

А. В. Рутковський¹, ст. наук. співр., канд. техн. наук,

О. Г. Трапезон¹, пров. наук. співр., д-р техн. наук,

С. І. Маркович², доц., канд. техн. наук, **О. В. Бевз**², доц., канд. техн. наук

¹Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: rut2000@ukr.net, coating@ipp.kiev.ua, marko60@ukr.net, oleg_bevz@ukr.net

Розробка методики для експериментального визначення втомної міцності дослідних зразків з титанових сплавів з модифікованими поверхнями

В роботі розроблена ефективна методика визначення характеру впливу технологічних параметрів процесу модифікації на характеристики витривалості. Виконати експериментальну частину дослідження в стислі терміни дозволяє високочастотне навантаження зразків. З цієї метою пропонується використати магнітострикційний випробувальний пристрій, який функціонує по резонансному принципу при частоті близько (10–12) кГц. Передбачено застосування груп призматичних зразків із титанового сплаву ВТ1-0 і ВТ1-00, як модифікованих, так і тих, що не були піддані модифікації (обробці) азотуванням поверхневого шару. Розроблена система кріплення зразків для збудження в них двох вузлових форм резонансних коливань. Амплітуда W_0 вимірюється мікроскопом та підтримується в процесі випробувань; частота f вимірюється електронним частотоміром. Запропонована формула для визначення граничних значень витривалості, з можливістю проведення їх порівняння з відповідними висновками на основі побудованих втомних кривих.

втомна міцність, циклічні навантаження, іонне азотування, імпульсний режим, втомні криві

Постановка проблеми. Параметри або показники конструктивної міцності характеризують як міцність конструктивних елементів, так і їх довговічність (ресурс), несучу здатність, а головне надійність [1]. При цьому важливим фактором є міцність елементів при різноманітних видах навантаження (розтягування, згинання, контактного навантаження і т.п.) при лінійному, двох і трьохвісному напруженому стані з різним характером прикладення навантаження (імпульсним, тривалим, стаціонарним або змінним), при низьких та високих температурах, в умовах впливу оточуючого середовища (корозійно-ерозійне середовище і т.п.) [1, 2, 3]. Серед динамічних навантажень особливий інтерес представляють циклічні навантаження. 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 [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Втомна міцність (витривалість) - важлива властивість системи елементів конструкцій. Дуже складно побудувати кількісну теорію втоми, яка б пов'язувала елементарні процеси з довговічністю під дією циклічного навантаження [1, 3, 6, 7]. Циклічне навантаження навіть простих матеріалів призводить до виникнення великої кількості різноманітних явищ. Це виправдовує розгляд питання втоми окремо від механічних властивостей. Відомо, що руйнування може мати місце при напруженнях, значно менших, ніж межа міцності, якщо їх прикладати по черзі з різними знаками. Наприклад, амплітуда напружень після 10^6 циклів навантаження (τ_{10^6}) становить 30...50 % від межі міцності більшості матеріалів [1, 8].

Установити максимальне циклічне навантаження, при якому матеріал не руйнується можна

за допомогою термомеханічних високочастотних випробувань на втому [8-10].

Разом з тим є актуальною проблемою розробка методики визначення впливу використання технологічного процесу модифікування титанових сплавів шляхом вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі, який впливає на якість поверхневого шару, для визначення можливості керування значеннями параметрів їх конструктивної міцності та витривалості. Це й визначило мету та задачі дослідження.

Постановка завдання. Метою дослідження була розробка ефективної методики визначення характеру впливу технологічних параметрів процесу модифікації на характеристику витривалості.

Визначити технологічне експериментальне устаткування для швидкісних випробувань на витривалість при згинних коливаннях зразків з тонколистових матеріалів кількох груп зразків, як модифікованих, так і тих, що не були піддані модифікації (обробці) азотуванням поверхневого шару, використовуючи єдину технологію, змінюючи ті чи інші її параметри, насамперед тиск і температуру на високочастотному втомному устаткуванні.

Шляхом математичного моделювання процесу розробити формули для визначення граничних значень витривалості, з можливістю проведення їх порівняння з відповідними висновками на основі побудованих втомних кривих.

Виклад основного матеріалу. Виконати експериментальну частину дослідження в стислі терміни дозволяє високочастотне навантаження зразків. З цієї метою було використано магнітострикційний випробувальний пристрій, який функціонує по резонансному принципу при частоті близько (10–12) кГц (рис. 1).

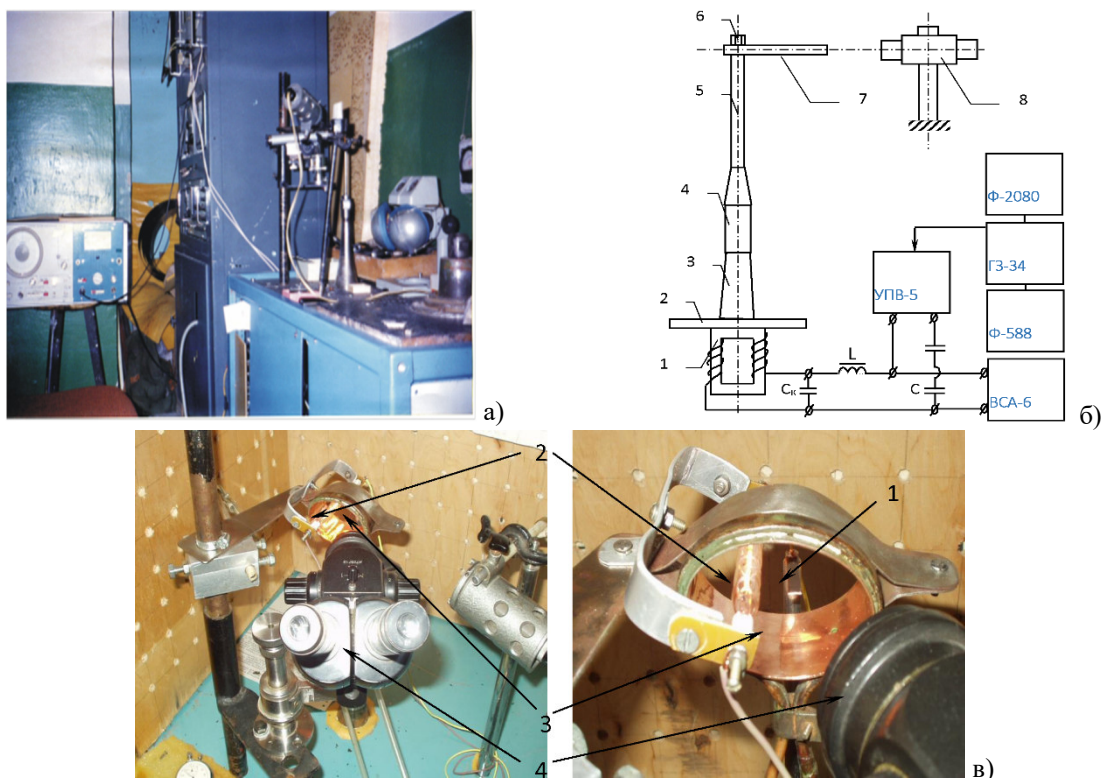


Рисунок 1 – Магнітострикційний випробувальний пристрій У-10: а) загальний вигляд; б) блок-схема (1 – вібратор; 2 – концентратор; 3 – фланець; 4 – накидна гайка; 5 – напівхвильовий концентратор; 6 – гайка; 7 – зразок; 8 – мікроскоп); в) зовнішній вигляд модернізованої установки (1 – зразок; 2 – джерело інфрачервоного випромінювання; 3 – камера нагрівання; 4 – мікроскоп)

Джерело: розроблено авторами

Методика втомних випробувань ґрунтується на збудженні двох вузлових форм резонансних коливань в призматичних зразках (рис. 2, 3).

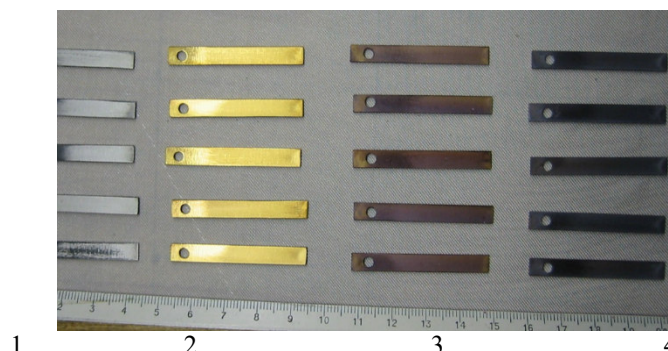


Рисунок 2 – Загальний вигляд зразків із титанового сплаву VT1-0 і VT1-00:

1 – титановий сплав VT1-0 до азотації; 2 – VT1-0 після азотації;

3 – титановий сплав VT1-00 до азотації; 4 – VT1-00 після азотації

Джерело: розроблено авторами

При точково-шарнірному закріпленні зразка на робочій частині установки (рис. 3), при його резонансних коливаннях з'являється втомна тріщина, місце якої знаходиться в зоні пучності коливань подалі від місця закріплення.

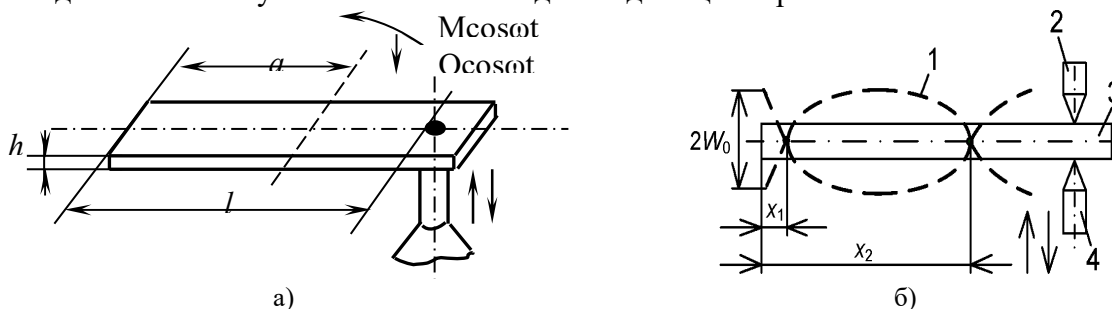


Рисунок 3 – Схема закріплення: а) та навантаження,

б) призматичного зразка при випробуваннях на втому: 1 – форма коливань; 2 – гвинт; 3 – зразок; 4 – вібратор

Джерело: розроблено авторами

Оскільки граничні умови для точково-шарнірного закріплення зразка не є стандартними, то при розв'язанні задачі додатково були використані результати вимірювання координат вузлових перерізів x_1 , x_2 (рис. 3), про що детально описано в. Конструктивно таке закріплення виконано з використанням малорозмірного (2-3 мм) спеціального гвинта 2 з потаємною головкою до вібратора 4, кінець якого виконано по конусу (рис. 3, а).

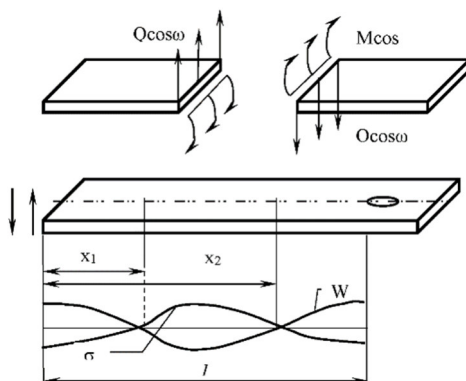


Рисунок 4 – Принцип навантаження призматичного зразка та розподіл у ньому прогинів W й напружень σ при коливаннях за третьою формою коливань

Джерело: розроблено авторами

Амплітуда W_0 вимірюється мікроскопом (рис. 1, в) та підтримується в процесі випробувань; частота f вимірюється електронним частотоміром. Коефіцієнт σ^* визначається на основі аналітичного розв'язку задачі про вільні коливання прямої балки постійного перерізу.

Визначимо особливості розрахунку коливань дослідних зразків та визначення циклічних напружень. В місці руйнування діють максимальні циклічні напруження $\sigma_{\max}$. Їх розрахунок проводиться за формулою

$$\sigma_{\max} = W_0 f^2 \sigma^*, \quad (1)$$

де W_0 – амплітуда коливань вільного кінця зразка (рис. 3, 4); f – резонансна частота коливань; σ^* – коефіцієнт, що залежить від форми коливань, густини матеріалу та товщини зразка.

Розглянемо алгоритм виводу формули (1). Використаємо рівняння власних форм коливань балки постійного перерізу, яка є аналогом зразків, що застосовуються

$$W'' + k^2 W = 0, \quad (2)$$

$$\text{де } k^4 = \frac{12\rho\omega^2}{Eh^2}; \quad (3)$$

$W=W(x)$ – прогини балки при коливаннях; ρ – густина матеріалу; $\omega=2\pi f$ – кругова частота коливань; E – модуль Юнга матеріалу балки; h – товщина балки.

Оскільки для балки з вільним кінцем при $x=0$ (рис. 4) рівняння (2) має розв'язок у вигляді

$$W = AS(kx) + BT(kx), \quad (4)$$

то максимальні по товщині нормальна напруження будуть визначатись залежністю

$$\sigma(x) = \frac{Ehk^2}{2} (AU(kx) + BV(kx)), \quad (5)$$

де S, T, U, V – функції Крілова.

При виборі довжини балки таким чином, що при заданій частоті f її коливання будуть мати форму з двома вузлами коливань при $x=x_1$ і $x=x_2$ (рис. 4), то з рівняння

$$\begin{vmatrix} S(kx_1) & T(kx_1) \\ S(kx_2) & T(kx_2) \end{vmatrix} = 0 \text{ можна знайти параметр } k \text{ а також відношення коефіцієнтів } B/A$$

$$\frac{B}{A} = -\frac{S(kx_1)}{T(kx_1)} = -\frac{S(kx_2)}{T(kx_2)}.$$

Знаючи k та B/A , можна побудувати функції прогинів (4) та напружень (5) на ділянці від $x=0$ до $x \leq x_2$ і визначити при цьому координату $x=x_0$, при якій нормальні напруження будуть максимальні, тобто $\sigma_{\max} = \sigma(x_0)$. Ця координата буде визначати місце вірогідного втомного руйнування зразка. Після внесення в (5) kx_0 та виключення з нього параметру E на основі виразу (2) отримаємо розрахункову формулу (1), в якій величина σ^* повинна бути розрахована відповідно до співвідношення

$$\sigma^* = \frac{24\rho\pi^2}{hk^2} \left[U(kx_0) + \frac{B}{A} V(kx_0) \right].$$

Висновки. 1. Вибрано технологічне експериментальне устаткування для швидкісних випробувань на витривалість при згинних коливаннях зразків з тонколистових матеріалів з застосуванням модифікованого магнітострикційного випробувального пристрою У-10.

2. Розроблено призматичні зразки з тонколистових матеріалів для проведення досліджень, система їх кріплень та принцип навантаження для визначення розподілу у ньому прогинів W й напружень σ при коливаннях.

3. Запропоновано формули для розрахунку максимальних циклічних напружень $\sigma_{\max}$.

4. Проведені розрахунки надають можливість визначити граничні значення витривалості, з можливістю проведення їх порівняння з відповідними висновками на основі побудованих втомних кривих.

Список літератури

1. Прочность материалов и конструкций. Под ред. В. Т. Трошенко. Киев: Академперіодика, 2006. 1074 с.
2. Трошенко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. Киев: Логос, 2000. 571 с.
3. Сопротивление материалов деформированию и разрушению / В. Т. Трошенко, А. Я. Красовский, В. В. Покровский та ін. Ч. 2. Киев: Наукова думка, 1993. 702 с.
4. Колесник В. І., Мірненко В. І., Рутковський А. В., Бондар А. В. Підвищення довговічності деталей на основі титану, що працюють в умовах знакозмінних навантажень. Труды Академії. К.: НАОУ, 2003. № 41. С. 170–174.
5. Thongtem Somchai, Thongtem Titipun, McNallan Michael. Surface modification of the Ti–Al alloys. *Surface and Interface Anal.* 2001. Т. 32, № 1. Р. 214–217.
6. Рутковський А. В. Методика та результати прискореного визначення циклічної міцності титану з тонко плівковими нітридними покриттями / Рутковський А. В. та ін. 6-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей (21–23 травня 2003, Львів). Львів, 2013. С. 157–158.
7. Nazmy M., Staubli M. Alloy modification of γ TiAl for improved mechanical properties. *Scr. Met. Et Mater.* 1994. Т. 31, № 7. Р. 829–833.
8. Gurappa I. Effect of aluminizing on the oxidation of the titanium alloy, IMI 834. *Oxidation of Metals.* 2001. Т. 56, № 1–2. Р. 73–87.
9. Рутковський А. В., Маркович С. І., Михайлюта С. С. Аналіз напружено-деформованого стану іонноазотованих зразків із покриттям в умовах ізотермічної та термоциклічної повзучості. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2022. Вип. 6(37). Ч. І. С. 3–9.
10. Рутковський А. В., Маркович С. І., Михайлюта С. С. Теплостійкість іонноазотованих алюмінієвих сплавів при ізотермічному та термоциклічному впливі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2020. Вип. 3(34). С. 72–81.

References

1. Troshchenko, V. T. (Ed.). (2006). Strength of materials and structures. Kyiv: Akademperіodyka [in Russian].
2. Troshchenko, V. T., Lebedev, A. A., & Strizhalo, V. A. (2000). Mechanical behavior of materials under various types of loading. Kyiv: Lohos [in Russian].
3. Troshchenko, V. T., Krasovskyi, A. Ya., Pokrovskyi, V. V., et al. (1993). Resistance of materials to deformation and fracture. Part 2. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
4. Kolesnyk, V. I., Mirnenko, V. I., Rutkovskyi, A. V., & Bondar, A. V. (2003). Increasing the durability of titanium-based parts operating under alternating loads. *Trudy Akademii*, 41, 170–174 [in Ukrainian].
5. Thongtem, S., Thongtem, T., & McNallan, M. (2001). Surface modification of the Ti–Al alloys. *Surface and Interface Analysis*, 32(1), 214–217.
6. Rutkovskyi, A. V., et al. (2013). Methodology and results of accelerated determination of cyclic strength of titanium with thin-film nitride coatings. In *Tezy dopovidei 6-ho Mizhnarodnoho sympoziumu ukrainskykh inzheneriv-mekhanikiv u Lvovi* (pp. 157–158). Lviv [in Ukrainian].
7. Nazmy, M., & Staubli, M. (1994). Alloy modification of γ TiAl for improved mechanical properties. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 31(7), 829–833.
8. Gurappa, I. (2001). Effect of aluminizing on the oxidation of the titanium alloy IMI 834. *Oxidation of Metals*, 56(1–2), 73–87.
9. Rutkovskyi, A. V., Markovych, S. I., & Mykhailiuta, S. S. (2022). Analysis of the stress–strain state of ion-nitrided coated specimens under isothermal and thermocyclic creep. *Tsentrálnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 6(37/1), 3–9 [in Ukrainian].
10. Rutkovskyi, A. V., Markovych, S. I., & Mykhailiuta, S. S. (2020). Heat resistance of ion-nitrided aluminum alloys under isothermal and thermocyclic loading. *Tsentrálnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 3(34), 72–81 [in Ukrainian].

Anatoly Rutkovskiy¹, PhD tech. sci, Sr. Researcher, Oleksandr Trapezon¹, DSc., leading researcher
Sergiy Markovych², Assos. Prof., PhD tech. sci, Oleg Bevz², Assos. Prof., PhD tech. sci.,

¹National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength, Kyiv, Ukraine

²Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Development of a Technique for Experimental Determination of Fatigue Strength of Test Samples of Titanium Alloys with Modified Surfaces

Cyclic load of even simple materials leads to a large number of different phenomena. This justifies the consideration of fatigue separately from mechanical properties. The experimental part of the study in a short time allows a high frequency load of samples. For this purpose, a magnetic stricting test device was used, which operates on a resonant principle at a frequency of about (10–12) KHz.

The method of fatigue tests is based on the excitation of two nodal forms of resonance vibrations in prismatic samples. When the point-fastening of the sample on the working part of the installation, with its resonant fluctuations, a fatigue crack appears, the place of which is in the area of the blanket of the oscillations of the fastener. Since the limiting conditions for point-sarry fixing of the sample are not standard, the results of measuring the coordinates of nodal sections x_1 , x_2 were additionally used when solving the problem.

The calculations make it possible to determine the limitations of endurance, with the possibility of their comparison with the corresponding conclusions on the basis of constructed fatigue curves.

ion nitriding, pulse mode, titanium alloy, wear resistance, free abrasive

Одержано (Received) 29.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 04.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.09.2025