

ВІДГУК

офіційного опонента Богун Лідії Ігорівни

на дисертаційну роботу Лаврися Сергія Мирославовича

«Підвищення зносостійкості титанового сплаву BT22 поверхневим деформаційно-дифузійним обробленням»,

**подану за здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
зі спеціальності 05.02.01 – «Матеріалознавство»**

За результатами вивчення дисертаційної роботи С. М. Лаврися, яка є науковою роботою, що подана у вигляді рукопису і складається з вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел і 2 додатків, що містять технологічні рекомендації щодо комбінованого деформаційно-дифузійного модифікування поверхневих шарів конструкційних елементів авіаційної техніки з титанового сплаву BT22 для ДП «АНТОНОВ» та опубліковані праці здобувача за темою дисертації, слід відзначити наступне.

Актуальність теми дисертації та зв'язок з науково-технічними програмами. Ефективність і надійність експлуатації виробів з титанових сплавів залежить від технології їх поверхневого зміцнення. Зокрема, щоб підвищити зносостійкість, робочі поверхні деталей авіаційної техніки, виготовлені з титанового сплаву BT22, гальванічно покривають хромом. Однак цю технологію досить складно відтворювати, оскільки нанесені покриття через малу адгезію з основою матеріалу відшаровуються під час експлуатації. Суттєва різниця у фізико-механічних характеристиках між матрицею сплаву і покриттям зменшує втомну міцність, і, як наслідок, ресурс конструкції в цілому. Також через нещільність та пористість хромового покриття можливе підтікання гідрорідини без явних слідів зношування на робочих поверхнях. Слід також відзначити, що через токсичність і канцерогенність сполук хрому та проблеми їх утилізації використання «шестивалентного» хрому провідними країнами світу обмежене. Тому на сьогодні актуальним є розроблення нових чи удосконалення вже існуючих методів інженерії поверхні титанових сплавів, які б забезпечували характеристики зміцненої поверхні не гірші, ніж електролітичне хромування.

В дисертаційній роботі С. М. Лаврися оцінено перспективу поверхневого деформаційно-дифузійного зміцнення сплаву BT22, яке поєднує попереднє

холодне поверхневе пластичне деформування (метод обкочування) з подальшим хіміко-термічним обробленням (метод газового азотування). Така комбінація методів відкриває великі можливості для формування високо функціонального поверхневого шару з регламентованими властивостями та керування ними, оскільки вдається варіювати параметрами технологічних режимів обох методів. Саме закономірності формування на конструкційному високоміцному сплаві ВТ22 деформаційно-дифузійного зміщеного шару, який підвищує зносостійкість без помітного зниження втомної міцності сплаву, є актуальними завданнями матеріалознавства титану. Одержані результати можна використовувати у вітчизняному літако-, судно- та машинобудуванні, що підтверджується програмами спільних науково-дослідних робіт між АНТК «АНТОНОВ», Фізико-механічним інститутом ім. Г.В. Карпенка НАН України та Інститутом надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України по підвищенню надійності та довговічності гідроциліндрів авіаційної техніки зі сплаву ВТ22 застосуванням зносостійких покріттів та деформаційних технологій.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до науково-дослідних програм і тематик Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України за планами тем відомчого замовлення НАН України, в яких автор був виконавцем: «Розробка технології формування деформаційно-дифузійних зміщених шарів на поверхні деталей гідроциліндрів з титанового сплаву ВТ22 для забезпечення підвищеного рівня службових характеристик» Програми «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (РЕСУРС)»; «Розроблення технології комбінованого деформаційно-дифузійного модифікування поверхневих шарів конструкційних елементів авіаційної техніки з титанових сплавів» Програми «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд (РЕСУРС-2)».

З урахуванням вище викладеного, дисертаційна робота С. М. Лаврися є актуальною та відповідає сучасним науковим напрямкам, визначенім державними науково-технічними програмами.

Загальна характеристика та зміст роботи. Мета роботи у формулюванні автора полягає у встановленні загальних закономірностей термодифузійного насичення азотом двофазного титанового сплаву ВТ22 з попередньо модифікованими холодним поверхневим пластичним деформуванням

поверхневими шарами та розробленні схеми та режимів комбінованого деформаційно-дифузійного оброблення для формування зносостійких поверхневих шарів. Для досягнення цієї мети вирішено наступні задачі:

- Встановлено вплив холодного поверхневого пластичного деформування (ХППД) на фізико-механічні властивості поверхневого шару титанового сплаву BT22.
- Встановлено кінетичні закономірності термодифузійного насичення азотом титанового сплаву BT22 за діапазону температур його зміцнюваного термічного оброблення (ЗТО).
- Досліджено вплив вихідного структурного стану на газове азотування сплаву BT22.
- Оцінено термічну стабільність деформаційно модифікованого поверхневого шару на титановому сплаві BT22.
- Оцінено вплив попереднього ХППД на інтенсифікацію суміщеного зі ЗТО азотування сплаву BT22.
- Вивчено триботехнічні характеристики сплаву BT22 після деформаційно-дифузійного оброблення.
- Досліджено міцнісні та втомні властивості сплаву BT22 після деформаційно-дифузійного оброблення.
- Рекомендовано схему та режим деформаційно-дифузійного оброблення титанового сплаву BT22, які забезпечують регламентовані характеристики зміцнених шарів відповідно до вимог ДП «АНТОНОВ» до конструкційних титанових сплавів авіаційного призначення після поверхневого зміцнення.

Виконана робота відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – «Матеріалознавство».

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, визначено мету, об'єкт та предмет дослідження, перелічено задачі дослідження та методи дослідження, сформовано наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, особистий внесок автора та наведено апробацію результатів дисертації та публікацій.

У **першому розділі** наведено приклади використання високоміцного титанового сплаву BT22 у конструкціях вітчизняних літаків марки «Ан». Показано, що низькі триботехнічні характеристики унеможливлюють використання сплаву

ВТ22 у рухомих трибовузлах без попереднього поверхневого зміцнювального оброблення. Систематизовано основні закономірності поверхневого оброблення сплаву ВТ22 різними методами, наведено їх переваги та недоліки. Особливу увагу приділено застосуванню газового азотування та шляхам його інтенсифікації. Сформовано мету та основні задачі дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячений висвітленню методичних аспектів роботи. Об'єктом дослідження був високоміцний титановий сплав ВТ22 з деформаційно-дифузійно модифікованими поверхневими шарами. Описано обладнання, за допомогою якого проводили обкочування та азотування, суміщене зі зміцнювальним термічним обробленням, а також використані методики досліджень фізико-механічних, триботехнічних, механічних характеристик поверхнево зміщеного сплаву ВТ22.

У третьому розділі встановлено кореляційні залежності між параметрами ХППД та рівнем поверхневого зміщення титанового сплаву ВТ22 різного структурного стану. Показано, що збільшення навантаження забезпечує підвищення рівня поверхневого зміщення, а збільшення кількості проходів – покращення якості оброблюваної поверхні титанового сплаву ВТ22. Найефективніше поверхневе деформаційне зміщення реалізується на сплаві з вихідною двофазною $(\alpha+\beta)$ -пластинчастою чи глобулярною структурами.

У четвертому розділі досліджено кінетичні закономірності термодифузійного насичення азотом титанового сплаву ВТ22 та розраховано основні кінетичні константи процесу для широкого температурного діапазону (750...950°C). Показано вплив вихідного структурного стану на азотування, суміщене зі зміцнювальним термічним обробленням сплаву ВТ22, що в свою чергу впливає на структурно-фазовий стан і рівень поверхневого зміщення модифікованих шарів. Так, для сплаву з вихідною $(\alpha+\beta)$ -глобулярною та β -структурами рівень поверхневого зміщення вищий, ніж для сплаву з вихідною $(\alpha+\beta)$ -пластинчастою. Натомість найінтенсивніші структурні зміни (ріст α -фази) спостерігаємо у сплаві з вихідною β - та $(\alpha+\beta)$ -пластинчастою структурами.

П'ятий розділ присвячено дослідженю ефективності деформаційно-дифузійного оброблення титанового сплаву ВТ22. Підтверджено термічну стабільність деформаційно зміщеного шару за температури 820°C. Показано, що під час нагрівання в азотовмісному середовищі рекристалізаційні процеси деформованого шару гальмуються за рахунок протікання твердорозчинного

зміцнення. Показано, що проведення попереднього поверхневого деформування інтенсифікує азотування, суміщене зі ЗТО сплаву BT22, що підтверджується на 50% вищою поверхневою мікротвердістю та на 30% глибшим зміцненим шаром в порівнянні з азотуванням без попереднього ХППД.

У **шостому розділі** встановлено вплив деформаційно-дифузійного оброблення на трибологічну поведінку сплаву BT22 у фрикційній парі з деформівною бронзою БрАЖН 10-4-4 в умовах граничного мащення. Деформаційно-дифузійне оброблення титанового сплаву BT22 забезпечує найнижчі значення інтенсивності зношування, коефіцієнт тертя та температуру поблизу зони тертя досліджуваних трибопар порівняно зі ЗТО, ХППД та азотування, суміщеного зі ЗТО. Показано, що проведення попереднього поверхневого деформаційного оброблення сплаву BT22 сприяє підвищенню його зносостійкості у трибопарі з бронзою удвічі та на 30% знижує коефіцієнт тертя порівняно з азотуванням без попереднього ХППД.

У **сьомому розділі** встановлено, що після деформаційно-дифузійного оброблення втомна міцність зразків зі сплаву BT22 є вищою, ніж після азотування без попереднього ХППД та наближається до значень після ЗТО. Показано, що міцність зразків сплаву BT22 після деформаційно-дифузійного оброблення підвищується на 6%, а пластичність на 14%, порівняно зі ЗТО.

У **висновках** сформульовано основні наукові результати дисертаційної роботи.

Наукова новизна та практична значимість отриманих в роботі результатів. Наукове значення дисертації полягає у встановленні раніше невідомих особливостей формування деформаційно-дифузійних модифікованих шарів на конструкційному сплаві BT22; вивченю їх поверхневих фізико-механічних, трибологічних і механічних властивостей.

У рамках поставлених та вирішених у дисертації завдань хочу відзначити ряд нових наукових та практичних результатів.

- визначено кінетичні закономірності газового азотування титанового сплаву BT22 для широкого температурного діапазону (750...950°C);
- вперше досліджено вплив вихідного структурного стану сплаву BT22 на фізико-механічні характеристики поверхневого зміщеного шару після суміщеного зі ЗТО азотування та структурні зміни у матриці;

– вперше встановлено, що найефективніше ХППД реалізується у сплаві ВТ22 з вихідною двофазною пластинчастою чи глобулярною структурами. Для сплаву з вихідною β -структурою ХППД потрібно проводити за вищих навантажень;

– досліджено термічну стабільність деформованого поверхневого шару сплаву ВТ22 під час насищення в азотовмісному середовищі.

Практична цінність отриманих у дисертації результатів полягає у новому вирішенні науково-технічної задачі інтенсифікації газового азотування титанового сплаву ВТ22 шляхом попереднього модифікування його поверхні методом ХППД, що забезпечує підвищення рівня поверхневого зміщення та зносостійкості порівняно з газовим азотуванням.

На основі отриманих результатів розроблено технологічні рекомендації щодо комбінованого деформаційно-дифузійного модифікування титанового сплаву ВТ22 авіаційного призначення для ДП «АНТОНОВ».

Ступінь обґрунтованості, достовірності наукових положень та висновків, сформульованих у дисертації. Обґрунтованість наведених в дисертації наукових положень та висновків підтверджується опрацюванням недоліків та переваг існуючих методів інженерії поверхні сплаву ВТ22, чітким формулюванням мети роботи та завдань для її вирішення, комплексним характером експериментів, поєднанням матеріалознавчих досліджень з випробуваннями, що моделюють експлуатаційні умови роботи поверхнево зміщеного титанового сплаву ВТ22 у конструкціях шасі літаків марки «Ан». Достовірність результатів дослідження підтверджується їх відповідністю сучасним уявленням про структуру і властивості деформаційних і дифузійних поверхнево модифікованих шарів на титанових сплавах, узгодженістю в ряді випадків з результатами аналогічних досліджень та їх порівнянням з відомими результатами.

Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації й автореферату. Дисертація написана державною мовою, виклад матеріалу є логічним, послідовним від постановки задачі до висновків по роботі, стиль викладу грамотний, розділи взаємопов'язані та цілком розкривають поставлену мету.

Зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – «Матеріалознавство». Зміст автореферату відповідає змісту дисертації. Оформлення дисертаційної роботи та автореферату відповідає чинним вимогам.

Повнота викладення основних результатів дисертації. Зміст дисертації повністю відображену у публікаціях. За темою дисертації опубліковано 26 праць. У тому числі 12 статей у наукових фахових виданнях, з них 7 статей у виданнях, які включені наукометричної бази Scopus, 14 матеріалів та тез доповідей конференцій.

Зауваження до дисертаційної роботи та автореферату:

1. У розділі 2.1. на рисунку 2.1. наведено деталі шасі з титанового сплаву ВТ22. Не зовсім зрозуміло, котра з тих деталей працює в умовах граничного машинення, і в подальшому досліджується на тертя та зношування.
2. У методичній частині (ст. 64) зазначається, що за глибину зміщеного шару приймали глибину зони, мікротвердість якої перевищує твердість серцевини зразка на $\Delta HV=0,2$ ГПа. Не вбачаю за потрібне дублювати це у всіх наступних розділах (ст. 74 та ст. 93).
3. У роботі не обґрунтовано, чому термічну стабілізацію деформованого шару сплаву ВТ22 проводили саме за таких газодинамічних параметрів.
4. Автор у дисертаційній роботі використовує застарілі назви елементів, наприклад «атоми кисню чи азоту» замість «атоми оксигену чи нітрогену» та подекуди зустрічається термінологія, яка не відповідає чинному ДСТУ 2823-94. Тертя, зношування та машинення. Терміни та визначення. Наприклад, на ст. 65, дисертації вжито термін «масло» замість мастило або оліва.
5. У дисертаційній роботі використані ГОСТи, які вже замінені на ДСТУ. Наприклад на ст. 65 дисертації вказано, що для випробувань використано мастило АМГ-10 (ГОСТ 6794-53), котрий замінено на ДСТУ ГОСТ 6794:2019.
6. У дисертаційній роботі не наведено властивостей та складу мастила АМГ-10, яке використано для триботехнічних випробувань. Такі мастила, як правило містять функціональні присадки, які можуть провокувати вибірковий механізм зношування з перенесенням матеріалу з однієї поверхні тертя на іншу, особливо, за використання бронзи у якості контртіла.
7. У шостому розділі ніде не розглянуто вплив мастила на процеси тертя в умовах граничного машинення та впливу формування механізму зношування.

8. Оскільки деформаційно-дифузійне оброблення розроблялось як перспективний метод інженерії поверхні сплаву BT22 вітчизняного авіаційного призначення, доцільно було би порівняти трибологічні і втомні характеристики сплаву BT22 після деформаційно-дифузійного оброблення з тими ж характеристиками після інших перспективних поверхневих оброблень, які зазначені у літературному огляді.

Зроблені вище зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Заключна оцінка дисертаційної роботи. Дисертація С. М. Лаврися «Підвищення зносостійкості титанового сплаву BT22 поверхневим деформаційно-дифузійним обробленням» є завершеною науковою роботою, в якій отримано нові результати, важливі в науковому і практичному плані, що поглиблює знання про матеріалознавчі основи інженерії поверхні конструкційних титанових сплавів комбінуванням деформаційних і дифузійних технологій.

Дисертаційна робота відповідає чинним вимогам до кандидатських дисертацій, а її автор, Сергій Мирославович Лаврись, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – «Матеріалознавство».

Офіційний опонент,
доцент кафедри прикладного
матеріалознавства та обробки металів
Національного університету
«Львівська політехніка» МОН України
кандидат технічних наук, доцент

Л. І. Богун

Підпис доцента Л. І. Богун засвідчує:

Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка» МОН України
кандидат технічних наук, доцент



Р. Б. Брилинський