



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 76596

(13) C2

(51) МПК (2006)

F01D 11/08

F04D 29/40

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) РЕЦИРКУЛЮЮЧИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ТУРБОКОМПРЕСОРА, АВІАЦІЙНИЙ ДВИГУН ТА СТАЦІОНАРНА ГАЗОВА ТУРБІНА, ОСНАЩЕНІ РЕЦИРКУЛЮЮЧИМ ПРИСТРОЄМ

1

(21) 20040907814
(22) 26.02.2003
(24) 15.08.2006
(86) PCT/DE03/00623, 26.02.2003
(31) 02/1688
(32) 28.02.2002
(33) ZA
(31) 102 38 837.7
(32) 23.08.2002
(33) DE
(46) 15.08.2006, Бюл. № 8, 2006 р.
(72) Зайтц Петер, DE
(73) MTU АЕРО ЕНДЖИНС ГМБХ, DE
(56) US 5137419, 11.08.1992
US 5282718, 01.02.1994
DE 3322295, 02.02.1984
EP 0719908, 03.07.1996
UA 1436, 15.10.2002
SU 1252553, 23.08.1986
SU 1332081, 23.08.1987

(57) 1. Рециркулюючий пристрій для турбокомпресора, що має розташовану концентрично осі турбокомпресора в зоні вільних кінців лопаток лопаткового вінця кільцевої камери, яка у радіальному напрямку граничить з контуром основного проточного каналу, так названого кільцевого простору, і з її сторони, що граничить з контуром основного проточного каналу, по всій її осьовій довжині і по всій її окружності відкрита в сторону цього основного проточного каналу і яка оснащена багатьма розташованими всередині неї і розподіленими по її окружності напрямними елементами, які за рахунок їх відповідного розміщення і надання їм відповідної форми забезпечують у задній в осьовому напрямку частині кільцевої камери аеродинамічне раціональне надходження до неї рециркуляційного потоку, а в передній в осьовому напрямку частині кільцевої камери забезпечують вихід з неї рециркуляційного потоку в заданому напрямку, а також необов'язково його закручування у визначеному напрямку щодо розташованого далі за ходом потоку лопаткового вінця, при цьому в передній і/або задній частині кільцевої камери між її передньою, відповідно задньою стінкою і напрямними елементами є виїмки для проходу потоку в обводному напрямку кільцевої камери, який **відрізняється**

2

тим, що вільні кромки (41-44) напрямних елементів (37-40) за всією їх осьовою довжиною лежать на або поблизу лінії, що обмежує контур (11, 12) основного проточного каналу (9, 10), а осьова середина кільцевої камери (29-32) розташована за ходом потоку перед осьовою серединою вільних кінців (25-28) лопаток.

2. Рециркулюючий пристрій за п. 1, який **відрізняється** тим, що в кількості щонайменше одного пристрою розташований нерухомо щодо корпусу турбокомпресора, тобто виконаний статичним, у зоні щонайменше одного робочого колеса (20, 23, 24) і/або в кількості щонайменше одного пристрою розташований нерухомо щодо маточини робочого колеса турбокомпресора, тобто виконаний обертним, у зоні щонайменше одного напрямного апарата (15).

3. Рециркулюючий пристрій за п. 1 або 2, який **відрізняється** тим, що розташований в одно- або багатоступінчастому турбокомпресорі осьового, діагонального або відцентрового типу.

4. Рециркулюючий пристрій за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що передня в осьовому напрямку стінка (33) і задня в осьовому напрямку стінка (34) кільцевої камери (29) нахилені, починаючи від їхніх кромки (35, 36), що лежать на лінії, що обмежує контур (11) основного проточного каналу (9), на однаковий або різний кут α назустріч потоку, тобто нахилені вперед.

5. Рециркулюючий пристрій за п. 4, який **відрізняється** тим, що кут α нахилу передньої і задньої в осьовому напрямку стінок кільцевої камери, що відлічують від радіального напрямку, складає від 30 до 60°.

6. Рециркулюючий пристрій за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що напрямні елементи (37-40) виконані у вигляді рівних або скривлених металевих пластин постійної товщини або у вигляді просторово скривлених лопаток з перемінною товщиною і з визначеним профілем перерізу.

7. Рециркулюючий пристрій за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що напрямні елементи (37-40), якщо дивитися в осьовому напрямку, радіально нахилені або скривлені в обводному напрямку, при цьому у випадку їх на-

(13) C2

(11) 76596

(19) UA

хилу або скривлення кути β підібрані з таким розрахунком, щоб полегшити з аеродинамічної точки зору, тобто забезпечити аеродинамічне раціональне надходження рециркуляційного потоку в кільцеву камеру (29-32).

8. Рециркулюючий пристрій за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що співвідношення між загальним об'ємом потоку і загальним об'ємом напрямних елементів (37-40) у межах рециркуляційної структури (1-4) підібрано максимально можливим, тобто напрямні елементи (37-40) виконані мінімально можливої товщини, відповідно спрофільовані мінімально тонкими.

9. Рециркулюючий пристрій за будь-яким з попередніх пунктів, у якому напрямні елементи в осьовому напрямку доходять аж до зони вільних кінців лопаток, який **відрізняється** тим, що вільні кромки (44) напрямних елементів (40) щонайменше на ділянці, розташованій радіально напроти вільних кінців (28) лопаток, радіально віддалені від них на таку відстань, при якій при нормальній роботі тур-

бокомпресора виключається зіткнення кінців (28) лопаток з напрямними елементами (40).

10. Рециркулюючий пристрій за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що напрямні елементи (37-40) виконані з металу, такого як сталь або сплав на основі Ni або Co, з легкого металу, такого як Al, або із синтетичного матеріалу, такого як термопласт, реактопласт або еластомер.

11. Рециркулюючий пристрій за п. 10, який **відрізняється** тим, що вільні кромки (41-44) напрямних елементів (37-40), якщо вони виконані з легкого металу або синтетичного матеріалу, доходять аж до зони вільних кінців (25-28) лопаток і допускають можливість зіткнення з ними.

12. Авіаційний двигун, оснащений турбокомпресором щонайменше з одним рециркулюючим пристроєм за будь-яким з попередніх пунктів.

13. Стационарна газова турбіна, оснащена турбокомпресором щонайменше з одним рециркулюючим пристроєм за будь-яким з пп. 1-11.

Даний винахід відноситься до рециркуляційної структури для турбокомпресора відповідно до обмежувальної частини п.1 формули винаходу, а також до авіаційного двигуна і стаціонарної газової турбіни.

Рециркуляційні структури для турбокомпресорів відомі вже досить давно і серед фахівців звичайно називаються пристроями типу "casing treatment" (вбудованими в корпус рециркуляційними пристроями). Основне призначення таких пристроїв полягає в розширенні області аеродинамічно стійкої роботи компресора за рахунок зсуву так названої границі помпажу убік більш високих значень створюваного компресором тиску, тобто убік більш високих значень навантаження компресора. Збурення, відповідальні за виникнення локального зриву потоку і в остаточному підсумку за виникнення помпажу компресора, з боку корпуса виникають на кінцях лопаток робочого колеса однієї, відповідно декількох ступенів компресора, а з боку маточини - на радіально внутрішніх кінцях лопаток робочого колеса, оскільки в цих зонах аеродинамічне навантаження досягає максимальної величини. Повернення "повітряних мас", що знаходяться між вершинами лопаток і обертаються з частотою їх обертання та які володіють зниженою енергією, назад в основний потік зі збільшенням їх енергії дозволяє знову стабілізувати потік у зоні кінців лопаток. Оскільки збурення в потоці звичайно виникають нерівномірно в окружному напрямку ступені компресора, на додаток до переважно осьової рециркуляції з аеродинамічної точки зору варто забезпечити компенсацію таких збурень і в окружному напрямку ступені компресора. Основний недолік відомих пристроїв типу "casing treatment" полягає в тім, що вони незважаючи на забезпечувану ними можливість підвищення порога помпажу одночасно з цим знижують к.к.д. компресора.

У патенті DE 3322295 C3 описаний осьовий вентилятор із пристроєм "casing treatment" зазна-

ченого на початку опису типу. Такий пристрій має кільцеву камеру (поз.8) з нерухомо встановленими в ній направляючими елементами (поз.9). На задньому за ходом потоку ділянці над кінцями робочих лопаток розташована відкрита по всій окружності зона, до якого направляючі елементи не доходять. Характерною рисою подібного пристрою типу "casing treatment" є наявність у ньому замкнутого кільця (поз.7), контур якого лежить приблизно на одній лінії з контуром основного проточного каналу і який відокремлює задню вхідну частину рециркуляційної структури від її передньої вихідної частини й утворює гладку суцільну ділянку поверхні.

Багато в чому схожий з описаним вище пристрою типу "casing treatment" відомий з DE 3539604 C1, причому в цьому випадку в передній і задній частинах кільцевої камери (поз.7) присутня відкрита по всій її окружності зона. В описаному в зазначеній публікації пристрої також передбачено радіально внутрішнє кільце (поз.6).

Більш сучасний пристрій типу "casing treatment" відомий з патенту US 5282718. В описаному в цьому патенті пристрою аеродинамічно удосконалена його кільцева камера (поз. 18, 28) і направляючі елементи (поз.24). Однак і в цьому випадку вхідної і вихідної рециркуляційні потоки відокремлені один від одного масивним, гладким з боку лопаток замкнутим кільцем. Звичайно такі кільця на випадок доторкування з ними вершин лопаток необхідно оснащувати на розташованому напроти лопаток ділянці спеціальним покриттям, що захищає їх від ушкодження при зіткненні з ними вершин лопаток, відповідно сприяє їх припрацюванню.

Існують і інші пристрої типу "casing treatment" з канавками, що проходять паралельно осі, відповідно під кутом до неї, як це описано, наприклад, у US 5137419. Однак такі пристрої в даному описі не розглядаються, оскільки вони через наявність у

них між собою канавок, що не з'єднуються, не дозволяють забезпечити вирівнювання потоку в окружному напрямку.

З врахуванням властивих відомим з рівня техніки рішень недоліків в основу даного винаходу була покладена задача розробити рециркуляційну структуру для турбокомпресора, що дозволяла б значно підвищити поріг помпажу і за рахунок цього істотно розширити область стійкої роботи турбокомпресора без помітного зниження його к.к.д.

Ця задача у відношенні рециркуляційної структури зазначеного в обмежувальній частині п.1 типу вирішується за допомогою відрізняючих ознак цього пункту.

Основна особливість запропонованого у винаході рішення полягає в тому, що кільцева камера з розташованими в ній направляючими елементами виконана цілком відкрито по всій її осевій довжині і по всій її окружності. При цьому відпадає необхідність у застосуванні кільцевих елементів, оснащених покриттями, що захищають їх від пошкодження при зіткненні з вершинами лопаток, і інших елементів. З наведених вище патентних публікацій випливає, що в даній області техніки дотепер основні зусилля були спрямовані на виконання рециркуляційних структур з їх зверненою до основного проточного каналу, тобто до так званого кільцевого простору, сторони гладкими, з мінімальною кількістю щілин і суцільними на ділянці максимально можливої осевої довжини з метою найбільш раціонального з погляду аеродинаміки і зв'язаного лише з мінімальними втратами подовження контуру основного проточного каналу. На відміну від цього запропоноване у винаході рішення приводить до появи в основному проточному каналі щілин, рельєфних поверхонь і т.д. і тому на перший погляд здається невдалим і недоцільним. Однак за результатами проведених дослідів було встановлено, що запропонована у винаході рециркуляційна структура перевершує відомі технічні рішення як з погляду підвищення порога помпажу, так і з погляду к.к.д. турбокомпресора. З погляду аеродинаміки подібний ефект можна пояснити тим, що вільне, природне формування рециркуляційного потоку у відкритій кільцевій камері з вільно виступаючими в ній направляючими елементами і проточними з'єднаннями в її окружному напрямку має набагато більш важливе значення, ніж подовження контуру основного проточного каналу при мінімально можливій кількості щілин. Додаткова перевага, зв'язана з відсутністю в запропонованій у винаході рециркуляційної структурі суцільного кільця, складається у відсутності необхідності оснащувати направляючі елементи спеціальними покриттями, що захищає їх від ушкодження при зіткненні з ними лопаток, відповідно сприяє їх припрацюванню, а також у зменшенні радіальних розмірів турбокомпресора й у зниженні його маси, що зв'язано з визначеними конструктивно-механічними перевагами.

Кращі варіанти виконання рециркуляційної структури, зазначеної в головному пункті формули винаходу, приведені в залежних пунктах формули.

Нижче винахід більш докладний розглянуто з посиланням на приведені спрощені і виконані без дотримання масштабу креслення, на яких показа-

но:

на Фіг.1 - фрагмент зображеного в поздовжньому розрізі компресора осьового типу на ділянці, на якій розташована вбудована в його корпус рециркуляційна структура,

на Фіг.2 - аналогічний показаному на попередньому кресленні фрагмент зображеного в поздовжньому розрізі компресора на ділянці, на якій розташована вбудована в маточину рециркуляційна структура,

на Фіг.3 - фрагмент зображеної в поперечному розрізі рециркуляційної структури, показаної на Фіг.1,

на Фіг.4 - фрагмент показаної на Фіг.1 і 3 рециркуляційної структури у виді радіально зсередини,

на Фіг.5 - фрагмент зображеного в поздовжньому розрізі компресора на ділянці, на якій розташована вбудована в його корпус рециркуляційна структура, трохи модифікована в порівнянні з показаною на Фіг.1 рециркуляційною структурою, і

на Фіг.6 - фрагмент зображеного в поздовжньому розрізі компресора на ділянці, на якій розташована вбудована в його корпус рециркуляційна структура, модифікована в порівнянні з показаними на Фіг.1 і 5 рециркуляційними структурами.

Показана на Фіг.1 рециркуляційна структура 1 вбудована в корпус 5 турбокомпресора і тому може бути названа пристроєм типу "casing treatment" (вбудований в корпус пристрій, англ. "casing" - корпус). Напрямок потоку в основному проточному каналі 9, у якому розташована система лопаток, позначено показаною на кресленні ліворуч стрілкою, тобто потік рухається через цей канал з ліва на право. На показаній на кресленні ділянці потік спочатку набігає на направляючий апарат 13 (вхідний), потім на робоче колесо 20 і потім ще на один направляючий апарат 14 (вихідний). Радіально зовнішній контур 11 основного проточного каналу 9 відповідає внутрішньому контуру корпуса 5 і для наочності умовно позначений на кресленні штрихпунктирними лініями, що продовжують його, ліворуч і праворуч від основного зображення. Статична рециркуляційна структура 1 взаємодіє з робочим колесом 20 і в осьовому напрямку здебільшого розташована перед ним, тобто попереду за ходом потоку. З радіально зовнішньої сторони до основного проточного каналу 9 примикає відкрита з його боку кільцева камера 29, що разом з направляючими елементами 37 і утворює рециркуляційну структуру 1. Вільні кромки 41 направляючих елементів 37 лежать на одній лінії з лінією, що обмежує контур 11 основного проточного каналу 9, або поблизу неї, тобто щонайменше приблизно лежать на лінії, що обмежує внутрішній контур корпуса. Ці направляючі елементи 37 можуть бути виконані з металу, наприклад нікелевого сплаву, з легкого металу, наприклад алюмінію, або із синтетичного матеріалу, такого як термопласти, реактопласти або еластомери. Передня 33 і задня 34 стінки кільцевої камери 29 для зменшення їх аеродинамічного опору позначеному маленькою стрілкою рециркуляційному потоку виконані нахиленими вперед починаючи від їх радіально внутрішніх країв 35, 26.

Кут нахилу передньої стінки позначений через α і може дорівнювати куту нахилу задньої стінки 34

або відрізнитися від нього. Між передньою стінкою 33, направляючими елементами 37 і задньою стінкою 34 передбачені виїмки 45, 46, що на додаток до рециркуляції потоків, що відбуваються переважно в осьовому напрямку, допускають їх рух у кільцевій камері в її окружному напрямку. Позицією 25 позначені вільні кінці лопаток робочого колеса 20, у зоні яких найбільш ймовірно виникнення збурень у потоці.

На відміну від показаного на Фіг.1 варіанта, на Фіг.2 показана інтегрована в маточину 8, що обертається, рециркуляційна структура 2. У показаному на цьому кресленні варіанті в основному проточному каналі 10 розташовані, якщо дивитися з ліва на право, робоче колесо 21, що направляє апарат 15, вільні кінці 26 лопаток якого звернені радіально всередину, і робоче колесо 22. Відповідно до цього подібну рециркуляційну структуру при такому її новому розташуванні варто було б позначити як пристрій типу "hub treatment" (вбудований в маточину пристрій, англ. "hub" - маточина). Ця рециркуляційна структура 2, що складається з кільцевої камери 30 і направляючих елементів 38, з передніми і задніми виїмками 47, 48 взаємодіє з направляючим апаратом 15, що здебільшого розташований за ходом потоку за нею. Оскільки в цьому випадку пристрій типу "hub treatment" обертається, а направляючий апарат 15 залишається нерухомим, частота обертання ротора цілком відповідає відносній частоті обертання. За своїм принципом дії пристрій типу "hub treatment" власне кажучи нічим не відрізняється від пристрою типу "casing treatment". Пристрої обох типів "hub treatment" і "casing treatment" можна також спільно використовувати в одному й тому ж турбокомпресорі, у тому числі й у декількох його ступенях. У розглянутому випадку радіально внутрішній контур 12 основного проточного каналу відповідає зовнішньому контуру маточини 8.

На Фіг.3 більш детально в розрізі показаний фрагмент зображеної на Фіг.1 конструкції. Направляючі елементи 37 нахилені під таким кутом β до радіуса, при якому кінці 25 лопаток робочого колеса 20, що обертається (у позначеному стрілкою напрямку), без істотних втрат направляють рециркуляційний потік у кільцеву камеру 29. При відповідній кривизні направляючих елементів кут їхнього нахилу β може зменшуватися в радіальному напрямку зсередини назовні до нульового значення.

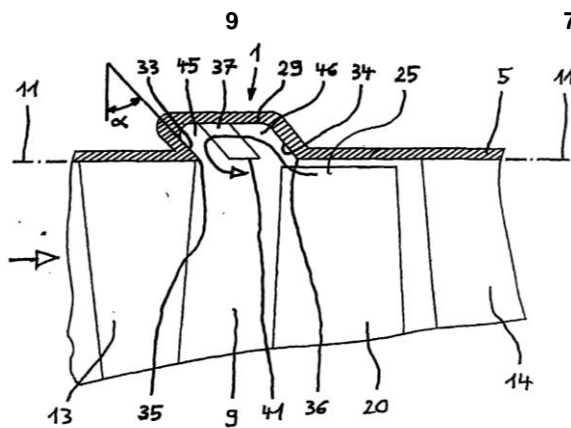
У принципі існує можливість строго радіального розташування направляючих елементів, тобто з кутом їхнього нахилу β рівним 0° , однак таке їх розташування менш доцільне з погляду створюваного ними аеродинамічного опору.

Більш наочне представлення про аеродинамічний профіль і кривизну направляючих елементів 37 дозволяє одержати показана на Фіг.4 проекція, де на додаток до Фіг.3 показаний профіль лопаток робочого колеса 20 разом з напрямком його обертання (позначеним стрілкою). Для фахівця є очевидним, що на виході з кільцевої камери 29 у зоні її передньої за ходом потоку кромки 35 рециркуляційний потік у цьому випадку повинний закручуватися проти обертання робочого колеса 20. Позицією 36 позначена задня за ходом потоку кромка кільцевої камери. Слід зазначити, що в більш простих варіантах здійснення винаходу направляючі елементи 37 можуть бути виконані й у виді рівних або скривлених "металевих пластин" (листових деталей).

Показана на Фіг.5 рециркуляційна структура 3 являє собою пристрій типу "casing treatment" з інтегрованою в корпус 6 турбокомпресора кільцевою камерою 31. У цьому випадку направляючі елементи 39 доходять до передньої стінки кільцевої камери 31, у задній частині якої безпосередньо поблизу кінців 27 лопаток робочого колеса 23 є виїмки 49. Вільні кромки 43 направляючих елементів 39 трохи не доходять до окружності, що описується кінцями 27 лопаток при їх обертанні. Позиціями 16 і 17 позначені направляючі апарати.

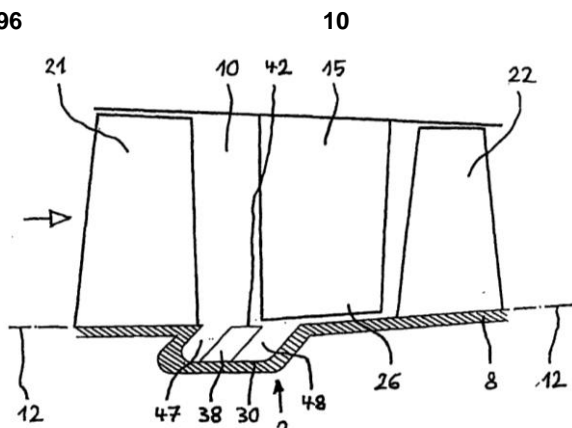
Показана на Фіг.6 рециркуляційна структура 4 з кільцевою камерою 32 і направляючими елементами 40 також являє собою пристрій типу "casing treatment", інтегрований в корпус 7 турбокомпресора і взаємодіючий з робочим колесом 24. На відміну від показаного на Фіг.5 варіанта направляючі елементи 40 у даному випадку доходять до задньої стінки кільцевої камери 32. Виїмки ж 50 у розглянутому варіанті розташовані в передній частині кільцевої камери. Крім цього вільні кромки 44 направляючих елементів 40, оскільки вони доходять до окружності, що описується кінцями 28 лопаток при їх обертанні, щоб уникнути їх зіткнення з цими лопатками виконані на їхній задній ділянці укороченими радіально назовні, тобто виконані у вигляді ступінчатої форми. Очевидно, що кромки можна зробити коротшими на відповідну величину і по всій їх довжині.

В усіх варіантах виконання рециркуляційної структури вільні кромки 41-44 направляючих елементів 37-40 за умови їх виготовлення з м'якого легкого металу або із синтетичного матеріалу (пластику) необов'язково повинні мати укорочене радіально назовні виконання, оскільки в цьому випадку цілком можна допустити їх зіткнення з кінцями 25-28 лопаток без небезпеки їх ушкодження.

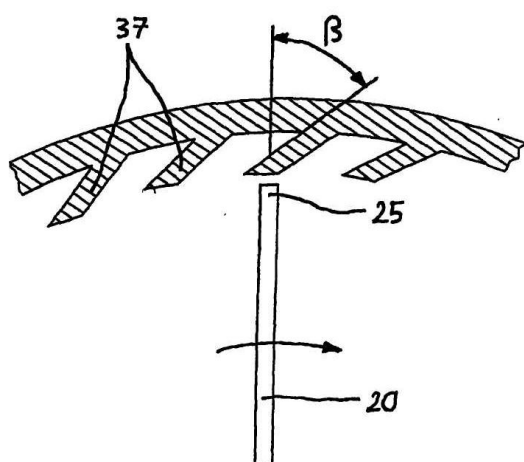


ФІГ. 1

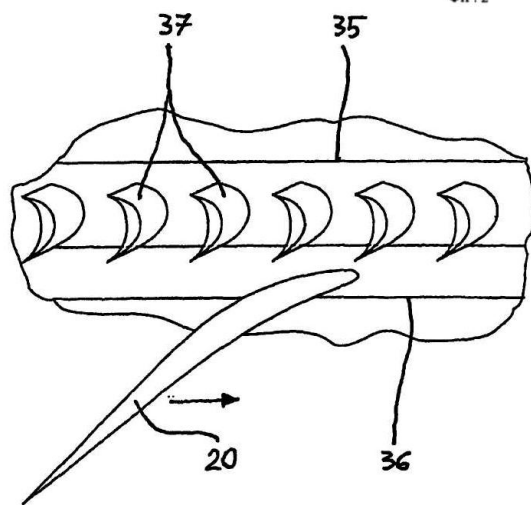
76596



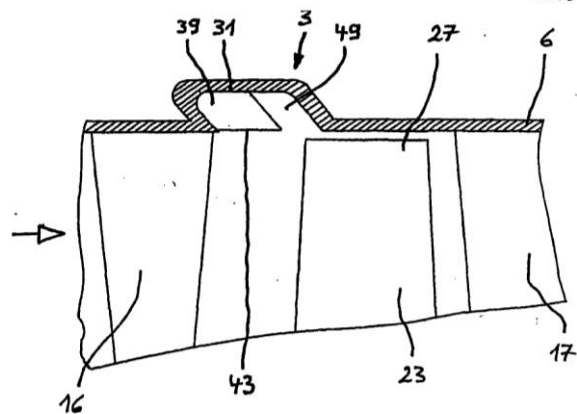
ФІГ. 2



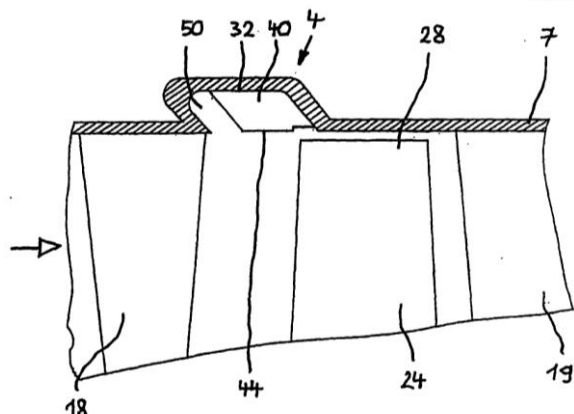
ФІГ. 3



ФІГ. 4



ФІГ. 5



ФІГ. 6