the kinetics of solidification and the structure of the cast product. To do this, a fictitious layer (volume) is introduced between the metal and the mold wall, which allows describing the effect of the gas gap on heat transfer without the need to adapt the mesh or model geometry.

Computer calculations indicate a distribution of the solidification rate across the cross-section of the ball casting (0.5-0.8 mm/s), at which a white cast iron structure is formed across the entire cross-section of the cast product. Based on the calculated data, graphical dependencies were constructed for changes in the casting surface layer temperature and gas gap over time. The calculations were performed for various casting regimes (painted chill mold, lined chill mold, unpainted chill mold).

When the thickness of the chill mold wall increased from 40 to 70 mm, the kinetics of curing, due to the small size of the casting and rapid cooling, did not change qualitatively or quantitatively. At the same time, the cooling time of the solidified casting in the chill mold to the knockout temperature was somewhat reduced (~14%), which can be explained by the greater accumulation of heat in the more massive casting mold.

In general, Ø40 mm cast iron balls receive significantly lower dynamic loads when operated in mills compared to Ø100-120 mm grinding bodies, and white cast iron may be an economically viable material for their production.

cast iron ball, chill mold, gas gap, solidification kinetics, modeling, numerical study

Одержано (Received) 19.01.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 11.02.2026*
Прийнято до друку (Approved) 26.02.2026

УДК 621.432 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).163-171

А. В. Рутковський, ст. наук. співр., канд. техн. наук,
О.Г. Трапезон, пров. наук. співр., д-р. техн. наук,
Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна
С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук,
О.В. Бевз, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: rut2000@ukr.net, coating@ipp.kiev.ua, marko60@ukr.net, oleg_bevz@ukr.net

Дослідження втомної міцності титанових сплавів, модифікованих вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі, при високочастотному навантаженні

В роботі проведено експериментальні дослідження з визначення втомної міцності тонколистового титану ВТ1-0 до та після модифікування поверхневого шару вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі. Втомні випробування призматичних зразків при їх резонансних згинних коливаннях проведено при високій частоті навантаження – (11-12) кГц. Побудовані в результаті проведених випробувань втомні криві на базі 10^7 циклів навантаження. Проведено випробування п'яти груп зразків – одна група в стані поставки без обробки і чотири групи після технологічного модифікування шару. З кривих втоми отримано значення меж витривалості σ_{-1} при симетричному змінному навантаженні. Показано, що незалежно від варіації параметрів технології вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі в заданому їх діапазоні, значення межі витривалості σ_{-1} титану ВТ1-0 з модифікованою поверхнею вище на (12-17)% порівняно зі значенням σ_{-1} не модифікованого титану ВТ1-0.

іонне азотування, імпульсний режим, титановий сплав, межа витривалості, навантаження

© А. В. Рутковський, О. Г. Трапезон, С. І. Маркович, О. В. Бевз, 2026

Постановка проблеми. Модифікацією поверхневого шару титанових сплавів методом вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі (ВІАвІР) можна досягти підвищення їх міцності. Від результатів обробки залежать властивості як основного металу, так і поверхневого модифікованого шару, котрий буде або зміцненим, або ослабленим, незважаючи на хімічну ідентичність основи і модифікованого шару [1]. Важливе прикладне значення має міцність в умовах змінного навантаження, кількісною характеристикою якої є межа витривалості при симетричному циклі навантаження з максимальним напруженням σ_{-1}. Проблема вибору технології вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі яка забезпечує підвищення σ_{-1} титанових сплавів є актуальною здачею [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно аналізу літературних даних, метод ВІАвІР не може гарантувати відновлення результатів, якщо не витримано необхідні вихідні технологічні умови. Недостатнє дотримання потрібних оптимальних технологічних параметрів ВІАвІР призводить до небажаних результатів. Згідно [1, 2] можна навіть отримати зниження початкової міцності з зменшенням межі витривалості модифікованих конструкцій при змінних навантаженнях. Разом з тим в роботах [2 - 5] при дослідженні впливу режимів ВІАвІР на міцність конструкцій встановлено, що модифікація поверхонь ЕК ВІАвІР, може суттєво підвищити σ_{-1}, при оптимізації параметрів технологічного процесу.

Проте результати деяких досліджень [6, 7], свідчать про неоднозначність висновків щодо їх впливу на величину σ_{-1}. Так, наприклад, в [6] описано метод створення нітриду Ті та Al-(TiAlN) і визначено таку механічну характеристику як модуль Юнга. Схожим об'єктом є дослідження механічних характеристик модифікованих поверхонь титанових сплавів [7].

Зміцнюючим технологіям на основі азотування поверхневого шару присвячено ряд публікацій [8-10]. Так в [8] викладена технологія зміцнення азотуванням та описано всі етапи її модифікації. Дослідженням доведено значне підвищення твердості поверхні. В [9-10] зазначається, що азотування як ХТО призводить до високої стійкості до зношення та втоми, зниження деформативності.

В роботах [11,12] розроблено теоретичні основи та методичні рекомендації що до визначення характеру впливу технологічних параметрів процесу модифікації на характеристику витривалості σ_{-1} в умовах циклічних навантажень. Зокрема приведена теоретична основа та методика експериментального визначення циклічної міцності титанових сплавів з поверхнею, модифікованою в ВІАвІР при одно вісьовому високочастотному розтязі - стиску на прикладі азотованих зразків модифікованого тонколистового титану ВТ1-0, які були навантаженні згінним циклічним деформуванням з високою частотою біля 10÷12 кГц. Разом з тим виникає необхідність проведення серії експериментів для встановлення залежностей та оптимізації технологічних параметрів, що і обумовило мету і задачі дослідження.

Постановка завдання. Метою дослідження було виявлення можливостей для зміцнення через підвищення межі витривалості сплаву ВТ1 шляхом вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі та з'ясування характеру впливу технологічних параметрів процесу на характеристику витривалості σ_{-1}.

Задачі дослідження.

Провести експерименти з визначення втомної міцності тонколистового титану ВТ1-0 до та після модифікування поверхневого шару ВІАвІР.

Визначити значення межі витривалості σ_{-1} титану ВТ1-0 з модифікованою поверхнею вище на (12-17)% в порівнянні зі значенням σ_{-1} не модифікованого титану ВТ1-0.

На основі аналізу кривих втоми визначити оптимальне значення технологічних параметрів ВІАвІР для гарантованого зміцнення титану ВТ1-0 в даному (вибраному) проміжку параметрів.

Виклад основного матеріалу. Модифікування ВІАвІР виконано за допомогою установки, до складу якої входять вакуумна камера та системи – вакуумування, газопостачання та контролю температури. Змінюючи вихідні технологічні параметри (робочий тиск P в вакуумній камері під час процесу азотування та температура t процесу азотування), можна змінювати властивості модифікованого поверхневого шару титанових сплавів, а отже і їх експлуатаційні властивості в цілому.

В роботі, що представлена, проведено дослідження характеру впливу покриття (з модифікацією поверхневого шару ВІАвІР) на витривалість при високій частоті (біля 10 кГц) змінного навантаження. Зразки довжиною 24,1 мм мали в зоні втомного руйнування поперечній переріз розміром (6×0,5) мм. Цілком обов'язковою є необхідність, щоб для коректного зіставлення майбутніх результатів розмір відповідного поперечного перерізу у зразків для випадку розтягу-стиску повинен бути аналогічним; частота випробувань також.

Розрахунки показують, що резонансна довжина металевого стрижня, який коливається на частоті 10 кГц по основній формі, повинна бути доволі значною – біля 240÷250 мм. Оскільки при таких довжинах забезпечити необхідний розмір (6×0,5) мм перерізу зразка без втрати його стійкості практично неможливо, із-за мінімальної жорсткості при згинанні, то в даному випадку необхідний пошук вирішення цієї проблеми. Пластини з таких матеріалів, що зібрані в пакет, працюють саме в умовах циклічного розтягу-стиску при частотах (3,10,20,40) кГц. Для того, щоб ще більше підвищити стійкість при поздовжніх коливаннях таких зразків, їх випробування було проведено на частотах, більших ніж (3;10) кГц, тому що, наприклад, при 20 кГц довжина зразка буде меншою ніж довжина при 10 кГц рівно в 2 рази.

Експериментальна частина. Як приклад, наведемо послідовність дій при тестовому визначенні втомної міцності по запропонованій методиці. Вихідні дані: робоча номінальна частота випробувальної установки (10÷11) кГц; (ВТ1-0) – титановий сплав у формі тонколистових матеріалів, які підлягають випробуванням на втомну міцність.

Виходячи з заданої частоти розраховано розміри і виготовлено циліндричний напівхвильовий стрижень з вантажами масою G, матеріал якого - титановий сплав ВТ1-0.

Розрахункові характеристики цього стрижню:

$E_1 = 1{,}15\times10^5$ МПа; $F_1 = 38{,}465$ мм^2; $\gamma_1 = 4{,}49$ г/см^3; $g = 981$ см/сек^2; $G = 40{,}989$ г; $2a =$ 48,2 мм.

З урахуванням знайденого розміру $2a$ виготовлена серія зразків без вантажів при загальній довжині $l < 2a$, запас якої потрібний для закріплення на вантажі G.

Розрахункові характеристики зразка: $E = 7{,}2\times10^5$ МПа; $\gamma = 2{,}8$ г/см^3; $2a = 48{,}2$ мм; $F = 2{,}5$ мм^2; $h = 0{,}5$ мм^2; $b = 5$ мм. Після складання коливальної системи, встановлення її на вібратор та збудження резонансних коливань виміряна її частота $f = 10{,}7$ кГц.

Використавши наведені вище характеристики матеріалів, знайдено

$$\xi = \sqrt{\frac{\rho_1 / \rho}{E_1 / E}} = 1{,}001 = 1.$$

З урахуванням цього значення ξ вираз (5.7) матиме вигляд

$$\frac{M_1 + 2M}{G} = katgka, \qquad (1)$$

де $\frac{M_1+2M}{G}=\frac{a\left(F_1\rho_1+2F\rho\right)}{G}=0{,}1098=0{,}11.$

Найменший (основний) корінь трансцендентного рівняння (1) в цьому випадку становить $ka=0{,}326$. Після внесення цього ka в (5.9) з'являється можливість визначити власну частоту системи, яка повинна мало відрізнятись від резонансної частоти $f=10{,}7$ кГц. Отримано

$$f=\frac{ka}{2\pi a}\sqrt{\frac{Eg}{\gamma}}=10{,}818\times10^3 \text{ 1/сек}=10{,}8 \text{ кГц}.$$

Різниця між експериментальним значенням $f=10{,}7$ кГц і розрахунковим - $f=$ 10,8 кГц становить величину, яка менше 1%. Відповідно до знайденого $ka=0{,}326$ вирази для переміщень і напружень будуть мати вигляд

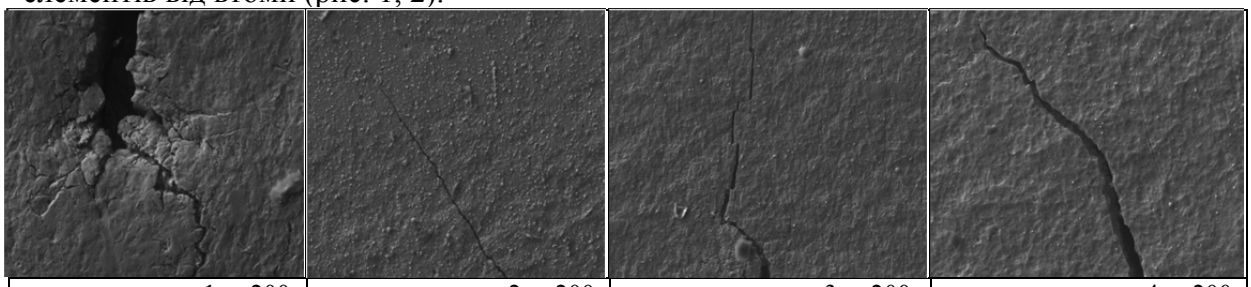
$$W=W_0\frac{\sin kx}{\sin ka}=W_0 3{,}122\sin\left(0{,}326\frac{x}{a}\right);$$

$$\sigma=W_0\frac{kE}{\sin ka}\cos(kx)=W_0 3{,}041\cdot10^2\cos\left(0{,}326\frac{x}{a}\right) \text{ кг/мм}^3,$$

де W_0 – переміщення при $x\geq a,$ які вимірюються за допомогою мікроскопа.

Аналогічні розрахункові співвідношення можна отримати для зразків інших металів, наприклад, із титанового сплаву ВТ1-0. Для цього достатньо ввести у відповідні загальні вирази для f,W,σ відповідні характеристики цих матеріалів.

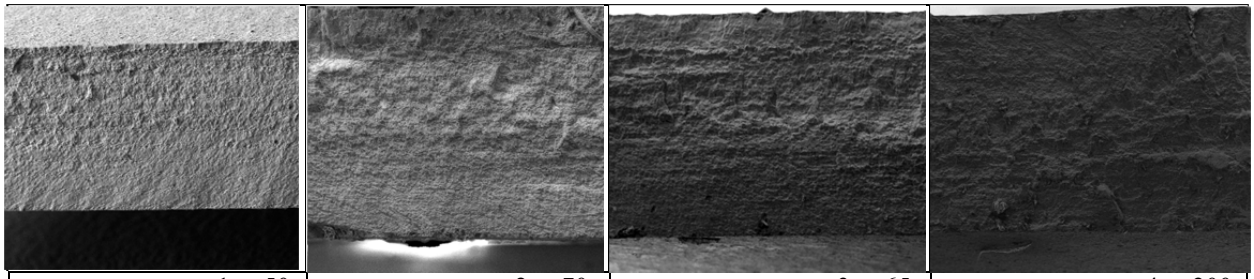
При систематичному повторенні навантаження та розвантаження проходить накопичення дефектів структури матеріалу, що призводить до виникнення мікроскопічних тріщин, поєднання яких викликає руйнування конструкційних елементів від втоми (рис. 1, 2).



1, х 200	2, х 200	3, х 200	4, х 200

Рисунок 1 - Розвиток тріщини по поверхні зразка з Ті-сплаву: при температурі 750^0С:
1 – до азотації (ВТ1-0); *2* – після азотації (ВТ1-00); *3* – до азотації (ВТ1-00);
4 – після азотації (ВТ1-00).

Джерело: розроблено авторами



1, х 50	2, х 70	3, х 65	4, х 200

Рисунок 2 - Злом від втоми титанового сплаву ВТ1-0 після модифікації методом вакуумного іонного азотуванням в імпульсному режимі: – при Т = 390°С; *2* – при Т = 473°С;
3 – при Т = 590°С; *4* – при Т = 750°С.

Джерело: розроблено авторами

На рис. 3 показані зруйновані від втоми зразки титанового сплаву ВТ1-0 і ВТ1-00. Тестові випробування цих зразків проведено на частоті 10,7 кГц при амплітудних значеннях резонансних коливань маси G приблизно 0,07 мм. Для зразка сплаву ВТ1-0 така амплітуда відповідає напруженню $\sigma(x=0)\approx$ 22 кг/мм^2. Руйнування зразків відбулось після 12 хвилин, тобто після витримки 8×10^6 циклів до моменту появи втомної тріщини.



Рисунок 3 - Зруйновані від втоми зразки із сплавів ВТ1-0 і ВТ1-00

Джерело: розроблено авторами

З рисунку 3 видно, що руйнування зразка не обов'язково відбувається в центрі (при $x=0$). Зона ймовірного руйнування в даному випадку включає в себе практично весь зразок по його довжині, оскільки функція $\cos\left(0{,}326\frac{x}{a}\right)$ в межах $-a\le x\le a$ змінюється вкрай несуттєво – від 1,0 при $x=0$ до 0,9473 при $x=\pm a$. Виходячи з цього, для гарантованого втомного руйнування зразків на віддаленні від граничних перерізів $x=\pm a$ вони виконані з галтелями мінімального радіусу.

Досліджено витривалість п'яти груп зразків, що виготовлені із тонколистового титанового сплаву ВТ-1 в стані поставки товщиною 0,55 мм. Ширина зразків – 6 мм, довжина від вільного краю до вісьової лінії закріплення – близько 21 мм.

Одна група під номером №1 – зразки без обробки, чотири інші групи під номерами №2-5 з модифікованою поверхнею відповідно до змінних параметрів азотування (табл. 1).

Таблиця 1 – Технологічні параметри та границі витривалості для п'яти груп зразків

№ групи зразків	P, 10^{-1} Па	T, °С	σ_{-1}, МПа	δ, %
1	–	–	270	0
2	4,5	530-540	314	16,29
3	32	530-540	317	17,40
4	74	530-540	302	11,85
5	4,5	490-500	317	17,40

Джерело: розроблено авторами

Тривалість процесу технологічної обробки була єдина для зразків всіх чотирьох пар. Втомні криві і межі витривалості σ_{-1}, які отримано на базі 10^7 циклів навантаження, для п'яти груп зразків наведено відповідно на рис. 4 - 8 та в таблиці 1. Крім цього, на рис. 9 для зручності та наочності при порівнянні експериментальних результатів ці криві приведені в їх сукупності.

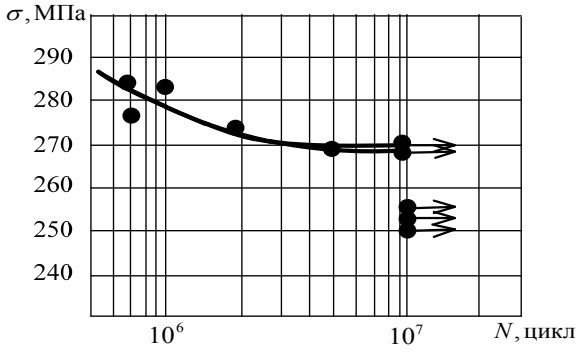


Рисунок 4 - Крива втоми сплаву ВТ1-0 без обробки азотуванням (група №1)

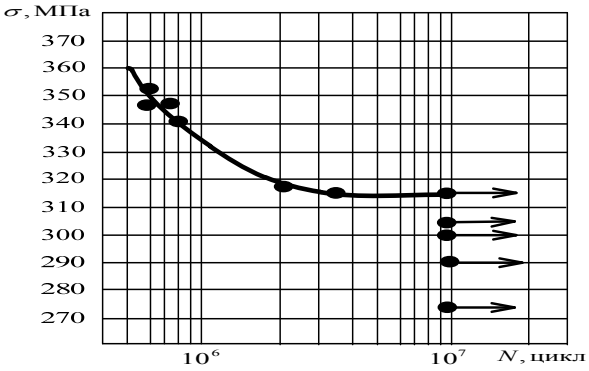


Рисунок 5 - Крива втоми сплаву ВТ1-0 після обробки азотуванням (група №2)

Джерело: Розроблено авторами

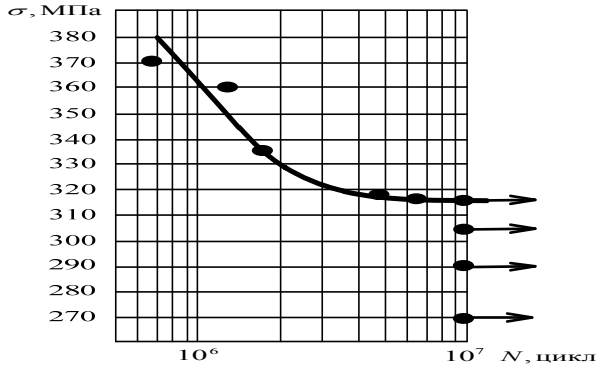


Рисунок 6 - Крива втоми сплаву ВТ1-0 після обробки азотуванням (група №3)

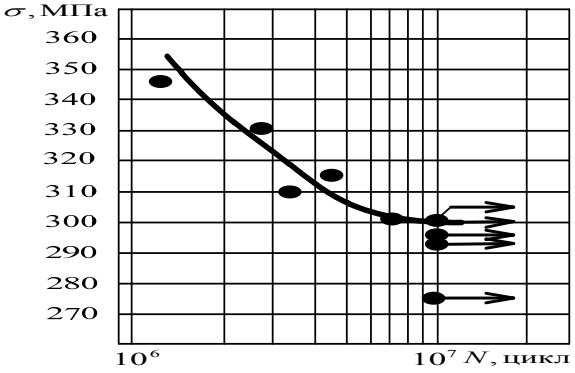


Рисунок 7 - Крива втоми сплаву ВТ1-0 після обробки

Джерело: розроблено авторами

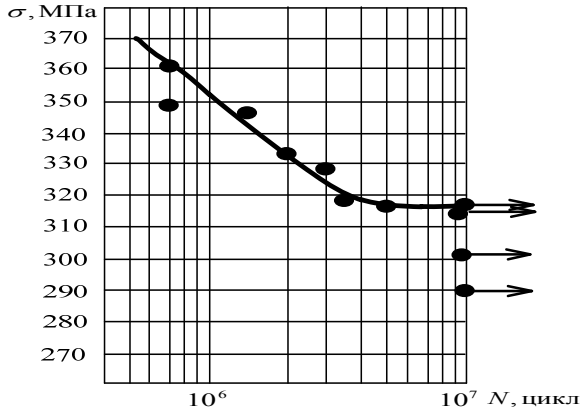


Рисунок 8 - Крива втоми сплаву ВТ1-0 після обробки азотуванням (група №5)

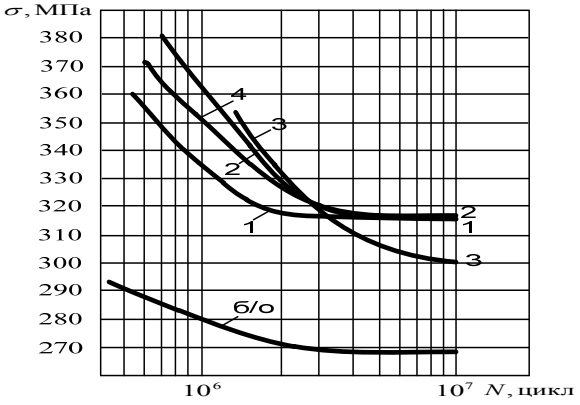


Рисунок 9 - Зведена сукупність кривих втоми сплаву ВТ1-0 без обробки (б/о) та після обробки азотуванням (група №1 та групи №2-5)

Джерело: розроблено авторами

При побудові втомних кривих для обчислення напружень використано величини: x_1 = 3,34 мм; x_2 = 12,21 мм, що отримано шляхом вимірювання при коливаннях на частоті f = 11,9 кГц.

Виходячи з x_1 та x_2, знайдено: x_0 = 7,28 мм; k = 0,3123 1/мм; $U(kx_0)$ + $(B/A)V(kx_0)$=0,761.

Враховуючи $\rho = \gamma/g$, де $\gamma = 4{,}5\times10^{-6}$ кГ/мм^3; $g = 9{,}81\times10^3$ мм/с^2; $h = 0{,}55$ мм отримано значення $\sigma^* = 1{,}54$ кГсек^2/мм^3.

Якщо амплітуда $A = W(x=0)$ вимірюється в мм, частота f в кГц, то при даному σ^* напруження σ будуть мати розмірність кГ/мм^2.

Дані, які наведені на відповідних рисунках 4 - 9 та в таблиці 1, свідчать про цілковиту доцільність обґрунтування підходу, що використовує високочастотний метод експериментального визначення меж витривалості. Висока частота (в нашому випадку 11-12 кГц) змінного навантаження дозволила в реальні терміни провести в повному об'ємі порівняльні втомні випробування п'яти груп зразків. Стосовно результатів власне втомних випробувань, відображених в таблиці 1 та на рисунках 4 - 9, слід відзначити наступне. Видно, що обраний варіант модифікацій, призводять до позитивних результатів – підвищують значення σ_{-1}. Як видно з таблиці 1, величина цього підвищення, вираженого через $\delta=(\sigma_{-1}/\sigma_{-1o}-1)\times100\%$ (σ_{-1o} – границя витривалості не модифікованого матеріалу) становить приблизно (12÷17)%. Цей результат відповідно до мети роботи можна вважати цілком придатним в якості підґрунтя для подальшого використання і розвитку використаної технології поверхневого зміцнення вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі. При розгляді кривих втоми в їх сукупності, як приведено на рисунку 9, впадає в очі практично повна зовнішня тотожність правих гілок кривих (1,2,4) на ділянці починаючи приблизно з $N=(3\div4)\times10^6$ циклів навантаження. В зворотному напрямі ліві гілки цих кривих не співпадають і їх хід носить дещо хаотичний характер. Гіпотетичне пояснення співпадіння кривих в першому випадку можна обґрунтувати несуттєвим впливом на втому тих розбіжностей, що відрізняють групи зразків (2,3,5) між собою. Якщо це так, то внаслідок цього можна дійти до корисного практичного висновку про порівняно широкий проміжок між групами зразків під номерами №2-5, в якому характеристика σ_{-1} буде гарантовано вищою від σ_{-1o}. Що стосується розбіжностей між лівими гілками експериментальних кривих, то оскільки в даному випадку вони знаходяться в зоні змішаного руйнування – частково від втоми і частково від динамічного перевантаження, то можливо внаслідок більшої чутливості статичної міцності до відмінностей між групами зразків під номерами №2-5 порівняно з втомною міцністю маємо значну розбіжність в траєкторії лівих гілок кривих. Має безумовно значення в цьому випадку кількість зразків, що випробувані при одному рівні навантаження – чим більше зразків, тим ближче траєкторія до деякої ідеальної для даного експерименту.

Висновки. 1. Виконано експерименти з визначення втомної міцності тонколистового титану ВТ1-0 до та після модифікування поверхневого шару за допомогою технології вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі. Втомні випробування призматичних зразків при їх резонансних згинних коливаннях проведено при високій частоті навантаження – (11-12) кГц. Попередня модифікування зразків виконана по технології вакуумного іонного азотування в ізотермічному режимі.

2. Побудовані в результаті проведених випробувань втомні криві на базі 10^7 циклів навантаження. Проведено випробування п'яти груп зразків – одна група в стані поставки без обробки і чотири групи після технологічного модифікування шару. З кривих втоми отримано значення меж витривалості σ_{-1} при симетричному змінному навантаженні. Показано, що незалежно від варіації параметрів технології вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі в заданому їх діапазоні, значення межі витривалості σ_{-1} титану ВТ1-0 з модифікованою поверхнею вище на (12-17)% порівняно зі значенням σ_{-1} не модифікованого титану ВТ1-0.

3. Зроблено припущення, що виходячи з наочного співпадіння кривих втоми для груп зразків 2,3,5 на ділянці $N\geq3\times10^6$ цикл., можна сподіватись про гарантоване зміцнення титану ВТ1-0 в даному (вибраному) проміжку параметрів.

4. Викладена розрахунково-експериментальна методика визначення витривалості матеріалів на тонкостінних зразках при циклічному навантаженні розтязі-стиску в умовах високої частоти. Враховуючи її підтверджену працездатність та теоретичну обґрунтованість, вона цілком придатна для дослідження втомної міцності тонколистових матеріалів в залежності від впливу різних фізико-механічних та технологічних факторів, в тому числі поверхневої модифікації в інший спосіб. З'являється можливість для порівняння втомної міцності титанових сплавів до та після азотації при циклічному згинанні та однорідному розтязі-стиску в умовах повної ідентичності вихідних характеристик і факторів за виключенням тільки виду даного навантаження.

Список літератури

1. A. G. Trapezon, B. A. Lyashenko, M. O. Lysenkov. Atigue strength of metals with hardening coatings (Review). *Strength of Materials,* 45, №3. P. 284–294 (2013).
2. A. G. Trapezon, B. A. Lyashenko, A. V. Rutkovskii Effect of vacuum deposited coatings on the fatigue strength of commercial-grade titanium. *Strength of Materials.* 27, №11-12. 659–664 (1995).
3. Б. А. Ляшенко, А. Г. Трапезон, А. В. Рутковский. Вакуумно-плазмені покриття як резерв підвищення сопротивления усталеності листових матеріалів. *Вібрації в техніці і технологіях.* 21, № 5. С. 76–79 (2001).
4. A. G. Trapezon, B. A. Lyashenko, N. V. Lipinskaya Fatigue of VT20 titanium alloy with vacuum-plasma coatings at high temperatures. *Strength of Materials.* 41 №4. С. 417–422 (2009).
5. Y. Su, S. Yao, and C. Wei Influence of single- and multilayer TiN films on the axial tension and fatigue performance of ANSI 1045 steel. *Thin Solid Films.* 338, № 1-2. С. 177–184 (1999).
6. S. Das, S. Guha, and R. Ghadai Structural and mechanical properties of CVD deposited titanium aluminum nitride (TiAlN) thin films. *Appl. Phys. A*. 123, №412. P. 1–5 (2017).
7. X. Xing, H. Wang, and T. Jin Scratch and wear behaviours of metallised Ti thin films deposited on Al2O3 substrate. *Appl. Phys. A*.. 124, № 718. P. 1–12 (2018).
8. M. Eshaghpour, I. Ebrahimzadeh, and M. Rafiei Enhanced Surface Properties of Plain Carbon Steel by Duplex Process of Friction Stir Processing and Plasma Nitriding. *JMEPEG*, 30. P. 2991–3002 (2021).
9. Z. Peng, H. Zhao Corrosion Mechanism of a Plasma Nitriding–Treated Alloy. Strength of Materials, 53, №1. 83–87 (2021).
10. I. Pohrelyuk, S. Lavrys, O. Sakharuk, and I. Stasyshyn Pretreatment Influence on Titanium Surface Properties After Gas Nitriding. *JMEPEG.* 26. P. 5072–5078 (2017).
11. Рутковський А.В., Трапезон О.Г., Маркович С.І., Бевз О.В. Розробка методики для експериментального визначення втомної міцності дослідних зразків з титанових сплавів з модифікованими поверхнями. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч. II. С. 143-147
12. Рутковский А.В., Трапезон О.Г., Мірненко В.І., Єрмолаєв В.В., Антонюк В.С., Бондар А.О. Методика та результати прискореного визначення циклічної міцності титану з тонко плівковими нітридними покриттями. *6-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові*: Тези доповідей (21-23 травня 2003, Львів). Львів: 2013. С. 157-158

References

1. Trapezon, A. G., Lyashenko, B. A., & Lysenkov, M. O.. (2013). Atigue strength of metals with hardening coatings (Review). *Strength of Materials,* 45, №3. 284–294
2. Trapezon, A. G., Lyashenko, B. A., & Rutkovskii, A. V. (1995). Effect of vacuum deposited coatings on the fatigue strength of commercial-grade titanium. *Strength of Materials,* 27, №11-12. 659–664
3. Lyashenko, B. A., Trapezon, A. H., & Rutkovskyy, A. V. (2001). Vakuum-plazmennыe pokrыtyya kak rezerv povыshenyya soprotyvlenyya ustalosty lystovыkh materyalov. *Vybratsyy v tekhnyke y tekhnolohyyakh*, 21, № 5, 76–79
4. Trapezon, A. G., Lyashenko, B. A., & Lipinskaya, N. V. (2009).Fatigue of VT20 titanium alloy with vacuum-plasma coatings at high temperatures. *Strength of Materials,* 41, №4. 417–422
5. Su, Y., Yao, S., & Wei, C. (1999). Influence of single- and multilayer TiN films on the axial tension and fatigue performance of ANSI 1045 steel. *Thin Solid Films.* 338, № 1-2. 177–184
6. Das, S., Guha, S., & Ghada,i R. (2017). Structural and mechanical properties of CVD deposited titanium aluminum nitride (TiAlN) thin films. *Appl. Phys. A.,* 123, №412. 1–5
7. Xing, X., Wang, H., & Jin, T. (2018). Scratch and wear behaviours of metallised Ti thin films deposited on Al2O3 substrate. *Appl. Phys. A.,* 124, № 718. 1–12
8. Eshaghpour, M., Ebrahimzadeh, I., & Rafiei, M. (2021). Enhanced Surface Properties of Plain Carbon Steel by Duplex Process of Friction Stir Processing and Plasma Nitriding. *JMEPEG*, 30. 2991–3002

9. Peng, Z., & Zhao, H. (2021).Corrosion Mechanism of a Plasma Nitriding–Treated Alloy. *Strength of Materials*, 53, №1. 83–87
10. Pohrelyuk, I., Lavrys, S., Sakharuk, O., & Stasyshyn, I. (2017). Pretreatment Influence on Titanium Surface Properties After Gas Nitriding. *JMEPEG*, 26. 5072–5078
11. Rutkovskyi, A.V., Trapezon, O.H., Markovych, S.I., & Bevz, O.V. (2025). Development of a Technique for Experimental Determination of Fatigue Strength of Test Samples of Titanium Alloys with Modified Surfaces. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences,* 12(43), II, 143-147 [in Ukrainian].
12. Rutkovskyi, A.V., Trapezon, O.H., Mirnenko, V.I., Yermolaiev, V.V., Antoniuk, V.S., & Bondar, A.O. (2013). Metodyka ta rezultaty pryskorenoho vyznachennia tsyklichnoi mitsnosti tytanu z tonko plivkovymy nitrydnymy pokryttiamy. 6-y Mizhnarodnyi sympozium ukrainskykh inzheneriv-mekhanikiv u Lvovi: Tezy dopovidei (21-23 travnia 2003, Lviv). Lviv: 157-158 [in Ukrainian].

Anatoly Rutkovskiy, PhD tech. sci, Senior Researcher, **Oleksandr Trapezon**, DSc, leading researcher
National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength, Ukraine
Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci., **Oleg Bevz**, Assos. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Study of the Fatigue Strength of Titanium aLloys Modified by Vacuum Ion Nitriding in the Pulse Mode Under High-Frequency Loading

In the work presented, a study was carried out of the effect of the coating (modification of the surface layer by vacuum ion nitriding in the pulse mode on endurance at a high frequency (about 10 kHz) of variable load. Samples with a length of 24.1 mm had a cross section measuring (6x0.5) mm in the fatigue failure zone. It is absolutely necessary that for a correct comparison of future results, the size of the corresponding cross section the cross-section of samples for the case of tension - compression should be similar; the frequency of tests should also be the same.

Calculations show that the resonant length of a metal rod that oscillates at a frequency of 10 kHz along its basic form should be quite significant - about 240÷250 mm. Since with such lengths it is practically impossible to ensure the required size (6x0.5) mm of the cross-section of the sample without losing its stability, due to the minimal stiffness during bending, in this case it is necessary to find a solution to this problem. Plates made of such materials, collected in a package, work exactly under conditions of cyclic stretching-compression at frequencies (3,10,20,40) kHz. In order to further increase the stability during longitudinal oscillations of such samples, their test was carried out at frequencies higher than (3;10) kHz, because, for example, at 20 kHz the length of the sample will be less than the length at 10 kHz by exactly 2 times.

Experiments were performed to determine the fatigue strength of thin sheet titanium VT1-0 before and after modification of the surface layer using vacuum ion nitriding technology in the pulse mode.Fatigue tests of prismatic samples during their resonant bending vibrations were carried out at a high frequency of loading - (11-12) kHz. Preliminary modification of the samples was carried out using the technology of vacuum ion nitriding in isothermal mode.

Fatigue curves based on 107 load cycles were constructed as a result of the tests. Five groups of samples were tested - one group in the state of delivery without processing and four groups after technological modification of the layer. From the fatigue curves, the values of endurance limits σ-1 under symmetrical variable load were obtained. It is shown that regardless of the variation of the parameters of the vacuum ion nitriding technology in the pulse mode in their given range, the value of the endurance limit σ-1 of titanium VT1-0 with a modified surface is higher by (12-17)% compared to the value of σ-1 of unmodified titanium VT1-0.

It is assumed that, based on the apparent coincidence of the fatigue curves for groups of samples 2, 3, 5 in the section $N \geq 3 \times 106$ cycles, one can hope for guaranteed strengthening of titanium VT1-0 in the given (selected) range of parameters.

The calculation-experimental method of determining the durability of materials on thin-walled samples under cyclic tension-compression loading under high-frequency conditions is described. Given its proven performance and theoretical validity, it is quite suitable for studying the fatigue strength of thin-sheet materials depending on the influence of various physical, mechanical and technological factors, including surface modification in another way.There is an opportunity to compare the fatigue strength of titanium alloys before and after nitriding under cyclic bending and homogeneous tension-compression under conditions of complete identity of the initial characteristics and factors, except for the type of the given load.

Одержано (Received) 06.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 04.03.2026