

(19)



(11)

EP 4 237 782 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
23.10.2024 Patentblatt 2024/43

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
F28F 1/36 ^(2006.01) **F25B 39/00** ^(2006.01)
F28F 1/42 ^(2006.01) **F28F 13/18** ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **21797938.4**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
F28F 1/36; F28F 1/422; F28F 13/187

(22) Anmeldetag: **07.10.2021**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2021/000121

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2022/089773 (05.05.2022 Gazette 2022/18)

(54) **METALLISCHES WÄRMEAUSTAUSCHERROHR**

METAL HEAT EXCHANGER TUBE

TUBE MÉTALLIQUE D'ÉCHANGEUR DE CHALEUR

(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: **31.10.2020 DE 102020006684**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
06.09.2023 Patentblatt 2023/36

(73) Patentinhaber: **Wieland-Werke AG
89079 Ulm (DE)**

(72) Erfinder:
• **GOTTERBARM, Achim**
89160 Dornstadt (DE)
• **KNAB, Manfred**
89160 Dornstadt (DE)
• **LUTZ, Ronald**
89143 Blaubeuren (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A2- 2 253 922 DE-A1- 102014 002 829
US-A- 5 597 039 US-A1- 2010 288 480

EP 4 237 782 B1

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).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein metallisches Wärmeaustauscherrohr nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1. DE 10 2014 002829 A1 z.B. offenbart ein derartiges Wärmeaustauscherrohr.

[0002] Verdampfung tritt in vielen Bereichen der Kälte- und Klimatechnik sowie in der Prozess- und Energietechnik auf. Häufig werden Rohrbündelwärmeaustauscher verwendet, in denen Flüssigkeiten von Reinstoffen oder Mischungen auf der Rohraußenseite verdampfen und dabei auf der Rohrrinnenseite eine Sole oder Wasser abkühlen.

[0003] Durch die Intensivierung des Wärmeübergangs auf der Rohraußen- und der Rohrrinnenseite lässt sich die Größe der Verdampfer stark reduzieren. Hierdurch nehmen die Herstellungskosten solcher Apparate ab. Außerdem sinkt die notwendige Füllmenge an Kältemittel, die bei den mittlerweile überwiegend verwendeten chlorfreien Sicherheitskältemitteln einen nicht zu vernachlässigenden Kostenanteil an den gesamten Anlagekosten ausmachen kann. Zudem sind die heute üblichen Hochleistungsrohre bereits etwa um den Faktor vier leistungsfähiger als glatte Rohre gleichen Durchmessers.

[0004] Die leistungstärksten, kommerziell erhältlichen Rippenrohre für überflutete Verdampfer besitzen auf der Rohraußenseite eine Rippenstruktur mit einer Rippendichte von 55 bis 60 Rippen pro Zoll (US 5,669,441 A; US 5,697,430 A; DE 197 57 526 C1). Dies entspricht einer Rippenteilung von ca. 0,45 bis 0,40 mm. Weiterhin ist bekannt, dass leistungsgesteigerte Verdampfungsstrukturen bei gleichbleibender Rippenteilung auf der Rohraußenseite erzeugt werden können, indem man zusätzliche Strukturelemente im Bereich des Nutengrundes zwischen den Rippen einbringt.

[0005] In EP 1 223 400 B1 wird vorgeschlagen, am Nutengrund zwischen den Rippen hinterschnittene Sekundärnuten zu erzeugen, die sich kontinuierlich entlang der Primärnut erstrecken. Der Querschnitt dieser Sekundärnuten kann konstant bleiben oder in regelmäßigen Abständen variiert werden.

[0006] Weitere Beispiele für Strukturen am Nutengrund sind in EP 0 222 100 B1, US 7,254,964 B2 oder US 5,186,252 A zu finden. Diesen Strukturen ist gemeinsam, dass die Strukturelemente am Nutengrund keine hinterschnittene Form aufweisen. Es handelt sich dabei entweder um in den Nutengrund eingebrachte Eindrückungen oder um Auskragungen im unteren Bereich des Kanals. Höhere Auskragungen werden im Stand der Technik explizit ausgeschlossen, da zu befürchten wäre, dass der Fluidfluss im Kanal für einen Wärmeaustausch nachteilig behindert wird.

[0007] Ein weiterer Ansatz mit höheren Strukturen ausgehend vom Nutengrund ist in EP 3 111 153 B1, offenbart. Es handelt sich bei den Strukturen um Auskragungen im Kanal, die eine Segmentierung hervorrufen. Durch eine Segmentierung zwischen zwei Rippen wird

der Kanal in umlaufender Richtung immer wieder unterbrochen und so das Wandern der entstehenden Blasen und des Wärmeaustauschfluids im Kanal zumindest reduziert oder ganz verhindert. Ein Austausch von Flüssigkeit und Dampf entlang des Kanals ist durch die jeweilige Zusatzstruktur zunehmend weniger bis gar nicht mehr unterstützt.

[0008] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein leistungsgesteigertes Wärmeaustauscherrohr zur Verdampfung von Flüssigkeiten auf der Rohraußenseite weiterzubilden.

[0009] Die Erfindung wird durch die Merkmale des Anspruchs 1 wiedergegeben. Die weiteren rückbezogenen Ansprüche betreffen vorteilhafte Aus- und Weiterbildungen der Erfindung.

[0010] Die Erfindung schließt ein metallisches Wärmeaustauscherrohr ein, mit auf der Rohraußenseite ausgeformten integralen Rippen mit Rippenfuß, Rippenflanken und Rippenspitze, wobei der Rippenfuß radial von der Rohrwandung absteht und zwischen den Rippen ein Kanal mit einem Kanalgrund ausgebildet ist, in dem voneinander beabstandete Zusatzstrukturen angeordnet sind. Die Zusatzstrukturen unterteilen den Kanal zwischen den Rippen in Segmente. Die Zusatzstrukturen reduzieren die durchströmbare Querschnittsfläche im Kanal zwischen zwei Rippen lokal und begrenzen zumindest dadurch im Betrieb einen Fluidfluss im Kanal. Erste Zusatzstrukturen sind vom Kanalgrund ausgehende, radial nach außen gerichtete Auskragungen, die in Radialrichtung jeweils durch eine sich zwischen dem Kanalgrund und der Rippenspitze befindende Abschlussfläche begrenzt sind, wodurch eine radiale Erstreckung der Auskragungen definiert ist. Am Ort der Auskragungen sind radial nach außen liegend Werkstoffvorsprünge als zweite Zusatzstrukturen angeordnet, die aus Material der Rippenflanken ausgebildet sind. Die Werkstoffvorsprünge sind in Radialrichtung jeweils zwischen einer Abschlussfläche und der Rippenspitze angeordnet, so dass die Werkstoffvorsprünge um die radiale Erstreckung der Auskragungen über dem Kanalgrund des Kanals seitlich an der Rippenflanke liegend ausgebildet sind. Die Werkstoffvorsprünge erstrecken sich in Axial- und Radialrichtung weiter als in Umfangsrichtung.

[0011] Diese metallischen Wärmeaustauscherrohre dienen insbesondere zur Verdampfung von Flüssigkeiten aus Reinstoffen oder Gemischen auf der Rohraußenseite.

[0012] Derartig leistungsfähige Rohre können auf der Basis von integral gewalzten Rippenrohren mittels Walzscheiben hergestellt werden. Unter integral gewalzten Rippenrohren werden berippte Rohre verstanden, bei denen die Rippen aus dem Wandmaterial eines Glattrohres geformt wurden. Typische auf der Rohraußenseite ausgeformte integrale Rippen sind beispielsweise spiralförmig umlaufend und weisen einen Rippenfuß, Rippenflanken und Rippenspitze auf, wobei der Rippenfuß im Wesentlichen radial von der Rohrwandung absteht. Die Anzahl der Rippen wird durch Zählung aufeinanderfol-

gender Ausbuchtungen in axialer Richtung eines Rohres festgelegt. Die erfindungsgemäßen Strukturen können durch eine scharfkantige gezahnte Walzscheibe hergestellt werden, welche sowohl Wandmaterial am Kanalgrund als auch Material an der Rippenflanke in Axial- und Radialrichtung umformt.

[0013] Es sind hierbei verschiedene Verfahren bekannt, mit denen die zwischen benachbarten Rippen befindlichen Kanäle derart verschlossen werden, dass Verbindungen zwischen Kanal und Umgebung in Form von Poren oder Schlitzen bleiben. Insbesondere werden solche im Wesentlichen geschlossene Kanäle durch Umbiegen oder Umlegen der Rippen, durch Spalten und Stauchen der Rippen oder durch Kerben und Stauchen der Rippen erzeugt.

[0014] Die Erfindung geht dabei von der Überlegung aus, dass zur Erhöhung des Wärmeüberganges bei der Verdampfung der Rippenzwischenraum durch Zusatzstrukturen segmentiert wird. Hierdurch werden lokale Überhitzungen in den Zwischenräumen erzeugt und der Vorgang des Blasensiedens intensiviert. Die Bildung von Blasen findet dann in erster Linie innerhalb der Segmente statt und beginnt an Keimstellen. An diesen Keimstellen bilden sich zunächst kleine Gas- oder Dampfblasen. Wenn die anwachsende Blase eine bestimmte Größe erreicht hat, löst sie sich von der Oberfläche ab. Im Zuge der Blasenablösung wird der verbleibende Hohlraum im Segment wieder mit Flüssigkeit geflutet und der Zyklus beginnt erneut. Die Oberfläche kann dabei derart gestaltet werden, dass beim Ablösen der Blase eine kleine Blase zurück bleibt, die dann als Keimstelle für einen neuen Zyklus der Blasenbildung dient.

[0015] Zusätzlich zur Bildung von Blasen innerhalb der Segmente befinden sich gemäß der erfinderischen Lösung im Bereich der ersten Zusatzstrukturen in Form von radial nach außen gerichteten Auskragungen weitere Werkstoffvorsprünge als zweite Zusatzstrukturen. Die Werkstoffvorsprünge sind seitlich an der Rippenflanke angeordnet und erstrecken sich im Wesentlichen in Axial- und Radialrichtung. Aus dem Herstellungsprozess mittels Walzen werden die Werkstoffvorsprünge aus Material der Rippenflanken ausgebildet, die radial nach außen liegend auf den Auskragungen bevorzugt direkt aufsetzen. In den durch die Werkstoffvorsprünge gebildete Strukturen wird der Fluidfluss von flüssigem Wärmeaustauscherfluid in die benachbarten Segmente, quasi von der Seite her, begünstigt. Eine derartige Fluidführung liefert somit einen Beitrag zur Blasenbildung im Segment. Die Auskragungen können sich zwischen dem jeweiligen Rippenfuß benachbarter Rippen in axialer Richtung über den gesamten Kanalgrund oder nur über einen Teil des Kanalgrunds erstrecken. Sie stellen quasi eine zwischen zwei Rippen verlaufende Barriere ausgehend vom Kanalgrund dar, die sich radial nach außen erstreckt und den Kanal in Umfangsrichtung zumindest teilweise verschließt.

[0016] Mit anderen Worten, auf einer bevorzugt massiven Auskragung der Kanalgrundstruktur aufgesetzte

erfindungsgemäße Werkstoffvorsprünge sind als zweite Zusatzstrukturen aus Material der Rippenflanke geformt und bilden im Wesentlichen in radialer Richtung jeweils einen fließenden Übergang zu den beiden Seitenflächen der darunter liegenden Auskragung. Diese stellen folglich eine Fluidleitstruktur dar, welche flüssiges Fluid quasi von der Seite her in die Segmente führt. Eine radial außen angeordnete Abschlussfläche der Auskragungen kann sich über die gesamte Kanalbreite erstrecken. Am Ort dieser auf einer Auskragung angeordneten Werkstoffvorsprünge kann flüssiges Fluid zwischen benachbarten Segmenten ausgetauscht werden und dabei auch aus einem Segment in ein benachbartes Segment gelangen. Die Auskragungen mit den aufgesetzten Werkstoffvorsprüngen stellen folglich eine Schwelle für den Fluiddurchtritt dar.

[0017] Hierbei können auch die Werkstoffvorsprünge in axialer Richtung eine geringere Ausdehnung als diejenige der darunter angeordnete Auskragungen aufweisen. Aufgrund der Größe, Form und Ausrichtung der Werkstoffvorsprünge ist in erster Linie das Benetzungsverhalten des Wärmeaustauscherfluids die Ursache für eine Fluidflusserhöhung. Dabei kann die Konturlinie der sich im Wesentlichen in Axial- und Radialrichtung erstreckenden Werkstoffvorsprünge auch geschwungen oder unregelmäßig ausgeführt sein.

[0018] Bei der vorliegenden Erfindung wird durch diese Art der Segmentierung des Kanals zwischen zwei Rippen dieser in umlaufender Richtung immer wieder unterbrochen und so das Wandern der entstehenden Blasen im Kanal zumindest reduziert oder ganz verhindert. Ein Austausch von Flüssigkeit und Dampf entlang des Kanals ist durch die jeweilige Zusatzstruktur zunehmend weniger bis gar nicht mehr unterstützt.

[0019] Der besondere Vorteil der Erfindung besteht darin, dass der Austausch von Flüssigkeit und Dampf lokal gezielt gesteuert und die Flutung der Blasenkeimstelle im Segment lokal und insbesondere durch die Werkstoffvorsprünge von der Seite her erfolgt. Insgesamt können durch eine gezielte Wahl der Kanalsegmentierung die Verdampferrohrstrukturen in Abhängigkeit der Einsatzparameter zielführend optimiert werden, wodurch eine Steigerung des Wärmeübergangs erzielt wird. Da im Bereich des Nutengrundes die Temperatur des Rippenfußes höher ist als an der Rippenspitze, sind zudem Strukturelemente zur Intensivierung der Blasenbildung im Nutengrund besonders wirkungsvoll.

[0020] Zudem ist es auch von Vorteil, dass die Zusatzstrukturen die durchströmbare Querschnittsfläche im Kanal zwischen zwei Rippen lokal reduzieren. Insgesamt können durch eine zunehmende Abtrennung einzelner Kanalabschnitte bei der Kanalsegmentierung die Verdampferrohrstrukturen in Abhängigkeit der Einsatzparameter weiter zur Steigerung des Wärmeübergangs weiter optimiert werden.

[0021] Bei einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung können die Auskragungen und die Werkstoffvorsprünge die durchströmbare Querschnittsfläche im Ka-

nal zwischen zwei Rippen lokal um mindestens 30% reduzieren. Auf diese Weise werden die Segmente lokal für einen Fluiddurchtritt ausreichend abgegrenzt. Der zwischen zwei Segmenten liegende Kanalabschnitt ist somit gegenüber benachbart liegenden Kanalabschnitten fluidseitig ausreichend bis weitestgehend getrennt.

[0022] Vorteilhafterweise können die Auskragungen und die Werkstoffvorsprünge die durchströmbare Querschnittsfläche im Kanal zwischen zwei Rippen lokal um 40 bis 70% reduzieren. Der zwischen zwei Segmenten liegende Kanalabschnitt bildet gegenüber benachbart liegenden Kanalabschnitten fluidseitig eine maßgebliche Schwelle.

[0023] In bevorzugter Ausgestaltung der Erfindung kann der Kanal radial nach außen bis auf einzelne lokale Öffnungen abgeschlossen sein. Dabei können die Rippen einen im Wesentlichen T-förmigen oder I-förmigen Querschnitt aufweisen, wodurch der Kanal zwischen den Rippen bis auf Poren als lokale Öffnungen verschlossen wird. Durch diese Öffnungen können die im Verdampfungsprozess entstehenden Dampfblasen entweichen. Das Verformen der Rippenspitzen geschieht mit Methoden, die dem Stand der Technik zu entnehmen sind.

[0024] In diesem Zusammenhang können auch die Rippenspitzen in axialer Richtung umgelegt sein oder sogar zu einem gewissen Maße in Richtung Kanalgrund hin ausgeformt sein. Der Kanal kann folglich auch aus einer Kombination mehrerer sich ergänzender Strukturelemente von unten und der Seite und/oder von oben um das gewünschte Maß verjüngt bis ganz geschlossen werden. Jedenfalls so, dass der Kanal zwischen den Rippen in diskrete Segmente unterteilt wird.

[0025] Durch die Kombination der erfindungsgemäßen Segmente mit einem bis auf Poren oder Schlitz verschlossenen Kanal erhält man eine Struktur, die über einen sehr weiten Bereich von Betriebsbedingungen eine sehr hohe Leistungsfähigkeit bei Verdampfung von Flüssigkeiten aufweist. Insbesondere erreicht bei Variation der Wärmestromdichte oder der treibenden Temperaturdifferenz der Wärmeübergangskoeffizient der Struktur ein gleichbleibend hohes Niveau.

[0026] In vorteilhafter Ausgestaltung der Erfindung kann zumindest eine lokale Öffnung pro Segment vorhanden sein. Diese Mindestanforderung gewährleistet noch, dass beim Verdampfungsprozess in einem Kanalsegment entstehende Gasblasen nach außen entweichen können. Die lokalen Öffnungen sind in Größe und Gestalt so ausgeführt, dass auch flüssiges Medium hindurchtreten und in den Kanalabschnitt nachströmen kann. Damit der Verdampfungsvorgang bei einer lokalen Öffnung aufrechterhalten werden kann, müssen die gleichen Mengen Flüssigkeit und Dampf folglich in zueinander entgegengesetzten Richtungen durch die Öffnung transportiert werden. Üblicherweise werden Flüssigkeiten verwendet, die den Rohrwerkstoff gut benetzen. Eine derartige Flüssigkeit kann aufgrund des Kapillareffekts durch jede Öffnung in der äußeren Rohroberfläche auch gegen einen Überdruck in die Kanäle eindringen.

[0027] Zudem kann der Quotient der Anzahl der lokalen Öffnungen zur Anzahl der Segmente 1:1 bis 6:1 betragen. Weiter bevorzugt kann dieser Quotient 1:1 bis 3:1 betragen. Die zwischen den Rippen befindlichen Kanäle sind durch Material der oberen Rippenbereiche im Wesentlichen verschlossen, wobei die so entstehenden Hohlräume der Kanalsegmente durch Öffnungen mit dem umgebenden Raum verbunden sind. Diese Öffnungen können auch als Poren ausgestaltet sein, welche in gleicher Größe oder auch in zwei oder mehr Größenklassen ausgeführt sein können. Bei einem Verhältnis, bei dem mehrere lokale Öffnungen auf ein Segment ausgebildet sind, können sich besonders Poren mit zwei Größenklassen eignen. Nach einem regelmäßigen, sich wiederholenden Schema folgt entlang der Kanäle beispielsweise auf jede kleine eine große Öffnung. Durch diese Struktur wird eine gerichtete Strömung in den Kanälen erzeugt. Flüssigkeit wird bevorzugt durch die kleinen Poren mit Unterstützung des Kapillardrucks eingezogen und benetzt die Kanalwände, wodurch dünne Filme erzeugt werden. Der Dampf sammelt sich im Zentrum des Kanals an und entweicht an den Stellen mit dem geringsten Kapillardruck. Gleichzeitig müssen die großen Poren so dimensioniert werden, dass der Dampf ausreichend schnell entweichen kann und die Kanäle dabei nicht austrocknen. Die Größe und Häufigkeit der Dampfporen im Verhältnis zu den kleineren Flüssigkeitsporen sind dann aufeinander abzustimmen.

[0028] In bevorzugter Ausführungsform der Erfindung können die Auskragungen als erste Zusatzstrukturen zumindest aus Material des Kanalgrunds zwischen zwei integral umlaufenden Rippen ausgeformt sein. Hierdurch verbleibt eine stoffschlüssige Verbindung für einen guten Wärmeaustausch von der Rohrwandung in die jeweiligen Strukturelemente erhalten. Zudem kann eine Auskragung auch zusätzlich aus Material der Rippenflanke bestehen. Die Segmentierung des Kanals aus einem einheitlichen Material des Kanalgrunds ist für den Verdampfungsprozess besonders günstig.

[0029] In besonders bevorzugter Ausführungsform können die Auskragungen als erste Zusatzstrukturen eine Höhe zwischen 0,15 und 1 mm aufweisen. Diese Bemessung der Zusatzstrukturen ist auf die Hochleistungsrippenrohre besonders gut abgestimmt und bringen zum Ausdruck, dass die Strukturgrößen der Außenstrukturen bevorzugt im Submillimeter- bis Millimeterbereich liegen.

[0030] Vorteilhafterweise können die Auskragungen asymmetrische Formen aufweisen. Die Asymmetrie der Strukturen erscheint hierbei in einer senkrecht zur Rohrlängsachse verlaufenden Schnittebene. Asymmetrische Formen können, insbesondere wenn eine größere Oberfläche ausgebildet wird, einen zusätzlichen Beitrag zum Verdampfungsprozess leisten. Die Asymmetrie kann sowohl bei Zusatzstrukturen am Kanalgrund wie auch an der Rippenspitze ausgeprägt sein.

[0031] In bevorzugter Ausführungsform der Erfindung können die Auskragungen in einer senkrecht zur Rohrlängsachse verlaufenden Schnittebene einen trapezför-

migen Querschnitt aufweisen. Trapezförmige Querschnitte sind im Zusammenhang mit integral gewalzten Rippenrohrstrukturen technologisch gut beherrschbare Strukturelemente. Geringfügige fertigungsbedingte Asymmetrien der sonst parallelen Grundseiten eines Trapezes können hierbei auftreten.

[0032] Vorteilhafterweise können am Ort der Auskragungen in Richtung der Rohrlängsachse sich gegenüberstehende Werkstoffvorsprünge ausgebildet sein. Die Auskragungen mit den gegenüberstehenden Werkstoffvorsprünge stellen folglich die Schwelle für den Fluiddurchtritt dar.

[0033] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden anhand der schematischen Zeichnungen näher erläutert.

[0034] Darin zeigen:

- Fig. 1 schematisch eine Teilansicht eines Querschnitts eines Wärmeaustauscherrohres mit durch Zusatzstrukturen unterteilten Segmenten,
- Fig. 2 schematisch eine Schrägansicht auf einen Teil der Außenstruktur eines Wärmeaustauscherrohres mit umgelegten Rippenspitzen,
- Fig. 3 schematisch eine Detailansicht von Werkstoffvorsprüngen am Ort einer Auskragung,
- Fig. 4 schematisch eine Detailansicht einer weiteren Ausführungsform von Werkstoffvorsprüngen am Ort einer Auskragung, und
- Fig. 5 schematisch eine Schrägansicht auf einen Teil der Außenstruktur eines Wärmeaustauscherrohres mit sich gegenüberstehenden Werkstoffvorsprüngen am Ort einer Auskragung.

[0035] Einander entsprechende Teile sind in allen Figuren mit denselben Bezugszeichen versehen.

[0036] Fig. 1 zeigt schematisch eine Teilansicht eines Querschnitts eines erfindungsgemäßen Wärmeaustauscherrohres 1 mit durch Zusatzstrukturen 7 unterteilten Segmenten 8. Das integral gewalzte Wärmeaustauscherrohr 1 weist auf der Rohraußenseite schraubenlinienförmig umlaufende Rippen 2 auf, zwischen denen eine Primärnut als Kanal 6 ausgebildet ist. Die Rippen 2 erstrecken sich ohne Unterbrechung kontinuierlich entlang einer Helixlinie auf der Rohraußenseite. Der Rippenfuß 3 steht im Wesentlichen radial von der Rohrwandung 10 ab. Die Rippenhöhe H wird am fertigen Wärmeaustauscherrohr 1 von der tiefsten Stelle des Kanalgrundes 61 ausgehend vom Rippenfuß 3 über die Rippenflanke 4 hinweg bis zur Rippenspitze 5 des vollständig geformten Rippenrohres gemessen.

[0037] Es wird ein Wärmeaustauscherrohr 1 vorgeschlagen, bei dem im Bereich des Kanalgrundes 61, eine Zusatzstruktur 7 in Gestalt von radial nach außen gerichtete Auskragungen 71 angeordnet ist, die in Radialrichtung jeweils durch eine sich zwischen dem Kanalgrund 61 und der Rippenspitze 5 befindende Abschlussfläche 713 begrenzt sind. Diese Auskragungen 71 sind als erste Zusatzstruktur bezeichnet und aus Material der Rohr-

wandung 10 aus dem Kanalgrund 61 geformt. Die Auskragungen 71 sind in bevorzugt regelmäßigen Abständen im Kanalgrund 61 angeordnet und erstrecken sich quer zum Kanalverlauf von einem Rippenfuß 3 einer Rippe 2 zumindest teilweise in Richtung oder vollständig zum in der Figurenebene nicht dargestellten darüber liegenden nächsten Rippenfuß. Am Ort einer Auskragungen 71 sind radial nach außen liegend Werkstoffvorsprünge 72 als zweite Zusatzstruktur 7 angeordnet, die aus Material der Rippenflanken 4 ausgebildet sind. Die Werkstoffvorsprünge 72 sind in Radialrichtung jeweils zwischen einer Abschlussfläche 713 und der Rippenspitze 5 angeordnet, so dass die Werkstoffvorsprünge 72 um die radiale Erstreckung der Auskragungen 71 über dem Kanalgrund 61 des Kanals 6 seitlich an der Rippenflanke 4 liegend ausgebildet sind. Die Werkstoffvorsprünge 72 erstrecken in Axial- und Radialrichtung weiter als in Umfangsrichtung. Auf diese Weise wird die Primärnut als Kanal 6 in regelmäßigen Abständen zumindest teilweise verjüngt. Das dadurch entstehende Segment 8 begünstigt eine Blasenkeimbildung in Verbindung mit den Werkstoffvorsprüngen 72 als Leitstrukturen für den Fluidfluss in besonderer Weise. Der direkte Austausch von Flüssigkeit und Dampf zwischen den einzelnen Segmenten 8 wird zumindest verringert.

[0038] Zusätzlich zur Bildung der Auskragungen 71 am Kanalgrund 61 mit den radial außen liegenden Werkstoffvorsprüngen 72 sind zweckmäßigerweise die Rippenspitzen 5 als distaler Bereich der Rippen 2 derart verformt, dass sie den Kanal 6 in Radialrichtung teilweise mit einer axial umgelegten Rippenspitze 51 verschließen. Die Verbindung zwischen dem Kanal 6 und der Umgebung ist in Form von Poren 9 als lokale Öffnungen ausgestaltet, damit Dampfblasen aus dem Kanal 6 entweichen können. Das Verformen der Rippenspitzen 5 geschieht mit walztechnischen Methoden, die dem Stand der Technik zu entnehmen sind. Die Primärnuten 6 stellen auf diese Weise hinterschnittene Nuten dar. Durch die Kombination der Auskragungen 71 und Werkstoffvorsprünge 72 als Zusatzstrukturen 7 erhält man ein Segment 8 in Form eines Hohlraumes, der sich ferner dadurch auszeichnet, dass er über einen sehr weiten Bereich von Betriebsbedingungen eine sehr hohe Leistungsfähigkeit bei Verdampfung von Flüssigkeiten aufweist. Die Flüssigkeit verdampft innerhalb des Segments 8 unterstützt von Werkstoffvorsprüngen 72 als zusätzliche Fluidleitstrukturen. Der entstehende Dampf tritt an den lokalen Öffnungen 9 aus dem Kanal 6 aus, durch die auch flüssiges Fluid nachströmt. Zum Nachströmen des Fluid können auch gut benetzbare Rohroberflächen eine Hilfe sein.

[0039] Die erfindungsgemäße Lösung bezieht sich auf strukturierte Rohre, bei denen der Wärmeübergangskoeffizient auf der Rohraußenseite gesteigert wird. Um nicht den Hauptanteil des Wärmedurchgangswiderstandes auf die Innenseite zu verlagern, kann der Wärmeübergangskoeffizient auf der Innenseite durch eine geeignete Innenstrukturierung 11 zudem intensiviert werden.

Die Wärmeaustauscherrohre 1 für Rohrbündelwärmeaustauscher besitzen üblicherweise mindestens einen strukturierten Bereich sowie glatte Endstücke und eventuell glatte Zwischenstücke. Die glatten End- bzw. Zwischenstücke begrenzen die strukturierten Bereiche. Damit das Wärmeaustauscherrohr 1 problemlos in den Rohrbündelwärmeaustauscher eingebaut werden kann, darf der äußere Durchmesser der strukturierten Bereiche nicht größer sein als der äußere Durchmesser der glatten End- und Zwischenstücke.

[0040] Fig. 2 zeigt schematisch eine Schrägansicht auf einen Teil der Außenstruktur eines Wärmeaustauscherrohres 1 mit umgelegten Rippenspitzen 51. Zur besseren Veranschaulichung sind nur die zum Verständnis wichtigsten Strukturelemente der Außenstruktur dargestellt. Zusätzlich zur Bildung der Auskragungen 71 am Kanalgrund 61 mit den radial außen liegenden Werkstoffvorsprüngen 72 sind wiederum die Rippenspitzen 5 als distaler Bereich der Rippen 2 derart verformt, dass sie den Kanal 6 in Radialrichtung teilweise mit einer axial umgelegten Rippenspitze 51 verschließen. Die Verbindung zwischen dem Kanal 6 und der Umgebung ist als lokale Öffnungen 9 zum Entweichen von Dampfblasen aus dem Kanal 6 sowie Einstromen von flüssigem Fluid in den Kanal 6 ausgestaltet. Die Primärnuten 6 stellen auf diese Weise wiederum hinterschnittene Nuten dar. Die axial umgelegte Rippenspitze 51 ist aus der Rippe 2 ausgeformt und erstreckt sich so in axialer Richtung über den Kanal 6 hinweg. Mit den Zusatzstrukturen 7 reduziert sich die durchströmbare Querschnittsfläche im Kanal 6 zwischen zwei Rippen 2 lokal besonders effektiv, um dadurch im Betrieb den Fluidfluss im Kanal 6 zu begrenzen.

[0041] Fig. 3 zeigt schematisch eine Detailansicht von Werkstoffvorsprüngen 72 am Ort einer Auskragung 71. Die radial auf eine bevorzugt massive Auskragung 71 der Kanalgrundstruktur aufgesetzten Werkstoffvorsprünge 72 sind aus Material der Rippenflanke 4 durch eine gezahnte Walzscheibe hergestellt, welche sowohl Wandmaterial am Kanalgrund 61 als auch Material an der Rippenflanke 4 umformt. Obwohl Auskragungen 71 und Werkstoffvorsprünge 72 damit aus unterschiedlichen Bereichen der Rohrwandung geformt sind, können die Werkstoffvorsprünge 72 im Wesentlichen einen in radialer Richtung fließenden Übergang zu den beiden Seitenflächen 711 der darunter liegenden Auskragung 71 ausbilden. In diesem Fall verläuft die Auskragung 71 nur in einem Teil des Kanalgrundes 61 und schließt in axialer Rohrrichtung mit einer Stirnfläche 712 ab. Die Werkstoffvorsprünge 72 sind trennwandartig ausgebildet und erstrecken sich angenähert radial und in Richtung der Rohrlängsachse A und beispielsweise in dieser axialen Richtung bis ungefähr zur Kanalmitte ausgeprägt sind. Hierbei kann sich die Abschlussfläche 713 der Auskragung 71 in Richtung der Rohrlängsachse A auch weiter oder sogar über die gesamte Kanalbreite zwischen gegenüberliegenden Rippen erstrecken. In diesem Bereich ausgehend kann der Fluidfluss präziser gesteuert und in beiden in umlaufender Richtung benachbarten

Segmenten 8 zu einer Blasenbildung beitragen. Die Auskragungen 71 mit den aufgesetzten Werkstoffvorsprüngen 72 stellen folglich auch eine Schwelle für den Fluiddurchtritt dar.

[0042] Wie ebenfalls aus Fig. 3 ersichtlich, ist die axiale Erstreckung der Werkstoffvorsprünge 72 etwas kürzer als die axiale Erstreckung der darunter befindlichen Auskragung 71. Hierdurch ergibt sich eine zur Rohrlängsachse A Öffnung für das flüssige Wärmeaustauscherfluid, welches leichter von der Seite her in die benachbarten Segmente 8 zur Unterstützung der Blasenbildung geleitet wird.

[0043] Fig. 4 zeigt schematisch eine Detailansicht einer weiteren Ausführungsform von Werkstoffvorsprüngen 72 am Ort einer Auskragung 71. Die radial auf eine Auskragung 71 der Kanalgrundstruktur aufgesetzten Werkstoffvorsprünge 72 sind aus Material der Rippenflanke 4 durch eine gezahnte Walzscheibe hergestellt, welche sowohl Wandmaterial am Kanalgrund 61 als auch Material an der Rippenflanke 4 umformt. Dabei ist die Konturlinie der sich im Wesentlichen in Axial- und Radialrichtung erstreckenden Werkstoffvorsprünge auch geschwungen oder unregelmäßig ausgeführt sein. Bei dieser Ausführungsform haben die Werkstoffvorsprünge 72 eine sich verändernde Ausdehnung in axialer Richtung. Mit anderen Worten, in radialer Richtung nach außen betrachtet ist ein fließender Übergang in die Rippenflanke 4 realisiert. Insgesamt sind die Flächen der Werkstoffvorsprünge 72 auch etwas in sich gekrümmt. Diese Formen sind gewisse Variationen sonst ebener Flächen, die bezüglich der Oberflächeneigenschaften und des Benetzungsverhaltens des flüssigen Wärmeaustauscherfluids besonders günstig sind. Derartige Strukturen führen das flüssige Wärmeaustauscherfluid in besonders bevorzugter Weise von der Seite her in die benachbarten Segmente 8 zur Unterstützung der Blasenbildung.

[0044] Fig. 5 zeigt schematisch eine Schrägansicht auf einen Teil der Außenstruktur eines Wärmeaustauscherrohres 1 mit sich gegenüberstehenden Werkstoffvorsprüngen 72 am Ort einer Auskragung 71. Zur besseren Veranschaulichung sind nur die zum Verständnis wichtigsten Strukturelemente der Außenstruktur dargestellt. Zusätzlich zur Bildung der Auskragungen 71 am Kanalgrund 61 mit den radial außen liegenden Werkstoffvorsprüngen 72 sind wiederum die Rippenspitzen 5 als distaler Bereich der Rippen 2 derart verformt, dass sie den Kanal 6 in Radialrichtung teilweise mit einer axial umgelegten Rippenspitze 51 verschließen. Die Verbindung zwischen dem Kanal 6 und der Umgebung ist als lokale Öffnungen 9 zum Entweichen von Dampfblasen aus dem Kanal 6 sowie Einstromen von flüssigem Fluid in den Kanal 6 ausgestaltet. Mit den Auskragungen 71 und den Werkstoffvorsprüngen 72 als Zusatzstrukturen 7 reduziert sich die durchströmbare Querschnittsfläche im Kanal 6 zwischen zwei Rippen 2 lokal besonders effektiv, um dadurch im Betrieb den Fluidfluss im Kanal 6 zu begrenzen.

[0045] Die Auskragungen 71 erstrecken sich in diesem

Fälle über die gesamte Kanalbreite zwischen benachbarten Rippen 2 in Richtung der Rohrlängsachse A. Radial nach außen liegend sind am Ort der Auskragungen 71 sich gegenüberstehende Werkstoffvorsprünge 72 ausgebildet. Die Auskragungen 71 mit den aufgesetzten Werkstoffvorsprüngen 72 stellen folglich eine Schwelle für den Fluiddurchtritt dar.

Bezugszeichenliste

[0046]

1	Wärmeaustauscherrohr	
2	Rippen	
3	Rippenfuß	
4	Rippenflanke	15
5	Rippenspitze, distale Bereiche der Rippen	
51	axial umgelegte Rippenspitze	
6	Kanal, Primärmut	
61	Kanalgrund	20
7	Zusatzstrukturen	
71	Auskragung als erste Zusatzstruktur am Kanalgrund	
711	Seitenflächen der Auskrragung	
712	Stirnfläche der Auskrragung	25
713	Abschlussfläche der Auskrragung	
72	Werkstoffvorsprünge	
8	Segment	
9	lokale Öffnung, Poren	
10	Rohrwandung	30
11	Innenstruktur	
A	Rohrlängsachse	
H	Rippenhöhe	

Patentansprüche

1. Metallisches Wärmeaustauscherrohr (1), mit auf der Rohraußenseite ausgeformten integralen Rippen (2) mit Rippenfuß (3), Rippenflanken (4) und Rippenspitze (5), wobei der Rippenfuß (3) radial von der Rohrwandung (10) absteht und zwischen den Rippen (2) ein Kanal (6) mit einem Kanalgrund (61) ausgebildet ist, in dem voneinander beabstandete Zusatzstrukturen (7, 71, 72) angeordnet sind,
 - welche den Kanal (6) zwischen den Rippen (2) in Segmente (8) unterteilen,
 - welche die durchströmbare Querschnittsfläche im Kanal (6) zwischen zwei Rippen (2) lokal reduzieren und dadurch im Betrieb einen Fluidfluss im Kanal (6) zumindest begrenzen, und
 - wobei erste Zusatzstrukturen (7, 71) vom Kanalgrund (61) ausgehende, radial nach außen gerichtete Auskragungen (71) sind, die in Radialrichtung jeweils durch eine sich zwischen dem Kanalgrund (61) und der Rippenspitze (5) befindende Abschlussfläche (713) begrenzt sind, wo-

durch eine radiale Erstreckung der Auskragungen (71) definiert ist,

dadurch gekennzeichnet,

- **dass** am Ort der Auskragungen (71) radial nach außen liegend Werkstoffvorsprünge (72) als zweite Zusatzstrukturen (7, 72) angeordnet sind, die aus Material der Rippenflanken (4) ausgebildet sind,
- **dass** die Werkstoffvorsprünge (72) in Radialrichtung jeweils zwischen einer Abschlussfläche (713) und der Rippenspitze (5) angeordnet sind, so dass die Werkstoffvorsprünge (72) um die radiale Erstreckung der Auskragungen (71) über dem Kanalgrund (61) des Kanals (6) seitlich an der Rippenflanke (4) liegend ausgebildet sind, und
- **dass** sich die Werkstoffvorsprünge (72) in Axial- und Radialrichtung weiter erstrecken als in Umfangsrichtung.

2. Wärmeaustauscherrohr (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Auskragungen (71) und die Werkstoffvorsprünge (72) die durchströmbare Querschnittsfläche im Kanal (6) zwischen zwei Rippen (2) lokal um mindestens 30% reduzieren.

3. Wärmeaustauscherrohr (1) nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Auskragungen (71) und die Werkstoffvorsprünge (72) die durchströmbare Querschnittsfläche im Kanal (6) zwischen zwei Rippen (2) lokal um 40 bis 70% reduzieren.

4. Wärmeaustauscherrohr (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Kanal (6) radial nach außen bis auf einzelne lokale Öffnungen (9) abgeschlossen ist.

5. Wärmeaustauscherrohr (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest eine lokale Öffnung (9) pro Segment (8) vorhanden ist.

6. Wärmeaustauscherrohr (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Auskragungen (71) zumindest aus Material des Kanalgrunds (61) zwischen zwei integral umlaufenden Rippen (2) ausgeformt sind.

7. Wärmeaustauscherrohr (1) nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Auskragungen (71) eine Höhe zwischen 0,15 und 1 mm aufweisen.

8. Wärmeaustauscherrohr (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Auskragungen (71) asymmetrische Formen aufweisen.

9. Wärmeaustauscherrohr (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Auskragungen (71) in einer senkrecht zur Rohrlängsachse (A) verlaufenden Schnittebene einen trapezförmigen Querschnitt aufweisen.
10. Wärmeaustauscherrohr (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** am Ort der Auskragungen (71) in Richtung der Rohrlängsachse (A) sich gegenüberstehende Werkstoffvorsprünge (72) ausgebildet sind.

Claims

1. Metal heat exchange pipe (1) having integral ribs (2) which are formed on the outer pipe side and which have a rib base (3), rib flanks (4) and rib tips (5), wherein the rib base (3) protrudes radially from the pipe wall (10) and there is formed between the ribs (2) a channel (6) which has a channel base (61) and in which there are arranged mutually spaced apart additional structures (7, 71, 72),

- which subdivide the channel (6) between the ribs (2) into segments (8),
- and which locally reduce the through-flowable cross-sectional surface-area in the channel (6) between two ribs (2) and thereby at least limit a fluid flow in the channel (6) during operation, and
- wherein first additional structures (7, 71) are radially outwardly directed projections (71) which extend from the channel base (61) and which are delimited in the radial direction in each case by means of a terminal face (713) which is located between the channel base (61) and the rib tip (5), whereby a radial extent of the projections (71) is defined,

characterised in that

- at the location of the projections (71) radially external material projections (72) are arranged as second additional structures (7, 72) which are formed from the material of the rib flanks (4),
- **in that** the material projections (72) are arranged in the radial direction in each case between a terminal face (713) and the rib tip (5) so that the material projections (72) are formed by the radial extent of the projections (71) above the channel base (61) of the channel (6) so as to be located laterally on the rib flank (4), and
- **in that** the material projections (72) extend further in the axial and radial direction than in the circumferential direction.

2. Heat exchange pipe (1) according to claim 1, **characterised in that** the projections (71) and the material projections (72) reduce the through-flowable cross-sectional surface-area in the channel (6) be-

tween two ribs (2) locally by at least 30%.

3. Heat exchange pipe (1) according to claim 1 or 2, **characterised in that** the projections (71) and the material projections (72) reduce the through-flowable cross-sectional surface-area in the channel (6) between two ribs (2) locally by from 40 to 70%.
4. Heat exchange pipe (1) according to any one of claims 1 to 3, **characterised in that** the channel (6) is closed radially outwards with the exception of individual local openings (9).
5. Heat exchange pipe (1) according to any one of claims 1 to 4, **characterised in that** at least one local opening (9) per segment (8) is provided.
6. Heat exchange pipe (1) according to any one of claims 1 to 5, **characterised in that** the projections (71) are formed at least from the material of the channel base (61) between two integrally extending ribs (2).
7. Heat exchange pipe (1) according to claim 6, **characterised in that** the projections (71) have a height between 0.15 and 1 mm.
8. Heat exchange pipe (1) according to any one of claims 1 to 7, **characterised in that** the projections (71) have asymmetrical forms.
9. Heat exchange pipe (1) according to any one of claims 1 to 8, **characterised in that** the projections (71) have a trapezoidal cross-section in a plane of section which extends perpendicularly to the longitudinal pipe axis (A).
10. Heat exchange pipe (1) according to any one of claims 1 to 9, **characterised in that** mutually opposing material projections (72) are formed at the location of the projections (71) in the direction of the longitudinal pipe axis (A).

Revendications

1. Tube d'échangeur de chaleur (1) métallique, avec des nervures (2) intégrales formées sur le côté extérieur de tube avec un pied de nervure (3), des flancs de nervure (4) et une pointe de nervure (5), dans lequel le pied de nervure (3) dépasse radialement depuis la paroi de tube (10) et entre les nervures (2) est conçu un canal (6) avec une base de canal (61) dans lequel sont agencées des structures additionnelles (7, 71, 72) espacées les unes des autres,
- lesquelles subdivisent en segments (8) le canal (6) entre les nervures (2),

- lesquelles réduisent localement la surface de section transversale pouvant être traversée dans le canal (6) entre deux nervures (2) et au moins délimitent ainsi pendant le fonctionnement un flux de fluide dans le canal (6), et
- dans lequel des premières structures additionnelles (7, 71) sont des protubérances (71) partant de la base de canal (61) et orientées radialement vers l'extérieur qui sont respectivement délimitées dans la direction radiale par une surface de terminaison (713) se trouvant entre la base de canal (61) et la pointe de nervure (5), moyennant quoi est définie une extension radiale des protubérances (71),
- caractérisé en ce que**
- à l'emplacement des protubérances (71), en tant que deuxièmes structures additionnelles (7, 72) sont agencées des protubérances de matière (72) se situant radialement vers l'extérieur, qui sont conçues dans le matériau des flancs de nervure (4),
- les protubérances de matière (72) sont respectivement agencées dans la direction radiale entre une surface de terminaison (713) et la pointe de nervure (5), de sorte que les protubérances de matière (72) soient conçues de façon à se situer latéralement contre le flanc de nervure (4), autour de l'extension radiale des protubérances (71) et pardessus la base de canal (61) du canal (6), et
- les protubérances de matière (72) s'étendent davantage dans la direction axiale et radiale que dans la direction circonférentielle.
2. Tube d'échangeur de chaleur (1) selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les protubérances (71) et les protubérances de matière (72) réduisent localement d'au moins 30 % la surface de section transversale pouvant être traversée dans le canal (6) entre deux nervures (2).
 3. Tube d'échangeur de chaleur (1) selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** les protubérances (71) et les protubérances de matière (72) réduisent localement de 40 % à 70 % la surface de section transversale pouvant être traversée dans le canal (6) entre deux nervures (2).
 4. Tube d'échangeur de chaleur (1) selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** le canal (6) est terminé radialement vers l'extérieur à l'exception d'ouvertures (9) locales individuelles.
 5. Tube d'échangeur de chaleur (1) selon l'une des revendications 1 à 4, **caractérisé en ce qu'est** présente au moins une ouverture (9) locale par segment (8).
 6. Tube d'échangeur de chaleur (1) selon l'une des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** les protubérances (71) sont formées au moins dans le matériau de la base de canal (61) entre deux nervures (2) intégralement périphériques.
 7. Tube d'échangeur de chaleur (1) selon la revendication 6, **caractérisé en ce que** les protubérances (71) présentent une hauteur entre 0,15 et 1 mm.
 8. Tube d'échangeur de chaleur (1) selon l'une des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce que** les protubérances (71) présentent des formes asymétriques.
 9. Tube d'échangeur de chaleur (1) selon l'une des revendications 1 à 8, **caractérisé en ce que** les protubérances (71) présentent une section transversale trapézoïdale dans un plan de coupe se déroulant perpendiculairement à l'axe longitudinal de tube (A).
 10. Tube d'échangeur de chaleur (1) selon l'une des revendications 1 à 9, **caractérisé en ce que** deux protubérances de matière (72) se situant à l'opposé l'une de l'autre sont conçues à l'emplacement des protubérances (71), dans la direction de l'axe longitudinal de tube (A).

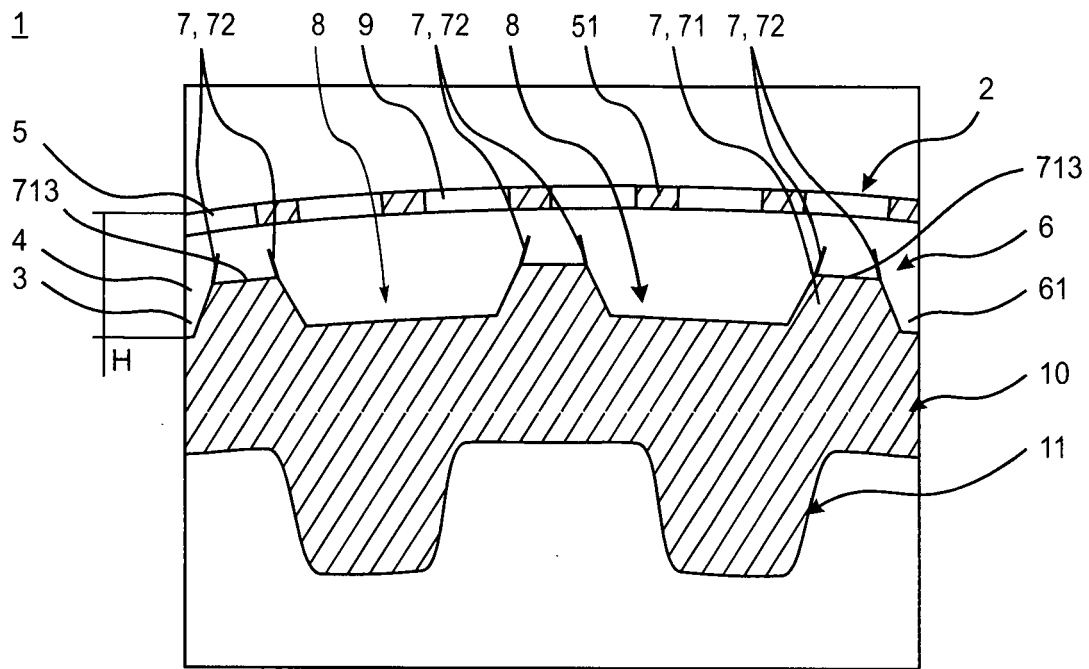


Fig. 1

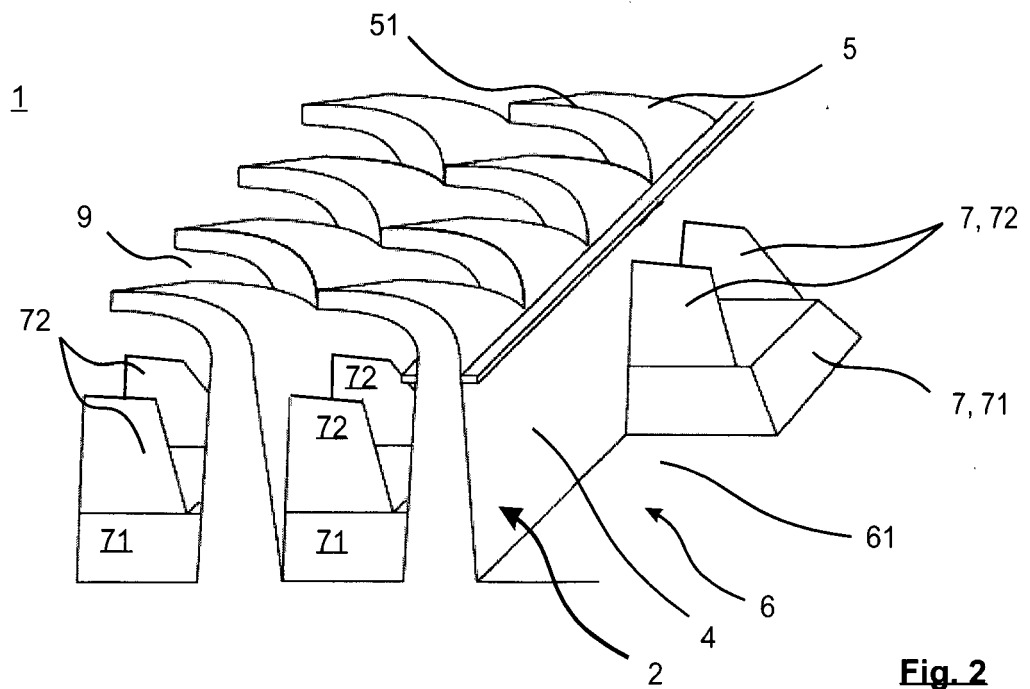


Fig. 2

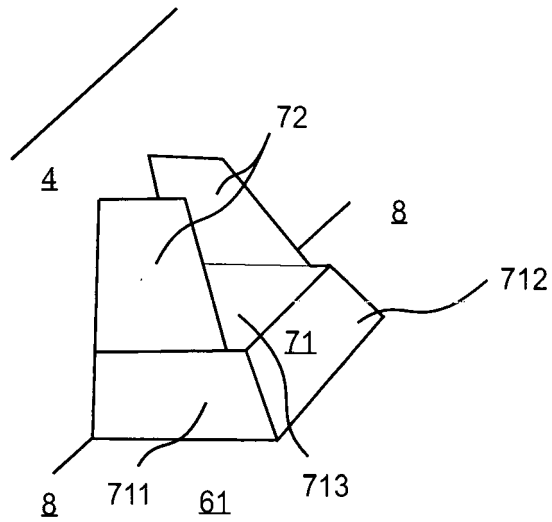


Fig. 3

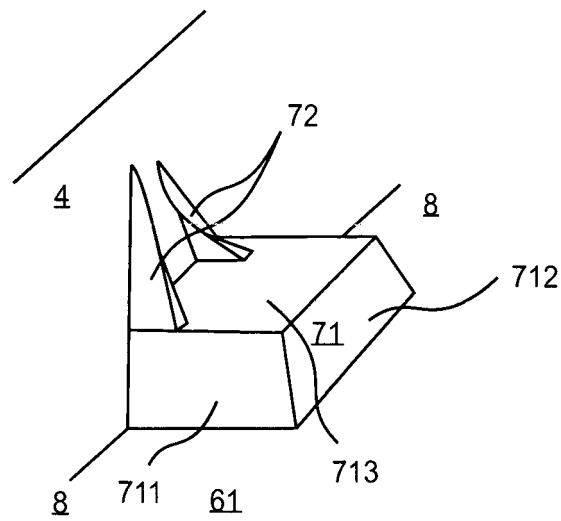


Fig. 4

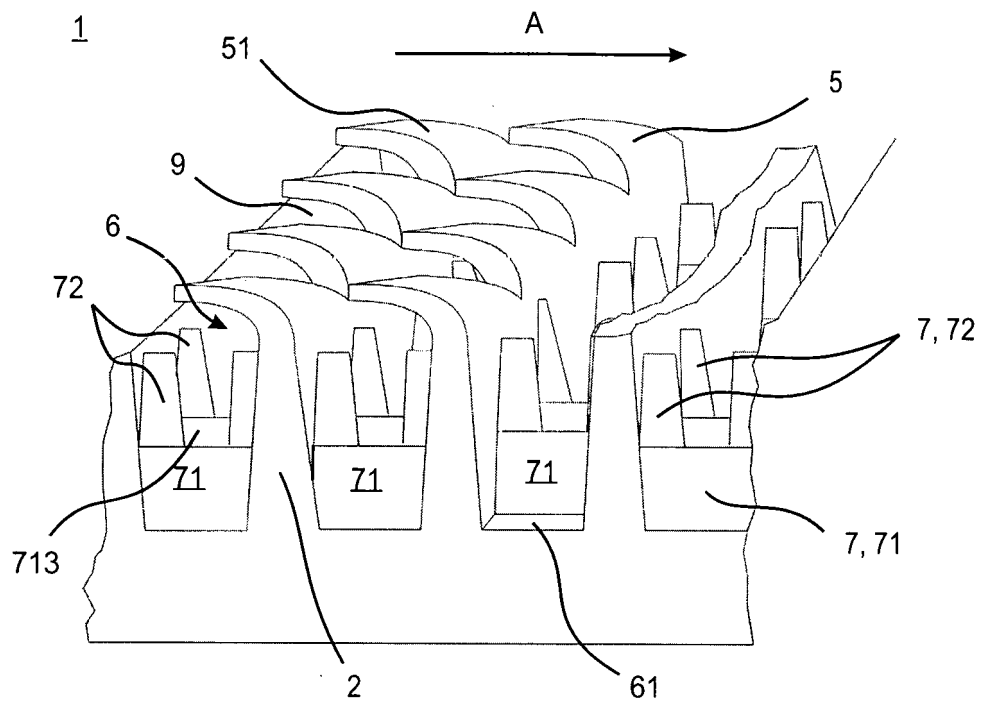


Fig. 5

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 102014002829 A1 **[0001]**
- US 5669441 A **[0004]**
- US 5697430 A **[0004]**
- DE 19757526 C1 **[0004]**
- EP 1223400 B1 **[0005]**
- EP 0222100 B1 **[0006]**
- US 7254964 B2 **[0006]**
- US 5186252 A **[0006]**
- EP 3111153 B1 **[0007]**