

УДК 621.792.4

Олександр Трапезон, д.т.н., п.н.с.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ ЗІ ЗМІЦНЮЮЧИМИ ПОКРИТТЯМИ

Анотація. Запропоновано комплексний підхід для прогнозування втомної міцності матеріалів з покриттями. Розрахункове співвідношення, що пропонується, враховує товщину покриття, його структурну неоднорідність та наявність залишкових напружень.

Ключові слова: товщина покриття, структурна неоднорідність, міцність, залишкові напруження.

Alexandr Trapezon, Ph.D.

PREDICTION OF FATIGUE STRENGTH OF MATERIALS WITH HARDENING COATINGS

Abstract. An integrated approach for predicting the fatigue strength of coated materials is proposed. The proposed calculation relationship takes into account the thickness of the coating, its structural heterogeneity, and the presence of residual stresses.

Keywords: coating thickness, structural heterogeneity, strength, residual stresses.

Перспективним методом поверхневого зміцнення деталей машин є метод зміцнення на основі тонко-плівкових вакуум-плазмових покриттів. З аналізу літературних джерел покриття такого типу забезпечують незмінну повторюваність ефекту зміцнення за умови знакозмінного навантаження, що у свою чергу дозволяє отримати підвищення втомної міцності сталей, титанових сплавів, та інших металів [1]. На практиці, проблема вибору способу зміцнення пов'язана з технологічними особливостями нанесення покриттів і досить часто розв'язується на основі методу спроб, внаслідок відсутності надійної теоретичної бази. Найпростіший підхід для прогнозування характеристик міцності побудований на основі співвідношення адитивності

$$\sigma = \sigma_o - V(\sigma_o - \sigma_n), \quad (1)$$

де σ , σ_o , σ_n – напруження відповідно в композиції (системі основа-покриття), основі та покритті при фіксованих деформаціях; V – об'ємний вміст покриття. Модель (1) проте, не враховує структурних особливостей покриття, але дозволяє зробити певні корисні висновки. Так, з (1) випливає, що $\sigma > \sigma_o$, якщо $\sigma_n > \sigma_o$. Тобто, можна спрогнозувати, що зміцнення системи основа-покриття можливе у випадку значень міцності покриття, які є більшими за значення міцності основи. Виходячи з цього, можна поставити за мету отримання високоміцних тонко-плівкових елементів як аналога покриттів. Високі значення міцності плівок досягаються, зокрема, шляхом диспергування їх структури, що для експериментальних даних, отриманих при вивченні властивостей полікристалічних плівок може бути представлено через емпіричне співвідношення типу Холла-Петча, яке є справедливим у вузькому інтервалі товщин:

$$\sigma_s = \sigma^* + kh^{-n}, \quad (2)$$

де h – товщина плівки; $n=0,5$; σ^* – граничне напруження; σ^* , k – параметри даного матеріалу. Внаслідок невизначеного фізичного змісту параметрів σ^* та k співвідношення (2) не є зручним для практики і може бути використано лише в окремих теоретичних дослідженнях. Внаслідок того, що вирази (1) та (2) спрямовані

вресітї-ресіт на розв'язання єдиної проблеми – прогнозування міцності при наявності покриття, то виникає питання щодо можливості їх синтезу. Але у зв'язку з тим, що ці співвідношення не мають між собою чіткого логічного зв'язку, то безпосереднє їх об'єднання строго не є можливим. Розв'язання цієї задачі пропонується шукати через аналітичний розв'язок співвідношення (1) за рахунок введення додаткових параметрів, які відображають вплив реальних факторів обумовлених наявністю покриття. В пропозиції розглянуто випадок циклічного вигину композиції і співвідношення адитивності може бути використано у випадку осьового розтягу-стиснення композиції. При циклічному вигині (1) виконується тоді, коли композит є багатошаровим і розподіл шарів по його товщині є рівномірним. При вигині потрібно мати інше співвідношення для тонко-плівкових покриттів, яке було отримано в роботі [2]

$$\sigma_{-1} = (\sigma_{-1})_o \frac{1 + \eta C}{1 + \eta}, \quad (3)$$

де σ_{-1} , $(\sigma_{-1})_o$ – межі витривалості композиту (матеріалу з двостороннім покриттям) та основи; $\eta = 6h/H$; $C = \sigma_n / (\sigma_{-1})_o$; h, H – товщини покриття та основи, причому $h \ll H$; σ_n – напруження в покритті, у випадку, коли на поверхні основи напруження досягають значень межі витривалості $(\sigma_{-1})_o$. Співвідношення (3) побудовано за умови, що втомне руйнування основи у перехідній зоні виникає раніше за руйнування покриття. Іншими словами, наведена залежність (3) призначена насамперед для зміцнюючих покриттів. Оскільки модель (3) не враховує структурних особливостей покриття та міжфазного шару, які залежать від технологічних параметрів та умов нанесення покриття, то коефіцієнт C слід вважати невизначеним. Таким чином, для коректного застосування виразу (3) необхідно провести уточнення цього коефіцієнту як параметра, що неявно відображає структуру покриття. Можна допустити, що коефіцієнт C відіграє таку саму роль, як і параметри σ^{\square}, k з виразу (2). Іншим суттєвими фактором, який впливає на втомну міцність композиції основа-покриття, є наявність технологічних залишкових напружень $\sigma_{зал}$, які виникають в основному матеріалі та покритті після його нанесення. Аналітичне врахування $\sigma_{зал}$ при оцінці циклічної міцності розрахунковим способом потрібне як чинник підвищеної достовірності такої оцінки. Врахування $\sigma_{зал}$ можливе на основі однієї з гіпотез про вплив статичних (середніх) напружень на межу витривалості. Відповідно до гіпотези Гудмена, як однієї з найбільш підтверджених експериментально можна записати: $\sigma_a = \sigma_{-1}(1 - \sigma_{ст} / \sigma_c)$, де σ_a – граничне напруження, яке відповідає межі витривалості при додатковій дії статичного напруження $\sigma_{ст}$; σ_{-1} – межа витривалості матеріалу за умови відсутності $\sigma_{ст}$, тобто при гармонійному симетричному навантаженні; σ_c – межа міцності. Як приклад розглянуто балку з двостороннім покриттям, яке нанесено методом осадження при підвищених температурах. Для цього випадку можна записати вираз визначення граничного напруження, що відповідає межі витривалості для випадку $\alpha_o > \alpha_n$

$$\sigma_a = \sigma_{-1} + ((3\gamma_n - \gamma_o) \cdot (\Delta E_o) \cdot (C\eta)) / ((1 + \eta) \cdot (3 + C\eta)),$$

де $\gamma_o = ((\sigma_{-1})_o) / (\sigma_{в})_o$; $\gamma_n = ((\sigma_{-1})_n) / (\sigma_{в})_n$; $(\sigma_{в})_o, (\sigma_{в})_n$ – межі міцності основи та покриття; $\Delta = (\alpha_o - \alpha_n)(t - t_1)$; α_o, α_n – коефіцієнти температурного розширення основи та покриття; t – робоча температура формування покриття; t_1 – температура завершення процесу (кімнатна); E_o – модуль Юнга основи. Співставлення результатів розрахунку з експериментальними даними втомної міцності при циклічному згинанні дає розходження в (0,5-2)%, що є підтвердженням практичної дієздатності зазначеного підходу.

1. Trapezon, A., Lyashenko, B. (2016). Fatigue of VT1-0 titanium alloy with vacuum-plasma coating under a plane stress state. *Strength Mater.*, 48, 270–278. <https://doi.org/10.1007/s11223-016-9762-3>

2. Trapezon, A., (2007). Methodological problems in the investigation of thin hardening films. *Strength Mater.*, 39, 178–188. <https://doi.org/10.1007/s11223-007-0023-3>