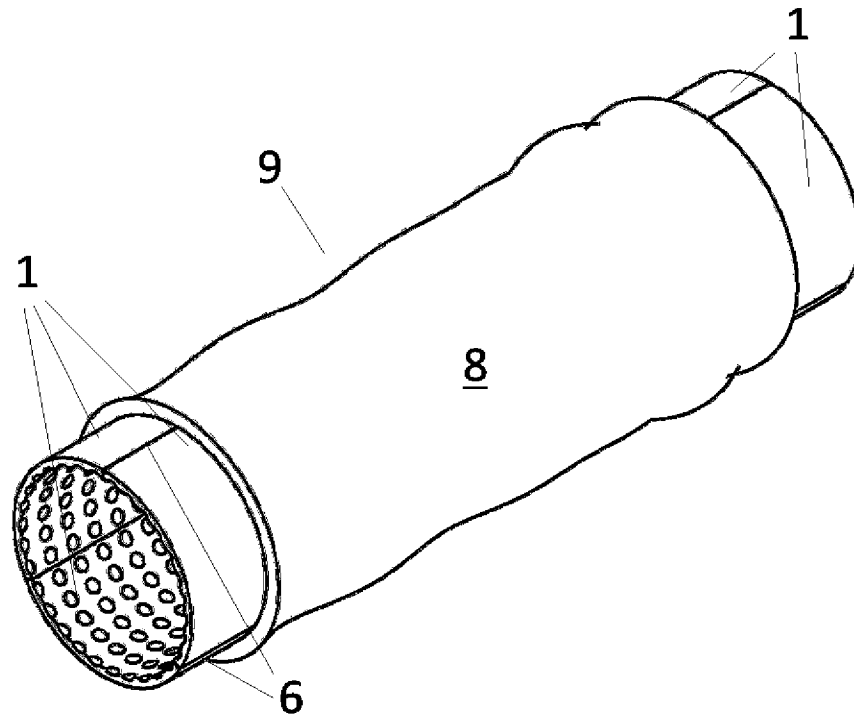


Fig.1f

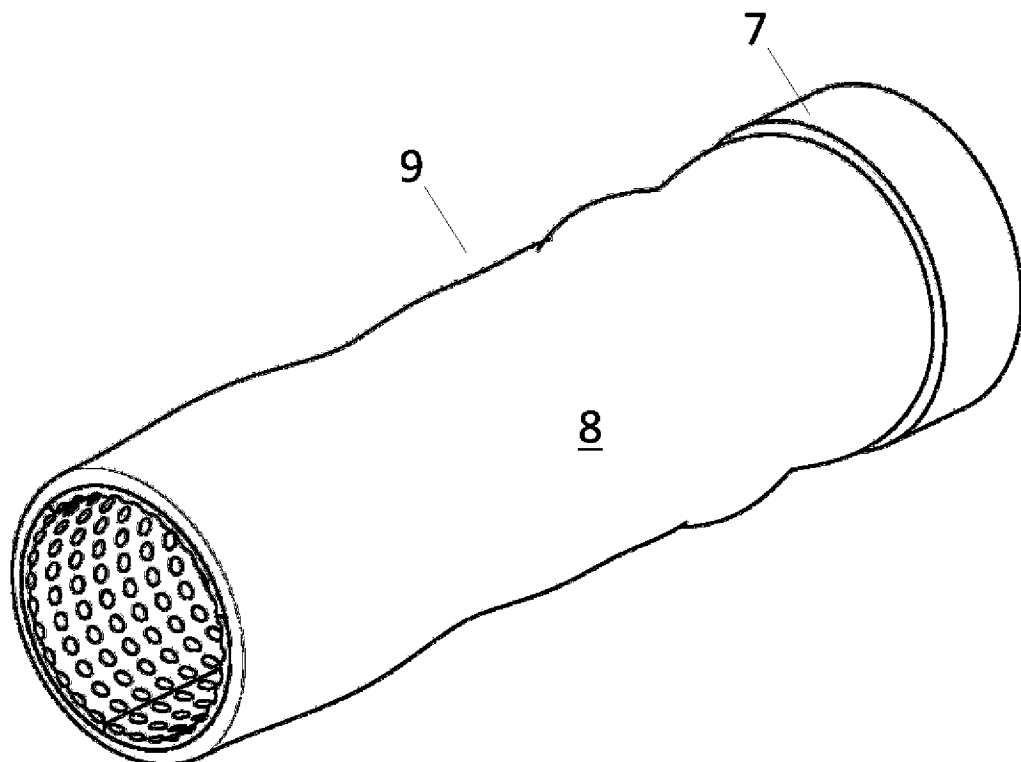


Fig.1g

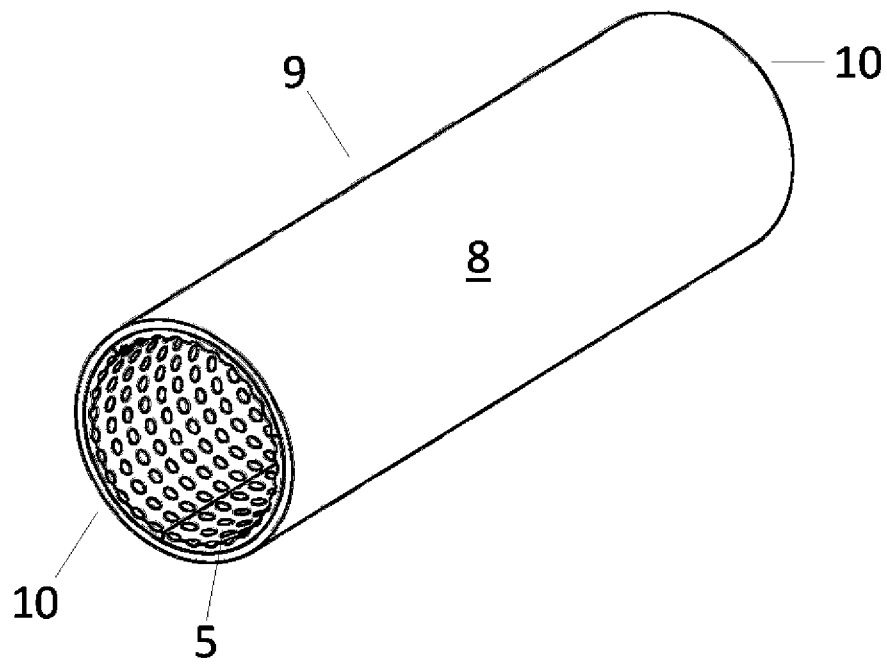


Fig.1h

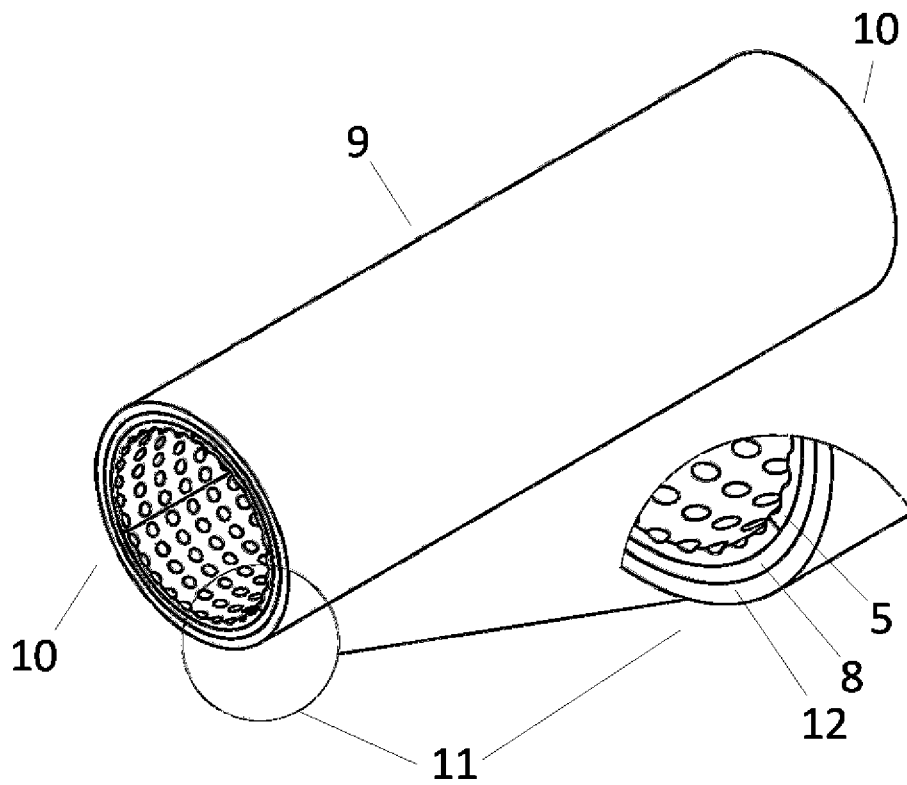


Fig.1i

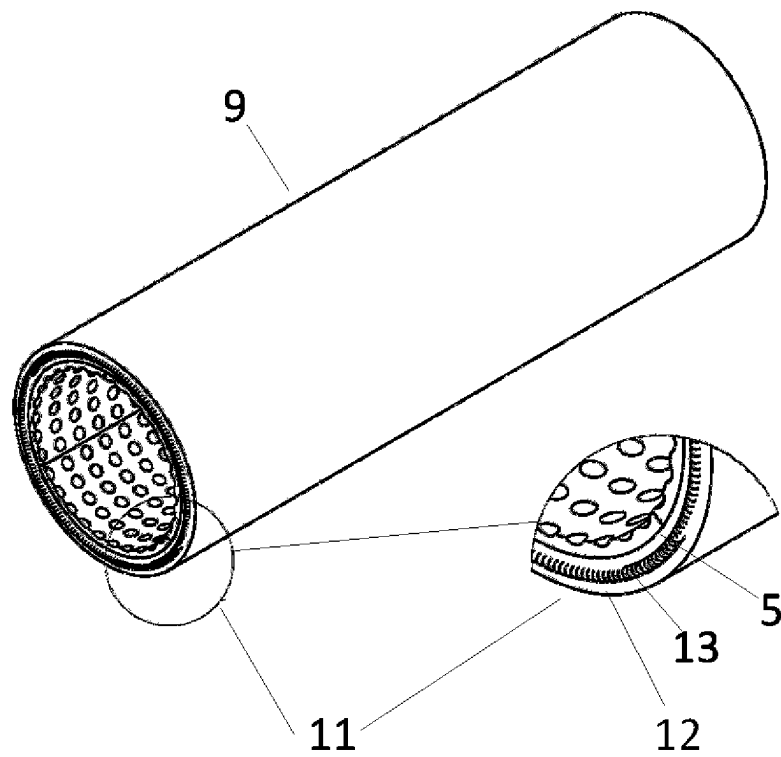


Fig.2a

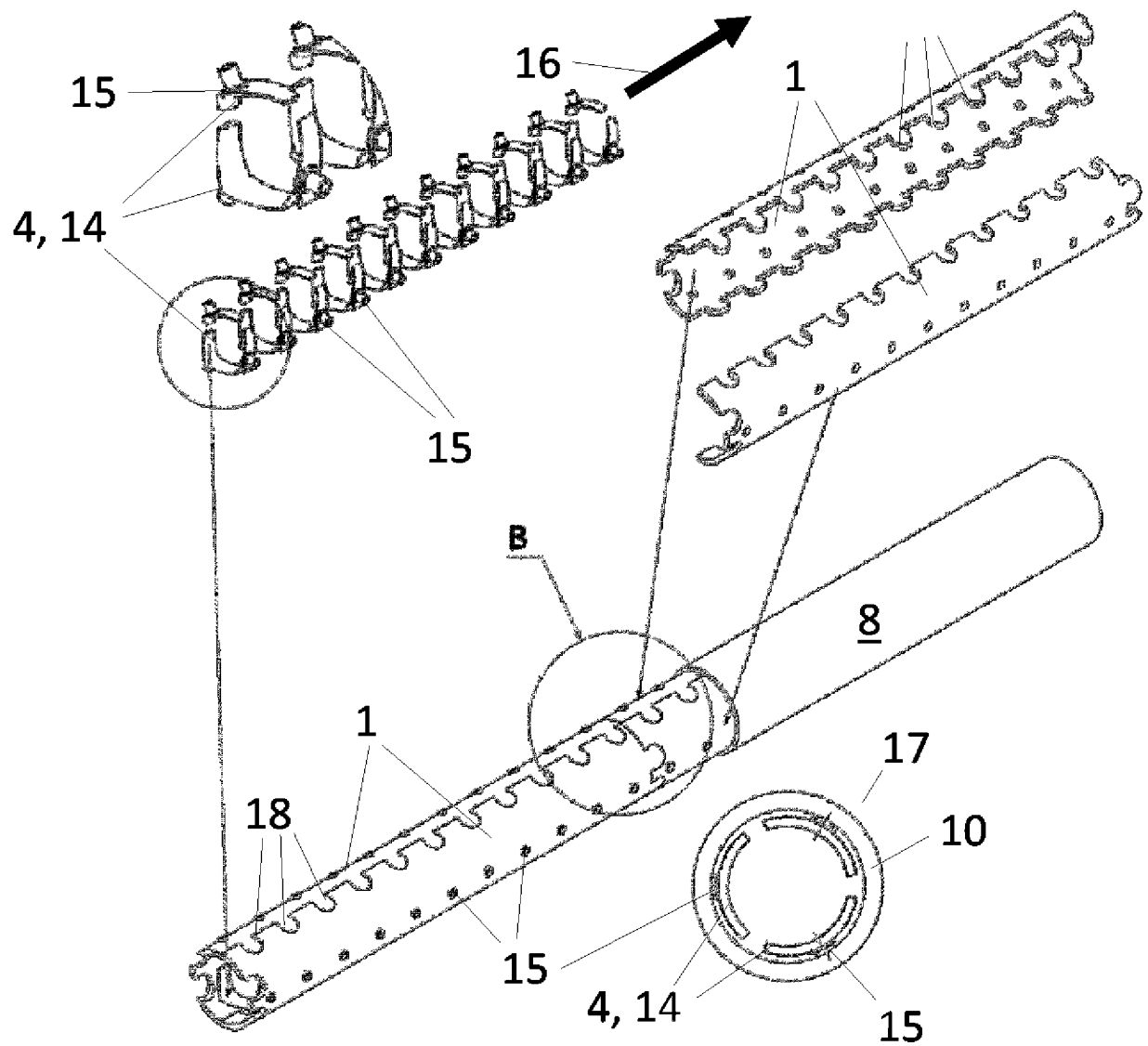


Fig.2b

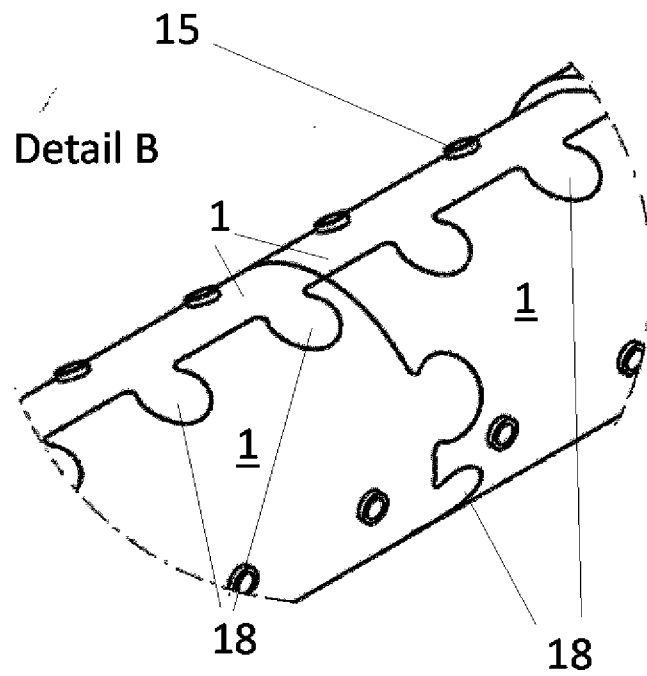


Fig.3a

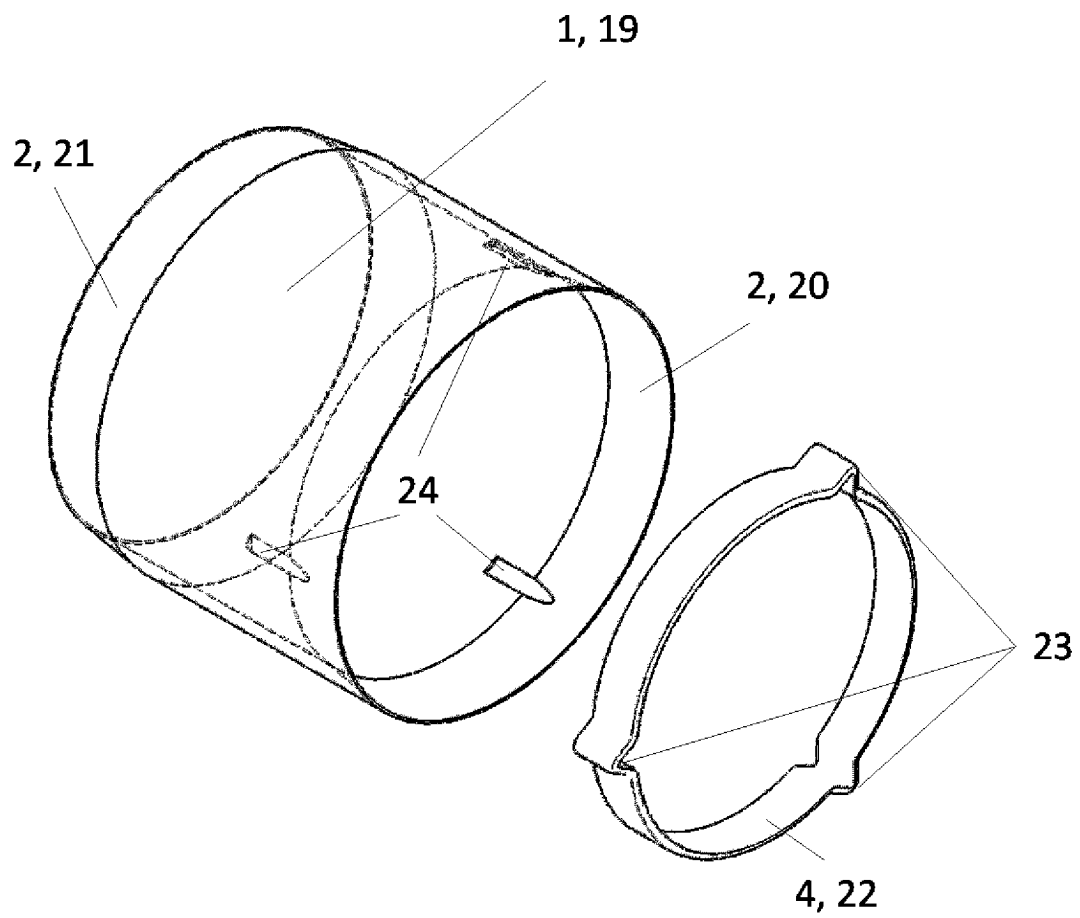


Fig.3b

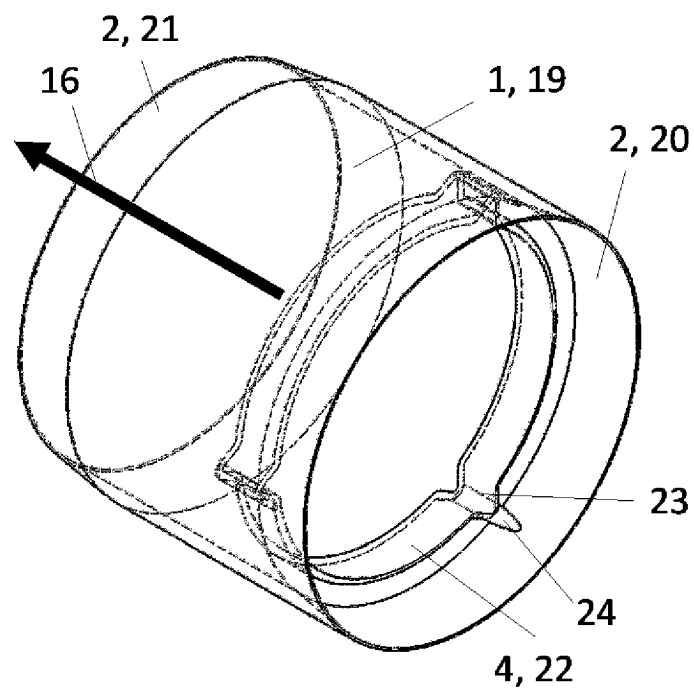


Fig.3c

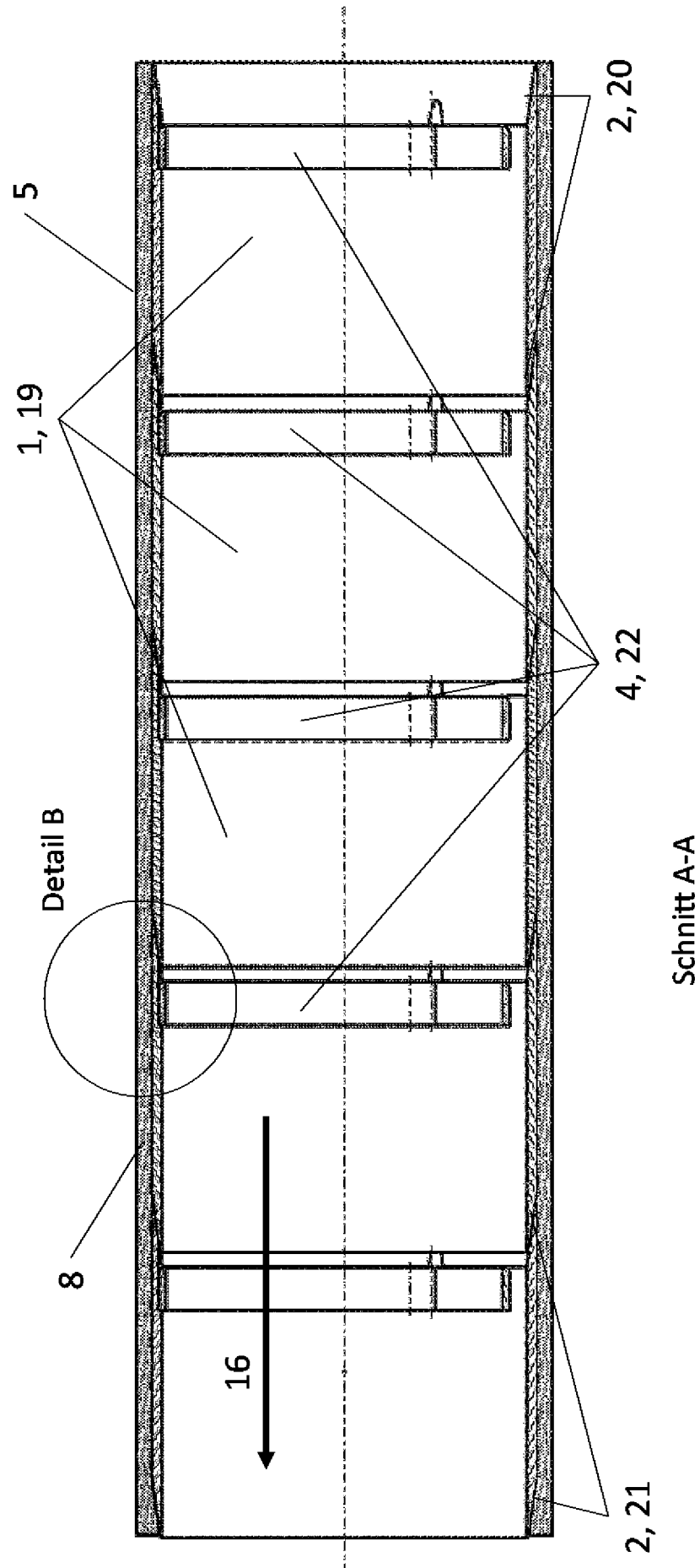


Fig.3d

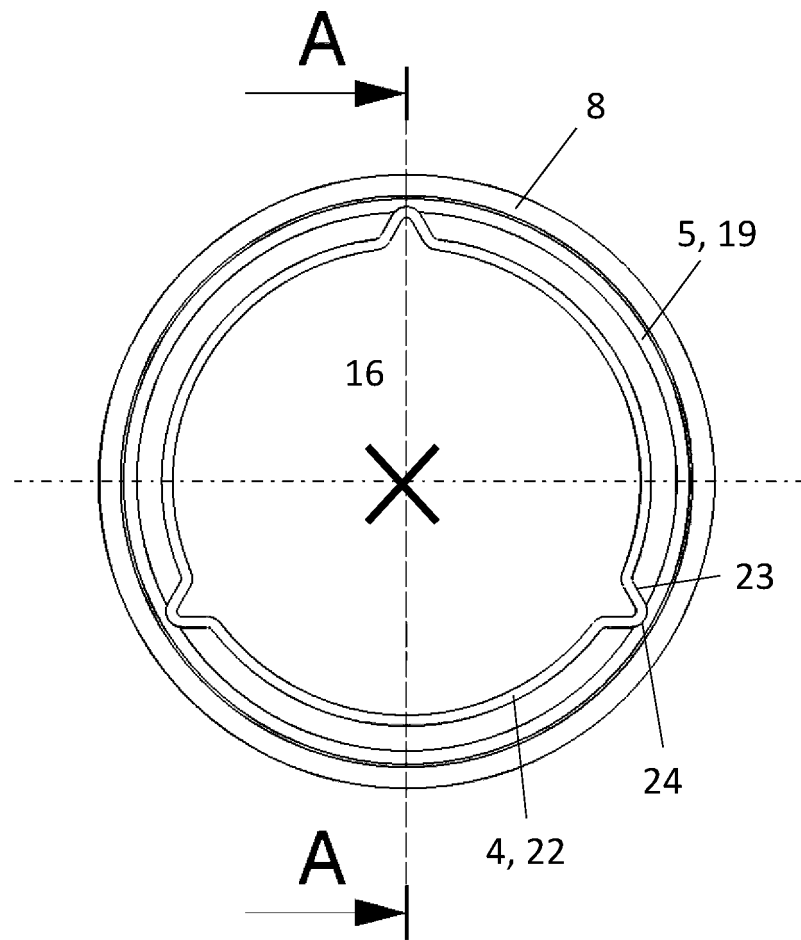


Fig.3e

