



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **123802** (13) **C2**  
(51) МПК

**B23K 26/352** (2014.01)

**B23K 26/0622** (2014.01)

**C22F 1/18** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ"

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

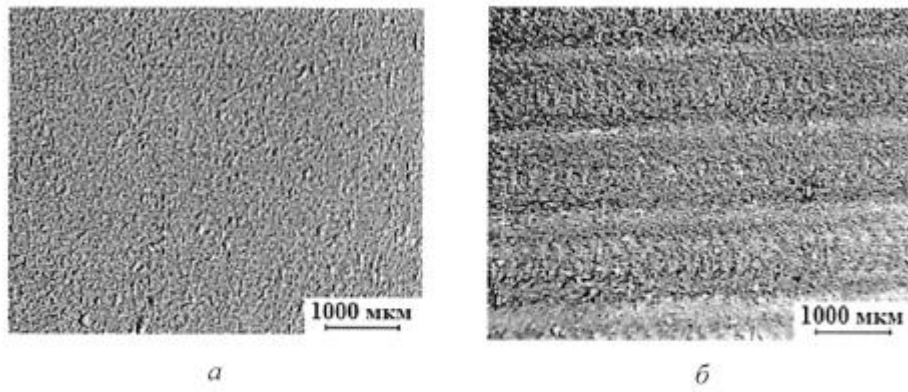
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>(21) Номер заявки: <b>а 2019 04677</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>02.05.2019</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>03.06.2021</b></p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: <b>10.10.2019, Бюл.№ 19</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>02.06.2021, Бюл.№ 22</b></p> | <p>(72) Винахідник(и):<br/><b>Гіржон Василь Васильович (UA),<br/>Куш Ольга Василівна (UA)</b></p> <p>(73) Володілець (володільці):<br/><b>ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ<br/>УНІВЕРСИТЕТ,</b><br/>вул. Жуковського, 66, м. Запоріжжя, 69600 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:<br/>Плешаков Е.І. Вплив лазерного гартування й науглецювання на структуру й властивості поверхневого шару титанового сплаву ВТ3-1 // Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. - 2000. - № 394. - С. 138-142<br/>UA 114036 C2, 10.04.2017<br/>UA 117183 C2, 25.06.2018<br/>RU 2183692 C2, 20.06.2002<br/>Формування структури поверхневих шарів алюмінієвих сплавів під дією імпульсної лазерної обробки: автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.13 / І.В. Танцюра; Київ. нац. ун-т ім. Т.Шевченка. - К., 2009. - 19 с.<br/>JP H06212395 A, 02.08.1994<br/>US 2017240985 A1, 24.08.2017<br/>US 2014356578 A1, 04.12.2014</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## (54) СПОСІБ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ЛЕГОВАНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ

### (57) Реферат:

Винахід належить до галузі машинобудування. Спосіб поверхневого зміцнення виробів з титанового сплаву включає імпульсну лазерну обробку в режимі передоплавлення поверхні в середовищі повітря з густиною потужності лазерного випромінювання  $q=0,4-0,6$  ГВ/м<sup>2</sup>, з частотою прямування імпульсів  $\nu=8-10$  Гц та з тривалістю лазерного випромінювання  $\tau=2,00-2,25$  мс. Винахід забезпечує можливість локального зміцнення поверхневих шарів титанових сплавів складної конфігурації без додаткової обробки та без зміни шорсткості поверхні, тобто для подальшої експлуатації виробу не потрібно застосовувати фінішну механічну обробку.

UA 123802 C2



**Fig. 2**

Спосіб належить до галузі матеріалознавства, а саме до поверхневого зміцнення деталей з титанових сплавів, та може бути використаний в авіабудуванні при виготовленні лопаток газотурбінних двигунів, які внаслідок тривалої дії тертя зазнають значного зношування поверхні в процесі експлуатації.

Відомий спосіб зміцнення деталей з легованого титанового сплаву [Спосіб поверхневого зміцнення деталей з титанових сплавів: пат. 117183 Україна. МПК В23К 26/34, В23К 26/12, В23К 26/18, С22F 1/18; заяв. 28.12.2016; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12.], який включає попереднє шліфування та затемнення (застосування вуглецевого покриття) поверхні деталі зі спеченого титанового сплаву та подальшу імпульсну лазерну обробку в струмені інертного газу в режимі оплавлення поверхні при густині потужності 1 ГВт/м<sup>2</sup> та тривалості імпульсу лазерного випромінювання 1-4 мс.

Недоліком способу є попередня обробка, яка знижує продуктивність процесу та складність нанесення покриття рівномірної товщини, оскільки неоднакова товщина покриття буде по-різному впливати на фазовий склад зони обробки і, відповідно, на зміну фізико-механічних властивостей поверхневих шарів.

Спільними ознаками з винаходом, що заявляється, є імпульсна лазерна обробка поверхні легованих титанових сплавів.

Відомим є спосіб зміцнення деталей з легованого титанового сплаву [Спосіб лазерного зміцнення поверхні титанових сплавів: пат. 114036 Україна. МПК С07F 7/28, В23К 26/00; заяв. 16.11.2015; опубл. 10.04.2017, Бюл. № 7.], який включає нанесення на поверхню деталі легуючої речовини, а саме, клею марки БФ (товщиною приблизно 100 мкм), витримуванні нанесеного шару до його висихання та подальшу лазерну обробку в режимі оплавлення поверхні в струмені інертного газу.

Недоліком способу є використання додаткових матеріалів, зниження продуктивності роботи та складність рівномірного нанесення органічної обмазки, що може призводити до зміни кількості вуглецю у розплаві і, відповідно, до зміни кількісного співвідношення компонентів у фазовому складі поверхні.

Спільними ознаками з винаходом, що заявляється, є використання лазерної обробки поверхні титанових сплавів.

Відомим є спосіб зміцнення деталей з легованого титанового сплаву [Плешаков Е.І. Вплив лазерного гартування й науглецювання на структуру й властивості поверхневого шару титанового сплаву ВТЗ-1 //Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. 2000. № 394. С. 138-142.], який включає лазерне гартування поверхневого шару титанового сплаву ВТЗ-1 у режимах оплавлення поверхні з густиною потужності випромінювання 1,6 ГВ/м<sup>2</sup> у середовищі повітря.

Недоліком способу є використання лазерного оплавлення поверхні, оскільки у результаті такої обробки зростає її шорсткість. Це означає, що для експлуатації виробу потрібне застосування ще й фінішної механічної обробки, що знижує продуктивність процесу.

Спільними ознаками з винаходом, що заявляється, є імпульсна лазерна обробка поверхні легованого титанового сплаву у середовищі повітря.

В основу винаходу поставлено задачу розробити спосіб зміцнення деталей з легованого титанового сплаву шляхом лазерної обробки поверхні у режимі передоплавлення в середовищі повітря, що зумовлює формування в поверхневих шарах сплаву пересиченого твердого розчину азоту та кисню в гексагональній щільноупакованій ґратці (ГЩУ) та дисперсного нітриду титану, що дозволяє підвищити значення мікротвердості поверхні деталей та збільшити термін їх експлуатації.

Суттєвою ознакою винаходу, що заявляється, є:

- імпульсна лазерна обробка в середовищі повітря деталей з легованого титанового сплаву в режимі передоплавлення поверхні з густиною потужності лазерного випромінювання  $q=0,4-0,6$  ГВ/м<sup>2</sup>,  $q=0,4-0,6$  ГВ/м<sup>2</sup>, з частотою прямування імпульсів  $u=8-10$  Гц та з тривалістю лазерного випромінювання  $t=2,00-2,25$  мс.

Відмінними від найближчого аналога ознаками, є:

- що імпульсну лазерну обробку здійснюють у режимі передоплавлення поверхні з густиною потужності лазерного випромінювання  $q=0,4-0,6$  ГВ/м,  $q=0,4-0,6$  ТВ/м, з частотою прямування імпульсів  $u=8-10$  Гц та з тривалістю лазерного випромінювання  $t=2,00-2,25$  мс.

Оплавлення поверхні лазером має досить суттєвий недолік – зростання шорсткості поверхні зразків (виробів), тому для експлуатації виробу потрібно застосування ще й фінішної обробки.

Передоплавлення поверхні деталі лазером суттєво не впливає на шорсткість поверхні (тобто вона залишається близькою до вихідної), тому запропонований спосіб дозволяє

підвищити експлуатаційні можливості деталей та продуктивність процесу, внаслідок уникнення фінішної механічної обробки.

Після лазерної обробки в середовищі повітря утворюються дисперсні нітриди титану в поверхневих шарах титанових сплавів. Титан та його сплави при високих температурах активно взаємодіють з газами атмосфери (кисень, азот). Атоми азоту та кисню займають міжвузловинні позиції в ґратці основного металу, утворюють пересичений твердий розчин втілення. Означені чинники впливають на підвищення значень мікротвердості поверхні деталі.

Отже, у заданому способі поверхнєве зміцнення відбувається, переважно за рахунок формування дрібних нітридів та твердорозчинного зміцнення деталі.

Отримана в результаті обробки структура зумовлює зростання мікротвердості поверхні приблизно в 1,4 разу за всією глибиною зони лазерної дії. Змінюючи режими лазерної обробки (тривалість імпульсу, густину потужності випромінювання, частоту прямування імпульсу) можна варіювати як кількісним співвідношенням між утвореними фазами, так і глибиною зони лазерної дії.

Перевагами зазначеного способу є простота реалізації, економія електроенергії, підвищення продуктивності роботи за рахунок уникнення фінішної механічної обробки, а також можливість локального зміцнення поверхневих шарів титанових сплавів складної конфігурації без додаткової обробки поверхні виробу та незмінності шорсткості поверхні.

Спосіб здійснюють так: виконують імпульсну лазерну обробку деталей з легованого титанового сплаву у середовищі повітря в режимі передоплавлення з густиною лазерного випромінювання  $q=0,4-0,6$  ГВ/м<sup>2</sup>, з частотою прямування імпульсів  $\nu=8-10$  Гц та з тривалістю лазерного випромінювання  $\tau=2,00-2,25$  мс. Режим передоплавлення поверхні деталей вибирають, залежно від марки сплаву та типу імпульсного лазера.

Приклад конкретного виконання.

Для здійснення способу вирізалися зразки з лопатки газотурбінного двигуна з титанового сплаву BT3-1, хімічний склад якого наведено в табл. 1, зразки мали форму паралелепіпедів з розмірами 15×12×1 мм.

Лазерну обробку поверхні виконували на імпульсному YAG-лазері ( $\lambda=1,069$  мкм) у середовищі повітря в режимах передоплавлення поверхні, з густиною потужності лазерного випромінювання  $q=0,5$  ГВ/м<sup>2</sup>, з тривалістю імпульсу 2,00 мс та частотою прямування імпульсів  $\nu=10$  Гц.

Структурно-фазовий склад поверхневих шарів деталей після імпульсної лазерної обробки досліджували методами рентгенівського фазового (ДРОН-3, Cu-K $\alpha$ -випромінювання) та металографічного (Axiovert 200 MAT) аналізів. Вимірювання інтегральних значень мікротвердості в зоні лазерної дії та в матриці зразка здійснювали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3.

Таблиця 1

Хімічний склад титанового сплаву

| Хімічний елемент, % мас. |     |     |     |     |     |      |      |      |      |       |              |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------|--------------|
| Ti                       | Al  | Mo  | Cr  | Zr  | Fe  | C    | Si   | O    | N    | H     | Інші домішки |
| основа                   | 5.8 | 2.8 | 1.3 | 0.5 | 0.4 | 0.10 | 0.35 | 0.15 | 0.05 | 0.015 | 0.30         |

На Фіг. 1 зображено дифрактограми від поверхні деталей титанового сплаву BT3-1: у вихідному стані (а) та після лазерної обробки в середовищі повітря (б).

На Фіг. 2 зображено зовнішній вигляд поверхні сплаву робочої лопатки з авіаційного двигуна компресора низького тиску з титанового сплаву BT3-1: а - вихідний стан; б - після лазерної обробки в середовищі повітря.

На Фіг. 3 зображено мікроструктуру деталей титанового сплаву BT3-1: вихідного стану (а) та після лазерної обробки (б).

Згідно з даними металографічного аналізу у вихідному стані структура сплаву BT3-1 була однорідною двофазною (Фіг. 1, а). Об'ємна частка  $\alpha$ -Ti не перевищувала 65 %.

Рентгенівський фазовий аналіз підтвердив наявність двох фаз у вихідному стані (Фіг. 2, а): твердого розчину на основі  $\alpha$ -Ti з періодами ГЦУ ґратки  $a=0,2951\pm0,0008$  нм,  $c=0,4682\pm0,0002$  нм та твердого розчину на основі  $\beta$ -Ti з періодом об'ємно центрованої кубічної ґратки (ОЦК)  $a=0,3306\pm0,0005$  нм.

Після лазерної обробки в середовищі повітря в зоні лазерної дії (ЗЛД) рентгенографічно було зафіксовано (Фіг. 2, б) наявність трьох фаз -  $\alpha$ -Ti,  $\beta$ -Ti та незначної кількості кубічного

нітриду титану. Незважаючи на високу хімічну активність титану, слідів окислів рентгенографічно не було виявлено. Аналіз дифрактограм виявив незначне підвищення параметрів кристалічної ґратки  $\alpha$ -Ti (Табл. 2). Це пов'язано з тим, що частка атомів азоту проникла у міжвузловини ГЩУ ґратки, що зумовило утворення твердого розчину втілення азоту в  $\alpha$ -Ti. Необхідно зазначити, що при лазерній обробці в середовищі повітря відбувалися два конкуруючих процеси - атоми алюмінію (як основного легуючого елемента) заміщували атоми титану, що зумовлювало зниження параметрів кристалічної ґратки; з іншого боку, деяка частка атомів азоту та кисню втілювалася в октаедричні пори гексагональної ґратки, що зумовлювало зростання її параметрів. Утворення твердих розчинів втілення більш ефективно впливало на зміни параметрів ґратки, що й забезпечило їх зростання, порівняно з вихідними значеннями.

Таблиця 2

## Характеристики сплаву BT3-1 до та після лазерного передоплавлення

| Стан зразків                                                                | Фазовий склад                 | Періоди ґратки $\alpha$ -Ti, нм                |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| Вихідний стан                                                               | $\alpha$ -Ti+ $\beta$ -Ti     | $a=0,2951\pm0,0008$<br>$c=0,4682\pm0,0002$     |
| Лазерне передоплавлення в середовищі повітря ( $q=0,5$ ГВт/м <sup>2</sup> ) | $\alpha$ -Ti+ $\beta$ -Ti+TiN | $a=(0,2933\pm0,0008)$<br>$c=(0,4714\pm0,0019)$ |

Відносна інтенсивність дифракційних максимумів від  $\beta$ -фази після лазерного передоплавлення зросла, порівняно з вихідною, що свідчило про зростання її кількості.

Металографічний аналіз поперечного перерізу зони лазерної дії після лазерної обробки в середовищі повітря дозволив виділити лише одну підзону термічного впливу (оскільки, матеріал нагрівався до максимально можливої температури, при якій оплавлення поверхні відсутнє), глибина якої складала

приблизно 90-120 мкм (Фіг. 3, б). Розміри структурних складових ( $\alpha$ -Ti,  $\beta$ -Ti та TiN) в зоні лазерної дії не перевищували 1...3 мкм.

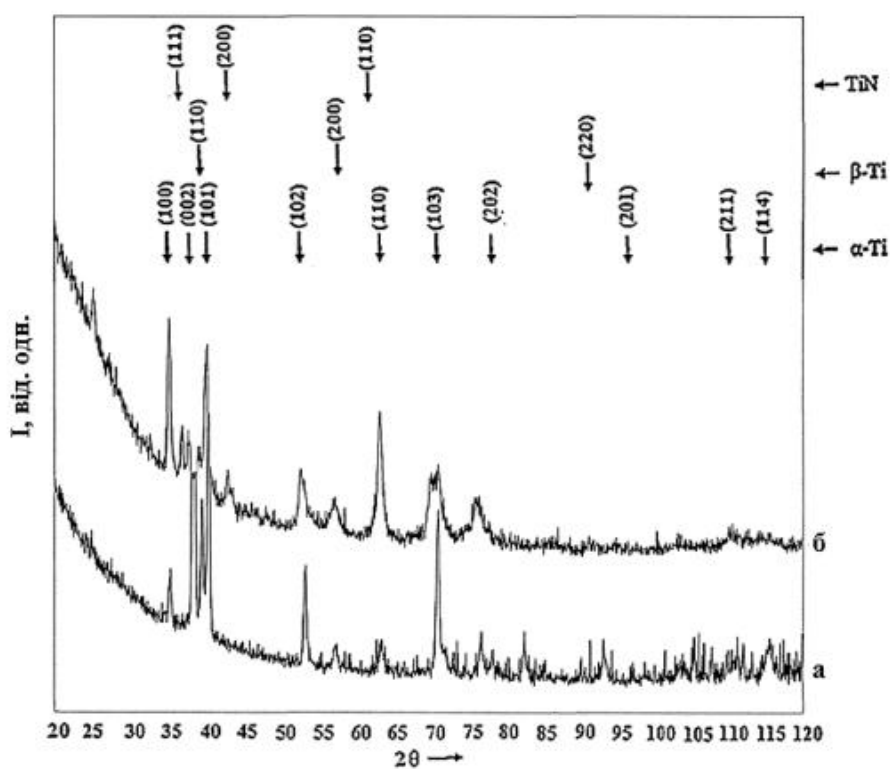
Значення мікротвердості в зоні лазерної дії зросли та становили для зони термічного впливу близько 4,4...4,5 ГПа (у вихідному стані  $H_R=3,3...3,4$  ГПа). Зростання значень мікротвердості зумовлено утворенням високоміцних нітрідів титану типу TiN та формуванням пересиченого твердого розчину впровадження азоту та кисню в  $\alpha$ -Ti.

Лазерна обробка в режимах передоплавлення поверхні в середовищі повітря титанового сплаву BT3-1 дозволяє підвищити значення мікротвердості в 1,3...1,4 разу зі збереженням шорсткості поверхні.

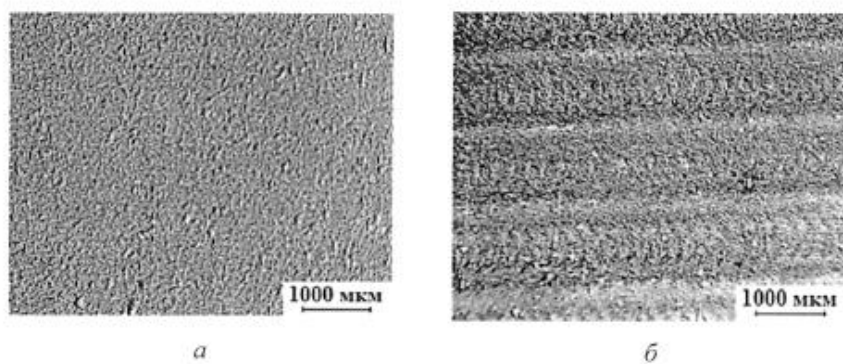
Отже, лазерна обробка в режимах передоплавлення поверхні з густиною потужності лазерного випромінювання  $q=0,6-0,4$  ГВ/м<sup>2</sup> в середовищі повітря є ефективним методом термічної обробки, оскільки зумовлює підвищення значень мікротвердості легованого титанового сплаву та, завдяки незмінності шорсткості поверхні, дозволяє підвищити продуктивність процесу та заощаджувати електроенергію за рахунок уникнення фінішної механічної обробки. Спосіб дозволяє виконувати локальне зміцнення поверхневих шарів легованого титанового сплаву складної конфігурації.

## ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

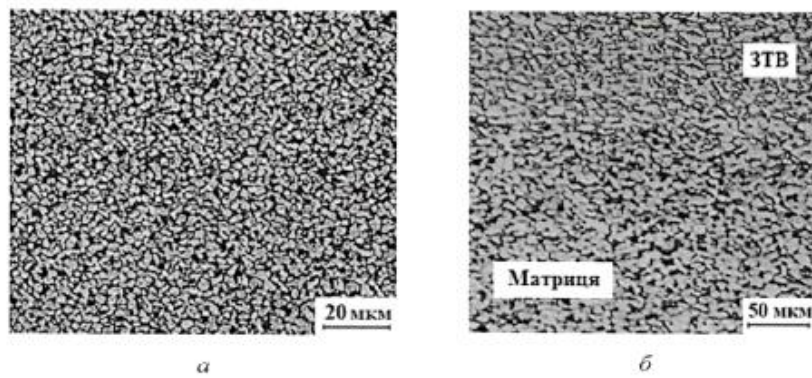
Спосіб лазерного зміцнення поверхні деталей з легованого титанового сплаву, що включає імпульсну лазерну обробку поверхні в середовищі повітря, який **відрізняється** тим, що лазерну обробку здійснюють в режимі передоплавлення поверхні деталі з густиною потужності лазерного випромінювання  $q=0,4-0,6$  ГВ/м<sup>2</sup>, з частотою прямування імпульсів  $\nu=8-10$  Гц та з тривалістю лазерного випромінювання  $t=2,00-2,25$  мс.



Фиг. 1



Фиг. 2



**Фіг. 3**