

УДК 620.19

МЕТОД БЕЗКОНТАКТНОГО ВИЗНАЧЕННЯ АМПЛІТУДИ ДЕФОРМАЦІЇ НАКОПИЧЕНОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО ПОШКОДЖЕННЯ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ

Г. Г. Писаренко¹, О. В. Войналович², А. М. Майло¹, С. Г. Писаренко¹

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

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Стаття з спеціальності: 131 – прикладна механіка.

Кореспонденція авторів: georgiy.pysarenko@gmail.com; voynalovich@nubip.edu.ua; maylo@ipp.kiev.ua.

Історія статті: отримано – квітень 2021, акцептовано – серпень 2021, опубліковано – 30 вересня 2021 року.

Бібл. 24, рис. 2, табл. 2.

Анотація. Показано, що для дослідження кінетики експлуатаційного пошкодження матеріалів та елементів конструкцій необхідно розробляти сучасні засоби і методи діагностування пошкодження, що виникає у лабораторних зразках та елементах конструкцій. У даній роботі, з метою визначення деформаційного стану поверхневого шару конструкційного матеріалу, на прикладі зразків аустенітної сталі, було використано метод оптичного вимірювання мікропластичної деформації, який базується на кореляційному зв'язку енергії проміння когерентного джерела світла, відбитого поверхнею металевго полікристала, і амплітуди мікропластичної деформації здеформованої поверхні. Згідно з даним методом досліджувану локальну зону поверхні зразка матеріалу на певних етапах навантажування опромінюють когерентним промінням світла з довжиною хвилі, яка відповідає масштабу локалізації мікропластичних деформацій поверхні зразка. За допомогою оптичної системи формують зображення спекломодульованого проміння, що має параметри рельєфу деформованої поверхні. Як міра глибини деформаційного рельєфу використано інтегральне значення параметру інтенсивності яскравості зображення у вигляді відношення кількості світлих пікселів до загальної кількості пікселів зображення спеклограми. У результаті аналізу статистичних параметрів спеклограми, що корелюють з характеристиками стану мікропластичного деформування поверхні зразків аустенітної сталі, було визначено характеристичні параметри розсіяної пошкодженості структури дискретних деформацій поверхні металевго полікристала. На основі отриманих експериментальних даних у роботі виявлено закономірності впливу статичного і циклічного деформування на форму розподілу дискретних властивостей поверхні. Зокрема, в результаті аналізу статистичних характеристик кореляційних діаграм отримано лінійну залежність параметрів розподілу дискретних властивостей рельєфу деформованої поверхні від чинника навантаженості.

Ключові слова: пошкодженість металоконострукції, деформаційний мікрорельєф поверхні, когерентно-оптичне сканування, мікропластичне деформування поверхні.

Постановка проблеми

Упродовж експлуатації тракторів та іншої мобільної сільськогосподарської техніки деталі та елементи конструкцій зазнають пошкодження. Пошкодженість інтегрально відображає ступінь зниження механічних та експлуатаційних характеристик конструкційного матеріалу, з якого виготовлено деталь. Інтенсивність накопичення пошкодження здебільшого визначають умови експлуатації техніки (силове навантаження у вузлах, корозійний вплив доквілля, температурні режими роботи деталей тощо) [1, 2].

Дослідження кінетики експлуатаційного пошкодження матеріалів та елементів конструкцій важливі для розроблення методів підвищення надійності мобільної техніки, прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій, встановлення ризику настання аварійних ситуацій. Для виконання таких досліджень на металоконострукціях необхідно розробляти засоби і методи діагностування пошкодження у лабораторних зразках та елементах конструкцій, де було б враховано експлуатаційні чинники.

Аналіз останніх досліджень

Щоб контролювати пошкодженість конструкційного матеріалу, необхідно відстежувати кінетику пошкодження на різних структурних рівнях, що можна забезпечити застосуванням структурно-чутливих методів дослідження [3]. Однак нині не погоджено єдиної прийнятної концепції щодо аналізу закономірностей формування та накопичення пошкодження у зразках металоконострукцій, що ускладнює вибір критеріїв для оцінювання граничного

накопичення пошкодження та інтенсивності такого накопичення [4].

Останнім часом застосовують міждисциплінарний підхід, що дозволяє описати кінетику пошкодження конструкційного матеріалу з позицій механіки та з врахуванням фізичних аспектів пошкодження матеріалу на різних масштабних рівнях [5-7]. Так, розвиваються нові підходи (синергетичний підхід, фрактальна параметризація, вейвлет-аналіз та ін.), що дозволяють комплексно досліджувати деформаційну поведінку конструкційних матеріалів за статичного та циклічного навантажування.

Численними дослідженнями нині показано, що змінення фізико-механічних властивостей полікристалічного матеріалу за циклічного навантажування характеризується стадійністю, що відповідає певним структурним рівням [8]. Для представлення закономірностей виявленої стадійності накопичення пошкодження на різних досліджених структурних рівнів запропоновано статистичні моделі [9, 10].

Встановлено, що кінетичні статистичні характеристики закономірностей накопичування пошкодження у конструкційному матеріалі внаслідок циклічного навантажування корелюють з параметрами, які характеризують стан структури, зокрема мікроструктури [11]. Величина виявленої кореляції суттєво залежить від чутливості методу контролю пошкоженості матеріалу за умов циклічного деформування. Зокрема, чутливість методу оцінювання кінетики мікропластичного деформування матеріалу за втоми дозволяє оцінювати зміни фізико-механічних властивостей відповідного структурного рівня (мікро-, мезо-, макро-) [12]. Кінетика характеристичного параметра відповідає еволюції структури конструкційного матеріалу на кожному структурному рівні, а інтегральна характеристика пошкодження виявляє велику дискретність стадій пошкоджуваності.

Для визначення еволюційної послідовності зміни топографії структури поверхневого шару матеріалу за циклічного навантажування, з метою кількісного оцінювання кінетики пошкодження, рекомендують використовувати характеристики, які вибірково чутливі до змінення фізико-механічних властивостей конструкційного матеріалу [13, 14].

Щоб дослідити вплив початкової структурної неоднорідності матеріалу та інтенсивності накопичення пошкодження (дефектів) різного масштабного рівня на умови переходу від дисперсного до макроскопічного руйнування, ефективними є методи кількісної фрактографії [15]. Вони дозволяють врахувати певні стадії цього переходу – зародження і розвиток тріщин критичного розміру, що може бути використано для оцінювання ресурсу металокопструкцій за умов багатоміклової втоми [16].

Аналіз морфології поверхонь руйнування матеріалу на основі просторово-часових інваріантів було запропоновано у роботі [17] на основі аналізу рельєфу поверхні руйнування, що свідчить про властивості самоафінності, які відображаються в інваріантних характеристиках рельєфу поверхні

(шорсткості) на широкому спектрі просторових масштабів, і які, у свою чергу, відображають кореляційну поведінку дефектів різних масштабних рівнів.

Тому актуальним є розроблення нових методів дослідження накопичення експлуатаційного пошкодження в елементах конструкцій, що дозволять оцінювати граничні рівні питомої щільності мікропластичних деформацій, що зумовлюють утворення макродефектів критичного розміру. Методом кількісного оцінювання мікро- і мезоструктурних змін поверхневого шару металокопструкції є оптичний метод [18], що дозволяє вимірювати не тільки характеристики морфології структури поверхні, але й амплітуду мікропластичних деформацій, що відіграють важливу роль у пошкодженні структури металів та сплавів за нестационарного навантажування [19, 20].

Мета досліджень

Мета дослідження – дослідити методом оптичного сканування поверхні матеріалу закономірності накопичення пошкодження внаслідок втомного і статично навантажування.

Результати досліджень

У даній роботі кінетику накопичення деформаційних дефектів у металокопструкції оцінювали на основі аналізу дискретних параметрів мікрорельєфу поверхневого шару, що корелюють з розсіяним пошкодженням. Оскільки зміни рельєфу поверхні матеріалу пов'язані з величиною пошкодження, то ступінь пошкодження оцінювали за результатами вимірювання характеристик рельєфу zdeформованої поверхні внаслідок навантажування.

Щоб контролювати зміни мікрорельєфу поверхневого шару матеріалу, використано метод вимірювання дифузного розсіювання лазерного променя, відбитого від рельєфу поверхні, сформованого внаслідок мікропластичних деформацій. У даному методі реалізовано кореляційний зв'язок інтенсивності проміння когерентного джерела світла, відбитого поверхнею зразка металокопструкції, і величини мікропластичної деформації zdeформованої поверхні (рис. 1).

Процедура розробленого методу наступна [21, 22]. Досліджувану локальну зону поверхні металокопструкції опромінують когерентним світловим промінням з довжиною хвилі, яка відповідає масштабу локалізації мікропластичних деформацій поверхні, та отримують спеклограму проміння, відбитого від сформованого мікрорельєфу поверхні. Для оцінювання інтенсивності зміни деформаційного рельєфу використовують параметр, який обчислюють як відношення кількості певних типів світлих пікселів до загальної кількості пікселів зображення спеклоструктури [23].

З формуванням деформаційного рельєфу поверхні рівень яскравості зображення спеклограми

монотонно змінюється в діапазоні шкали від 0 до 255 «градацій сірого». 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.

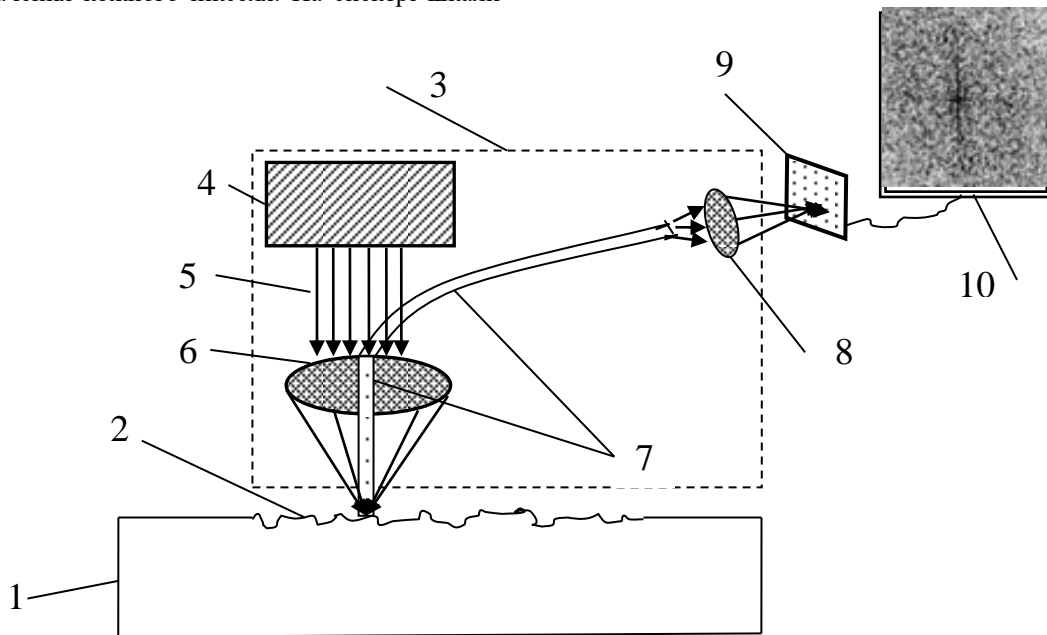


Рис. 1. Схема реалізації методу оптичного контролю мікродеформаційного рельєфу поверхні металокопункції: 1 – зразок металокопункції; 2 – сформований мікродеформаційний рельєф поверхні; 3 – пристрій для опромінення поверхні і отримання відбитого проміння; 4 – джерело когерентного світлового випромінювання; 5 – спрямований потік когерентного світла; 6 – коліimatorних лінза; 7 – світловолоконний кабель, що спрямовує до системи лінз відбите від локальної зони деформаційного рельєфу проміння; 8 – система лінз, що фокусує відбите проміння; 9 – приймальня фотодіодна матриця; 10 – отримана спеклструктура.

Fig. 1. The scheme of realization of a method of optical control of a microdeformation relief of a surface of a metalwork: 1 – a sample of a metalwork; 2 – formed microdeformation relief of the surface; 3 – device for irradiating the surface and obtaining a reflected beam; 4 – source of coherent light radiation; 5 – directional flow of coherent light; 6 – collimator lens; 7 – fiber optic cable that directs to the lens system reflected from the local zone of the deformation relief of the beam; 8 – lens system that focuses the reflected beam; 9 – receiving photodiode matrix; 10 – obtained speckle structure.

Отримана у вигляді спеклограми дискретна структура рельєфу корелює зі щільністю деформаційних дефектів накопиченого розсіяного пошкодження. Обсяг інформаційної вибірки в аналізованій локальній зоні площею 200x200 мкм становить $4 \cdot 10^6$ пікселів (пкс.).

У разі застосування фотодіодної матриці розміром 1920x1080 пкс. за довжини хвилі когерентного випромінювання $\lambda = 0,450$ мкм, виокремівність методу становить 0,2 мкм/пкс.

У роботі отримано кореляційні залежності дискретних розподілів спеклів від ступеня пошкодження поверхні за двох видів деформування зразків металокопункції – монотонного розтягу і циклічного розтягу-стиску. Щоб аналізувати статистичні параметри розподілу мікродеформацій поверхні, було розроблено комп'ютерну програму цифрового оброблення спеклограм.

Дослідження накопичення пошкодження проводили на полірованих плоских зразках корсетної форми товщиною 3 мм з аустенітної сталі X18H10T (межа міцності $\sigma_s = 628$ МПа, умовна межа плинності $\sigma_{02} = 314$ МПа, межа втоми $\sigma_{-1} = 230$ МПа; модуль Юнга $E = 2,4 \cdot 10^5$ МПа [24-25]). На випробувальній

машині «Amsler» із силозбуджувачем електромагнітного типу було випробувано у м'якому режимі навантажування дві групи зразків: за розтягу до напруження $\sigma = 580$ МПа та симетричного однорідного розтягу-стиску на багатоцикловій базі циклічного навантажування.

Коефіцієнт навантаженості K визначали: для циклічного навантажування ($K_{цк}$) у вигляді відношення $K_{цк} = N_n/N_b$, де N_n – поточна кількість циклів навантажування за напруження межі багатоциклової втоми; N_b – базова кількість циклів; для статичного навантажування ($K_{ст}$) визначали у вигляді відношення $K_{ст} = \sigma_{ном}/\sigma_{пр}$, де $\sigma_{ном}$ – номінальне напруження; $\sigma_{пр}$ – напруження межі пружності.

Результати вимірювання обробляли, застосовуючи відомі методи математичної статистики – розраховували середнє значення, похибку окремого вимірювання, середньоквадратичний відхил та середньоквадратичну похибку за коефіцієнтом Стюдента $t_{a(n)}$. Коефіцієнт Стюдента визначали для прийнятого значення довірчої ймовірності $P = 0,95$ і кількості вимірювань $n = 100$ за табличними даними. Його значення становить $t_{a(n)} = 1,646$. Результати досліджень яскравості спеклограм двох груп зразків

за циклічного і статичного навантажування отримано у формі гістограм амплітуд яскравості та представлено на рис. 2 у вигляді нормованих кореляційних діаграм, що відображають цифрові ряди амплітуд спектрів яскравості зображень спеклограм деформованої поверхні. Амплітуду спектра яскравості I зображення спеклограми поверхні зразка визначали за шкалою яскравості фотодіодної матриці ($I = 0-255$). Виконана апроксимація діаграм лінійними функціями з коефіцієнтом кореляції більш $R^2 = 0,91$ показує високий рівень зв'язку для обох груп зразків.

Параметри функції амплітуди яскравості спеклограми характеризуються дискретним розподілом із середнім значенням, пропорційним амплітуді середньоквадратичного відхилу від площини симетрії рельєфу поверхні дискретних деформацій.

Система діаграм характеризує послідовне зниження параметрів амплітуд яскравості зображення спеклограм зі збільшенням навантаженості у діапазоні від циклічного (діаграми 1-3) до статичного (діаграми 4-6) навантажування зразків.

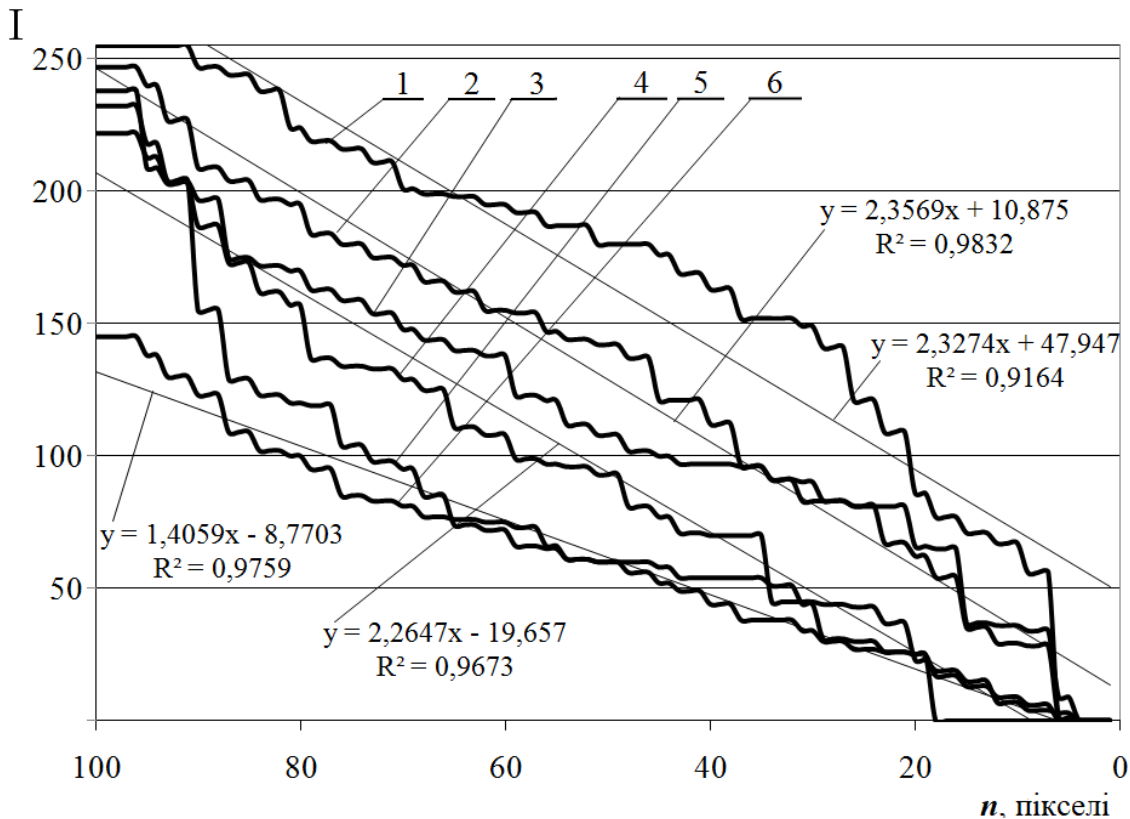


Рис. 2. Кореляційні діаграми аустенітної сталі у разі циклічного навантажування за напруження $\sigma_a = 200$ МПа і кількості циклів навантажування відповідно $N_1 = 3 \cdot 10^4$ циклів (діаграма 1), $N_2 = 4 \cdot 10^4$ циклів (діаграма 2) і $N_3 = 5 \cdot 10^4$ циклів (діаграма 3); у разі статичного навантажування за напруження $\sigma = 56$ МПа (діаграма 4), $\sigma = 170$ МПа (діаграма 5) і $\sigma = 280$ МПа (діаграма 6).

Fig. 2. Correlation diagrams of austenitic steel in the case of cyclic loading at stress $\sigma_a = 200$ MPa and the number of loading cycles, respectively, $N_1 = 3 \cdot 10^4$ cycles (diagram 1), $N_2 = 4 \cdot 10^4$ cycles (diagram 2) and $N_3 = 5 \cdot 10^4$ cycles (diagram 3); in the case of static loading at stresses $\sigma = 56$ MPa (diagram 4), $\sigma = 170$ MPa (diagram 5) and $\sigma = 280$ MPa (diagram 6).

Таблиця 1. Статистичні характеристики результатів вимірювання параметрів спеклограм.

Table 1. Statistical characteristics of the results of measuring the parameters of speclograms.

Номер вибірки	1	2	3	4	5	6
Максимальна амплітуда яскравості	255	247	222	238	232	145
Середнє значення	165,48	129,9	115,97	94,71	75,4	62,23
Стандартна похибка	7,05321	6,895988	5,815991	6,680173	6,355797	4,129002
Стандартний відхил	70,5321	68,95988	58,15991	66,80173	63,55797	41,29002
Медіана	180	142	108	93	60	60
Асиметрія	-0,79428	-0,20172	-0,0393	0,434038	1,008117	0,354511
Екссес	-0,13281	-0,86963	-0,60828	-0,64768	0,510642	-0,763
Коефіцієнт варіації	42,62273	53,0869	50,15082	70,53292	84,2944	66,35067

Зниженню кута нахилу діаграм на рис. 2 відповідає збільшення навантаженості зразків і зменшення кількості пікселів певної амплітуди яскравості, що відзначено зниженням значень основних статистичних характеристик (максимальна амплітуда яскравості, середньоквадратичне значення вибірки, стандартна помилка, медіана, стандартний відхил) описової статистики, представленої у таблиці 1.

За результатами виконаних досліджень було оцінено закономірності накопичення розсіяного пошкодження у випробуваних зразках. У табл. 2 для

двох видів навантажування наведено узагальнені дані змінення амплітуди яскравості у дослідженому діапазоні пошкодження, побудовані за точками кореляційних діаграм на рис. 2, що відповідають кількості пікселів 80 пкс. і 40 пкс. На основі цих даних було кількісно оцінено вплив чинника навантаженості на розподіл дискретних властивостей деформованої поверхні за характеристиками залежності щільності деформаційного пошкодження (розсіяного пошкодження) поверхні аустенітної сталі від параметрів навантаженості.

Таблиця 2. Змінення амплітуди яскравості як характеристика пошкоджуваності аустенітної сталі.
Table 2. Changes in brightness amplitude as a characteristic of austenitic steel damage.

Коефіцієнт навантаженості, K	Циклічне навантажування		Статичне навантажування	
	0,1	0,2	0,3	0,4
Амплітуда яскравості, $I_{80 \text{ пкс.}}$	230	200	170	110
Амплітуда яскравості, $I_{40 \text{ пкс.}}$	150	100	80	40

Встановлено, що незалежно від виду навантажування поверхнева щільність деформаційних дефектів розсіяного пошкодження накопичується у матеріалі до певного стану пошкодження, яке характеризується поточним станом параметрів щільності елементів зображення спеклограми.

Висновки

1. Розроблено експериментально-інформаційну систему аналізу кількісних характеристик розсіяного пошкодження металоконструкції методом когерентно-оптичного сканування деформованої поверхні з виокремівністю 0,2 мкм/пкс.

2. Отримано кореляційні характеристики параметрів пошкодження поверхневого шару зразків сталі X18H10T у разі навантажування двох видів: за монотонного розтягу і симетричного розтягу-стиску.

3. Представлені дослідження статистичних характеристик стану мікропластичного деформування поверхні зразків дозволяють рекомендувати розроблений метод для визначення пошкодження елементів машин за критерієм неоднорідності мікропластичних деформацій поверхневого шару металу, а отже з певною достовірністю оцінити ризик настання аварійних ситуацій.

Список літератури

1. *Voinalovych O., Hnatiuk O., Rogovskii I., Pokutnii O.* Probability of traumatic situations in mechanized processes in agriculture using mathematical apparatus of Markov chain method. *Engineering for rural development.* 2019. Vol. 18. P. 563-269. doi: 10.22616/ERDev2019.18.N245.

2. *Попович П. В., Довбуш Т. А., Олексюк В. П., Миць В. І.* Аналіз впливу корозійно-експлуатаційних факторів на залишковий ресурс елементів

металоконструкцій сільськогосподарських машин. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2015. Вип. 45. Ч. II. С. 194-199.

3. *Шанявский А. А., Никитин А. Л., Palin-Luc T., Bathias C.* Масштабная иерархия малоциклового, многоциклового и сверхмногоциклового усталости разрушения титанового сплава ВТ3-1. *Физическая мезомеханика.* 2014. Т. 17. № 4. С. 58-68.

4. *Pisarenko G., Voinalovych O., Rogovskii I., Motrich M.* Probability of boundary exhaustion of resources as factor of operational safety for agricultural aggregates. *Engineering for rural development.* 2019. Vol. 18. P. 291-298. doi: 10.22616/ERDev2019.18.N248.

5. *Бондарь В. С., Данишин В. В., Макаров Д. А.* Математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений при циклических нагружениях. *Вестник ПНИПУ. Механика.* 2014. № 2. С. 125-152.

6. *Ravanellia R., Nascettia A., Di Ritaa M. et al.* A new digital image correlation software for displacements field measurement in structural applications. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences: FOSS4G-Europe 2017, 18 – 22 July 2017 : Academic Track.* Marne La Vallée, France. 2017. Vol. XLII-4/W2. P 139-145.

7. *Moiseenko D. D., Pochivalov Yu. I., Maksimov P. V., Panin V. E.* Rotational Deformation Modes in Near-boundary Regions of Grain Structure in a Loaded Polycrystal. *Phys. Mesomech.* 2013. Vol. 16. № 3. P. 248-258.

8. *Миндюк В. Д., Карпаш М. О., Доценко Е. Р.* Експериментальна перевірка характеру зв'язку між параметрами мікроструктури і фізичними властивостями матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації для оцінки ступеню їх деградації. *Вісник Тернопільського національного технічного університету.* 2013. № 3 (71). С. 153-163.

9. *Банников М. В., Оборин В. А., Наймарк О. Б.* Исследование стадийности разрушения титановых

сплавів в режимі багато- і гигациклової усталості на основі морфології поверхні руйнування. Вестник ПНІПУ. Механіка. 2015. № 3. С. 15-24.

10. Троценко В. Т., Хамаза Л. А. Механіка розсіяного усталостного пошкодження металів і сплавів. Київ: Інститут проблем прочності імені Г.С. Писаренко НАН України. 2016. 412 с.

11. Nao Fujimura, Takashi Nakamura and Kosuke Takahashi. Changing Mechanisms of Surface Relief and the Damage Evaluation of Low Cycle Fatigued Austenitic Stainless Steel. MATEC Web of Conferences. 12th International Fatigue Congress (FATIGUE 2018). 2018. Vol. 165 (2). P. 256-262.

12. Vannikov M. V., Naimark O. B., Oborin V. A. Experimental investigation of crack initiation and propagation in high- and gigacycle fatigue in titanium alloys by study of morphology of fracture. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016. Vol. 10. Iss. 35. P. 50-56.

13. Писаренко Г. Г., Войналович О. В., Майло А. М. Закономірності накопичення нелокалізованого пошкодження у поверхневих шарах конструкційних матеріалів. Науковий вісник НУБіП України. Серія: техніка та енергетика АПК. 2018. Вип. 282. С. 208-218.

14. Гучинский П. В., Петинев С. В., Сиддик Ш., Имран М., Вальтер Ф. Прогнозирование усталостной долговечности металлов с учетом неоднородности микроструктуры. *Материаловедение. Энергетика*. 2015. Вып. 4. С. 134-143.

15. Селезнев М. Н., Мерсон Е. Д. Выявление зон усталостной трещины при гигациклоевой усталости стали 42CRMO4 с применением количественной фрактографии. Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2019. 3 (49). С. 33-39.

16. Bobyr M. I., Khalimon O. P., Bondarets O. A. Phenomenological damage models of anisotropic structural materials. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2013. № 67. P. 5-13.

17. Повстяной О. Ю., Рудь В. Д., Мельник Ю. А., Імбірович Н. Ю. Аналіз сучасних методів визначення структури та топології поверхонь металів. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2014. № 2. С. 37-42.

18. Владимиров А. П., Каманцев И. С., Веселова В. Е. Использование динамической спекл-интерферометрии для бесконтактной диагностики зарождения усталостной трещины и определения скорости ее роста. *Журнал технической физики*. 2016. № 4. С. 85-90.

19. Писаренко Г. Г., Войналович О. В., Майло А. М. Вплив експлуатаційних чинників на закономірності розподілу дискретних деформацій поверхневого шару металокопункцій за багатоциклового навантажування зразків. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2018. Т. 84. № 3. С. 39-44.

20. Meireles J. B., da Silva L., Caetano D. P., Huguenin J. A. O. Effect of metallic surface roughness on the speckle pattern formation at diffraction plane. *Optics and Lasers in Engineering*. 2012. № 12. P. 1731-1734.

21. Войналович О. В., Писаренко Г. Г., Майло А. М. Спосіб безконтактного вимірювання кінетичних характеристик руйнування поверхневого

шару металокопункцій. Патент України на корисну модель № 133430. Бюл. № 7 від 10.04.2019 р.

22. Войналович О. В., Писаренко Г. Г., Майло А. М. Спосіб вимірювання ступеню мікродеформованості поверхні металокопункцій із застосуванням когерентного випромінювання. Патент України на корисну модель № 134268. Бюл. № 9 від 10.05.2019 р.

23. Минеев С. А., Угольников А. Ю., Лозовская Л. Б. Анализ спекл-изображений деформируемой поверхности на основе алгоритмов обработки оптического потока. Вестник Нижегородского университета имени Н. И. Лобачевского. 2014. № 2. С. 81-86.

24. Бялонович А. В. Накопление усталостных повреждений в структуре сплава X18H10T при комнатной и повышенной температурах. Надійність і довговічність машин і споруд. 2011. Вип. 34. С. 124-130.

References

1. Voinalovych O., Hnatiuk O., Rogovskii I., Pokutnii O. (2019). Probability of traumatic situations in mechanized processes in agriculture using mathematical apparatus of Markov chain method. *Engineering for rural development*. 18. 563-269. doi: 10.22616/ERDev2019.18.N245.

2. Popovych P. V., Dovbush T. A., Oleksyuk V. P., Myts V. I. (2015). Analysis of the influence of corrosion and operational factors on the residual life of the elements of metal structures of agricultural machinery. Design, manufacture and operation of agricultural machinery. 45(II). 194-199.

3. Shanyavsky A. A., Nikitin A. L., Palin-Luc T., Bathias C. (2014). Scale hierarchy of low-cycle, high-cycle and super-high-cycle fracture fatigue of titanium alloy VT3-1. *Physical mesomechanics*. 17(4). 58-68.

4. Pisarenko G., Voinalovych O., Rogovskii I., Motrich M. (2019). Probability of boundary exhaustion of resources as factor of operational safety for agricultural aggregates. *Engineering for rural development*. 18. 291-298. doi: 10.22616/ERDev2019.18.N248.

5. Bondar V. S., Danshin V. V., Makarov D.A. (2014). Mathematical modeling of deformation processes and damage accumulation under cyclic loading. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 2. 125-152.

6. Ravanellia R., Nascettia A., Di Ritaa M. et al. (2017). A new digital image correlation software for displacements field measurement in structural applications. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences : FOSS4G-Europe 2017, 18 – 22 July 2017 : Academic Track. - Marne La Vallée, France. XLII-4/W2. 139-145.

7. Moiseenko D. D., Pochivalov Yu. I., Maksimov P. V., Panin V. E. (2013). Rotational Deformation Modes in Near-boundary Regions of Grain Structure in a Loaded Polycrystal. *Phys. Mesomech*. 16(3). 248-258.

8. Minduk V. D., Karpash M. O., Dotshenko E. R. (2013). Experimental verification of the nature of the

connection between the parameters of microstructure and the physical properties of materials of long-term metal structures for the assessment of their degree of degradation. Bulletin of the Ternopil National Technical University. 3(71). 153-163.

9. *Bannikov M. V., Oborin V. A., Naymark O. B.* (2015). Study of the staging of the destruction of titanium alloys in the mode of multi- and gigacycle fatigue based on the morphology of the surface of destruction. Bulletin PNRPU. Mechanics. 3. 15-24.

10. *Troschenko V. T., Hamaza L.A.* (2016). Mechanics of scattered fatigue damage to metals and alloys, Kyiv. G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength NAS of Ukraine. 412.

11. *Nao Fujimura, Takashi Nakamura, Kosuke Takahashi* (2018). Changing Mechanisms of Surface Relief and the Damage Evaluation of Low Cycle Fatigued Austenitic Stainless Steel. MATEC Web of Conferences. 12th International Fatigue Congress (FATIGUE 2018). 165(2). 256-262.

12. *Bannikov M. V., Naimark O. B., Oborin V. A.* (2016). Experimental investigation of crack initiation and propagation in high- and gigacycle fatigue in titanium alloys by study of morphology of fracture. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 10(35). 50-56.

13. *Pisarenko G. G., Voinalovich O. V., Mailo A. M.* (2018). Laws of accumulation of non-localized mail-coding in the surface layers of structural materials. Scientific Bulletin of NUBiP of Ukraine. Series: engineering and power engineering of agroindustrial complex. 282. 208-218

14. *Guchinsky R. V., Petinov S. V., Siddik Sh., Imran M., Walter F.* (2015). Prediction of the fatigue life of metals taking into account the inhomogeneity of the microstructure. *Materials Science. Energy*. 4. 134-143.

15. *Seleznev M. N., Merson E. D.* (2019). Identification of fatigue crack zones in gigacycle fatigue of steel 42CRMO4 using quantitative fractography. *Vector of the Science of Togliatti State University*. 3(49). 33-39.

16. *Bobyry M. I., Khalimon O. P., Bondarets O. A.* (2013). Phenomenological damage models of anisotropic structural materials. *Mechanics and Advanced Technologies*. 67. 5-13.

17. *Povstyanoy O. Yu., Rud V. D., Melnyk Yu. A., Imbirovich N. Yu.* (2014). Analysis of modern methods for determining the structure and topology of metal surfaces. *Technical diagnostics and non-destructive testing*. 2. 37-42.

18. *Vladimirov A. P., Kamantchev I. S., Veselova V. E.* (2016). Using dynamic specklininterferometrii for contactless diagnosis of the nucleation of a fatigue crack and determine the rate of its growth. *Technical Physics Journal*. 4. 85-90.

19. *Pisarenko G. G., Voinalovich O. V., Mailo A. M.* (2018). The influence of operational factors on the patterns of distribution of discrete deformations of the surface layer of metal structures under high-cycle loading of samples. *Mechanics and Advanced Technologies*. 84(3). 39-44.

20. *Meireles J. B., da Silva L., Caetano D. P., Huguenin J. A.* (2012). Effect of metallic surface roughness on the speckle pattern formation at diffraction plane. *Optics and Lasers in Engineering*. 12. 1731-1734.

21. *Voinalovich O. V., Pisarenko G. G., Mailo A. M.* Method of contactless measurement of kinetic destruction of the surface layer of metal structures. Patent of Ukraine for utility model № 133430. Publ. 10.04.2019. Bul. No. 7.

22. *Voinalovich O. V., Pisarenko G. G., Mailo A. M.* Method of measuring degree of microdeformation of surface of metal structures using coherent radiation. Patent of Ukraine for utility model № 134268. Publ. 10.05.2019. Bul. No. 9.

23. *Mineev S. A., Ugolnikov A. Yu., Lozovskay L. B.* (2014). Analysis of speckle images of a deformable surface based on optical flow processing algorithms. *Bulletin of the Nizhny Novgorod University of N. I. Lobachevskii*. 2. 81-86.

24. *Byalonovich A. V.* (2011). Accumulation of fatigue damage in the structure of the alloy X18H10T at room and elevated temperatures. *Reliability and durability of machines and structures*. 34. 124-130.

25. *Молодецька Т. І.* Дослідження напружено-деформованого стану процесу згину покритих матеріалів. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Фізика». 2021. Вип. 50. С.15-24. doi: 10.24144/2415-8038.2021.50.15-24

МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ДЕФОРМАЦИИ НАКОПЛЕННОГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ

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

Аннотация. Показано, что для исследования кинетики эксплуатационного повреждения материалов и элементов конструкций необходимо разрабатывать современные средства и методы диагностики повреждения, возникающего в лабораторных образцах и элементах конструкций. Для определения деформационного состояния поверхностного слоя конструкционного материала (аустенитной стали) в данной работе был использован метод оптического измерения микропластических деформаций, основанный на корреляционной связи энергии излучения когерентного источника света, отраженного поверхностью металлического поликристалла, и амплитуды микропластической деформаций деформированной поверхности. В соответствии с данным методом исследуемую локальную зону поверхности образца материала на определенных этапах нагружения облучают когерентным светом с длиной волны, соответствующей масштабу локализации микропластической деформации поверхности образца. С помощью световолоконного кабеля и системы фокусирующих линз получают спеклограмму лучей, отраженных от рельефа поверхности. Как степень интенсивности изменения деформационного рельефа использован параметр в виде отношения количества светлых пикселей к общему количеству пикселей изображения спеклограммы. В результате анализа статистических параметров спеклограммы, коррелирующих с характеристиками микропластического деформирования поверхности образцов аустенитной стали, были определены характерные параметры рассеянной поврежденности структуры дискретных

деформаций поверхности металлического поликристалла. На основе полученных экспериментальных данных в работе выявлены закономерности влияния статического и циклического деформирования на форму распределения дискретных свойств поверхности. В частности, в результате анализа статистических характеристик корреляционных диаграмм получено линейную зависимость параметров распределения дискретных свойств рельефа деформированной поверхности от фактора нагруженности.

Ключевые слова: поврежденность металлоконструкции, деформационный микрорельеф поверхности, когерентно-оптическое сканирование, микропластическое деформирование поверхности.

METHOD OF NON-CONTACT MEASUREMENT
OF THE DEFORMATION AMPLITUDE
OF ACCUMULATED OPERATIONAL DAMAGE
TO METAL STRUCTURE

*G. G. Pisarenko, A. V. Voinalovych, A. N. Maylo,
S. G. Pisarenko*

Abstract. It is shown that in order to study the kinetics of operational damage to materials and structural elements, it is necessary to develop modern means and methods for diagnosing damage that occurs in laboratory samples and structural elements. To determine the deformation state of the surface layer of a structural material (austenitic steel), in this work, we used the method of optical measurement of microplastic deformations, based on the correlation relationship between the radiation energy of a coherent light source reflected by the surface of a metal polycrystal and the amplitude of microplastic deformations of a deformed surface. In accordance with this method, the investigated local area of the surface of the material sample at certain stages of loading is irradiated with coherent light with a wavelength corresponding to the scale of localization of microplastic deformation of the sample surface. Using a fiber optic cable and a focusing lens system, a specklogram of rays reflected from the surface relief is obtained. The parameter in the form of the ratio of the number of light pixels to the total number of pixels in the specklogram image is used as the degree of intensity of the deformation relief change. As a result of the analysis of the statistical parameters of the specklogram, which correlate with the characteristics of the microplastic deformation of the surface of the austenitic steel samples, the characteristic parameters of the scattered damage of the structure of discrete deformations of the surface of the metal polycrystal were determined. On the basis of the obtained experimental data, the work revealed the regularities of the influence of static and cyclic deformation on the shape of the distribution of discrete surface properties. In particular, as a result of the analysis of the statistical characteristics of the correlation diagrams, a linear dependence of the parameters of the distribution of discrete properties of the relief of the deformed surface on the loading factor was obtained.

Key words: damage of metal structures, deformation microrelief of the surface, coherent optical scanning, microplastic deformation of the surface.

Г. С. Писаренко ORCID 0000-0001-9557-9710.
О. В. Войналович ORCID 0000-0002-9321-2672.
А. М. Майло ORCID 0000-0002-4762-0886.