

Даний винахід належить до галузі турбінних лопаток газотурбінних двигунів. Конкретніше, винахід охоплює контури охолодження для таких лопаток.

#### Рівень техніки

Відомо, що рухливі (робочі) лопатки газових турбін газотурбінного двигуна, зокрема турбіни високого тиску, в процесі роботи двигуна піддаються дії вкрай високих температур, що їх мають продукти згоряння. Ці температури сягають значень, які суттєво перевищують граничні температури, що їх можуть витримувати без ушкоджень різноманітні деталі, які стикаються зі вказаними газами, що призводить до обмеження терміну служби цих деталей.

Також відомо, що підвищення температури газів у турбіні високого тиску підвищує ефективність газотурбінного двигуна, тобто відношення тяги двигуна до маси літака, що приводиться в рух цим газотурбінним двигуном. Унаслідок цього мають місце спроби створення лопаток турбін, здатних витримувати дедалі вищі температури.

Відомий метод вирішення даної задачі полягає в обладнанні таких лопаток контурами охолодження, призначеними для зменшення їхньої температури. За допомогою таких контурів у лопатку, як правило, через її хвостовик, вводиться охолодне повітря, що проходить крізь передбачені всередині лопатки порожнини й виводиться через отвори в поверхні лопатки.

Так, у патентному документі FR 2765265 пропонується набір лопаток турбіни, охолоджуваних розподільником із гвинтовою прямою поверхнею за рахунок співударів струменів повітря зі стінками і системи перемичок. Хоча така конструкція забезпечує достатній рівень охолодження, її виготовлення складне, а теплообмін, забезпечуваний потоком охолодного повітря, виявляється неоднорідним і породжує температурні градієнти, що негативно впливають на термін служби лопатки.

#### Розкриття винаходу

Задача, на вирішення якої спрямовано даний винахід, полягає в усуненні відзначених хиб і у створенні конструкції лопатки газової турбіни, контури охолодження якої дозволяють зменшити середню температуру цієї лопатки й уникнути утворення температурних градієнтів з метою збільшення терміну служби лопатки.

Для вирішення поставленої задачі пропонується лопатка газової турбіни для газотурбінного двигуна, що має перо, розташоване в радіальному напрямку між хвостовиком і вершиною лопатки. Перо має передню кромку і задню кромку, з'єднані спинкою і коритом пера, причому в районі вершини лопатки воно перекрите поперечною стінкою, за яку перо виступає в радіальному напрямку, утворюючи ванну. Лопатка за винаходом характеризується, насамперед, тим, що додатково постачена розташованим у її центральній частині першим контуром охолодження, що містить принаймні одну зовнішню порожнину, витягнуту в радіальному напрямку і прилеглу до спинки пера лопатки; принаймні одну внутрішню порожнину, витягнуту в радіальному напрямку і прилеглу до корита пера лопатки; і принаймні одну центральну порожнину, витягнуту в радіальному напрямку і розташовану в центральній частині лопатки між зовнішньою порожниною і внутрішньою порожниною. Перший контур охолодження містить також перший вхідний отвір, розташований на радіальне нижньому краї зовнішньої порожнини для введення охолодного повітря в зовнішню порожнину; другий вхідний отвір, розташований на радіальне нижньому краї внутрішньої порожнини для введення охолодного повітря у внутрішню порожнину; принаймні один перший канал, що з'єднує радіальне верхній край зовнішньої порожнини з радіальне верхнім краєм центральної порожнини; принаймні один другий канал, що з'єднує радіальне верхній край внутрішньої порожнини з радіальне верхнім краєм центральної порожнини; і вихідні отвори, що відкриваються в центральну порожнину і на корито пера лопатки.

Такий центральний розташований перший контур охолодження лопатки забезпечує зниження середньої температури лопатки, зменшуючи при цьому температурні градієнти і сприяючи тим самим збільшенню терміну служби лопатки.

Поперечна стінка лопатки переважно містить випускні отвори, які відкриваються у внутрішню, зовнішню і центральну порожнини, а також у ванну лопатки.

Такі випускні отвори сприяють утворенню на дні ванни лопатки повітряного прошарку для її захисту від гарячих газів.

У оптимальному варіанті внутрішня і зовнішня порожнини першого контуру охолодження містять перемички, розташовані між їхніми бічними стінками для посилення їхнього внутрішнього теплообміну.

Такі перемички також служать для відведення тепла від стінок порожнини, що стикаються з гарячими газами, до холоднішої стінки, суміжної з центральною порожниною, що обмежує температурні градієнти в лопатці.

В оптимальному варіанті виконання лопатки внутрішня порожнина й зовнішня порожнина першого контуру охолодження для посилення внутрішнього теплообміну мають високе характеристичне відношення геометричних розмірів.

Лопатка турбіни переважно містить другий і третій контури охолодження, незалежні один від одного й від першого контуру охолодження. Вони служать для охолодження, відповідно, задньої кромки і передньої кромки лопатки.

#### Стислий опис креслень

Інші характеристики й переваги даного винаходу стануть ясні з нижченаведеного опису, поданого з посиланнями на додані креслення, на яких представлено не обмежувальний приклад здійснення винаходу. На кресленнях:

фіг. 1 зображує в перспективі лопатку за винаходом;

фіг. 2 зображує в розрізі лопатку за фіг. 1;

на фіг. 3 поданий переріз площиною III-III на фіг. 2;

на фіг. 4 поданий переріз площиною IV-IV на фіг. 3;

фіг. 5 зображує схему циркуляції охолодного повітря в різноманітних контурах охолодження лопатки за фіг. 1.

Здійснення винаходу

На фіг. 1 зображена виготовлена, наприклад, з металу робоча лопатка 10 турбіни високого тиску газотурбінного двигуна. Зрозуміло, що даний винахід також може застосовуватися до інших лопаток газотурбінного двигуна, як рухомих, так і до нерухомих.

Лопатка 10 містить аеродинамічну поверхню (перо) 12, розташовану в радіальному напрямку між хвостовиком 14 і вершиною 16 лопатки. Хвостовик 14 лопатки призначений для кріплення до диска ротора турбіни високого тиску.

Перо 12 містить чотири чітко відокремлених зони: передню кромку 18, розташовану з боку надходження гарячих газів, що виходять з камери згоряння газотурбінного двигуна, задню кромку 20, протилежну передній кромці 18, внутрішню бічну поверхню (корито) 22 і зовнішню бічну поверхню (спинку) 24, причому корито 22 і спинка 24 з'єднують передню кромку 18 із задньою кромкою 20.

Поблизу вершини 16 лопатки перо 12 перекрите поперечною стінкою 26. При цьому перо 12 дещо виступає в радіальному напрямку за цю поперечну стінку 26, утворюючи заглиблення 28, надалі називане "ванною". Ця ванна 28, таким чином, має дно, утворене поперечною стінкою 26, і бічні стінки, утворені пером 12. Ванна 28 відкрита в напрямку вершини 16 лопатки.

Відповідно до винаходу лопатка 10, утворена описаним чином, містить перший центральний контур А охолодження лопатки.

Як показано на фіг. 2, перший контур А охолодження містить принаймні одну зовнішню порожнину 30, витягнуту в радіальному напрямку і прилеглу до спинки 24 пера лопатки, принаймні одну внутрішню порожнину 32, витягнуту в радіальному напрямку і прилеглу до корита 22 пера лопатки, і принаймні одну центральну порожнину 34, витягнуту в радіальному напрямку і розташовану в центральній частині лопатки між зовнішньою порожниною 30 і внутрішньою порожниною 32.

Як показано на фіг. 4, зовнішня і внутрішня порожнини 30, 32 розташовані в радіальному напрямку між поперечною стінкою 26, що утворює дно ванни 28, і хвостовиком 14 лопатки. Центральна порожнина 34 також починається від поперечної стінки 26, але займає лише частину висоти лопатки. Крім того, центральна порожнина 34 має найбільший розмір у напрямку від передньої до задньої кромки лопатки.

На радіальне нижньому (тобто найближчому до хвостовика 14 лопатки) краї кожної зовнішньої порожнини 30 передбачений перший впускний отвір 36 для введення охолодного повітря у зовнішню порожнину 30. Аналогічним чином, на радіальне нижньому краї кожної внутрішньої порожнини 32 передбачений другий впускний отвір 38 для введення охолодного повітря у внутрішню порожнину 32.

Щонайменше, один перший канал 40 забезпечує сполучення радіальне верхнього (тобто найближчого до вершини 16 лопатки) кінця зовнішньої порожнини 30 з радіальне верхнім кінцем центральної порожнини 34. Аналогічним чином, принаймні один другий канал 42 забезпечує сполучення радіальне верхнього кінця внутрішньої порожнини 32 з радіальне верхнім кінцем центральної порожнини 34.

Ці перший і другий канали 40, 42, таким чином, утворюють порожнину, розташовану між коритом 22 і спинкою 24 пера 12 і що знаходиться під ванною 28 лопатки.

Нарешті, контур А охолодження містить вихідні отвори 44, що відкриваються в центральну порожнину 34 і на корито 22. На поданому на фіг.2 вигляді в розрізі зображені два таких отвори 44.

Корисна відмінність даного винаходу полягає в тому, що зовнішня і внутрішня порожнини 30 і 32 першого контуру А охолодження мають високе характеристичне відношення (коефіцієнт форми), що збільшує внутрішній теплообмін. Характеристичне відношення охолодної порожнини вважається високим, якщо один з геометричних розмірів (довжина) її поперечного перерізу перевищує інший її геометричний розмір (ширину) принаймні втричі.

Інша корисна відмінність даного винаходу полягає в тому, що зовнішня і внутрішня порожнини 30 і 32 першого контуру А охолодження містять перемички 46, що з'єднують їхні бічні стінки. Як показано на фіг. 2 і 4, перемички 46 перетинають зовнішні і внутрішні порожнини, з'єднуючи їхні бічні стінки, що вступають у зіткнення з гарячими газами, з їхніми бічними стінками, суміжними з центральною порожниною 34.

Перемички дозволяють підвищити турбулентність потоку охолодного повітря в порожнинах, підвищуючи, таким чином, ефективність охолодження.

Вони також дозволяють збільшити ділянку теплообміну між охолодним повітрям і пером лопатки.

Крім того, перемички утворюють теплопроводи, що передають тепло від гарячих стінок порожнин, що стикаються з гарячими газами, до холодніших стінок цих порожнин, суміжних з центральною порожниною 34, що підвищує рівномірність нагрівання лопатки, зменшує температурний градієнт усередині лопатки і, отже, збільшує термін служби лопатки.

Геометрія перемичок 46 (їхній діаметр, крок, переріз, розташування тощо) може варіюватися з метою адаптації термічних умов лопатки до її просторових обмежень. Так, форма перерізу перемичок може бути довільною, наприклад круглою, квадратною або довгастою. Перемички також можуть розташовуватися по всій висоті порожнини в шаховому порядку або в лінію.

Наступна корисна відмінність даного винаходу полягає в тому, що поперечна стінка 26, яка утворює дно ванни 28, містить декілька випускних отворів 48, що відкриваються в зовнішні, внутрішні і центральну порожнини 30, 32 і 34 першого контуру А охолодження, а також у ванну 28.

Випускні отвори 48, таким чином, забезпечують надходження охолодного повітря, що протікає у зовнішніх і внутрішніх порожнинах, для охолодження ванни 28 лопатки. Ванна розташована в гарячій зоні, підданій дії турбулентних потоків гарячих газів, і потребує охолодження.

Слід зазначити, що у варіанті здійснення винаходу, проілюстрованому на кресленнях, перший контур А охолодження містить три зовнішні порожнини 30 і дві внутрішні порожнини 32. Подання повітря в зовнішні і внутрішні порожнини здійснюється незалежним чином, отож, кількість таких порожнин може варіюватися залежно від розмірів і геометрії лопатки. Кількість і розміри порожнин також можуть бути підібрані таким чином, щоб вихідні отвори 44 були розташовані між центральною порожниною 34 і каналом течії гарячих газів.

Також слід зазначити, що перший контур А охолодження не містить вихідних отворів, що виходять на спинку

24 пера лопатки. Справді, введення охолодного повітря в горловину, обмежену лопаткою, з боку, в який тече газовий потік, знизило б ефективність турбіни.

Крім того, лопатка 10 містить також другий контур В охолодження, незалежний від першого контуру А охолодження.

Як показано на фіг. 2 і 3, другий контур В охолодження містить принаймні одну задню порожнину 50, витягнуту в радіальному напрямку і розташовану поблизу задньої кромки 20 лопатки 10. Ця задня порожнина 50 розташована в радіальному напрямку між хвостовиком 14 і поперечною стінкою 26, що утворює дно ванни 28 лопатки.

Другий контур В охолодження також містить розташований у радіальне нижньому краї задньої порожнини 50 вхідний отвір 52 для введення в задню порожнину 50 охолодного повітря.

Нарешті, вихідні прорізи 54 відкриваються в задню порожнину 50 і на корито 22 пера лопатки 10 для випускання охолодного повітря.

Крім вихідних прорізів 54, другий контур В охолодження може містити додаткові вихідні отвори 56, що також відкриваються в задню порожнину 50 і на корито 22 пера лопатки.

Ці зображені на фіг. 1 і 2 додаткові вихідні отвори 56 поліпшують охолодження задньої кромки 20 лопатки, утворюючи біля корита 22 лопатки прошарок холодного повітря.

У районі вершини 16 лопатки другий контур В охолодження в оптимальному варіанті містить принаймні один випускний отвір 58, передбачений у поперечній стінці 26 і що відкривається в задню порожнину 50 і на поверхню вершини 16 лопатки.

Це або ці випускні отвори 58, таким чином, забезпечують охолодження охолодним повітрям, що протікає через задню порожнину 50, стінки ванни 28 лопатки. Випускний отвір або випускні отвори 58 також служать для видалення пилу і бруду, що містяться в охолодному повітрі і що можуть у противному випадку засмітити вихідні прорізи 54 і додаткові вихідні отвори 56.

Наступна корисна відмінність даного винаходу полягає в тому, що принаймні один вихідний проріз 54a, розташований найближче до вершини 16 лопатки, нахилений до вершини 16 лопатки під кутом  $\beta$ , тоді як інші вихідні прорізи 54 розташовані, по суті, паралельно осі газотурбінного двигуна (фіг. 3).

Кут нахилу  $\beta$  визначений відносно до осі газотурбінного двигуна (не зображена). Наприклад, цей кут нахилу може складати від  $5^\circ$  до  $50^\circ$ , а в кращому варіанті складати від  $10^\circ$  до  $30^\circ$  відносно до осі газотурбінного двигуна.

У кращому варіанті два крайні вихідні прорізи 54a, 54b, найближчі до вершини 16 лопатки, нахилені під цим кутом (3 до вершини 16 лопатки (див. фіг. 3), причому інші вихідні прорізи 54 розташовані, по суті, паралельно осі газотурбінного двигуна.

Розташування цього або цих крайніх вихідних прорізів 54a (54b) під нахилом сприяє поліпшенню охолодження задньої кромки 20 лопатки 10 у районі вершини 16 лопатки. Оскільки найближчі до вершини 16 лопатки вихідні прорізи 54a, 54b відкриваються в напрямку вершини 16 лопатки (тобто зони, в якій статичний тиск нижчий, аніж у зоні за заднім краєм лопатки), це дозволяє одержати краще значення коефіцієнта розширення порівняно до традиційних вихідних прорізів, спрямованих тільки в напрямку течії газового потоку від задньої кромки лопатки.

Лопатка 10 турбіни також містить третій контур С охолодження, незалежний від першого і другого контурів А і В охолодження. Цей третій контур С охолодження використовується для охолодження передньої кромки 18 лопатки.

Як показано на фіг. 2 і 3, третій контур С охолодження містить принаймні одну передню порожнину 60, розташовану поблизу передньої кромки 18 лопатки 10 і витягнуту в радіальному напрямку. Ця передня порожнина 60 розташована в радіальному напрямку між хвостовиком 14 лопатки і поперечною стінкою 26, що утворює дно ванни 28 лопатки (див. фіг. 3).

У радіальне нижньому краї передньої порожнини 60 передбачений вхідний отвір 62 для введення в передню порожнину 60 охолодного повітря.

Нарешті, третій контур С охолодження містить вихідні отвори 64, що відкриваються в передню порожнину 60 і на передню кромку 18 корита 22 і спинки 24 пера лопатки.

У кращому варіанті третій контур С охолодження містить принаймні один розташований на поперечній стінці 26 випускний отвір 66, який відкривається в передню порожнину 60 і у ванну 28 лопатки. Цей випускний отвір 66 бере участь в охолодженні ванни 28 і служить для спрямування охолодного повітря від вершини 16 лопатки до ванни 28.

У оптимальному варіанті поперечний переріз випускного отвору 66 перевищує поперечний переріз вихідних отворів 64 третього контуру С охолодження, так що він здатний забезпечувати видалення пилу і бруду, що містяться в охолодному повітрі і можуть у противному випадку засмітити вихідні отвори 64.

Нижче коротко описані деякі загальні особливості другого і третього контурів В і С охолодження лопатки турбіни за винаходом.

Відповідно до однієї з цих загальних особливостей задня порожнина 50 і/або передня порожнина 60 містять дефлектори, розташовані на їхніх зовнішніх і внутрішніх бічних стінках і що сприяють теплообміну з цими стінками.

Так, зображена на фіг. 2 і 3 задня порожнина 50 містить дефлектори 68a, розташовані на її внутрішній бічній стінці, і дефлектори 68b, розташовані на її зовнішній бічній стінці. Аналогічним чином, передня порожнина 60 містить дефлектори 70a, розташовані на її внутрішній бічній стінці, і дефлектори 70b, розташовані на її зовнішній бічній стінці.

Як показано на фіг. 2 і 3, дефлектори 68a, 68b, 70a і 70b задньої і передньої порожнин 50 і 60 відповідно можуть являти собою ребра, в оптимальному варіанті нахилені під кутом  $45^\circ$  відносно до напрямку течії потоку охолодного повітря.

Дефлектори 68a, 70a, розташовані на внутрішній стінці, можуть бути додатково нахилені в напрямку,

протилежному напрямку нахилу дефлекторів 68b, 70b, розташованих на зовнішній стінці. В цьому випадку дефлектори 68a, 70a, розташовані на внутрішній стінці задньої порожнини 50 і передньої порожнини 60, переважно зміщені в радіальному напрямку (тобто розташовані в шаховому порядку) відносно до дефлекторів 68b, 70b, розташованих на зовнішній стінці.

В альтернативному варіанті дефлектори 68a, 68b, 70a і 70b можуть являти собою штирі, розташовані, наприклад, у шаховому порядку або в лінію.

Поза залежністю від форми і розташування, дефлектори 68a, 68b, 70a і 70b служать для збільшення турбулентності потоку повітря в порожнинах з метою посилення теплообміну.

Слід зазначити також, що дефлектори 70a, 70b, розташовані в передній порожнині 60 третього контуру С охолодження, можуть перекриватися або не перекриватися. Перекриття дефлекторів означає таке їхнє розташування, при якому дефлектори 70a, розміщені на внутрішній стінці передньої порожнини 60, перехреснюються з дефлекторами 70b, розміщеними на зовнішній стінці передньої порожнини.

У області передньої кромки 18 лопатки 10 охолодження забезпечується, по суті, відведенням тепла через вихідні отвори 64. При цьому наявність у передній порожнині 60 дефлекторів 70a, 70b може ускладнювати виготовлення вихідних отворів 64 методом механічної обробки і надходження в них охолодного повітря (в разі, якщо вихідний отвір розташований безпосередньо за дефлектором або перетинає його).

Згідно з іншою загальною відмінністю другого й третього контурів В і С охолодження додаткові вихідні отвори 56 другого контуру В охолодження і 64 третього контуру С охолодження можуть мати переріз довільної форми, наприклад круглої, витягнутої або розширюваної. Діаметр і крок розташування (тобто відстань у радіальному напрямку між двома сусідніми отворами) цих вихідних отворів 56, 64 також підібрані для оптимізації охолодження бічних поверхонь (корита і спинки) пера 12 лопатки 10.

У загальному випадку додаткові вихідні отвори 56 другого контуру В охолодження і 64 третього контуру С охолодження забезпечують відведення охолодного повітря з порожнини (задньої порожнини 50 або передньої порожнини 60) у канал течії гарячих газів. Виведене таким чином повітря утворює прошарок холодного повітря, що захищає перо 12 лопатки 10 від гарячих газів, що надходять з камери згоряння.

Принципи охолодження лопатки, які явно впливають з попереднього опису, коротко описані нижче з посиланнями на фіг. 5.

На фіг. 5 схематично подана діаграма руху потоків охолодного повітря в різноманітних контурах А-С охолодження лопатки 10. Ці контури охолодження незалежні один від одного, оскільки кожен з них має власне джерело подання охолодного повітря безпосередньо в контур.

У перший, центральний контур А охолодження охолодне повітря надходить через внутрішні порожнини 30 і зовнішні порожнини 32. Повітря проходить через ці порожнини 30, 32 від хвостовика 14 до вершини 16 лопатки і забезпечує охолодження за допомогою конвекційного теплообміну з дном ванни 28 через випускні отвори 48 перед надходженням у центральну порожнину 34 в районі поперечної стінки 26. Після цього охолодне повітря рухається через центральну порожнину 34 у радіальному напрямку, протилежному напрямку його руху через внутрішні і зовнішні порожнини 30 і 32. Нарешті, повітря виводиться на поверхню корита пера лопатки через вихідні отвори 44, передбачені в цій центральній порожнині.

Слід зазначити, що внутрішні і зовнішні порожнини 30 і 32 незалежні одна від одної і швидкість течії повітря через різні порожнини може бути різною.

В другий контур В охолодження охолодне повітря надходить через задню порожнину 50. Це повітря проходить через задню порожнину 50 від хвостовика 14 до вершини 16 лопатки і виводиться в окіл задньої кромки 20 на поверхню корита пера через вихідні прорізи 54 і, можливо, через додаткові вихідні отвори 56.

Аналогічним чином, у третій контур С охолодження охолодне повітря надходить через передню порожнину 60. Це повітря проходить через передню порожнину 60 від хвостовика 14 до вершини 16 лопатки і виводиться в окіл передньої кромки 18 на поверхню корита і на поверхню спинки пера лопатки через вихідні отвори 64.

Порівняно до відомих контурів охолодження лопаток турбін даний винахід, таким чином, забезпечує можливість експлуатації лопаток при високих температурах на вході турбіни.

За постійних умов експлуатації турбіни даний винахід дозволяє збільшити термін служби лопаток завдяки зниженню їхньої середньої температури. Аналогічним чином, при постійному терміні служби лопаток винахід дозволяє зменшити інтенсивність потоку охолодження лопатки і підвищити ефективність турбіни.

Наявність перемичок у внутрішніх і зовнішніх порожнинах центрального контуру охолодження дозволяє забезпечити більш високу механічну міцність лопатки завдяки наявності з'єднань між стінками, що стикаються з гарячими газами, і стінками, суміжними з центральною порожниною.

Центральний контур охолодження додатково дозволяє розташувати порожнину в центральній частині лопатки, під її ванною. Ця відмінність дозволяє розмістити в зонах, що найбільше потребують охолодження, випускні отвори без будь-яких обмежень, що спрощує охолодження ванни. Вона також вигідна тим, що спрощує виготовлення випускних отворів методом механічної обробки, бо допускає великі відхилення при розташуванні отворів.

Наявність випускних отворів у центральній частині лопатки забезпечує охолодження методом термічного накачування через поперечну стінку, що утворює дно ванни. Ці випускні отвори також формують прошарок повітря, що захищає бічні поверхні лопатки від гарячих газів.

Наявність на задній кромці лопатки одного або двох прорізів, нахилених до вершини лопатки, дозволяє охолоджувати задню кромку в районі вершини лопатки. Вона також сприяє кращому охолодженню верхньої частини задньої порожнини.

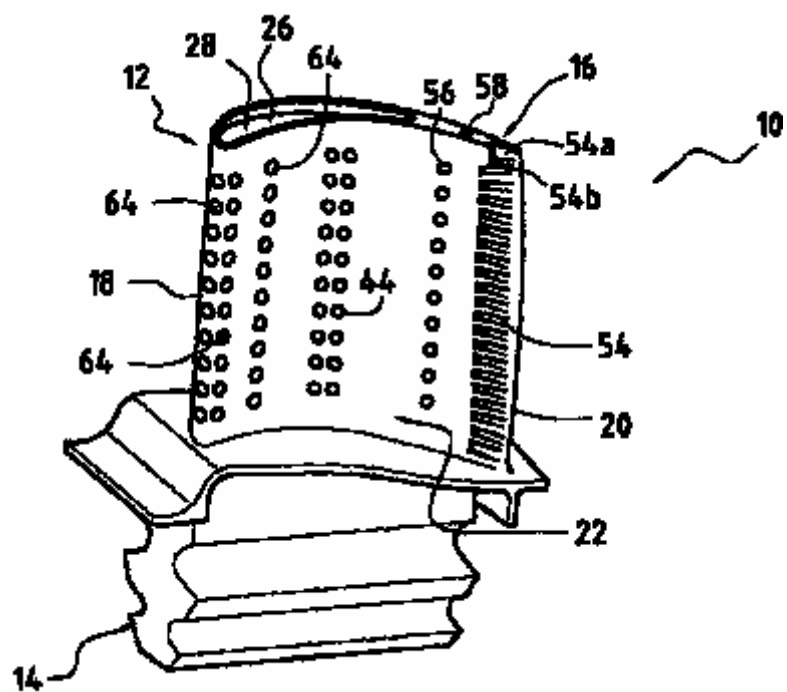


Fig. 1

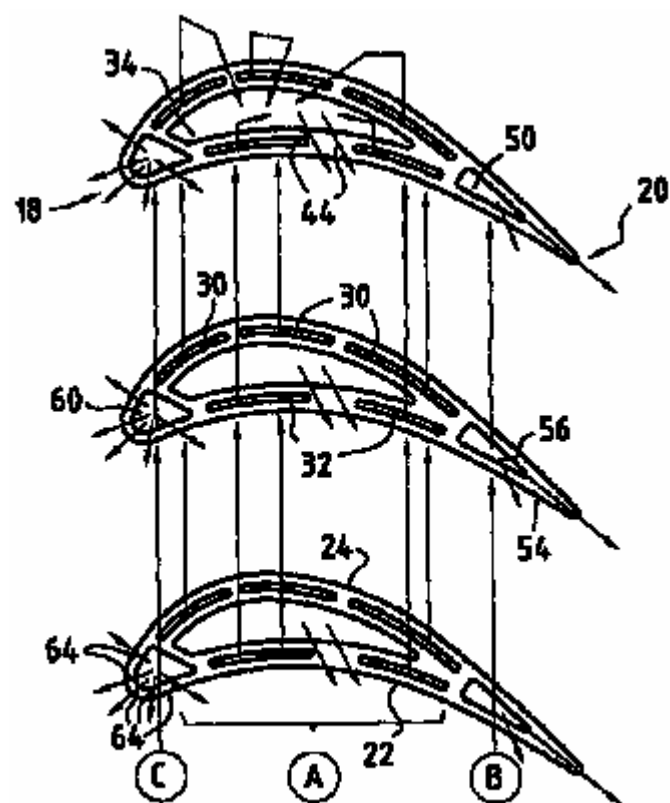


Fig. 5

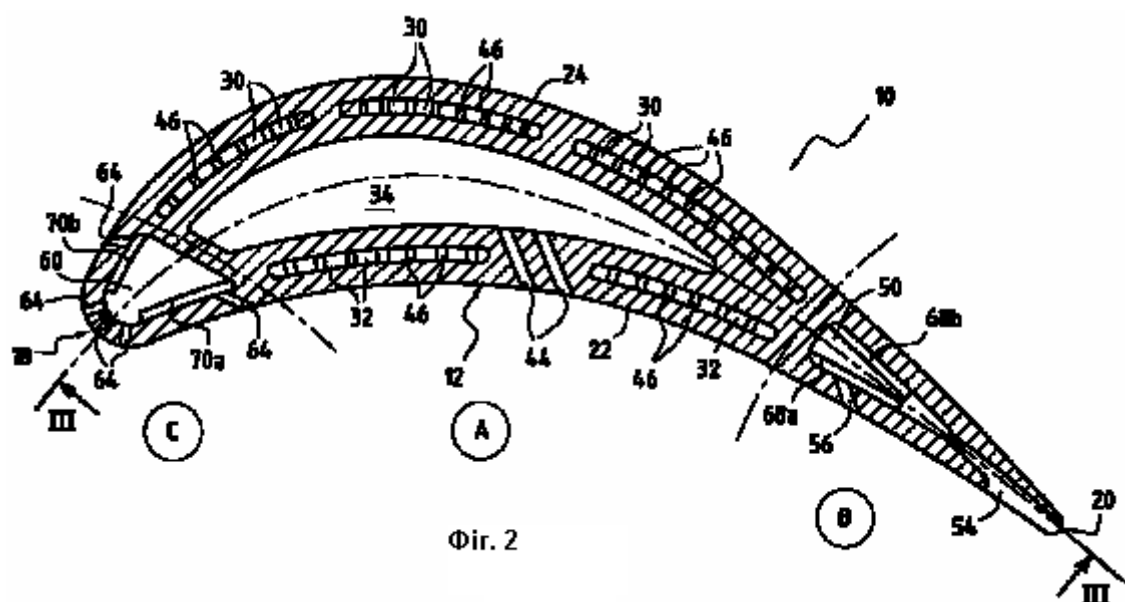


Fig. 2

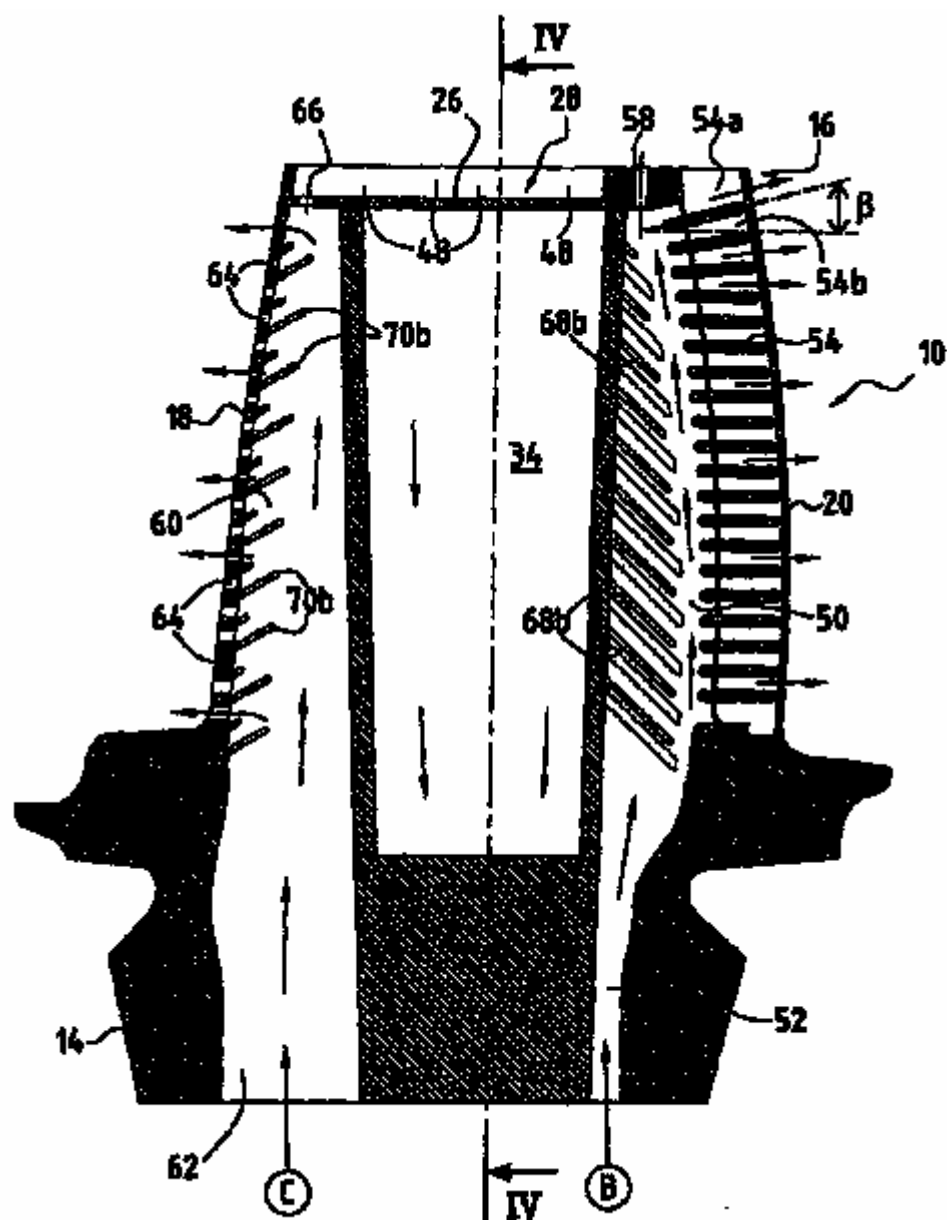


Fig. 3

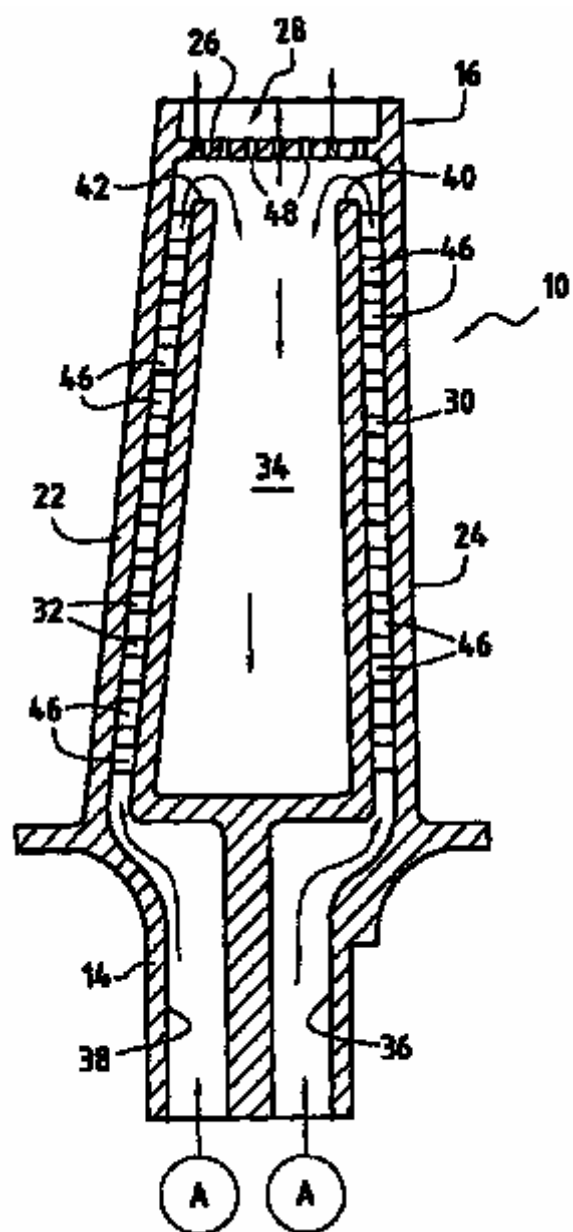


Fig. 4