

Вплив експлуатаційних чинників на закономірності розподілу дискретних деформацій поверхневого шару металоконструкцій за багатоциклового навантажування зразків

Г.Г. Писаренко¹ • О.В. Войналович² • А.М. Майло¹

1 - Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна;

2 - Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

Received: 03 July 2018 / Accepted: 15 October 2018

Анотація. Досліджено вплив тривалості циклічного навантажування на закономірності розподілу дискретних деформацій поверхневого шару металоконструкцій за багатоциклового навантажування з використанням оптичного методу з високою виокремлюваною здатністю відображення мікропластичних деформацій поверхні. Для цього розроблено програмно-апаратний комплекс на технологічній базі методу DIC, що передбачає опромінення досліджуваної зони поверхні зразка металоконструкції когерентним пучком променів світла з довжиною хвилі, яка співвимірна з масштабом локалізації мікропластичних деформацій поверхні зразка металоконструкції та отримання спектрограми віддзеркаленого від локально zdeформованого рельєфу поверхні проміння. Як міру інтенсивності деформаційного рельєфу використано параметр у вигляді співвідношення кількості світлих пікселів до загальної кількості пікселів зображення спеклструктури.

Показано, що отримана характеристика зміни інтенсивності яскравості спекл-поля відповідає кінетиці збільшення деформаційного рельєфу. Зі збільшенням кількості циклів навантажування зразка характеристика мікропошкодженості зростає, що відповідає збільшенню інтенсивності формування амплітуди рельєфу деформацій на поверхні.

На засадах викладеної методики безконтактного вимірювання параметрів дискретного розподілу яскравостей віддзеркаленого проміння проаналізовано їх мікродеформаційну еволюцію за умов багатоциклового навантажування. Встановлено, що аналіз еволюції стану пошкодженості структуро-чутливих параметрів субструктури поверхні дозволяє контролювати механічні властивості металоконструкції за умов багатоциклового деформування.

Ключові слова: втома, непружність, мікропластичні деформації, деформаційний рельєф, спекл-структура.

Вступ. Для опису процесів зародження та поширення тріщин втоми сучасні моделі втомного руйнування конструкційних матеріалів використовують концепцію самоузгодженої автотельності, для якої характерна періодичність зміни мезоструктури поверхні циклічно zdeформованого матеріалу протягом всієї стадії перед макрозруйнуванням зразка [1]. На цій стадії циклічність процесу пошкодження металів і сплавів характеризується підвищенням частоти циклів зміцнення-знеміцнення матеріалу і зменшенням інтенсивності енергії процесу руйнування [2], що можна відстежити за кінетичними залежностями непружних властивостей матеріалів. У роботі [3] зазначено, що не існує надійних методів контролю величини непружних деформацій поверхні матеріалу за їх малих амплітуд (менше 10^{-6}). Такий рівень відносних деформацій відповідає рівню циклічних напружень, коли конструкційний матеріал не руйнується на базисах циклічного навантажування 10^9 циклів і більше [4]. То ж постає необхідність розроблення методів оцінювання кінетики накопичення пошкодження у конструкційних матеріалах за гігациклової втоми та дослідження виявлених закономірностей, що важливо для прогнозування залишкового ресурсу металоконструкцій.

Внаслідок особливостей формування субструктури полікристалічного матеріалу процеси деформування найбільш інтенсивно розвиваються у поверхневому шарі, що обумовлено наявністю дефектів, недосконалістю структури, впливом технологічних чинників. Через це важливе місце для визначення кінетики пошкоджуваності під час втоми займають методи кількісного оцінювання структурних змін на поверхні зразків матеріалу [4, 5].

На стадії розсіяного пошкодження виділяють період, пов'язаний з нелокалізованими змінами структури мікропошкодження. Нелокалізоване руйнування під час втоми металів і сплавів відбувається на рівнях мікро- і мезоструктурної деградації фізико-механічних характеристик та завершується на макрорівні локального зародження тріщини. Інтенсивність нелокалізованого руйнування залежить від багатьох чинників, оцінити вплив кожного з них вкрай складно, чим пояснюється суттєвий розкид розрахункових та експериментальних даних щодо характеристик опору втоми конструкційних матеріалів і довговічності металоконструкцій [6]. То ж

зміну механічних характеристик конструкційних матеріалів за умов циклічного навантажування багато авторів описують на основі аналізу кінетики мікропластичних деформацій поверхні [7, 8].

Постановка задачі. Виявлення стадійності пошкоджуваності під час багатоциклової втоми є важливим чинником для визначення поточного структурного стану конструкційного матеріалу та прогнозування його характеристик втоми [5]. Протягом 90% довговічності металокопункції і більше процес циклічного деформування проявляється неоднорідно із стохастичною закономірністю розподілу напружень в об'ємі матеріалу, супроводжується еволюцією структурних параметрів, мікропластична деформація розвивається в обмеженій кількості мікрооб'ємів, розмір яких збільшується зі зростанням кількості циклів навантажування, і лише на завершальній стадії характеризується локалізацією і розвитком мікротріщин [9]. За таких умов деформаційні дефекти структури розвиваються в поверхневому шарі, утворюючи усталений деформаційний рельєф на поверхні.

Ефективним сучасним методом відстеження пошкоженості матеріалу через неоднорідність деформаційного рельєфу може бути використання дискретних характеристик оптичних зображень структурних елементів на рівні мезо- та мікросруктурних перетворень, що дозволяють контролювати неоднорідність деформацій на поверхні матеріалу з високою виокремівністю [6-8]. Для оцінення змін структури рельєфу деформаційних дефектів на поверхні конструкційних матеріалів перспективним є застосування безконтактного методу DIC (digital image correlation) [9, 10], в якому досліджувану зону поверхні зразка контрольованої металокопункції опромінують когерентним пучком променів світла, отримують спеклограму віддзеркаленого від локально здеформованого рельєфу поверхні проміння, а як міру інтенсивності деформаційного рельєфу використовують параметр у вигляді співвідношення кількості «білих» пікселів до загальної кількості пікселів зображення спеклструктури.

Разом з тим відомі в літературі реалізації цього методу не дозволяють забезпечити отримання великого статистично обґрунтованого масиву даних про ступінь здеформування (мікропошкодження) поверхні зразка металокопункції та аналіз накопичення поверхневих мікродеформацій рельєфу поверхні об'єкту із необхідною на практиці точністю.

Мета роботи – дослідити вплив експлуатаційних чинників на закономірності розподілу дискретних деформацій поверхневого шару металокопункції за багатоциклового навантажування з використанням оптичного методу з високою виокремівною здатністю відображення мікропластичних деформацій поверхні, що важливо для оцінення залишкового ресурсу металокопункції.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для кількісного оцінення впливу мікродеформацій поверхні об'єкта на характеристики опору втоми конструкційних матеріалів у даній роботі розроблено програмно-апаратний комплекс на технологічній базі методу DIC, що передбачає перетворення енергії гаусівського пучка джерела когерентного опромінення у віддзеркалену енергію спекл-модульованого проміння з певним співвідношенням енергій поглинання та відбиття пластично деформованою поверхнею полікристалу. Така взаємодія поверхні твердого тіла з когерентним променем є виявленням інтегрального ефекту дисипативної взаємодії металевого полікристалу з енергією деформування силосбудувача, що виявляється локально у зміні амплітуд деформацій поверхневого шару пружно-пластичного тіла. Перетворення енергії променю світла виникає внаслідок дифузійно-дзеркального відбиття когерентного пучка на центрах розсіювання, розташованих у зоні опромінення. Зони розсіювання – це елементи деформаційного рельєфу поверхні полікристалів опроміненого об'єкту [6].

Поверхню матеріалу з деформаційним рельєфом опромінювали джерелом когерентного проміння з довжиною хвилі, яка співвимірна з очікуваним розміром мікропластичних деформацій поверхні металевого зразка, що виникають за умов циклічного багатоциклового навантажування. Експериментальні дані отримані у роботі з використанням джерела когерентного опромінення з довжиною хвилі 450 nm.

Формування рельєфу пов'язано з розвитком локалізованих зсувів площин ковзання структурних елементів полікристалу. Внаслідок цього накопичується множинне деформаційне пошкодження пружно-пластичного матеріалу. Множина розвинених площин зсуву поверхні створює рельєф, щільність якого незворотна внаслідок адитивності процесу. Рельєф поверхні має структуру, характерну для кожного етапу навантажування. Зміна структури рельєфу деформаційних дефектів поверхневого шару відображається у кінетичних характеристиках відображень фрактальної розмірності деформованої поверхні. Попередніми дослідженнями характеристик опору втоми конструкційних елементів та лабораторних макетів металокопункції виявлено інваріантність характеристик мікродеформацій за ідентичних умов локального напружено-деформованого стану поверхневого шару матеріалу [9].

На рис. 1 представлено 2D-спеклструктуру поверхні недеформованого зразка та кореляційну характеристику дискретних деформацій ст. 45 на базі шкали вимірювання $L=40$ мкм. Встановлено [8], що із зменшенням бази вимірювання мікродеформацій на поверхні полікристалічного матеріалу зростає виокремівна здатність визначення параметру неоднорідності. Розмір зони опромінення поверхні становить (30×40) мкм і

відповідає масштабу локалізації мікрдеформацій на поверхні. Виокремівна здатність зображення деформаційного рельєфу становила 225 пікселів на $1 \mu\text{m}^2$ площі зразка.

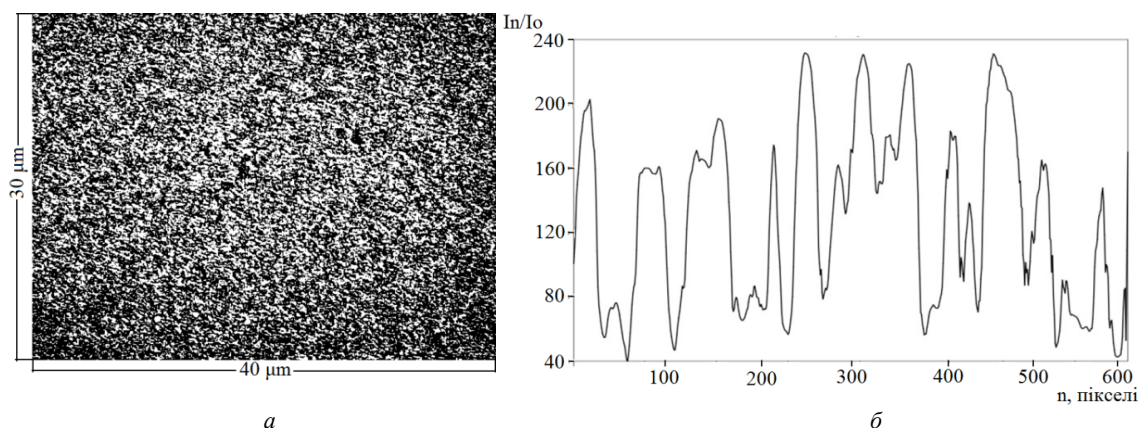


Рис. 1. Зображення спеклструктури недеформованої поверхні (а) та кореляційна характеристика дискретних деформацій поверхні (б)

З формуванням деформаційного рельєфу рівень яскравості зображення монотонно змінюється у діапазоні шкали від 0 до 255 градацій яскравостей діодної матриці. Для збільшення чутливості використано бінарну моду спеклограми, що збільшує питоме значення кожного пікселя. На спектрі шкали яскравостей зниження віддзеркалювальної здатності поверхні матеріалу відображається збільшенням кількості темних пікселів. З розвитком щільності деформаційного рельєфу енергія віддзеркаленого проміння буде зменшуватися, а дифузно розсіяна – зростати. На зображенні спеклструктури віддзеркаленого поверхнею пучка з розвитком деформаційного рельєфу кількість пікселів зростає, що буде відповідати стану пошкодження, зображеному на рис. 2 для деформаційного рельєфу досліджуваної сталі. Поля спеклів фіксували та усереднювали за результатами вимірювання у шести перерізах зони дії максимальних циклічних напружень у консольному лабораторному зразку стержневої форми галтельного типу, який навантажували циклічним згиним з неоднорідним розподілом напружень по довжині.

Реалізований у даному експерименті рівень відносних деформацій відповідав рівню циклічних напружень, за яких матеріал конструкційного елемента витримує дію циклічного навантаження без руйнування на базах 10^9 циклів і вище. Втомне руйнування пружно-пластичного матеріалу за гігациклової втоми відбувається як процес ініціації тріщини, здебільшого під поверхневим шаром, у вигляді несущальностей металу експлуатаційного та технологічного походження і її зростання до остаточного руйнування.

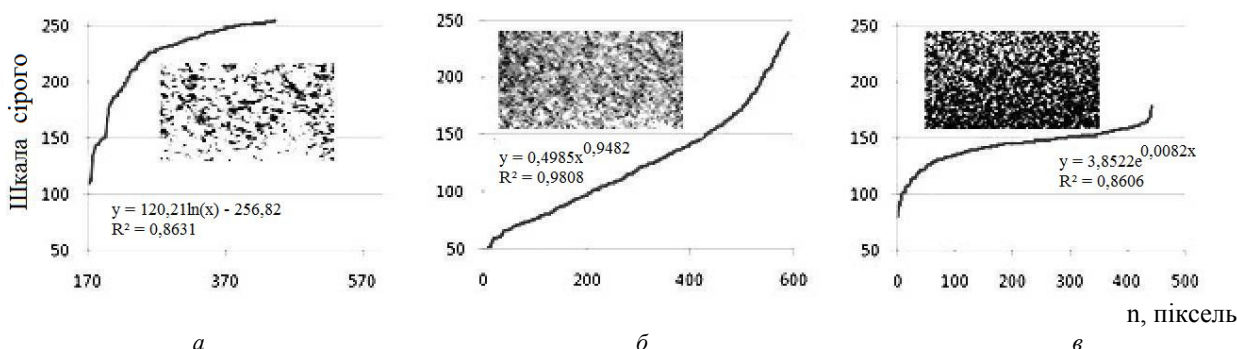


Рис. 2. Кореляційні характеристики мікрдеформацій та зображення спеклструктур відповідного деформаційного рельєфу поверхні зразка ст. 45: а – початковий стан поверхні зразка; б, в – стан поверхні зразка після циклічного навантаження на базі 10^5 та 10^6 циклів відповідно (у – апроксимувальна функція, R^2 – коефіцієнт кореляції)

Отримана характеристика зміни інтенсивності яскравості спекл-поля відповідає кінетиці збільшення деформаційного рельєфу [6]. Із зростанням кількості циклів навантаження зразка характеристика мікропошкодженості зростає, що відповідає збільшенню інтенсивності формування амплітуди рельєфу деформацій на поверхні.

На засадах викладеної методики безконтактного вимірювання параметрів дискретного розподілу яскравостей віддзеркаленого проміння проаналізовано їх мікрдеформаційну еволюцію за умов багатоциклового навантаження.

З метою виявлення стохастичних властивостей ймовірнісного розподілу дискретних деформацій поверхневого шару конструкційного матеріалу за багатоциклового навантаження побудовано гістограми

(рис. 3) розподілу яскравостей елементів діодної матриці індикатора, що залежать від мікродеформованого стану поверхні після циклічного навантаження зразка. Гістограми побудовано для двох станів розсіяного пошкодження поверхні лабораторних зразків, навантажених за однакової амплітуди циклічних напружень з різною кількістю циклів: стан 1 – 10^6 циклів; стан 2 – $2 \cdot 10^9$ циклів. Гістограми для станів 1 та 2 належать до нормального (рис. 3, а) та експоненційного (рис. 3, б) розподілів параметрів спеклструктур відповідно. Розташування діаграм щодо координатних осей відповідає стану мікропластичних деформацій поверхні деформованих зразків. Різна форма цих гістограм пов'язана з різним характером впливу тривалості циклічного навантаження на пластичні властивості матеріалу поверхневого шару зразків.

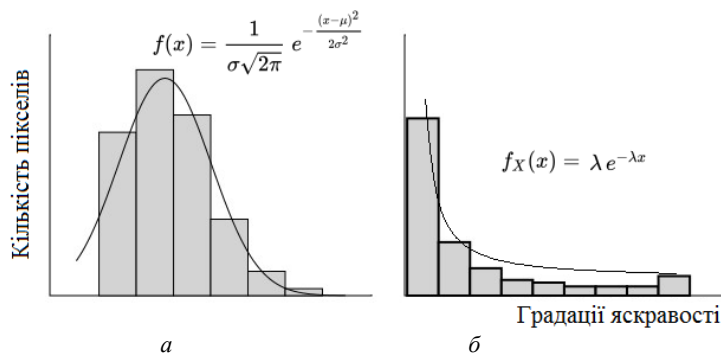


Рис. 3. Гістограми ймовірності дискретних розподілів, отриманих за різною тривалістю навантаження: а – стан 1 (нормальний розподіл); б – стан 2 (експоненційний розподіл), $f(x)$ – функція розподілу

Представлено параметри статистики розподілу дискретних деформацій поверхні зразків для двох станів, сформованих після циклічного навантаження. Базовий обсяг вибірки забезпечують 1920×1080 дискретних елементів діодної матриці індикатора.

Еволюція параметрів описаної статистики розподілу дискретних мікродеформацій поверхні корелює з кінетикою накопичення мікропластичних деформацій поверхневого шару зразків. Так, на основі висновків робіт [6-8] та отриманих у даній роботі результатів дослідження побудовано діаграми розподілу яскравостей матриці, які відображають кореляційну залежність віддзеркаленої енергії когерентного опромінення від неоднорідної структури мікропластичних деформацій деформованого шару (рис. 4).

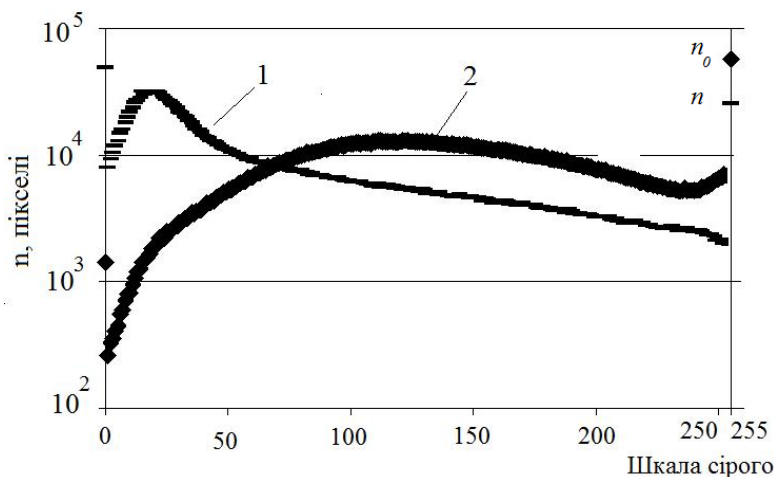


Рис. 4. Діаграми дискретного розподілу структурних елементів матриці яскравості після навантаження тривалістю: 1 – 10^6 циклів; 2 – $2 \cdot 10^9$ циклів

Ці діаграми є характеристиками процесу накопичення структурних перетворень поверхневого шару зразка, відображених у діапазоні шкали яскравостей 0-255, і представлені немонотонно зростаючими функціями. Діаграма стану 1 має екстремум у діапазоні середніх яскравостей матриці. Для діаграми стану 2 характерним є наявність максимуму в діапазоні мінімальної яскравості. Щоб визначити параметри поточного стану накопичення структурних змін поверхневого шару зразка, необхідно співставити параметри поточного стану поверхні з параметрами початкового за критерієм локальних змін деформованої поверхні. Найбільший діапазон зміни локального стану поверхні зразка у критичному стані розсіяного руйнування може бути віднесений до змін параметрів матриці яскравостей на діаграмі розподілу в зоні її перетину з січною лінією у

діапазоні певної градації яскравостей. У даній роботі показано, що для стану граничного пошкодження перед локальним руйнуванням зразка відношення загальної кількості білих пікселів у початковому стані до залишкової кількості у діапазоні градації 255 яскравостей становить близько 300 % (рис. 4).

На рис. 5 представлено залежність асиметрії гістограми розподілу від кількості циклів навантажування, яку апроксимовано експоненційною функцією з коефіцієнтом кореляції $R^2 = 0,939$,

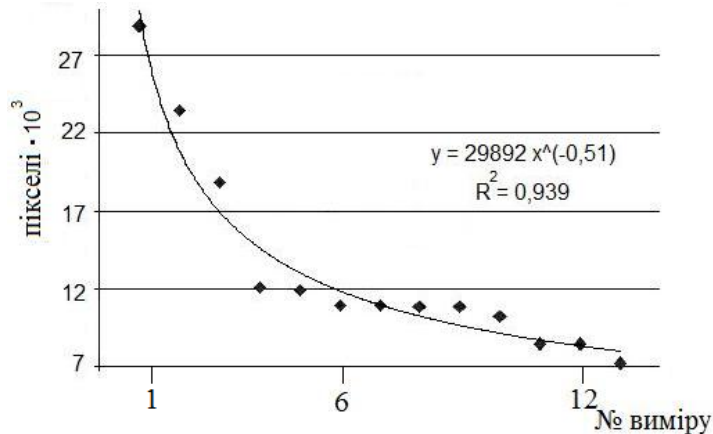


Рис. 5. Характеристика еволюції розподілу елементів градації 255 матриці яскравостей у діапазоні циклічного навантажування 10^6 - $2 \cdot 10^9$ циклів

Для кількісного визначення поточного стану накопиченого деформаційного рельєфу вибрано параметр D , який характеризує питому щільність у розподілі матриці яскравості пікселів градації 255 (у стані максимального пошкодження параметр $D = 1$). Параметр D визначали за співвідношенням кількості білих пікселів матриці яскравостей до циклічного навантажування зразка (позначка 1 на рис. 5) до кількості білих пікселів після певного етапу навантаження (позначка 2 на рис. 5). Параметр D характеризує поточний стан втомного пошкодження як накопичення деформаційного рельєфу на поверхні матеріалу за циклічного навантажування зразка

$$D = \sum n_0 / \sum n ,$$

де n_0 – кількість білих пікселів у початковому стані поверхні зразка, n – кількість білих пікселів у поточному мікрODEформованому стані.

Висновки. Отримано кореляційні характеристики деформаційного рельєфу на базі циклічного навантажування $2 \cdot 10^9$ циклів зразків сталі 45 за параметром розподілу дискретних елементів матриці яскравості, що досягає критичного значення на стадії перед руйнуванням і відповідає закономірностям кінетики деформування пружно-пластичного матеріалу під час багатоциклової втоми.

Показано, що розроблений програмно-апаратний комплекс реалізує можливості оптичного методу для аналізу з високою виокремлювальною здатністю мікропластичних деформацій поверхні пружно-пластичного матеріалу, зокрема забезпечує виокремлювальну здатність відображення локальних зон утворення ортогональних деформацій металевій поверхні в діапазоні $0,5 \text{ мкм} \pm 10\%$, що може бути застосовано для моніторингу розсіяного пошкодження у металоконструкції за циклічного навантажування.

Влияние эксплуатационных факторов на закономерности распределения дискретных деформаций поверхностного слоя металлоконструкций при многоцикловом нагружении образцов

Г.Г. Писаренко, А.В. Войналович, А.Н. Майло

Анотация. Неоднородность структуры конструкционного материала вызывает разброс характеристик механических свойств. Локальные напряжения кристаллита в несколько раз могут превышать значение действующих напряжений. Порядок величины микропластических деформаций составляет 10^{-6} мм/мм, что при номинальных напряжениях ниже предела выносливости. Вследствие структурных и технологических факторов поверхностный упруго-пластический шар конструкционного материала имеет меньшую устойчивость к повреждаемости при действии механического нагружения сравнительно с основным объемом, что вызывает количество случаев усталостного разрушения сравнительно с общим количеством разрушений металлоконструкций. Неоднородность микронапряженного состояния приводит к неоднородному развитию микропластических деформаций, локализация которых влияет на эволюцию диссипативной

структуры поликристаллического материала, что особо критично обнаруживается в приповерхностном слое. Анализ эволюции состояния поврежденности структуро-чувствительных параметров субструктуры поверхности делает возможным контроль механических свойств конструкционного материала при многоцикловом деформировании.

Ключевые слова: усталость, неупругость, микропластические деформации, деформационный рельеф, спекл-структура.

The influence to the patterns of the surface layer discrete deformations distribution for metal structure's operational factors under high-cycle loading of samples

G.G. Pisarenko, O.V. Voinalovich, A.M. Maylo

Abstract. The structural material heterogeneity causes the scatter in the mechanical properties. The local stresses in the crystallite can exceed by several times the actual stress values. The order of magnitude of the microplastic strains is 10^{-6} mm/mm, which is below the fatigue limit at normal stresses. Due to the structural and technological factors, the surface elasto-plastic layer of the structural material is less resistant to mechanical damage than the bulk of the material, resulting in a certain number of fatigue failure cases in the total number of failures of metal structures. Non-uniformities in the micro-stress state lead to an irregular development of micro-plastic strains, whose localization affects the evolution of a dissipative structure in a polycrystalline material, which is particularly critical for the subsurface layer. The analysis of the damage state evolution for structure-sensitive parameters of the substructure surface makes it possible to control the mechanical properties of the structural material under high-cycle deformation.

Keywords: fatigue, inelasticity, microplastic strains, deformation relief, speckle pattern.

References

1. Bathias C. There is no infinite fatigue life in metallic materials / C. Bathias. // Fatigue & fracture of engineering materials & structures. – 1999. – Vol. 22, no. 7. – С. 559–565.
2. Bydzan A. Fatigue failure as process of sequential development of plastic deformation and continuity disturbance in hierarchy of structural levels / A. Bydzan, S. Panin // Proceedings KORUS 2000. The 4th Korea-Russia International Symposium On Science and Technology / A. Bydzan, S. Panin. – Ulsan, South Korea: IEEE, 2000. – P. 337–341.
3. Alfyorova E. A. Self-organization of plastic deformation and deformation relief in FCC single crystals / E. A. Alfyorova, D. V. Lychagin. // Mechanics of Materials. – Vol. 117. – 2018. – P. 202–213.
4. A fatigue life assessment of aircraft alloys using fractal analysis in combination with eddy current testing [Электронный ресурс] / [J. Schreiber, U. Cikalova, S. Hillmann та ін.] // Proceedings 18th World Conference on Non-Destructive Testing 16 - 20 April 2012, Durban, South Africa. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: https://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/240_wcndtfinal00240.pdf.
5. Коссов В. С. Учет гигацикловой усталости сталей при оценке срока службы ответственных деталей железнодорожной техники / В. С. Коссов, В. Н. Огуенко, В. В. Огуенко. // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2007. – №19. – С. 165–169.
6. Использование динамической спекл-интерферометрии для бесконтактной диагностики зарождения усталостной трещины и определения скорости ее роста / [А. П. Владимиров, И. С. Каманцев, В. Е. Веселова та ін.]. // Журнал технической физики. – 2016. – № 4. – С. 85–90.
7. Минеев С. А. Анализ спекл-изображений деформируемой поверхности на основе алгоритмов обработки оптического потока / С. А. Минеев, А. Ю. Угольников, Л. Б. Лозовская. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2014. – №2. – С. 81–86.
8. Effect of metallic surface roughness on the speckle pattern formation at diffraction plane / J. B. Meireles, L. da Silva, D. P. Caetano, J. A. O. Huguenin. // Optics and Lasers in Engineering. – 2012. – №12. – P. 1731–1734.
9. Shih-Heng T. Development of digital image correlation method to analyse crack variations of masonry wall / T. Shih-Heng, S. Ming-Hsiang, S. Wen-Pei. // Sadhana. – 2008. – № 6. – P. 767–779.
10. Сергеев Р. Н. Мобильный цифровой спекл-интерферометр с непрерывным лазером для регистрации деформационных полей перемещений и дефектоскопии конструкционных материалов / Р. Н. Сергеев, Ю. В. Харчикова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – № 4. – С. 216–220.