

ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРА ПОВЕРХОНЬ БАНДАЖНИХ ПОЛИЧОК ЛОПАТОК ЗІ СПЛАВУ VT3-1

Зайчук Н.П., Шимчук С.П., Фециук Ю.П., Ткачук Ю.М., Шух Д.Ю.

Луцький національний технічний університет

Дана робота присвячена дослідженню структури та властивостей титанового сплаву VT3-1 із нанесеним зносостійким покриттям. У процесі досліджень було встановлено актуальність зміцнення титанових сплавів, встановлено, що структурний стан основного металу залишається майже без змін, а якість напаяного зміцнюючого шару із реліту залежить від дотримання технології нанесення напайки. Механічні властивості напаяного шару значно покращують міцність та твердість бандажних поверхонь лопаток, що підвищує показники зносостійкості та надійності даних виробів.

Ключові слова: титановий сплав, зносостійкість, властивості, структура.

Вступ. Сучасний газотурбінний двигун є складною конструкцією, елементи і вузли якої працюють в екстремальних умовах. Це перш за все високі температури, агресивне середовище, високий рівень механічних напружень, вібрації, багатократне силове і термічне циклування. Складність вузлів і конструктивних рішень разом з жорсткими умовами експлуатації обмежили коло матеріалів, які можуть бути використані як конструкційні. До найважливіших характеристик конструкційних матеріалів, які призначені для газових турбін, відносяться наступні: висока температура плавлення; високий рівень міцності міжатомних зв'язків; можливість створення структур з високим опором повзучості, і нарешті, технологічність. З усіх елементів періодичної системи Д. І. Менделєєва вказаним вимогам відповідають лише залізо, нікель і титан. Інші елементи або за своєю природою не відповідають складному комплексу вимог, або вони дефіцитні, або для них не знайдено рішень, які б поєднували високий рівень властивостей і технологічність [1].

Для виготовлення лопаток компресора застосовуються леговані сталі і титанові сплави [2]. З урахуванням умов роботи, до матеріалів, з яких виготовляються лопатки компресора, ставляться вимоги збереження міцності при температурах до 600°C і висока корозійна стійкість. Головною перевагою титанових сплавів перед іншими конструкційними матеріалами в тому що високі механічні властивості і корозійна стійкість поєднуються з низькою густиною. Титанові сплави за питомою міцністю при температурах до 500°C перевершують більшість жароміцних сталей, що дозволяє зменшити масу двигуна, володіють термічною стабільністю і не окричуються при тривалій роботі в умовах нагрівання до 400...500°C. Крім того титанові сплави можуть оброблятися різанням. Найбільше поширення при виготовленні лопаток компресора отримали сплави VT3-1, VT5, VT8, VT9, VT18 [3].

Актуальність досліджень. В сучасних ГТД широко використовують бандажування лопатки турбін. Застосування бандажних полицок дозволяє знизити змінні напруження від вібраційних навантажень і таким чином підвищити загалом ресурс роботи і надійність ГТД. Проте в процесі експлуатації робочих і соплових лопаток в результаті значних контактних напружень в умовах тертя і вібрації в місцях контактування полицок відбувається підвищене зношування контактних поверхонь в порівнянні, наприклад, з пером і замком лопатки. При збільшенні робочих температур і ресурсу сучасних авіадвигунів різко інтенсифікуються процеси, що призводять до пошкодження і руйнування контактних поверхонь лопаток, що обмежує термін їх служби і надійність.

Загалом у процесі роботи лопаток можуть виникати наступні дефекти:

- тріщини в основному металі і поверхневе розтріскування внаслідок втомного зношування;
- пошкодження поверхневих шарів деталей внаслідок корозії;

– підвищене спрацювання контактних поверхонь в умовах тертя та вібрації.

Титанові сплави, не зважаючи на всі їх переваги, мають низькі характеристики зношування, що призводить до необхідності вирішення питань збільшення ресурсу роботи деталей, які виготовляються з даних матеріалів, а також проблеми зміцнення і ремонту зношуваних поверхонь. Це в першу чергу відноситься до контактних поверхонь бандажних полиць лопаток компресора ГТД. З науково-практичного досвіду різного роду підрозділів по ремонту авіаційної техніки відомо, що одним найбільш вигідних та ефективних способів ремонту багатьох деталей двигунів є зварювання. Проте результати досліджень механізму зношування контактних поверхонь, дозволяє зробити висновки, що оптимальним варіантом зміцнення робочих лопаток є створення на зоні зношування шару з високожаростійкого і зносостійкого матеріалу [4], відмінного від матеріалу лопатки, термодинамічно сумісного при температурі експлуатації з матеріалом лопатки.

Постановка задачі. Метою даної роботи було дослідження впливу напайки зносостійкого матеріалу на властивості та структуру поверхонь бандажних полиць лопаток компресора.

Для досягнення поставленої мети в процесі роботи були поставлені наступні завдання:

- дослідити мікроструктуру зразків, виготовлених зі сплаву ВТЗ-1 та зразків з напайкою зносостійкого матеріалу (реліту);
- провести спектральний аналіз хімічного складу зразків, виготовлених із титанового сплаву ВТЗ-1 та хімічного складу напайки;
- провести дослідження механічних властивостей зразків, виготовлених із титанового сплаву ВТЗ-1 та зразків з напайкою реліту;
- на основі отриманих результатів провести порівняльну характеристику досліджуваних зразків та встановити вплив напайки зносостійкого матеріалу на комплекс властивостей поверхні бандажних полиць.

Порівняння даних про структуру та властивості поверхонь титанового сплаву ВТЗ-1 без напайки та з напайкою зносостійкого матеріалу дає змогу визначити найкраще поєднання механічних, фізичних та технологічних властивостей необхідних для підвищення зносостійкості поверхні бандажних полиць та збільшення ресурсу роботи лопатки.

Результати досліджень. В даній роботі дослідження поверхні зразків проводилось за допомогою електронного мікроскопа РЕММА, растрового електронного мікроскопа високого роздільної здатності і рентгенівського мікроаналізатора.

Зокрема в даній роботі проводились дослідження поверхні зразків, виготовлених з титанового сплаву ВТЗ-1, вирізаних з різних частин лопатки компресора. Так, об'єктом досліджень стали: зразки, які вирізались з бандажних полиць лопатки компресора (один – з якісною напайкою реліту та один – зі зношеної полицьки з дефектом у вигляді краплі), зразки, які вирізались з хвостовика лопатки і не піддавались інтенсивному зношуванню.

У результаті досліджень поверхні зрізу титанового сплаву ВТЗ-1 виявлено, що сплав в основному має однорідну структуру. Також є ділянки у вигляді невеликих за формою включень. Структура поверхні вказує, що матеріал є в'язким і пластичним, погано піддається різанню і схильний до залипання. Результати локального аналізу вказують на однорідність хімічного складу зразка і його відповідність хімічному складу ВТЗ-1 вказаному в ГОСТ 19807-91. Спектральний аналіз зроблений на напайці (рис. 1 а, б) вказує на однорідний розподіл хімічних елементів на поверхні зразка.

Поверхня дефектного покриття характеризується дещо нижчою шорсткістю ніж якісна напайка, а також є подекуди невеликі тріщини (які не проходять на товщину покриття). Локальний аналіз ділянок показує, що вони сильно відрізняються за елементним складом. На рисунку 1 а показаний графік зміни вмісту хімічних елементів залежно від ділянки, на якій проводились дослідження, на рисунку 1 б показано Al, Cr і V.

Неоднорідність хімічного складу могла виникнути в результаті порушення технологічного процесу напайки. В результаті чого полочка є непридатною до експлуатації через наявність на деяких ділянках дуже високого вмісту Ti, який має низьку теплопровідність, схильність до налипання та задирання.

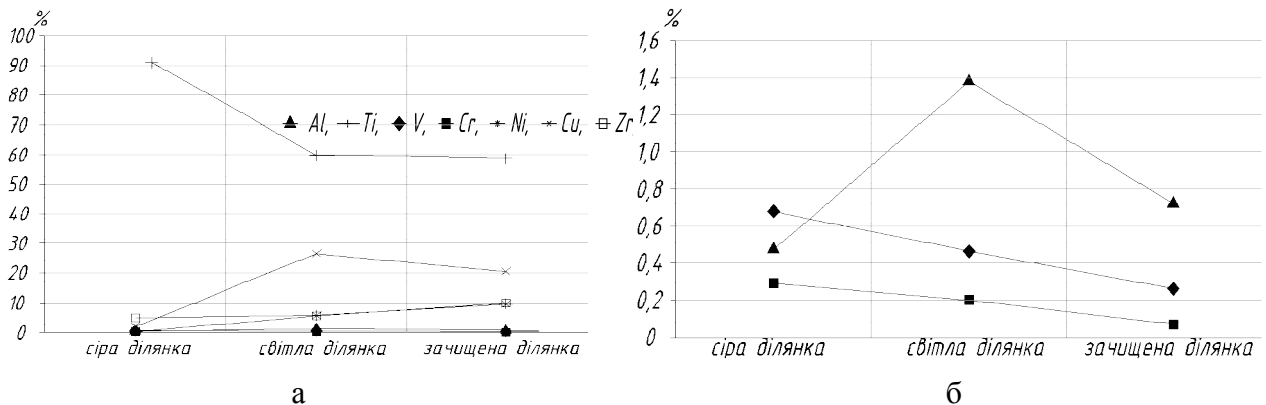


Рисунок 1 – Порівняння хімічного складу різних ділянок дефектного зразка

Порівняння середніх значень кількісного складу якісної напайки, дефектної ділянки та матеріалу основи наведено в таблиці 1, графічне зображення вмісту елементів представлено на рисунку 2 (рисунок 2 б – нижня частина рисунка 2 а – елементи Mo, Fe, Si, V, вміст яких не перевищує 2,4 %).

Таблиця 1 – Порівняння кількісного аналізу елементів основи та напайки (прискорююче напруження 20 кВ)

Ділянка	Середній вміст елементів, %										
	Al	Si	Ti	V	Cr	Fe	Mo	Ni	Cu	Zr	Сума
Якісна напайка	0,52	–	51,7	0,29	11,72	–	–	10,85	16,47	8,97	100,00
Дефектна напайка	0,47	–	90,94	0,68	0,29	–	–	0,42	2,09	5,11	100,00
Основа (BT3-1)	8,09	0,77	86,71	-	0,75	0,34	2,34	–	–	–	100,00

Можна відмітити, що в порівнянні з основою якісна напайка містить знижену кількість Ti, Al і підвищений вміст Cu, Ni, Zr. Дефектна ділянка характеризується проміжним вмістом Ti між якісною напайкою та основою, вміст Al, Cu, Zr і V близький до його вмісту в якісній напайці.

Всі легуючі елементи підвищують міцність та знижують пластичність титану. Cu підвищує стабільність в процесі експлуатації, підвищує ароміцність сплаву. Ni підвищує міцність та корозійну стійкість покриття. Zr підвищує міцність, жароміцність й опір повзучості покриття при підвищених температурах.

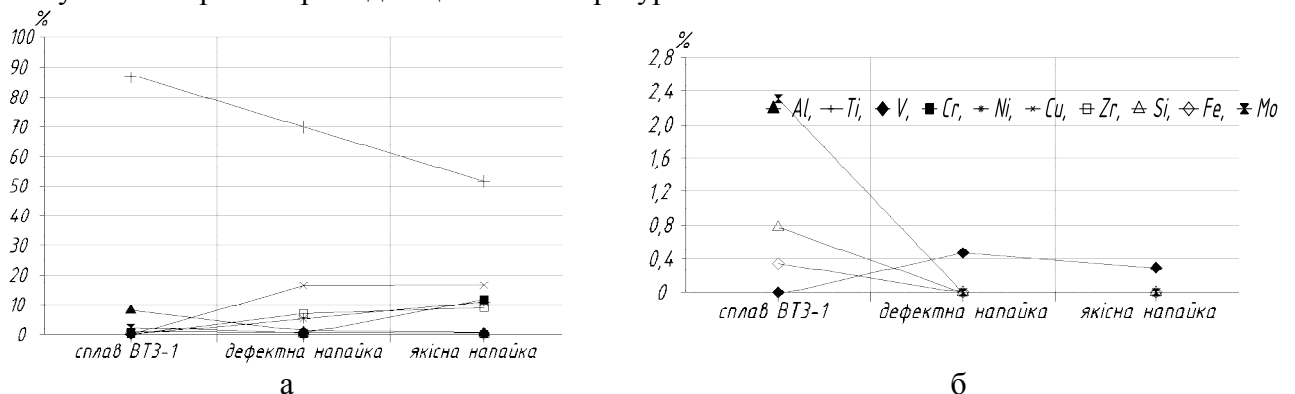


Рисунок 2 – Порівняння хімічного складу різних зразків

Спектральний аналіз хімічного складу напайок виявив елементи, які присутні в складі припою ВПр16 (Cr, Ni, Cu, Zr), проте він не виявив присутності на поверхні зміцнюючої фази – реліту (W і C). Це може пояснюватись тим, що частки реліту мають густину в 2,5 разу вищу густини припою, і в процесі напайки відбувається їх осідання і, як наслідок, збагачення нижніх шарів покриття і збіднення верхніх.

Структура досліджуваних зразків в основному однорідна, хоча на окремих ділянках помітно деяку неоднорідність: локальні скупчення легуючих елементів або невеликого розміру пори. Вони виникають під час виготовлення лопатки методом лиття під тиском, коли швидкості охолодження значні, а переріз лопатки має невеликі розміри, бульбашки газу або повітря не встигають вийти на поверхню. Вищеописані дефекти структури є незначними і не впливають на експлуатаційні характеристики виробу.

Структура вихідного сплаву ВТ3-1 бандажних полицок лопатки у місці напайки реліту значно відрізняється від структури пера та хвостовика, які не піддавались нагріванню. На протравленому шліфі помітні риски, які залишились після полірування. Це може пояснюватись тим, що титановий сплав є досить м'яким матеріалом. Також вони могли виникнути внаслідок потрапляння часток реліту в зону шліфування. В таких випадках рекомендується застосовувати електролітичне полірування, яке запобігає виникненню дефектів такого типу.

Із мікроструктури напайки також видно дуже крупні зерна з чіткими границями. Такі зерна утворюються без сумніву під час СВЧ нагрівання та витримки у процесі напайки реліту, оскільки відома схильність титану до швидкого росту зерна при високих температурах. Наявність чітких, широких границь зерен сплаву ВТ3-1 під дефектною напайкою пояснюється скупченням пор та інших дефектів саме на границях, такі скупчення дефектів травляться сильніше, ніж основний метал. Сплав має голчасту схожу на мартенситну загартовану структуру, яка утворюється внаслідок швидкого охолодження на повітрі після напайки.

Порівнюючи перехідні зони між якісною напайкою та основним металом і між дефектною напайкою та основним сплавом варто відмітити, що якісна напайка має рівний поступовий бездефектний перехід. В той час як границя між дефектною напайкою та основним металом нерівна, характеризується наявністю дефектів (пори, тріщини).

Мікроструктура релітової напайки двофазна: світлі крупні кристали WC і протравлені темні ділянки припою ВПр16. Світлі зерна дуже тверді, дрібнозерниста рівновісна структура припою – менш тверда, але більш в'язка, служить в'язучим.

В процесі напайки не відбувається фазових реакцій, що кардинально змінюють склад і структуру армуючих частин. Тому в структурі напаяного шару частки реліту, які забезпечують високу стійкість проти зношування покриття, повинні бути розподілені рівномірно і з'єднані між собою і основним матеріалом припоєм.

Проте дефектна напайка має неоднорідну структуру: великі нерівномірно розподілені зерна реліту, оточені підвищеною кількістю припою. Він має дрібнозернисту структуру, яка складається з β -фази. Зерна реліту, на відміну від припою не протравились, оскільки травлення проводилось реактивом Кролля призначеним для визначення структури титанових сплавів. На зернах реліту лише спостерігаються сліди корозії.

На окремих ділянках дефектної напайки покриття є нещільним – можна помітити присутність ділянки з структурою основного сплаву лопатки ВТ3-1. Також на даній ділянці присутні газові пори, які мають значні розміри (до 1 мм), гладкі, рівні стінки і краї.

Якісна напайка на досліджуваному зразку характеризується рівномірним розподілом реліту та достатньою кількістю припою. Вона покриває всю поверхню досліджуваного зразка, утворює щільне якісне бездефектне покриття, яке забезпечує високу твердість та міцність в процесі роботи лопатки.

Важливою особливістю формування покриття є розподілення армуючих частин реліту по висоті. Карбід вольфраму має густину в 2,5 разу вищу густини припою, і в

процесі напайки відбувається його осідання і, як наслідок, збагачення нижніх шарів покриття і збідніння верхніх. Верхній збіднений шар найбільш чітко проявляється при збільшенні вмісту припою в складі пасти і при збільшенні товщини напаяного шару. Частки реліту можуть осідати також при дії на них сил, які виникають при електромагнітному перемішуванні рідкої ванни припою при індукційному нагріванні струмами високої частоти. Практично на товщині напаяного шару 0,2...0,3 мм від зміцнюваної поверхні розподілення армуючих часточок носить майже рівномірний характер.

Дослідження і контроль фізико-механічних властивостей матеріалів в приповерхневих та поверхневих шарах обумовлені тим, що з контактною дією і контактною деформацією пов'язані не тільки майже усі сучасні методи обробки, зміцнення і з'єднання матеріалів (обробка металів тиском і різанням, шліфування, полірування і т.д.), але і службові властивості матеріалів в умовах тертя, втоми, схоплювання, зношування.

У даній роботі подані результати як відновленої, так і невідновленої мікротвердості [5, 6]. Для визначення відновленої твердості використовувався спосіб за Мартенсом, а для невідновленої – спосіб за Мейєром. При цьому слід зазначити, що мікротвердість за Мейєром рівна середньому тиску у відбитку і кількісно точно виражає фізичну суть твердості. Стандартна мікротвердість (в даному випадку за Мартенсом) менше твердості за Мейєром в стільки разів, у скільки площа поверхні відбитку, розрахована для індентора прийнятої геометрії, більше площі проекції відбитку.

Після проведення досліджень комп'ютерна програма за допомогою пристрою «Мікрон-гама» вивела на монітор значення показників міцності у вигляді таблиць для кожного зі здійснених уколів. Можна сказати, що відхилення при вимірюванні мікротвердості зразків є незначними.

Аналізуючи дані для цих уколів, можна сказати, що найвищим значенням невідновленої мікротвердості володіють зерна реліту (21,02 ГПа), очевидно, що саме вони забезпечили загальне підвищення мікротвердості поверхні з якісною напайкою реліту (в середньому 5,51 ГПа). При тих же умовах навантаження, невідновлена твердість для інших зразків набувала дещо менших значень: для зразка з дефектною напайкою 4,76 ГПа, а для зразка зі сплаву ВТЗ-1 наближалась до 4 ГПа (табл. 2).

На рисунку 3 наведені гістограми порівняння отриманих середніх значень мікротвердості зразків.

Характерною особливістю титанових сплавів є низький модуль пружності, який при підвищенні температури знижується. Напайка реліту дозволила підвищити дану характеристику (табл. 3), що збільшить жорсткість та працездатність деталей.

Міцність належить до числа найбільш важливих властивостей матеріалу. Межа міцності (σ_b), тобто максимальне напруження, що витримує матеріал при випробуванні в титанових сплавах є досить високою (табл. 3), проте в умовах зношування вона є недостатньою. Напайка реліту забезпечує підвищення значення міцності.

Таблиця 2 – Середні значення мікротвердості для досліджуваних поверхонь

<i>Досліджувана поверхня</i>	<i>Відновлена мікротвердість Н, ГПа</i>	<i>Невідновлена мікротвердість Н_р, ГПа</i>
Поверхня зразка зі сплаву ВТЗ-1	3,53	3,99
Поверхня зразка з дефектною напайкою реліту	4,16	4,76
Поверхня зразка з якісною напайкою реліту	4,83	5,51
Зерна реліту	17,14	19,36

Як видно з рисунку 4, а найвищий модуль пружності має зразок з якісною напайкою, що досягається безперечно завдяки утворенню якісного покриття та рівномірному розподілу зерен реліту, який має значно вищий модуль Юнга.

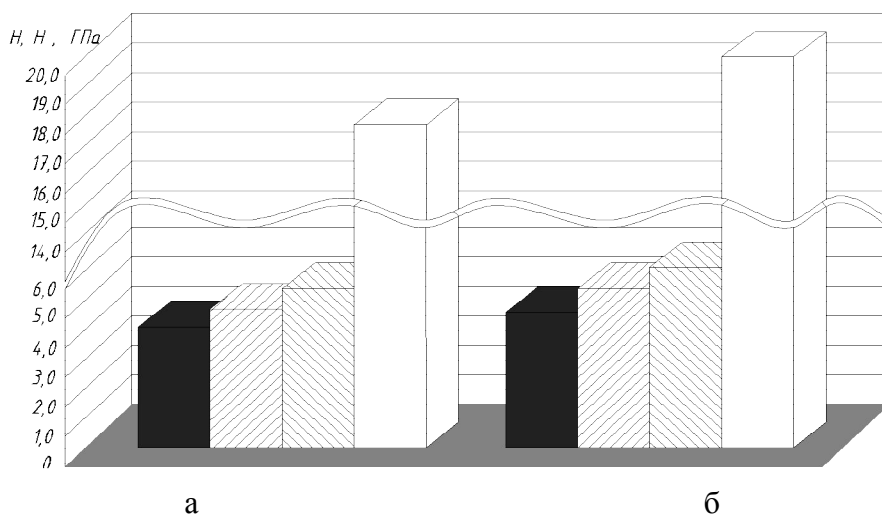


Рисунок 3 – Гістограма порівняння середніх значень відновленої (а) та невідновленої (б) мікротвердості досліджуваних зразків:

- – зразок зі сплаву ВТЗ-1;
- ▨ – зразок з дефектною напайкою реліту;
- ▩ – зразок з якісною напайкою реліту;
- – релітові зерна

Найнижчий модуль пружності має зразок з дефектною напайкою, що могло виникнути в результаті недотримання технології пайки.

Таблиця 3 – Середні значення механічних властивостей досліджуваних зразків

<i>Досліджувана поверхня</i>	<i>Модуль Юнга E, ГПа</i>	<i>Показник пластичності K</i>	<i>Межа міцності σ, ГПа</i>
Поверхня зразка зі сплаву ВТЗ-1	133,46	0,78	0,879
Поверхня зразка з дефектною напайкою реліту	132,88	0,76	1,022
Поверхня зразка з якісною напайкою реліту	136,22	0,75	1,151
Зерна реліту	178,67	–	1,532

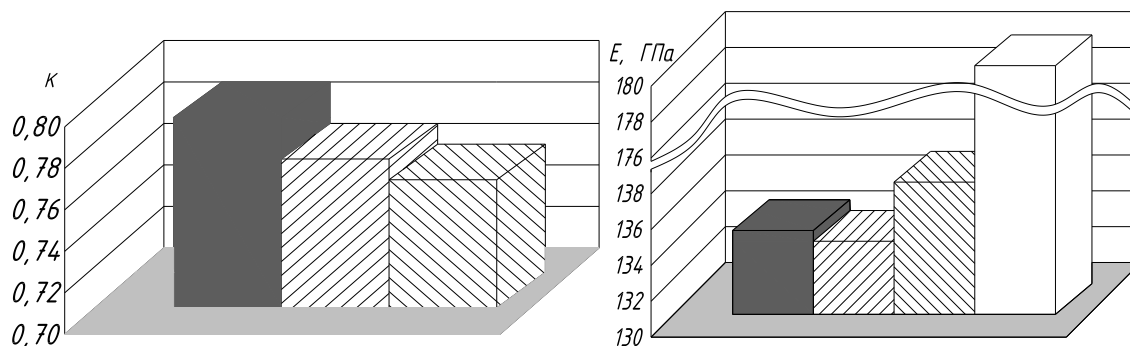


Рисунок 4 – Гістограма порівняння середніх значень модуля Юнга (а) усереднених значень та показників пластичності досліджуваних зразків (б):

- – зразок зі сплаву ВТЗ-1;
- ▨ – зразок з дефектною напайкою реліту;
- ▩ – зразок з якісною напайкою реліту;
- – релітові зерна

Аналізуючи гістограми порівняння показників пластичності (рисунок 4 б) можна стверджувати, що однією з причин невисокої зносостійкості титанових сплавів є висока пластичність. Напайка реліту знижує показник пластичності, забезпечуючи підвищення твердості, міцності та зносостійкості.

Порівняння середніх значень модуля пружності, показника пластичності та межі міцності подані на рисунках 4, 5, 6.

Релітові зерна мають високі значення міцності (рисунок), вони значно підвищують межу міцності досліджуваних зразків (на 30,9 % у порівнянні зі зразком із сплаву ВТЗ-1).

Висновки. Зразок з якісною напайкою реліту володіє найкращими механічними властивостями. Дослідження лише трьома уколами виявило присутність зерен реліту, хоча суттєве підвищення механічних властивостей забезпечується завдяки порошку реліту, який рівномірно розподілений в припої. Крім того частки реліту мають густину в 2,5 разу вищу густини припою, і в процесі напайки відбувається їх осідання і, як наслідок, збагачення нижніх шарів покриття і збідніння верхніх. Верхній збіднілий шар найбільш чітко проявляється при збільшенні вмісту припою в складі пасти і при збільшенні товщини напаяного шару. Проте зниження вмісту реліту у верхніх шарах покриття має позитивне значення, так як полегшує механічну обробку напаяної поверхні за рахунок зниження твердості верхнього шару.

Встановлено, що оптимальним варіантом зміцнення робочих лопаток є створення на зоні зношування шару з високожаростійкого і зносостійкого матеріалу ВТН-1, який складається з твердих частин карбиду вольфраму (реліту) і припою на титановій основі ВПр16 в якості в'язучого.

За допомогою електронного растрового мікроскопа РЕММА-102 було вміст елементів у досліджуваних зразках. Результати аналізу дали змогу стверджувати, що сплав ВТЗ-1 є в'язким і пластичним матеріалом, що є причиною того що він швидко зношується. Поверхні напайок характеризуються високою шорсткістю. Спектральний аналіз зразка зі сплаву ВТЗ-1 та поверхні якісної напайки показує, що їх хімічний склад в основному однорідний. На поверхні дефектної напайки помітні ділянки різного забарвлення, локальний аналіз яких вказує на те, що вони сильно відрізняються хімічним складом. Така неоднорідність хімічного складу призводить до зниження фізико-механічних показників і відповідно – експлуатаційних властивостей.

Мікроструктурні дослідження, які проводились на зразках показали, що значних змін в структурі основного сплаву по всьому об'єму лопатки не спостерігалось, хоча у сплаві на бандажних полечках, у місці напайки реліту відбувся ріст зерна та утворення голчастої мартенситної структури.

Фізико-механічні показники зразків зі сплаву ВТЗ-1 та зразків з дефектною та якісною напайками реліту визначались, за допомогою багатофункціонального приладу «Мікрон-гама». Результати таких досліджень показали помітне підвищення механічних властивостей зразка з якісною напайкою у порівнянні зі зразком зі сплаву ВТЗ-1: модуля пружності E на 2,1 %, межі міцності σ_B на 30,9 %, невідновленої мікротвердості на 38,1 %. Таких властивостей зразок набуває завдяки високим механічним властивостям зерен реліту ($H_\mu=19,36$ ГПа, $E=178,67$ ГПа, $\sigma_B=1,532$ ГПа) та припою, який забезпечує міцне з'єднання зерен реліту між собою та з основним сплавом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Технология создания неразъемных соединений при производстве газотурбинных двигателей / [Елисеев Ю. С., Масленников С. Б., Гейкин В. А., Поклад В. А.]. – М. : Наука и технологии, 2001. – 544 с.

2. Александров В. Г. Справочник по авиационным материалам и технологии их применения / В. Г. Александров, Б. И. Базанов – М. : Транспорт, 1979. – 326 с.

3. Мурза И. С. Титановые сплавы: справочник авиационного техника / И. С. Мурза – М. : Военное издательство министерства обороны СССР, 1984. – 510 с.
4. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. А. Г. Братухина, Г. К. Язова, Б. Е. Карасева. – М. : Машиностроение, 1997. – 410 с.
5. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С. И. Булычев, В. П. Алехин. – М. : Машиностроение, 1990 – 224 с.
6. Золотаревский В. С. Механические испытания и свойства металлов / В. С. Золотаревский – М. : Металлургия, 1974. – 302 с.

Зайчук Н.П., Шимчук С.П., Фещук Ю.П., Ткачук Ю.Н., Шух Д.Ю. СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТЕЙ БАНДАЖНЫХ ПОЛОЧЕК ЛОПАТОК ИЗ СПЛАВА ВТЗ-1

Работа посвящена исследованию структуры и свойств титанового сплава ВТЗ-1 с нанесенным износостойким покрытием. В процессе исследований было определено актуальность повышения прочности титановых сплавов, обнаружено, что структурное состояние основного металла остается почти без изменений, а качество напаянного слоя с релитом зависит от соблюдения технологии нанесения напайки. Механические свойства напаянного слоя значительно улучшают прочность и твердость бандажных поверхностей лопаток, что повышает износостойкость и надежность данных изделий.

Ключевые слова: титановый сплав, износостойкость, свойства, структура.

Zaichuk N.P., Shymchuk S.P., Feschuk Y.P., Tkachuk Y.N., Schuch D.Y. PROPERTIES AND STRUCTURE OF SURFACES BANDAGE SHELVES BLADE WITH ALLOY VTZ-1

This work is devoted to investigation of the structure and properties of titanium alloy with a coated wear-resistan. In the process studies was established the relevance of titanium alloys, established that structural state of the base metal still nearly unchanged, but the quality respirative layer of the relit depends on the compliance technology of embossing soldering. Mechanical quality of soldered layer greatly improves the strength and hardnessbandage surfaces of blades which increases the durability and performance reliability of these products.

Keywords: titanium alloy, wear resistance, properties, structure.