

**Відгук**  
**офіційного опонента**  
**на дисертаційну роботу ЛАВРИСЯ Сергія Мирославовича**  
**«ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT22**  
**ПОВЕРХНЕВИМ ДЕФОРМАЦІЙНО-ДИFUЗІЙНИМ ОБРОБЛЕННЯМ»**,  
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
зі спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство

**Актуальність теми.**

Серед титанових сплавів, які широко використовують у літакобудуванні, особливої уваги заслуговує високоміцний двофазний титановий сплав VT22 системи Ti–Al–Mo–V–Cu–Fe. Особливістю сплаву VT22 є висока схильність до контактного схоплювання під час тертя, що створює певні труднощі та робить небезпечним його застосування без поверхневого зміцнення у вузлах тертя механізмів. Тому, щоб підвищити зносостійкість титанового сплаву VT22, застосовують різні методи поверхневого зміцнювального оброблення, де найуніверсальнішим методом інженерії поверхні залишається газове азотування, яке легко відтворюється та дає змогу обробляти деталі складної форми, в тому числі з отворами. Проте на практиці для формування оптимального зносостійкого зміцненого шару, газове ізотермічне азотування потрібно проводити за високих температур ( $T > 900^{\circ}\text{C}$ ) і тривалих витримок ( $t > 25$  годин), що призводять до росту зерен матриці сплаву, і, як наслідок нівелюється об'ємне зміцнення сплаву. Тому, для отримання регламентованих як об'ємних, так і поверхневих характеристик сплаву необхідно інтенсифікувати газове азотування. Цього можна досягнути, зокрема, за рахунок попереднього модифікування структури шляхом поверхневого пластичного деформування, що зумовить зниження температурно-часових параметрів термодифузійного насичення азотом і забезпечить отримання регламентованих поверхневих та об'ємних характеристик сплаву, а, відтак, і належного рівня його зносостійкості.

На основі викладеного, є всі підстави вважати, що дисертаційна робота Лаврися Сергія Мирославовича, яка присвячена з'ясуванню закономірностей термодифузійного насичення азотом двофазного титанового сплаву VT22 з попередньо деформованими поверхневими шарами та розробленню схем і режимів комбінованого деформаційно-дифузійного оброблення для формування зносостійких поверхневих шарів, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Актуальність роботи підтверджується її виконанням у рамках держбюджетної тематики Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України за відомчим замовленням НАН України, а саме: «Розробка технології формування деформаційно-дифузійних зміцнених шарів на поверхні деталей гідроциліндрів з титанового сплаву VT22 для забезпечення

підвищеного рівня службових характеристик» Програми «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (РЕСУРС)» (№№ держреєстрації 0113U004209, 0115U004001; 2013–2015 рр.); «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)» (№№ держреєстрації 0116U006333, 0117U000713, 0118U000467, 0119U101189; 2016-2020 рр.)

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформованих в дисертації, їх достовірність і новизна.**

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та висновків дисертаційної роботи Лаврися С.М. підтверджуються використанням широкого спектру сучасних методів дослідження, чітким формулюванням задач і комплексним підходом до їх розв'язання, значним обсягом експериментальних результатів.

Основні матеріали дисертаційної роботи доповідались на VII, VIII та IX Міжнар. наук.-техн. конф. «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (Київ, 2015, 2016, 2017); XXIV Відкритій наук.-техн. конф. молодих науковців і спеціалістів (КМН-2015) «Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи» (Львів, 2015); Міжнар. наук.-техн. конф. молодих науковців «Сучасні технології в механіці» (Хмельницький, 2016); XIV Всеукр. наук.-практ. конф. «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра» (Київ, 2016); IV Міжнар. наук.-практ. конф. «Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні» (Запоріжжя, 2016); 7th world congress «Aviation in the XXI-st century: Safety in aviation and space technologies» (Kyiv, 2016); 5th Int. Acad. Conf. «Mechanical engineering, materials science, transport» (Lviv, 2016); 9th Int. Conf. of young scientists on welding and related technologies (Kyiv, 2017); VIII Міжнар. техн.-практ. конф. «АВІА-2017», (Київ, 2017); Міжнар. наук.-практ. конф. «Титан 2018: виробництво та використання в Україні» (Київ, 2018); 9th Int. Conf. «Welding and related technologies – present and future» (Kyiv, 2018); 14-й Міжнар. симпозіумі українських інженерів-механіків у Львові, (Львів, 2019); Young Scientists Conf. on Materials Science and Surface Engineering (Lviv, 2019).

Крім того, робота у повному обсязі доповідалася і обговорювалася на науковому семінарі «Проблеми матеріалознавства та інженерії поверхні металів» Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України.

### **Структура та зміст дисертації.**

Дисертація складається з анотації українською та англійською мовами, списку публікацій здобувача, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та двох

додатків. Загальний обсяг роботи становить 170 сторінок, вона містить 76 рисунків, 7 таблиць, список використаних джерел із 210 найменувань.

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, сформовано мету і задачі роботи, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, а також наведені дані щодо апробації матеріалів дисертаційної роботи та публікації за темою досліджень.

В **першому розділі** наведено огляд літературних джерел, де ґрунтовно проаналізовано доцільність використання двофазного титанового сплаву VT22 у вітчизняному авіабудуванні. Показано, що основним недоліком, який обмежує використання сплаву VT22 у рухомих конструкціях і трибовузлах літаків марки «Ан» є низькі триботехнічні характеристики.

Розглянуто сучасний стан досліджень в напрямку підвищення зносостійкості сплаву VT22. Проведено критичний аналіз переваг та недоліків різних методів інженерії поверхні сплаву VT22 не лише за експлуатаційними характеристиками, але й їх екологічністю, економічністю і відтворюваністю на практиці.

Обґрунтовано використання газового азотування для підвищення триботехнічних характеристик титанових сплавів. Показано, що інтенсифікація газового азотування структурними чи технологічними підходами підвищує якість зміцнених шарів і знижує енерговитрати під час реалізації процесу насичення. Обґрунтовано можливість інтенсифікації насичення азотом шляхом попереднього холодного поверхневого пластичного деформування титанових сплавів. Сформульовано мету та задачі роботи.

У **другому розділі** наведено характеристики досліджуваного сплаву VT22, викладена методика холодного поверхневого пластичного деформування та газового азотування, суміщеного зі зміцнювальним термічним обробленням сплаву VT22. В ході роботи проведено дослідження властивостей сплаву з модифікованими деформаційно-дифузійним обробленням поверхневими шарами, використовуючи наступні методики: оптичної та сканувальної електронної мікроскопії, мікрофрактографічного, рентгенофазового та рентгеноструктурного аналізів, термогравіметрії, дюриметрії, профілометрії, трибологічних і механічних випробувань.

У **третьому розділі** вивчено вплив холодного поверхневого пластичного деформування на характеристики поверхневого зміцненого шару сплаву VT22 різного структурного стану.

Встановлено, що збільшення навантаження під час поверхневого деформування не впливає на рівень зміцнення титанового сплаву з вихідною  $\beta$ -структурою. Натомість, для сплаву з вихідною  $(\alpha+\beta)$  пластинчастою і глобулярною структурами, внаслідок подрібнення структури поверхневого шару, рівень поверхневого зміцнення підвищується на 15%. Також за навантажень вище 300 Н під час поверхневого пластичного деформування якість обробленої поверхні сплаву VT22 погіршується внаслідок деламінування з наступним налипанням відлушеного матеріалу.

Встановлено, що незалежно від вихідного структурного стану сплаву VT22 збільшення кількості проходів під час холодного поверхневого пластичного деформування покращує якість оброблюваної поверхні на декілька класів та несуттєво впливає на рівень поверхневого зміцнення.

Згідно отриманих результатів рекомендовано проводити поверхневу деформаційну обробку за навантаження 300 Н в 11 проходів, що забезпечує оптимальний комплекс поверхневого зміцнення.

У **четвертому розділі** викладено кінетичні закономірності термодифузійного насичення азотом титанового сплаву VT22 та оцінено ефективність азотування, суміщеного зі зміцнювальним термічним обробленням, залежно від вихідного структурного стану сплаву VT22.

Встановлено, що процеси низькотемпературної взаємодії високоміцного двофазного титанового сплаву VT22 з азотом на базі температурно-часових інтервалів зміцнювального термічного оброблення описується параболічною залежністю. На основі експериментальних даних термогравіметричних досліджень визначено кінетичні константи процесу азотування. Отриманні значення константи швидкості азотування свідчать про те, що зі зниженням температури азотування з 820 до 750°C швидкість азотування зменшується у 3,3 рази. Також це підтверджується результатами дюрOMETричного і рентгенофазового аналізів.

Показано, що залежно від вихідного структурного стану сплаву VT22 інтенсивність процесів нітридоутворення та газонасичення під час азотування, суміщеного зі термічним обробленням сплаву є різною, що впливає на рівень поверхневого зміцнення сплаву. Так, найбільший рівень поверхневого зміцнення спостерігається у сплаву VT22 з вихідною однофазною  $\beta$ - та двофазною  $(\alpha+\beta)$ -глобулярною структурами, що добре узгоджуються з результатами рентгенофазового аналізу, де для цих сплавів фіксується вища інтенсивність нітридних фаз після азотування, а, отже, вища інтенсивність процесів нітридоутворення.

Встановлено, що з підвищенням температурно-часових параметрів режимів азотування, суміщеного зі термічним обробленням, незалежно від вихідного структурного стану сплаву VT22, процеси фазоутворення та газонасичення інтенсифікуються. Згідно рентгенофазового аналізу після азотування за усіх досліджуваних режимів, незалежно від вихідного структурного стану сплаву VT22, на поверхні формується двофазна нітридна плівка, що представлена нижчим нітридом титану  $Ti_2N$  та монотітридом  $TiN$ .

Встановлено, що внаслідок підвищення температурно-часових параметрів режимів азотування, суміщеного зі зміцнювальним термічним обробленням, рівень поверхневого зміцнення зростає. Найбільший приріст поверхневої мікротвердості та глибину зміцненого шару спостерігається під час термодифузійного насичення за температури 840°C і експозиції 10 год першого ступеня термічного оброблення. Найвищий рівень поверхневого зміцнення фіксується для сплаву з  $\beta$ - та  $(\alpha+\beta)$ -глобулярною структурами.

Однак, згідно з мікроструктурним аналізом матриці (основи) титанового сплаву встановлено, що незалежно від вихідного структурного

стану зі збільшенням часової експозиції та температури насичення у сплаві починаються процеси ререкристалізації, тобто зерна  $\alpha$ -фази розростаються в тілі зерен  $\beta$ -фази. Найінтенсивніший ріст  $\alpha$ -фази спостерігається у сплаві з вихідною  $\beta$ - та ( $\alpha+\beta$ )-пластинчастою структурами, що є негативним з точки зору міцнісних характеристик матеріалу: що більший бал зерна  $\alpha$ -фази після термічного чи хіміко-термічного оброблення, то нижчі механічні та втомні властивості матеріалу. Тому для забезпечення рівня поверхневого зміцнення без помітного погіршення структурного стану титанової матриці перевагу слід надати термодифузійному насиченню азотом сплаву VT22 з вихідною  $\alpha+\beta$ -глобулярною структурою.

Отримані характеристики зміцненої поверхні після досліджуваних режимів азотування забезпечують лише нижню межу регламенту ДП «АНТОНОВ». Тому для досягнення регламентованого поверхневого та об'ємного зміцнення сплаву VT22 азотування інтенсифікували, формуючи шляхом попереднього ХППД сплаву умови для полегшеної дифузії азоту.

**В п'ятому розділі** показано ефективність деформаційно-дифузійного оброблення титанового сплаву VT22.

Металографічним аналізом показано, що після нагрівання у вакуумі та в середовищі азоту здрібненні зерна у деформованому шарі укрупнюються внаслідок рекристалізаційних процесів. Найменший ріст зерен у деформованому шарі спостерігається після нагрівання в азотовмісному середовищі. Встановлено, що внаслідок здрібнення структури поверхневого шару після обкочування розміри кристалітів зменшуються, що призводить до збільшення значень середньоквадратичної деформації ґратки та густини дислокації. Наступний нагрів як у вакуумі, так і атмосфері азоту, за рахунок процесів рекристалізації збільшує розміри кристалітів і, відповідно, зменшує деформацію кристалічної ґратки та густину дислокацій. Однак, після нагріву у вакуумі чи азоті розміри кристалітів не перевищують розміри кристалітів у вихідному стані, що вказує на домінування процесів твердорозчинного зміцнення азотом над процесами рекристалізації.

Показано, що проведення попереднього поверхневого деформування інтенсифікує азотування сплаву VT22, суміщене зі зміцнювальним обробленням, що підтверджується на 50% вищою поверхневою мікротвердістю та на 30% глибшим зміцненим шаром в порівнянні з азотуванням без попереднього поверхневого деформування.

Встановлено, що параметри зміцненого поверхневого шару сплаву VT22 після деформаційно-дифузійного оброблення в повній мірі відповідають регламенту ДП «Антонів» до конструкційних титанових сплавів авіаційного призначення після поверхневого зміцнення.

**Шостий розділ** присвячено дослідженню триботехнічних характеристик титанового сплаву VT22 після деформаційно-дифузійного оброблення.

Встановлено, що на етапі стабільного зношування найнижчі значення коефіцієнта тертя та температури в околі зони тертя фіксуються для трибопари, де титановий сплав VT22 зміцнювали деформаційно-дифузійним

обробленням. Проведення попереднього поверхневого деформування перед азотуванням сплаву VT22 дозволяє знизити коефіцієнт тертя та температуру в околі зони тертя досліджуваної фрикційної пари на 30 і 20%, відповідно порівняно азотуванням, суміщеним зі зміцнювальним термічним обробленням.

Показано, що фрикційна пара, де сплав VT22 зміцнювали деформаційно-дифузійним обробленням володіє найвищою зносостійкістю, яка на порядок вища, ніж фрикційної пари, де сплав після зміцнювального термічного оброблення і холодного поверхневого пластичного деформування, та удвічі вищі ніж – де сплав зміцнювали азотуванням, суміщеним зі зміцнювальним термічним обробленням.

Згідно металографічного аналізу встановлено, що механізм зношування сплаву VT22 після зміцнювального термічного оброблення і холодного поверхневого деформування відповідає адгезійному і втомному механізмам. Натомість формування на поверхні сплаву VT22 нітридної плівки після азотування і деформаційно-дифузійного оброблення змінює механізм зношування на абразивний, що і пояснює зменшення інтенсивності зношування цих трибопар на порядок.

Представлено нове вирішення науково-технічної задачі підвищення зносостійкості сплаву VT22 шляхом інтенсифікації азотування попереднім модифікуванням поверхневої структури холодним поверхневим пластичним деформуванням.

У **сьомому розділі** охарактеризовано міцнісні та втомні властивості зразків із титанового сплаву VT22 після деформаційно-дифузійного оброблення.

Встановлено, що незалежно від зміцнювального поверхневого оброблення втомна міцність титанового сплаву VT22 дещо знижується. Втомна міцність зразків зі сплаву VT22 після деформаційно-дифузійного оброблення наближається до значень після зміцнювального термічного оброблення, яка є на 12% вищою за межу витривалості сплаву VT22 зміцненого азотуванням без попереднього поверхневого деформування.

Встановлено, що після запропонованих обробок межа міцності зростає, де деформаційно-дифузійне та термодифузійне оброблення підвищує межу міцності зразків зі сплаву VT22 на 6 та 12% відповідно. Натомість пластичність сплаву після деформаційно-дифузійно оброблення підвищується на 14% порівняно з азотуванням, суміщеним зі зміцнювальним термічним оброблення, де значення пластичності знижується на 16%.

При цьому, показано, що деформаційно-дифузійне оброблення сплаву VT22 за збереження об'ємного зміцнення забезпечує регламентовані характеристики поверхневого зміцнення та зносостійкості.

У **висновках**, що сформульовані в дисертації, повністю відображено всі аспекти дисертаційної роботи, показано її вклад в науку і практику.

## **Наукова новизна отриманих у роботі результатів, сформульованих положень та висновків.**

Визначено низькотемпературний діапазон залежності параболічної константи швидкості азотування і уточнено енергію активації процесу та інші кінетичні константи для широкого температурного діапазону (750...950°C) азотування двофазного титанового сплаву VT22.

Вперше досліджено вплив вихідного структурного стану сплаву VT22 на фізико-механічні характеристики поверхневого зміцненого шару після суміщеного зі ЗТО азотування та структурні зміни у матриці. Показано, що для сплаву з вихідною ( $\alpha+\beta$ )-глобулярною та  $\beta$ -структурами рівень поверхневого зміцнення вищий, ніж для сплаву з вихідною ( $\alpha+\beta$ )-пластинчастою. Натомість інтенсивні структурні зміни матриці (ріст  $\alpha$ -фази) спостерігаються у сплаву з вихідною  $\beta$ - та ( $\alpha+\beta$ )-пластинчастою структурами.

Вперше встановлено, що найефективніше холодне поверхнєве пластичне деформування реалізується у сплаві VT22 з вихідною двофазною пластинчастою чи глобулярною структурами. Для сплаву з вихідною  $\beta$ -структурою поверхнєве пластичне деформування потрібно проводити за вищих навантажень.

Вперше на основі мікроструктурного, дюрOMETричного та рентгеноструктурного аналізів підтверджено термічну стабільність деформаційно зміцненого поверхневого шару сплаву VT22 в умовах насичення азотом до 820°C. Показано, що під час нагрівання в азоті процеси рекристалізації деформаційно зміцненого шару пригнічуються через процеси твердорозчинного зміцнення, що підтверджується збереженням деформованого шару з подрібненою структурою.

## **Практичне значення одержаних результатів:**

Запропоновано нове вирішення науково-технічної задачі інтенсифікації газового азотування титанового сплаву VT22 шляхом попереднього модифікування його поверхні методом холодного поверхневого пластичного деформування: поверхнева мікротвердість зростає на 50%, а глибина зміцненого шару потовщується на 30% порівняно з азотуванням без попереднього деформування.

Рекомендовано схему та режим деформаційно-дифузійного оброблення, що за регламентованого об'ємного зміцнення сплаву VT22 забезпечують підвищення вдвічі його зносостійкості у трибопарі з бронзою БрАЖН 10-4-4 та на 30% знижують коефіцієнт тертя порівняно з азотуванням без попереднього деформування.

Розроблено технологічні рекомендації щодо комбінованого деформаційно-дифузійного модифікування поверхневих шарів конструкційних елементів авіаційної техніки з титанового сплаву VT22 для Державного підприємства «АНТОНОВ».

## **Повнота викладу матеріалів дисертації в опублікованих працях.**

Основний зміст дисертації роботи Лавриця С.М. відображено у 26 друкованих працях, зокрема, в 11 статтях у наукових фахових виданнях, з них 7 статей у виданнях, які включені до міжнародної наукометричної бази Scopus, 2 з яких у виданнях, що входять до Q1 і Q2, 2 статті – у наукових періодичних виданнях інших держав, 14 тез і матеріалів міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій.

Опубліковані роботи повністю відображають зміст дисертації.

Автореферат за змістом ідентичний до тексту та основних положень і висновків дисертаційної роботи.

## **Мова та стиль дисертації.**

Дисертаційна робота написана державною мовою, грамотно. Розділ експериментального матеріалу логічний. Застосовано у роботі наукову загальновизнану термінологію. Стиль викладення результатів, нових наукових положень і висновків забезпечує доступність їх сприйняття та використання. Експериментальні дані проілюстровані графіками, фотографіями, діаграмами, таблицями, що сприяє розумінню викладених результатів.

Тема та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

## **Зауваження до автореферату і дисертаційної роботи.**

1. В дисертаційній роботі автор використовує термін «зміцнювальне термічне оброблення (ЗТО)», хоча в деяких опублікованих автором працях використовувався термін «штатна термічна обробка (ШТО)».

2. В роботі під час оптимізації азотування, суміщеного зі зміцнювальним термічним оброблення, змінювали температурно-часові параметри термодифузійного насичення. А газодинамічні – чомусь ні, хоча вони також впливають на процес нітридоутворення і газонасичення.

3. Дослідження термічної стійкості деформованого поверхневого шару на сплаві ВТ22 проводили лише за температур першого ступеню (820°C) зміцнювального термічного оброблення. Водночас, важливо було б провести дослідження за температури другого ступеня (750°C) зміцнювального термічного оброблення.

4. Не обґрунтовано, з яких міркувань для трибологічних досліджень в якості матеріалу контртіла обрали деформівну бронзу БрАЖН 10-4-4.

5. У роботі автор визначає співвідношення  $\alpha/\beta$  фаз до та після азотування, при цьому у роботі не зазначає яким саме методом.

6. На рисунку 4.1 через малий розмір мікроструктур важко розгледіти основні структурні зміни під час зміцнювального термічного оброблення.

7. У тексті дисертації зустрічаються стилістичні і термінологічні відхилення: «володіє» замість «має», «призводить» замість «обумовлює» тощо.

### **Висновок про відповідність дисертації вимогам ДАК.**

Дисертація Лаврися Сергія Мирославовича «Підвищення зносостійкості титанового сплаву VT22 поверхневим деформаційно-дифузійним обробленням» є завершеною роботою, в якій представлено нові, важливі в науковому і практичному плані результати, спрямовані на вирішення актуальної науково-практичної задачі – підвищити зносостійкість та довговічність конструкційного сплаву VT22 для вітчизняного авіабудування. Робота характеризується внутрішньою єдністю, написана грамотно з використанням сучасної наукової термінології.

Зазначені вище зауваження не знижують загальної позитивної оцінки та значення дисертаційної роботи і рівня достовірності основних її результатів.

За актуальністю, новизною отриманих результатів, їх достовірністю та практичною значимістю робота Лаврися Сергія Мирославовича повністю відповідає вимогам Положення «Про порядок присудження наукових ступенів» ДАК України щодо кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент,  
заслужений діяч науки і техніки України,  
доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри технології матеріалів і  
машинобудування Національного  
лісотехнічного університету України  
МОН України

*В.М. Голубець*

В.М. Голубець



*м.м. ЗАВІРЯЮ*  
*начальник відділу кадрів*  
*Національного лісотехнічного*  
*університету України*  
*29 20*