

УДК 539.371

Прогнозування довговічності сплавів за непропорційного навантаження

Є.В. Савчук, С.М. Шукаєв

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Анотація. У роботі розглядається питання прогнозування довговічності матеріалів за умов непропорційного навантаження. Запропоновано модифікацію моделі Фатемі-Сосі, яка включає параметр, що враховує вплив повороту головних осей напружень та ефекти додаткового зміцнення. Модель базується на результатах експериментів для осьового навантаження, кручення і колової траєкторії. Проведено порівняльний аналіз точності прогнозу в порівнянні з класичними моделями критичної площини. В результаті було встановлено, що пряме врахування параметру впливу непропорційного навантаження та форми траєкторії значно покращує кореляцію моделі з експериментальними даними. Запропонований критерій за непропорційного навантаження демонструє кращі результати прогнозування довговічності як для малоциклової, так і для багатоциклової втоми порівняно з розглянутими моделями критичної площини.

Ключові слова: малоциклова втома, багатоциклова втома, непропорційне навантаження, коефіцієнт непропорційності, модель критичної площини.

Вступ

Більшість реальних конструкцій працюють в умовах складного термосилового навантаження, яке в багатьох випадках є непропорційним. За такого навантаження силові фактори змінюються за незалежними законами у часі, а головні напруження постійно змінюють напрями. На основі багатьох спостережень було виявлено що вплив непропорційного навантаження є багатофакторним ефектом адже залежить від рівня напружень, відношення силових факторів та кристалічної будови. Одним з перспективних напрямів прогнозування довговічності за цих умов, є розробка критеріїв за концепцією критичної площини, що встановлюють зв'язок довговічності з напруженнями та деформаціями, що виникають на обраній за критичну площині. Ці критерії можуть брати за основу різні припущення щодо визначення критичної площини та перспективних комбінацій напружень та деформацій. В роботах 1–2 проаналізовано ряд критеріїв, які базуються на різних підходах до визначення критичної площини. Результати аналізу засвідчили значні розбіжності між експериментальними даними і оцінками довговічностей, зробленими за більшістю критеріїв. Було продемонстровано, що розбіжності залежать від типу матеріалу, траєкторії і діапазону навантажень. Тобто, розробка нових підходів до оцінювання довговічності в умовах багатоосьового навантажування залишається актуальним завданням для механіки твердого тіла.

Мета дослідження – розробка нової моделі для прогнозування довговічності за багатоосьового непропорційного навантажування шляхом об'єднання концепції критичної площини зі схемою прямого включення у критеріальне рівняння параметра впливу непропорційного навантаження, який визначається експериментально з випробувань на втому за осьового навантаження і колової траєкторії.

Підходи до визначення критичної площини

У роботах 1–2 показано, що класичні теорії Ванга-Брауна та Фатемі Сосі демонструють одні з найкращих результатів передбачення довговічності для сплавів з різною чутливістю до непропорційного навантаження. В основі цих теорій закладено що критичною площиною на якій акумулюється втомне пошкодження, є площина максимальних зсувних деформацій. В даній роботі буде розглядатися критерій Фатемі-Сосі 3, що враховує вплив максимальної амплітуди деформації зсуву $\Delta\gamma_{max}$ та максимального нормального напруження $\sigma_{n,max}$ на

відповідній площині, нормованого границею текучості матеріалу σ_y . Модель Фатемі-Сосі записується наступним чином:

$$\frac{\Delta\gamma_{max}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_{n,max}}{\sigma_y} \right) = \frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma'_f (2N_f)^{c_0}$$

де N_f – число циклів до руйнування; G – модуль зсуву; τ'_f , γ'_f , b_0 і c_0 – коефіцієнти рівняння Коффіна-Менсона для випадку знакозмінного кручення. Як бачимо, модель включає лише параметри напруження та деформації і напряду не встановлює вплив непропорційного навантаження на довговічність 4. В роботі 5 наводиться детальний опис параметра k_{FS} критерія Фатемі-Сосі:

$$k_{FS} = \left[\frac{\frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma'_f (2N_f)^{c_0}}{(1+\nu_e) \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + (1+\nu_p) \epsilon'_f (2N_f)^c} - 1 \right] \frac{2\sigma_y}{\sigma'_f (2N_f)^b}$$

Підхід до визначення довговічності за непропорційного навантажування, коли в критеріальне рівняння включається параметр непропорційності, була запропонована Іто 6-7. Згідно цього підходу розмах еквівалентних деформацій $\Delta\epsilon_{NP}$ за непропорційного навантажування визначається добутком розмаху головної деформації $\Delta\epsilon_I$ на корегуючу функцію, що включає коефіцієнт непропорційного зміцнення α та параметром непропорційності траєкторії деформування f_{NP} :

$$\Delta\epsilon_{NP} = (1 + \alpha f_{NP}) \Delta\epsilon_I,$$

де,

$$\alpha = \frac{\sigma_{eq}^{np} - \sigma_{eq}^p}{\sigma_{eq}^p} = \frac{\sigma_{eq}^{np}}{\sigma_{eq}^p} - 1.$$

На рис. 1 наведено схему обчислення коефіцієнта α та його значення для різних металевих сплавів 1–2.

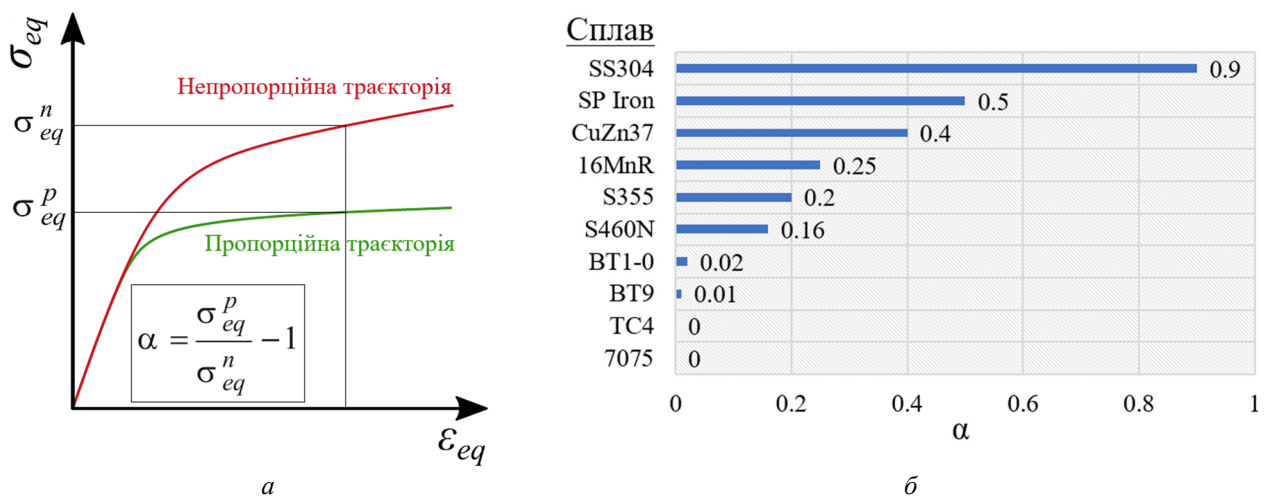


Рис. 2. Коефіцієнт непропорційного зміцнення α : (а) – схема обчислення коефіцієнта, (б) – значення α для різних сплавів 1–2

У роботі 6 показано що параметр α не є достатнім для описання властивостей матеріалів з різною кристалічною гаткою. Параметр α^* представлений в роботі 6 корегує параметр α для кращої кореляції з експериментальними даними для гранецентрованої(FCC) та кубічної (BCC) кристалічної решітки та записуються наступним чином:

$$\alpha^* = \begin{cases} 0.8\alpha + 0.1 & \text{для FCC} \\ 2(0.8\alpha + 0.1) & \text{для BCC} \end{cases}$$

Параметр що враховує форму траєкторії навантаження f_{NP} є інтегральною характеристикою, що пов'язує зміну кута наряду та величину головних напружень задля визначення степені жорсткості непропорційного циклу, та не залежить від типу і властивостей матеріалу. Класичне визначення запропоноване Іто наведене в роботі 6 Параметр f_{NP} який було застосовано в даній роботі було запропоновано Бородієм в працях 8–9. В роботах 10-11 показано що даний параметр краще корелює з експериментальними даними.

Модифікована модель Фатемі-Сосі

В даній роботі представляється гібридний критерій що поєднує підходи застосовані Іто і Фатемі Сосі та виражається наступним чином:

$$P_{FS-NP} = \frac{\Delta\gamma_{max}}{2} \left(1 + k_{FS} \frac{\sigma_{n,max}}{\sigma_y} \right) (1 + \alpha_\gamma f_{NP}) = \frac{\tau_f'}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma_f' (2N_f)^{c_0}$$

Параметр α_γ що характеризує вплив непропорційного навантаження буде виражатися наступним чином:

$$\alpha_\gamma = \frac{\frac{\tau_f'}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma_f' (2N_f)^{c_0}}{\left[\frac{\tau_f^{NP}}{G} (2N_f)^{b_0^{NP}} + \gamma_f^{NP} (2N_f)^{c_0^{NP}} \right] \left(1 + k_{FS} \frac{\sigma_f^{NP} (2N_f)^{b^{NP}}}{\sigma_y} \right)^{-1}},$$

де τ_f^{NP} , b_0^{NP} , γ_f^{NP} , c_0^{NP} – параметри кривої втоми для зсувних деформацій за непропорційного режиму навантаження а σ_f^{NP} , b^{NP} – параметри кривої втоми для лінійних деформацій за непропорційного режиму навантаження.

Параметр α_γ виражає взаємозв'язок між кривою втоми за знаковмінного кручення та кутових деформацій за непропорційного навантаження нормованого максимальними нормальними напруженнями за непропорційного навантаження. У роботі 1–2 показано що у випадку знаковмінного кручення та непропорційного режиму з зсувом $\varphi = 90^\circ$, орієнтація площини максимального зсуву збігається. Таким чином α_γ можливо визначити з експерименту з непропорційним навантаженням з зсувом $\varphi = 90^\circ$ для якого параметр непропорційності навантаження $f_{NP} = 1.0$.

Порівняльний аналіз

Розрахунки проводилися на експериментальних даних, які наведені в роботах 1–2. Криві функцій щільності ймовірностей помилки передбачення довговічності N_f наведені на Рис. 2 та Рис. 3. Розрахунки виконувались для таких моделей: FS 3, WB11, WHS13–14, AMGSE15–16, YSS2, і для запропонованої моделі FS-NP

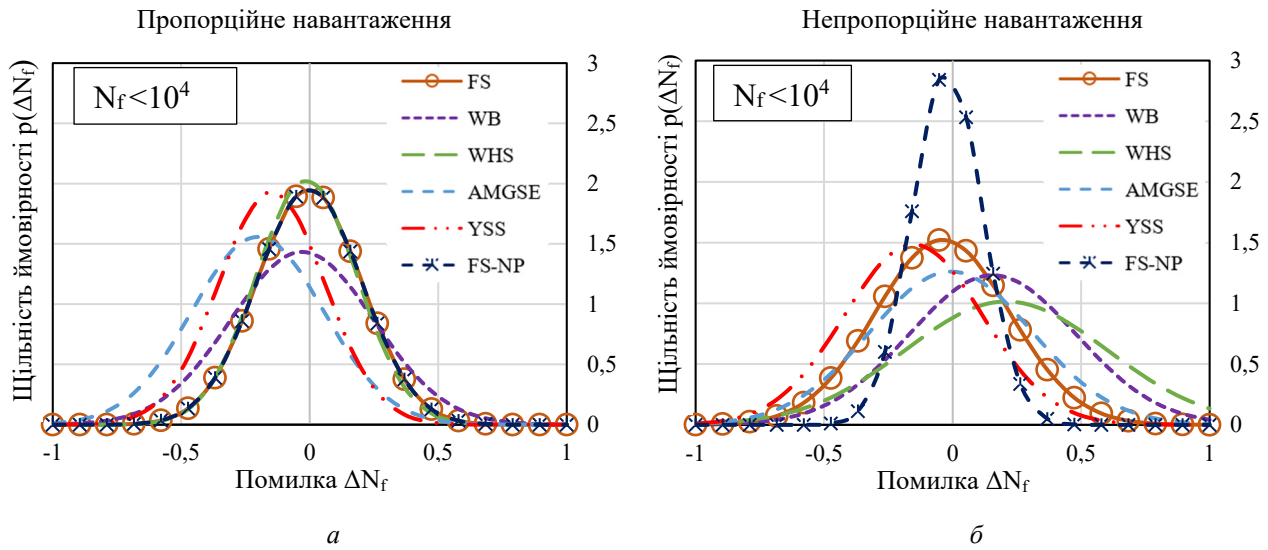


Рис. 3. Графіки функцій щільності ймовірностей похибки передбачення довговічності за малоциклового пропорційного (а) та непропорційного (б) навантаження

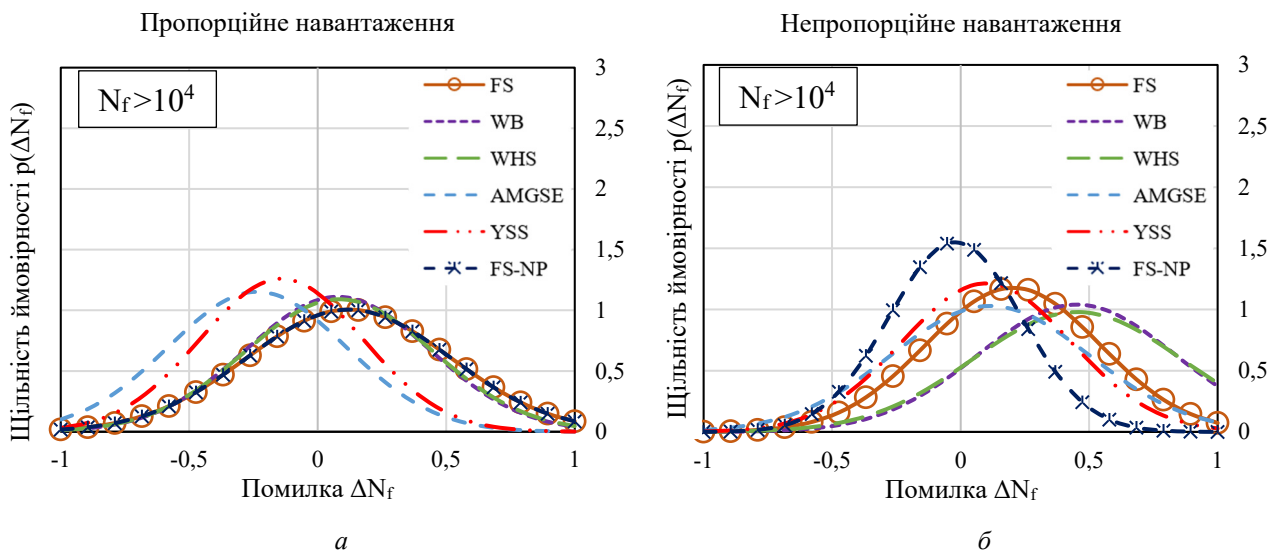


Рис. 4. Графіки функцій щільності ймовірностей похибки передбачення довговічності за багатоциклового пропорційного (а) та непропорційного (б) навантаження

Висновки

На основі проведених розрахунків, можна зробити наступні висновки:

1. Запропонований критерій значно покращує передбачення довговічності за умов непропорційного навантаження.
2. Запропонований параметр α^{γ} визначає вплив непропорційного навантаження як за малоциклової, так і для багатоциклової втоми та може бути визначеним для будь-якого типу кристалічної решітки на основі експериментальних даних.

Список літератури

1. Savchuk, Y., & Shukayev, S. (2023). Comparison of critical plane models for multiaxial fatigue life prediction. *Mechanics and Advanced Technologies*, 7(3 (99)), 279–293. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.3.287522>
2. Yakovchuk, P.V., Savchuk, E.V. & Shukayev, S.M. Critical Plane Approach-Based Fatigue Life Prediction for Multiaxial Loading: A New Model and its Verification. *Strength Mater* 56, 281–291 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11223-024-00647-3>
3. Fatemi A. and Socie D.F. A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading. *Fatigue Fract Eng Mater Struct* 1988; 11(3): 149–165.
4. D. Skibicki, *Phenomena and Computational Models of NonProportional Fatigue of Materials*, Springer, 2014.
5. Karolczuk A, Skibicki D, Pejkowski Ł. Evaluation of the Fatemi-Socie damage parameter for the fatigue life calculation with application of the Chaboche plasticity model. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 2018;1–12. <https://doi.org/10.1111/ffe.12895>
6. Itoh T, Sakane M, Hata T, Hamada N. A design procedure for assessing low cycle fatigue under proportional and non-proportional loading. *Int J Fatigue* 2006;28(5–6):459–66.
7. Wu M, Itoh T, Shimizu Y, Nakamura H, Takanashi M (2012) Low cycle fatigue life of Ti-6Al-4 V alloy under non-proportional loading. *Int J Fatigue* 44:14–20.
8. Borodii MV. Determination of cycle non-proportionality coefficient. *Strength Mater* 1995;27(5–6):265–72.
9. Borodii MV, Strizhalo VA. Analysis of the experimental data on a low cycle fatigue under non-proportional straining. *Int J Fatigue* 2000; 22:275-82.
10. Borodii MV, Adamchuk MP. Life assessment for metallic materials with the use of the strain criterion for low cycle fatigue. *Int J Fatigue* 2009; 31(10): 1579-87.
11. Zhong, B., Wang, Y-R., Wei, D-S., Wang, J-L., A new life prediction model for multiaxial fatigue under proportional and non-proportional loading paths, *International Journal of Fatigue* (2017), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.04.013>
12. Wang, C. H., & Brown, M. W. (1993). A path-independent parameter for fatigue under proportional and non-proportional loading. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 16(12), 1285-1297. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1993.tb00739.x>
13. Wu, Z., Hu, X., & Song, Y. (2013). Multi-axial fatigue life prediction model based on maximum shear strain amplitude and modified SWT parameter. *Jixie Gongcheng Xuebao (Chinese Journal of Mechanical Engineering)*, 49(2), 59-66.
14. Wu, Z. R., Hu, X. T., & Song, Y. D. (2014). Multiaxial fatigue life prediction for titanium alloy TC4 under proportional and nonproportional loading. *International Journal of Fatigue*, 59, 170-175. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.08.028>
15. Zhu, S. P., Yu, Z. Y., Correia, J., De Jesus, A., & Berto, F. (2018). Evaluation and comparison of critical plane criteria for multiaxial fatigue analysis of ductile and brittle materials. *International Journal of Fatigue*, 112, 279-288. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.03.028>
16. Yu, Z. Y., Zhu, S. P., Liu, Q., & Liu, Y. (2017). Multiaxial fatigue damage parameter and life prediction without any additional material constants. *Materials*, 10(8), 923. <https://doi.org/10.3390%2Fma10080923>

Fatigue Life Assessment of Alloys under Nonproportional Loading Conditions

Y. Savchuk, S. Shukayev

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Abstract: This work addresses the problem of predicting material fatigue life under conditions of nonproportional loading. A modification of the Fatemi-Socie model is proposed, which includes a parameter that accounts for the influence of the rotation of principal stress axes and additional hardening effects. The model is based on experimental results for axial loading, torsion, and circular trajectories. A comparative analysis of prediction accuracy is conducted in comparison with classical critical plane models. As a result, it was established that directly accounting for the parameters of nonproportional loading sensitivity and the shape of the trajectory significantly improves the model's correlation with experimental data. The proposed criterion for non-proportional loading demonstrates better fatigue life prediction results for both low cycle and high cycle fatigue compared to the considered critical plane models.

Keywords: low cycle fatigue; high cycle fatigue; nonproportional loading; nonproportionality coefficient, critical plane model.