

Винахід стосується способу виготовлення пригнутих аерогідродинамічних поверхонь роторів з інтегральною конструкцією системи лопаток згідно з обмежувальною частиною пункту 1 формули винаходу.

Ротори з інтегральною конструкцією системи лопаток, нероздільно і без зазору з'єднаних із втулкою, наприклад, зварюванням, куванням, пайкою або склеюванням, мають, як правило, переваги у відношенні їхньої міцності, маси і конструктивних габаритів, а тому їх усе найчастіше застосовують у сучасних конструкціях турбоагрегатів. У зв'язку з цим, мова йде в першу чергу про використання повсюдно прийнятого кріплення з геометричним замиканням робочих лопаток роторів (наприклад, лопаток із хвостовиком ялинкового типу або типу "ластівчин хвіст") у бажаному варіанті з осью протокою. Слід визнати, що, як кріплення/установка, так і ремонт/заміна лопаток у роторах з інтегральною конструкцією системи лопаток складні і вимагають більш високих витрат, ніж конструкції, виконані за принципом геометричного замикання. Щоб одержати подібну конструкцію, необхідні видозмінені або нові способи виготовлення й ремонту, з яких лінійне зварювання тертям являє собою найцікавіший приклад. Незважаючи на свою назву, з металургійного погляду цей метод з'єднання варто віднести скоріше до кування, ніж зварювання. Ще одним важливим способом з'єднання є індукційне зварювання, у ході якого після електроіндукційного нагрівання за рахунок тиску, що утворюється у процесі з'єднання, також відбувається формування дрібнозернистої "кованої структури".

У принципі, також можна використовувати методи паяння і склеювання, але з термічного і механічного погляду зона з'єднання при цьому перетворюється в більшості випадків на "слабке місце".

Здійснення існуючих способів з'єднання вимагає наявності в принаймні одній із з'єднувальних деталей припуску в зоні з'єднання. Це може обумовлюватися тим, у який спосіб затискаються деталі, і впливом прикладеного зусилля, що, наприклад, відбувається під час лінійного зварювання тертям, або можливістю доведення зони з'єднання по периметру, зокрема, з метою усунення геометричних похибок з'єднання. У ході самого процесу з'єднання, як правило, зі стику назовні виступає матеріал (наприклад, грат/облой ("flash") під час зварювання тертям), який потім також доводиться видаляти. У будь-якому випадку здійснюють доведення й оптимізацію форми поверхні, знімаючи матеріал принаймні на ділянці зони з'єднання, а при цьому необхідно враховувати аерогідродинамічні й міцнісні аспекти. Крім того, існує необхідність підганяти поверхні, що виготовляються, під вже існуючі, для чого треба здійснювати збирання і обробку метрологічних даних останніх. З метою забезпечення ефективного виробництва, яке відповідало б вимогам даного моменту, результати вимірів уводять у пам'ять обчислювального пристрою, поверхні, що виготовляються, розраховують у трьох вимірах і формують шляхом знімання матеріалу на верстаті, причому всі три стадії, "вимірювання", "обчислення" і "виготовлення" здійснюються на основі взаємозв'язаної обробки даних.

Із опису винаходу до неакцептованої заявки на європейський патент EP 0837220 A2 відомо про спосіб ремонту спрацьованих вершин лопаток компресорів і турбін, коли спрацьовану вершину лопатки відрізають на визначеній радіальній висоті h і замінюють на замінний (ремонтний) профіль, що точно узгоджується з нею по контуру, кріплення якого здійснюють паянням або зварюванням. Після відділення спрацьованої ділянки вимірюють фактичну геометрію решти пера лопатки на ділянці площини відділення, тобто, майбутньої площини з'єднання, і на підставі результатів цього вимірювання виготовляють замінний (ремонтний) профіль, що точно відповідає цій площині. В оптимальному варіанті для цього використовується метод лазерного різання в трьох вимірах. При цьому поверхня решти пера лопатки продовжується від площини відділення/з'єднання у формі замінного профілю, що спрямовано по периметру радіально і прямолінійно по дотичній. Доводка, якщо вона взагалі потрібна, здійснюється тільки в місці спайки або зварного шва. Вже не кажучи про таке удосконалення, як мінімізація доводки, вищенаведений спосіб має ще одну перевагу, яка полягає в тому, що лопатку після локального ремонту можна використовувати далі, не замінюючи її. Даний спосіб, що являє собою особливий метод "латання", можна також використовувати і для ремонту роторів із інтегральною конструкцією системи лопаток, але виключно на ділянці вершини лопатки. Ця технологія уможливила виготовлення тільки пригнутих поверхонь із прямими за висотою лініями бічної поверхні (різання прямим лазерним променем), тобто, без ніяких доволі сильно скривлених у просторі поверхонь, наприклад, таких, що утворюють ділянку переходу від пера лопатки до втулки. Лазер надає замінному елементу потрібну форму з чистовими розмірами поверхні до кріплення цього елемента на решті пера лопатки. У результаті цього геометричні помилки з'єднання вже майже неможливо скорегувати через відсутність припуску, який можна було б зняти. Обробка замінного елемента/латки під чистовий розмір із використанням різання лазерним променем після з'єднання неможлива, оскільки лазерний промінь, що ріже від вершини лопатки в основному радіально усередину, принаймні в окремих місцях буде пропалювати решту пера лопатки і псувати її,

В описі винаходу до неакцептованої заявки на німецький патент DE 4014808 A1 наведено спосіб автоматизації механічної обробки з технічного погляду. У цьому конкретному випадку система призначена для використання з метою ремонту спрацьованих вершин турбінних лопаток шляхом наплавлення лазером порошкоподібного матеріалу. Вершини лопаток мають спеціальну форму, коли тонкий виступ (стінка), що описує профіль лопатки, радіально виступає над своєю торцевою поверхнею. Зачіпаючи за корпус турбіни або обшивку корпусу, виступ лопатки спрацьовується, чому можна запобігти за допомогою наплавлення. Спочатку спрацьовану торцеву кромку виступу (стінки) лопатки шліфують, тобто, вирівнюють і згладжують. Форму профільованої кільцевої поверхні, утвореної торцевою кромкою, фіксують камерою з використанням оптоелектроніки, а одержані дані перераховують, одержуючи математичну характеристику кільця з локально визначеною товщиною (шириною). Дані безпосередньо використовують для керування процесом зварювання, узгоджуючи кількість матеріалу, що наплавляється в тому чи іншому (потік порошку, інтенсивність лазерного випромінювання), з рештою товщини виступу (стінки). Таким чином, наплавлення матеріалу фактично забезпечує продовження зовнішнього і внутрішнього контурів із принаймні приблизно рівною торцевою поверхнею. При цьому, звичайно, необхідно провести певну додаткову обробку.

У статті "Kompressor- und Turbinenschaufeln automatisch reparieren", опублікованої в німецькому журналі "Werkstatt und Betrieb" №129 (1996), на стор. 672-674 описано ремонт методом наплавлення вершин і кромок

лопаток. Метод передбачає об'ємне сканування в кількох перерізах фактичного контуру відповідної лопатки поблизу валика зварного шва і введення даних у запам'ятовуючий пристрій. Фактичний контур за допомогою розрахунків екстраполюють на ділянку, що наплавляється, і шляхом її обробки на верстаті з цифровим керуванням одержують готову поверхню. Цей процес можна здійснювати також із урахуванням особливості геометрії вершини лопатки, наприклад, вигнутих або ламаних ліній її бічної поверхні. Таку геометрію сканують, наприклад, використовуючи еталонну лопатку, а одержані дані вводять в запам'ятовуючий пристрій. У статті згадується також про "інтелігентну" корекцію геометрії дефектних лопаток на основі геометрії еталонної лопатки. Проте, фахівець не знайде ніяких конкретних указівок на те, як слід робити таку корекцію.

У роторах із інтегральною конструкцією системи лопаток геометрична ділянка для виготовлення пригнаних поверхонь може мати довжину на всю висоту простору, зайнятого кільцевою системою лопаток, тобто від втулки до вершин лопаток. Найшвидшим шляхом здійснення даного способу є виготовлення нових роторів, коли в оптимальному варіанті в основному остаточно оброблені лопатки з'єднують із втулкою з використанням відповідного методу з'єднання і шляхом знімання матеріалу принаймні на ділянці близьких до втулки зон з'єднання формують пригнані поверхні.

Під час експлуатації роторів можлива поява ознак спрацьовування й ушкоджень, які потребують ремонту. У найгіршому випадку доводиться замінити лопатки повністю, однак частіше замінюють більш-менш великі частини/ділянки лопаток. Зрозуміло, найбільших ушкоджень зазнають вхідні і вихідні кромки, а також вершини лопаток. Ушкоджені ділянки відрізають, наприклад, лазерним різакм і замінюють елементами з припуском/латками. У випадку, коли ушкодження ще неглибоко проникли в матеріал лопатки, буде достатнім наростити матеріал із припуском, наприклад, шляхом наплавлення лазером порошкоподібного матеріалу, завдяки чому відпадає необхідність у запасних деталях. На практиці виявилось, що найкраще вдаватися до комбінацій з таких заходів, як "заміна лопатки", "часткова заміна лопатки/латання" і "наплавлення матеріалу", оскільки на триваліших етапах експлуатації можуть з'явитися різноманітні види ушкоджень.

Виходячи з вищенаведеного, під час створення даного винаходу малося на меті розробити спосіб виготовлення пригнаних аерогідродинамічних поверхонь роторів з інтегральною конструкцією системи лопаток, однаково придатний як для виготовлення нових роторів, так і для їхнього ремонту, і застосовний для всієї поверхні лопатки, включаючи місце її переходу у втулку поблизу самої втулки, який, з урахуванням мінімальної кривизни, забезпечив би одержання поверхонь будь-якої кривизни, що не мають уступів і зламів (поздовжніх вигинів), уможливив би різноманітні методи знімання матеріалу, а також попереднє з'єднання або нарощування/наплавлення матеріалу, і здійснювався точно, швидко і ефективно без високих витрат.

Цієї мети можливо досягти шляхом комбінування відмітних ознак п.1 формули винаходу й ознак, наведених в обмежувальній частині цього пункту, які знаходяться в межах даного винаходу.

За ознакою "А", одержання й обробка метрологічних даних і виготовлення (поверхні) на обробному верстаті з постійним затиском ротора відбуваються за один цикл. Завдяки такому технічному рішенню підвищується точність способу і скорочується його тривалість.

За ознакою "Б", обробний верстат "знає" задану розрахункову поверхню кожної оброблюваної ділянки, отже, і необхідну оптимальну форму деталі. За ознакою "В", фактичні метрологічні і задані розрахункові дані систематично перетворюють спочатку на розрахункову об'ємну поверхню, а потім у поверхню деталі, що фактично виготовляється. Докладно ці операції наведено в залежних ознаках а)-в). У залежній ознаці а) визначається спосіб переходу від фактичної поверхні до поверхні, що виготовляється або ремонтується, яка визначається по всьому периметру і виготовляється в деталі в межах фактичної поверхні. У залежній ознаці б) визначаються загальні ознаки поверхні, що виготовляється, з технологічно оптимальною, тобто наскільки це можливо за прийнятних витрат, практичною реалізацією математично/теоретично заданих параметрів.

У залежній ознаці в) розглядаються випадки, коли розрахункову поверхню (розрахункові профілі в розрахунковому положенні) неможливо виготовити або, якщо і можливо, то неповністю, а також встановлюється пріоритет розрахункового профілю по відношенню до розрахункового положення.

Фахівцю буде зрозумілим, що реальні процеси виготовлення на верстаті можуть призводити, а часто-густо так і відбувається, до обумовлених програмно-технічними засобами відхиленням від теоретично/математично заданих параметрів. Проте, використання надійних і високоточних виробничих технологій дозволяє звести подібні відхилення до мінімуму й стабілізувати їх у припустимих межах, запобігаючи спотворюванню аерогідродинамічних і міцніших характеристик. Наприклад, на поверхнях, що виготовляються на верстаті, припустимі мінімальні уступи, борідки і злами/поздовжні вигини, незважаючи на теоретично задану в цих місцях математично безперервну, гладку форму поверхні.

Бажані варіанти здійснення цього способу згідно з головним пунктом формули винаходу наведено в залежних пунктах формули.

Нижче даний винахід докладніше описано на прикладах його здійснення з посиланням на креслення, що додаються до цього, на яких у спрощеній формі без дотримання масштабу показано:

на фіг.1 - поперечний переріз частини ротора з однією або кількома лопатками, форму поверхні якої в основному остаточно оброблено перед з'єднанням;

на фіг.2 - порівняльний поперечний переріз частини ротора із замінним елементом з припуском, з якого формують лопатку;

на фіг.3 - лопатки з поставленою латкою, вид збоку;

на фіг.4 - поздовжній переріз лопатки площиною А-А за фіг.3;

на фіг.5 - ділянка вершини лопатки з наплавленим матеріалом.

На фіг.1 частково наведено втулку 4 і частину лопатки 7 ротора з інтегральною конструкцією системи лопаток. У бажаному варіанті лопатку 7, яка має на радіальному внутрішньому нижньому кінці стовщення 11 для маніпулювання і прикладення сили, приварено лінійним зварюванням тертям до виконаного у формі горбка підвищення втулки 4. Зону з'єднання 14 показано штрихами. Завдяки збільшеному зображенню добре видно, що лопатку 7 було закріплено геометрично неправильно. Як приклад, тут мають місце як бічний зсув по

відношенню до втулки 4 вправо, так і кутова похибка, а саме, нахил вправо з відхиленням від напрямку радіуса.

На фіг.1 проілюстровано ситуацію, що може виникнути як під час виготовлення нового ротора, так і в ході його ремонту. При цьому літерно-цифрові позначення зліва від лопатки відносяться до випадку ремонту, а такі, розташовані справа - виготовлення нового ротора.

Поверхня лопатки 7 перед її приєднанням уже повинна бути в основному остаточно обробленою, наприклад, точним кутанням, і являє собою, таким чином, фактичну поверхню 11 або 13, яку, оскільки вона є опорною поверхнею, не можна змінювати або ушкоджувати. Трохи вище стовщення 11 здійснюють збирання й обробку метрологічних даних по цій фактичній поверхні. При цьому позначення M1 і M3, положення яких показано штрих-пунктирною лінією, вказують на зони вимірювань, які здійснюються на окремих ділянках площини фактичної поверхні з метою визначення форми її профілю в поздовжньому і поперечному напрямках і зміни профілю в радіальному напрямку. Таким чином, зона вимірювання являє собою не лінію, що проходить, наприклад, по периметру профілю на визначеній радіальній висоті, а ділянку площини. Штрих-пунктирні лінії показують лише приблизне положення центрів вимірювальних зон M1 і M3 за висотою.

У випадку ремонту (зліва) реєструють також і форму фактичної поверхні 12 між зоною з'єднання 14 і втулкою 4 на ділянці вимірювальної зони M2.

Між фактичними поверхнями 11 і 12 виготовляють пригнану поверхню 01, яка, плавно і без вигинів переходячи у ці фактичні поверхні, з'єднує їх. Сама ця поверхня також є плавною, не має вигинів і характеризується оптимальною з математичного погляду безперервністю з урахуванням параметрів мінімальної кривизни, які задаються змінно залежно від ділянки поверхні і напрямку. При цьому, якщо необхідно, діє принцип пріоритету розрахункового профілю перед розрахунковим положенням. Критерії виготовлення за цим винаходом, а також існуючі геометричні похибки з'єднання обумовлюють у даному випадку плавну S-подібну вигнуту форму поверхні 01. При цьому зайвий матеріал, що видаляється, позначено крапками.

За аналогічних умов здійснюється і виготовлення нового ротора (справа), але в цьому випадку вимірювання проводять тільки в зоні M3 вище стовщення 11. У новій деталі виконане у формі горбка підвищення на втулці 4 повинно мати припуск, у результаті чого пригнана поверхня 03 від верхньої фактичної поверхні 13 униз переходить у розрахункову поверхню S3, яку також необхідно спочатку виготовити. На якій висоті в радіальному напрямку пригнана поверхня 03 буде переходити в розрахункову поверхню S3, відразу сказати не можна, проте, у даному винаході спостерігається тенденція мінімізації відхилень перехідних ділянок від розрахункових параметрів, тобто, зменшення відхилень з урахуванням мінімальної кривизни.

На фіг.2 наведено варіант ремонту ротора 2, в якому практично всю лопатку було замінено елементом із припуском. У цьому випадку метрологічні розрахунки здійснюються на фактичному контурі 14 між зоною з'єднання 15 і втулкою 5 у вимірювальній зоні M4, що проходить по периметру навколо "профілю горбка". По периметру на певній відстані від вимірюваної фактичної поверхні 14 деталі визначають поверхню R, що ремонтується. Виготовлення пригнаної поверхні 04 починають від вищенаведеної поверхні R, формуючи на якомога низькій в радіальному напрямку висоті перехід до розрахункової поверхні S4, яка продовжується вгору до не показаної вершини лопатки. Поверхню R також виготовляють у межах цього циклу, причому цей процес можна здійснювати як до, так і після виготовлення поверхні 04. Таким чином, у даному випадку виготовляють три "типи" поверхонь (04, R, S4), де поверхня 04 являє собою пригнану поверхню. Спільно ці поверхні утворюють форму власне лопатки 8, причому в цьому випадку доводиться знімати досить багато зайвого матеріалу. Позитивний момент, який компенсує цей недолік, полягає в тому, що виготовлена лопатка практично відповідає розрахунковим параметрам, тобто виконана дуже точно.

Фіг.3 і 4 стосуються так званого латання, тобто заміни частин лопаток на замінні елементи, що, у разі потреби, мають припуск по периметру. На фіг.3 показано збоку лопатку 9, у даному випадку лопатку ротора 3 турбіни, зображеної по периметру, з частиною втулки 6. Вхідну кромку пера лопатки 9 на більшій частині її висоти в радіальному напрямку до самої вершини лопатки 12 було відрізано рівним, з нахилом вправо вгору розрізом і замінено привареною латкою 18 із припуском по периметру, за своєю конфігурацією більш-менш наближеною до форми лопатки, яку можна вирізати, наприклад, із прямокутного прутка або з товстого листа. Зону з'єднання 16 позначено штрихами.

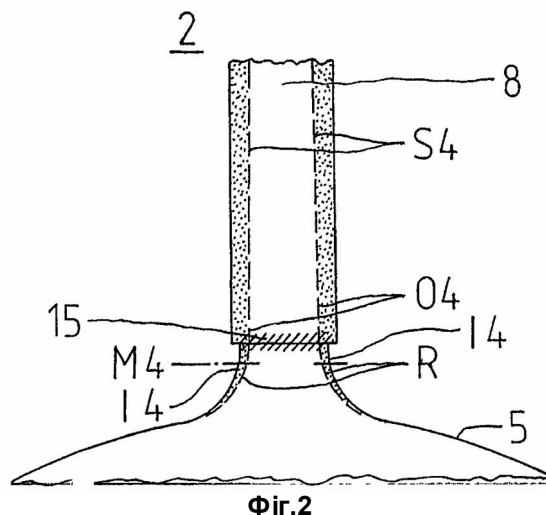
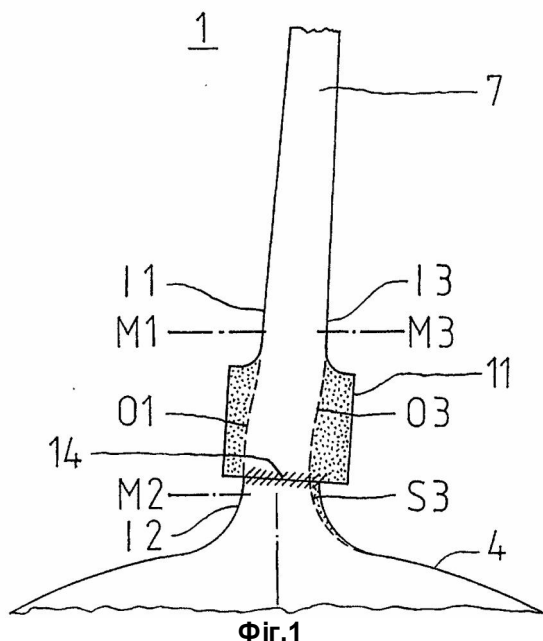
На фіг.4 зображено осьовий/дотичний переріз площиною A-A за фіг.3, на якому можна бачити профіль лопатки. Розташована праворуч від зони з'єднання 16 частина лопатки 9 має незмінну задану форму, її фактичну поверхню 15 вимірюють з обох боків профілю у вимірювальній зоні M5 поблизу зони з'єднання 16, щоб мати можливість у процесі виготовлення підняти ділянку профілю, яка простягається від зони з'єднання 16 уліво. Пригнана поверхня 05 повинна якомога економніше з погляду геометрії переходити в розрахункову поверхню S5, тобто в розрахунковий профіль у розрахунковому положенні, що не завжди можливо. Пригнану поверхню, принаймні, наскільки це можливо, наближають до розрахункової поверхні, при цьому узгодження з розрахунковим профілем, тобто розрахунковою формою, є пріоритетним перед узгодженням із розрахунковим положенням ("розрахунковий профіль має пріоритет перед розрахунковим положенням"). Ставити латку способом, наведеним на фіг.3 і 4, в принципі, можна в будь-якому місці лопатки, в тому числі усередині, наприклад, у формі пластини на відповідному отворі в лопатці. Таким чином, зона з'єднання може бути як вигнутою, бажано у формі частини окружності, так і замкнутою, наприклад, на зразок повної окружності. При цьому латка завжди являє собою замінний елемент із визначеною формою і принаймні локальним припуском для усунення ушкоджень лопатки, що мають значний об'єм.

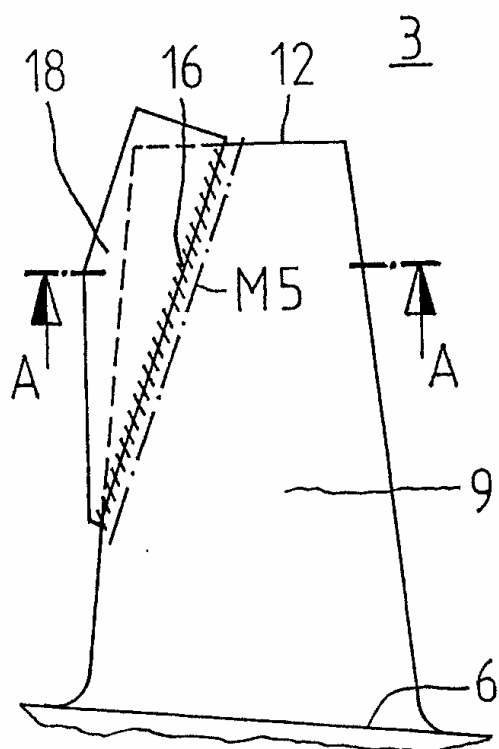
На відміну від вищенаведеного варіанта існують види ушкоджень, коли матеріал лопатки руйнується переважно на поверхневій ділянці, наприклад, у результаті механічного торкання частин статора, впливу присутніх у газовому потоці частинок, що викликають ерозійну корозію, або корозійного впливу гарячих газів. У цьому випадку може виявитися доцільнішим після "згладжувального" знімання ушкодженої поверхні деталі нарощувати відсутній матеріал без його формування, зокрема, у розплавленому стані шляхом зварювання або паяння. Одним із найоптимальніших способів виготовлення з порівняно невеликим температурним

навантаженням на деталь є лазерне наплавлення порошкового матеріалу.

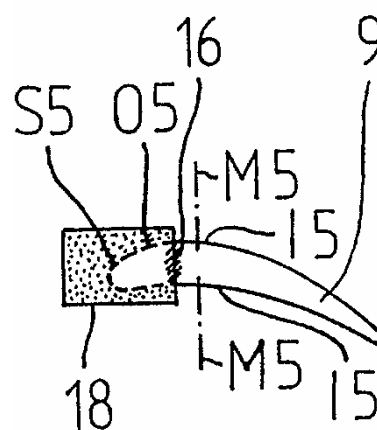
На фіг.5 зображено варіант ремонту шляхом наплавлення матеріалу на вершину 13 лопатки 10, зокрема, наплавлення матеріалу 19 із припуском, як з боків, так і зверху. На фігурі показано поперечний переріз частини лопатки, паралельний осі ротора. Заштрихована зона з'єднання 17 на верхньому кінці укороченої лопатки 10 повинна була б в оптимальному варіанті поширюватися на весь поперечний переріз наплавлення матеріалу 19, оскільки останній нарощують виключно методом зварювання. Але, для того, щоб чіткіше зобразити інші деталі усередині наплавлення 19, довелося відмовитися від продовження штрихування. Під зоною з'єднання 17 здійснюється вимірювання фактичної поверхні 16 у вимірювальній зоні M6 по периметру навколо профілю лопатки, а зібрані дані обробляються на обчислювальній техніці. Виготовляється пригнана поверхня 06, яка переходить у розрахункову поверхню S6, тобто, така, що якнайкраще узгоджується з останньою (і в цьому випадку "розрахунковий профіль має пріоритет перед розрахунковим положенням"). Найпростішим варіантом виготовлення пригнаної поверхні можна було б вважати прямолінійне по дотичній подовження фактичної поверхні, у даному випадку поверхні 16, по периметру профілю вгору до вершини лопатки, тобто, з математичного погляду, завдання в напрямку вгору "нескінченної" (∞) мінімальної кривизни. Здійснення такого варіанту може мати сенс у тих випадках, коли висота наплавлення матеріалу в радіальному напрямку дуже мала, тобто перехід у напрямку розрахункової поверхні або розрахункового профілю практично неможливий. При цьому слід звернути увагу також і на те, наскільки фактична поверхня поблизу зони з'єднання відхиляється від розрахункової поверхні.

На фіг.5 штриховою лінією з короткими штрихами позначено додаткову розрахункову поверхню S7, що являє собою додатковий об'єм матеріалу, що знімається з поверхні S6 (ділянка з рідкішими крапками). Цей варіант стосується лопаток із східчастою зміною профілю у напрямку вершини, у результаті чого "каплеподібний профіль" переходить у дуже тонкий профіль із практично постійною товщиною по довжині і відповідно вигнутим боком розрідження лопатки.

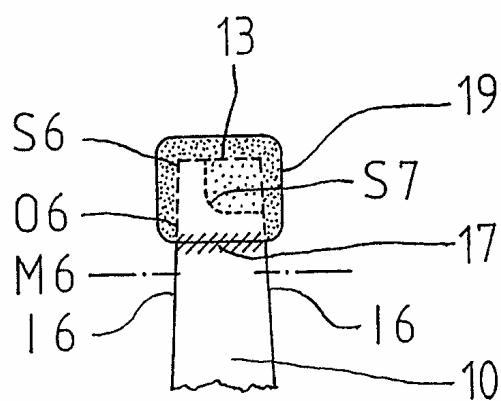




Φir.3



Φir.4



Φir.5