

УДК 621.77

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПОРЯДКОВАНОГО РЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ СТАТИЧНО ДЕФОРМОВАНОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

Я. В. ЛИТВИНЕНКО, П. О. МАРУЩАК, С. А. ЛУПЕНКО, П. В. ПОПОВИЧ

*Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя*

Запропоновано підхід до моделювання впорядкованого рельєфу поверхні алюмінієвого сплаву Д16чТ після статичного деформування, який дає можливість статистично оцінити параметри утворених нерівностей з урахуванням стохастичної та циклічної природи їх самоорганізації.

**Ключові слова:** *модель, циклічний випадковий процес, самоорганізована структура, деформування.*

Відомо, що експлуатаційне напруження супроводжується формуванням рельєфу на поверхні алюмінієвих сплавів, які використовують у цивільній та військовій авіації для проектування сенсорів втоми [1]. Саме структура поверхневих деформаційних зсувів – інформаційна ознака стану об'єкта діагностичного контролю.

Через необхідність оцінити процеси самоорганізації поверхневих дефектів та локалізованих деформаційних утворень виникла потреба у моделях цих фізичних явищ [1–3]. Проте емпіричні та евристичні підходи тут дещо знижують точність результатів. Крім того, є низка праць [4, 5], де локалізацію деформації описано за допомогою детермінованих інженерних підходів, хоча вона, як і більшість фізико-механічних сигналів, має випадковий характер. Саме тому слід створити нові та вдосконалити існуючі методи моделювання деформаційних процесів в сучасних конструкційних матеріалах. Особливо важливо це для технічного контролю стану сенсорів втоми авіаконструкцій, який неможливий без відповідних автоматизованих діагностичних систем. Застосування сучасних засобів обчислювальної техніки у таких системах суттєво розширить їх технічні можливості та забезпечить достовірніше оцінювання стану поверхні авіаконструкцій [1, 6].

Вказані проблеми зумовлені недостатнім розвитком теорії моделювання та обробки циклічних сигналів у мезомеханічних процесах [7, 8]. Тому необхідно розвинути моделі та методи, які б охоплювали відомі алгоритми їх обробки у межах єдиного теоретико-методологічного підходу. Слід враховувати широкий спектр можливих ознак циклічності рельєфних утворень для відображення не лише точної чи ймовірнісної повторюваності у структурі даних, а й різноманіття закономірностей мінливості та ритму циклічних сигналів рельєфоутворення за певної макродеформації зразка.

Нижче обґрунтовано можливості використання стохастичного підходу для аналізу та моделювання впорядкованого рельєфу поверхні статично деформованого алюмінієвого сплаву Д16чТ.

**Фізичні закономірності утворення впорядкованого рельєфу.** Для дослідження мікролокалізації та самоорганізації рельєфних утворень на поверхні статично деформованого сплаву Д16чТ використовували підходи фізичної мезомеханіки. Під самоорганізацією розуміли якісну зміну поведінки нелінійної дефор-

мівної системи, яка спричиняє просторові структури [3]. У низці праць теоретично обґрунтовано та експериментально доведено наявність мезоскопічного деформування. Тому деформовані матеріали можна інтерпретувати як системи, схильні до самовпорядкування [9–11]. Формування рельєфних утворень розглянемо як багатомасштабне деформування поверхні алюмінієвого сплаву з урахуванням його ієрархії. Так отримаємо двовимірний розподіл рельєфних утворень у вигляді хвилеподібних екструзій [1].

Деякі автори використовують поняття самоорганізації рельєфних утворень за умов деформування поверхневих шарів та внутрішніх меж поділу полікристалів, які відіграють важливу роль у зародженні деформаційних дефектів. Їх розглядають як самостійні мезоструктурні деформаційні прояви зі просторовою впорядкованістю руйнівних процесів у матеріалі [11, 12]. Отже, аналізуючи рельєфоутворення, слід враховувати деякі відомі фізико-механічні закономірності [13]: формування морфології та структури складчастого рельєфу квазівпорядковане і циклічне; рельєфоутворення випадкове, оскільки структура матеріалу неоднорідна і повне відтворення формування впорядкованого рельєфу – стохастичний процес; статистичне оцінювання імовірнісних характеристик рельєфоутворення за такого підходу ґрунтується на припущенні, що відомі області визначення циклів випадкового процесу (за методами сегментації [7]), а отже, і його функція ритму.

Під час моделювання та обробки рельєфних утворень необхідно максимально врахувати їх циклічність, стохастичність та зонну просторову структуру. Тобто математична модель рельєфоутворення повинна відтворювати зонну просторову та сегментну структуру, його стохастичну циклічну природу та давати можливість імітаційно моделювати [14, 15].

Методи, які ґрунтуються на такій моделі, слід використовувати для обробки рельєфу невеликої просторової області, що дасть можливість зробити висновок про стан поверхні за виявленими ознаками. Крім цього, їх треба адаптувати, щоб відтворити структуру рельєфу ділянок матеріалу за різних значень макродеформації.

**Циклічний випадковий процес як математична модель деформаційного рельєфу.** Впорядковане рельєфоутворення є неоднорідним динамічним і складно організованим процесом, якому властиві циклічність, значні групові та індивідуальні варіації. Математична модель адекватно описує сигнал та враховує поєднання циклічності і стохастичності сигналу, а також дає можливість розробити достовірні шляхи визначення інваріантних інформаційних ознак [11].

Вхідними даними для статистичного аналізу параметрів деформаційного рельєфу є ширина та висота нерівностей у межах аналізованої ділянки, одержані за результатами аналізу топографії поверхні вихідного та деформованого матеріалу на безконтактному інтерференційному профілометрі “Мікрон-бетта” з точністю 10 nm. Під час програмної обробки цифрових зображень точність зростала до 1 nm [16].

Для опису пошкодженості сплаву як процесу самоорганізації поверхню деформованих зразків розглядали як сукупність флуктуацій рельєфних утворень, властивих певним макродеформаціям матеріалу. Їм притаманна зонно-просторова структура внаслідок сегментації циклічних сигналів, знання про яку дало можливість сформувати дискретну функцію ритму такого процесу [7]. Результатами такої обробки є статистичні оцінки математичного сподівання та дисперсії [7].

Якщо використовують модель циклічного випадкового процесу, формують нову або вживають отриману під час сегментації (визначення зонно-просторової структури) дискретну функцію ритму (зі заданою чи визначеною довжиною сегментів). А далі моделюють циклічний сигнал зі сформованою функцією ритму [7].

Математичною моделлю деформаційного рельєфу є циклічний випадковий процес  $\{h(\omega, l), \omega \in \Omega, l \in \mathbf{R}\}$  за наявності функції  $L(l, n)$ , яка задовольняє умови (1)–(3), при цьому вектори  $(h(\omega, l_1), h(\omega, l_2), \dots, h(\omega, l_k))$  та  $(h(\omega, l_1 + L(l_1, n)), h(\omega, l_2 + L(l_2, n)), \dots, h(\omega, l_k + L(l_k, n)))$ ,  $n \in \mathbf{Z}$ , де  $\{l_1, l_2, \dots, l_k\}$  – множина сепарабельності процесу  $\{h(\omega, l), \omega \in \Omega, l \in \mathbf{R}\}$ , за всіх цілих  $k \geq 1$  є стохастично еквівалентні.

Функція  $L(l, n)$  є функцією ритму циклічного випадкового процесу і визначає закон зміни відстаней між його однофазними значеннями (ділянками рельєфу). Вона повинна задовольняти такі умови:

$$\begin{aligned} L(l, n) &> 0, \text{ якщо } n > 0; \\ L(l, n) &= 0, \text{ якщо } n = 0; \\ L(l, n) &< 0, \text{ якщо } n < 0; \end{aligned} \quad (1)$$

для будь-яких  $l_1 \in \mathbf{R}$  і  $l_2 \in \mathbf{R}$ , для яких  $l_2 > l_1$ , для неї виконується нерівність

$$l_1 + L(l_1, n) < l_2 + L(l_2, n), \quad \forall n \in \mathbf{Z}, \quad (2)$$

і вона найменша за модулем ( $|L(l, n)| \leq |L_\gamma(l, n)|$ ) серед усіх функцій  $\{L_\gamma(l, n), \gamma \in \Gamma\}$ , які задовольняють умови (1) і (2).

Функції розподілу циклічного випадкового процесу інваріантні до циклічної розривної групи перетворень їх аргументів:

$$\begin{aligned} F_1(x, l) &= F_1(x, l + L(l, n)), \quad x, l \in \mathbf{R}, \quad n \in \mathbf{Z}, \dots, \\ F_k(x_1, \dots, x_k, l_1, \dots, l_k) &= \\ &= F_k(x_1, \dots, x_k, l_1 + L(l_1, n), \dots, l_k + L(l_k, n)), \quad x_1, \dots, x_k, l_1, \dots, l_k \in \mathbf{R}, \quad n \in \mathbf{Z}, k \in \mathbf{N}. \end{aligned} \quad (3)$$

Якщо  $L(l, n) = n \cdot L$ ,  $L = \text{const}$ ,  $L > 0$ , то циклічний процес випадковий зі стабільним ритмом або т. зв. стохастично-періодичний, а якщо  $L(l, n) \neq n \cdot L$  – зі змінним ритмом.

За запропонованою математичною моделлю поверхні, вкритої деформаційним рельєфом, інтерпретуємо низку його основних елементів, зокрема, цикл, фазу і ритм. Під циклом розуміємо найменший сегмент експериментальної залежності “ширина нерівності–довжина аналізованої області”, отриманий під час рельєфоутворення, що містить всю послідовність його фаз (стадій). Отже, розглянемо самоорганізовану сукупність нерівностей поверхні сплаву Д16чТ – рельєф. Між циклами рельєфних утворень існує певна подібність, яку в межах циклічного випадкового процесу інтерпретують як самоорганізацію та відповідність імовірнісних характеристик однотипних фаз процесу [8]. Під однотипними розуміли сукупність тих фаз рельєфоутворення, які обов’язково присутні у різних циклах, проте мають однакові (щодо впорядкування) розташування та імовірнісні характеристики. Під ритмом коливання розуміли властивість просторової структури рельєфоутворення, за якою можна визначати розміри просторових проміжків для всіх його циклів та фаз [8]. Фізично – це каналовані зсуви, що генерують макро-смуги локалізованого пластичного деформування на поверхні зразка. Цей процес фронтально поширюється вздовж осі зразка за схемою лінійної хвилі локалізованого пластичного деформування. Таким чином, використовуючи підходи фізич-

ної мезомеханіки та математичного моделювання, спробували поглибити опис рельєфних утворень локалізованого пластичного деформування.

Враховуючи, що циклічне рельєфоутворення ніби “зшите” з послідовності циклів різної довжини, а цикли можуть мати характерні ділянки-сегменти, можна використати циклічний випадковий процес з зонно-просторовою структурою (сегментною) як модель деформаційного рельєфоутворення:

$$h(\omega, l) = \sum_{m \in \mathbf{Z}} h_m(\omega, l) = \sum_{m \in \mathbf{Z}} \sum_{k=1}^K h_{mk}(\omega, l), \quad \omega \in \Omega, \quad l \in \mathbf{R}, \quad (4)$$

де  $h_m(\omega, l)$  відповідає  $m$ -му циклу циклічного випадкового процесу, який визначають як

$$l_m(\omega, l) = \sum_{k=1}^K h_{mk}(\omega, l), \quad l \in \mathbf{W}_m, \quad \forall m \in \mathbf{Z}, \quad (5)$$

$$h_m(\omega, l) = h(\omega, l) \cdot I_{\mathbf{W}_m}(l), \quad l \in \mathbf{R}, \quad (6)$$

де індикаторна функція  $m$ -го циклу

$$I_{\mathbf{W}_m}(l) = \begin{cases} 1, & l \in \mathbf{W}_m, \\ 0, & l \notin \mathbf{W}_m, \end{cases} \quad (7)$$

$h_{mk}(l)$ ,  $l \in \mathbf{W}_{mk}$  –  $k$ -та зона в  $m$ -му циклі випадкового процесу:

$$h_{mk}(\omega, l) = h(\omega, l) \cdot I_{\mathbf{W}_{mk}}(l) = h_m(\omega, l) \cdot I_{\mathbf{W}_{mk}}(l), \quad l \in \mathbf{R}, \quad (8)$$

де індикаторна функція  $k$ -ї зони в  $m$ -му циклі

$$I_{\mathbf{W}_{mk}}(l) = \begin{cases} 1, & l \in \mathbf{W}_{mk}, \\ 0, & l \notin \mathbf{W}_{mk}. \end{cases} \quad (9)$$

Зонно-просторову структуру (зонну) циклічного випадкового процесу задають безліч просторових значень, що відповідають початкам його зон:

$$\mathbf{D} = \left\{ l_{m,k}, m \in \mathbf{Z}, k = \overline{1, K} \right\}, \quad l_m = l_{m,1}, \quad \forall m \in \mathbf{Z}. \quad (10)$$

Області визначення зон і циклів процесу запишемо у вигляді

$$\mathbf{W}_m = [l_m, l_{m+1}) \quad \mathbf{W}_{mk} = [l_{m,k}, l_{m,k+1}), \quad \mathbf{W}_m = \bigcup_{k=1}^K \mathbf{W}_{mk}, \quad (11)$$

$$\bigcup_{m \in \mathbf{Z}} \bigcup_{k=1}^K \mathbf{W}_{mk} = \mathbf{R}, \quad \mathbf{W}_{mk_1} \cap \mathbf{W}_{mk_2} = \emptyset, \quad k_1 \neq k_2. \quad (12)$$

Отже, одержали модель рельєфних утворень для сплаву Д16ЧТ, яка описує характер спотворення його поверхні, визначає структурні особливості, пов'язані із макродеформуванням та структурно-механічною деградацією матеріалу. Цей підхід до опису рельєфоутворення дає можливість оцінити поведінку матеріалу за переходу деформування з мезо- до макрорівня, узгоджується з математичними моделями циклічних сигналів, що вказує на його достатню обґрунтованість.

**Метод та результати статистичної обробки даних деформаційного рельєфу.** Методи статистичного аналізу циклічних випадкових процесів [6, 8] застосовано до аналізу впорядкованого рельєфоутворення, щоб оцінити його початкову моментну функцію першого порядку (математичне сподівання) та центральну другого порядку (дисперсію).

Математичне сподівання оцінювали як

$$\hat{m}_h(l) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M h_{\omega}(l + L(l, n)), \quad l \in \mathbf{W}_1 = [L_1, L_2], \quad (13)$$

де  $M$  – кількість циклів процесу;  $h_{\omega}(l)$  – послідовність значень ширини рельєфних утворень (реалізація процесу);  $L(l, n)$  – функція ритму рельєфоутворення;  $\mathbf{W}_1$  – область визначення першого циклу. А дисперсію – так:

$$\hat{d}_h(l) = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{n=1}^{M-1} \left[ h_{\omega}(l + L(l, n)) - \hat{m}_h(l + L(l, n)) \right]^2, \quad l \in \mathbf{W}_1 = [L_1, L_2]. \quad (14)$$

За формулами (13), (14) статистично аналізували рельєфоутворення (рис. 1).

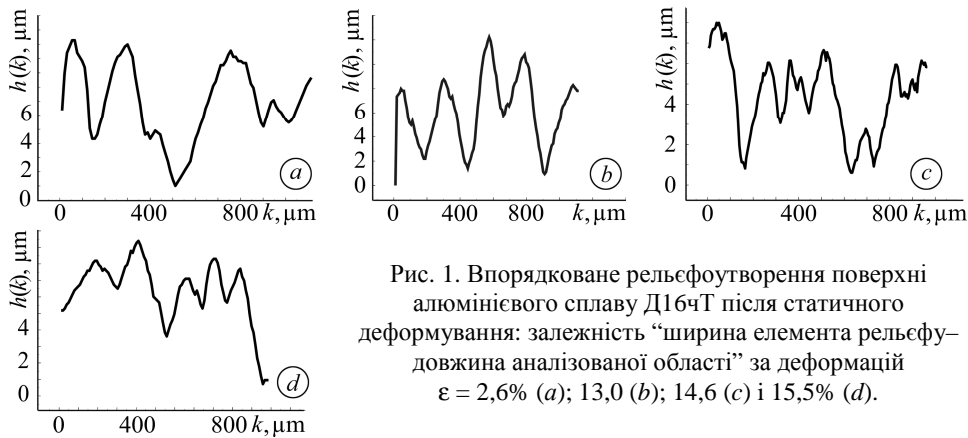


Рис. 1. Впорядковане рельєфоутворення поверхні алюмінієвого сплаву Д16чТ після статичного деформування: залежність “ширина елемента рельєфу–довжина аналізованої області” за деформацій  $\epsilon = 2,6\%$  (a);  $13,0\%$  (b);  $14,6\%$  (c) і  $15,5\%$  (d).

Fig. 1. The process of surface relief ordering of aluminum alloy Д16чТ after static deformation: dependence “width of the relief element–length of the analyzed area” for strain  $\epsilon = 2.6\%$  (a);  $13.0\%$  (b);  $14.6\%$  (c) and  $15.5\%$  (d).

Побудували графіки оцінок математичного сподівання  $\hat{m}(k)$  (рис. 2a–d) та дисперсії  $\hat{d}_h(k)$  (рис. 2e–h) розташування рельєфних утворень у межах аналізованої довжини під час їх обробки за математичною моделлю циклічного випадкового процесу (враховано функцію ритму). Виявили, що методи обробки, засновані на таких моделях, забезпечують фізичні передумови деформаційного процесу та відтворюють структуру дефектів аналізованої поверхні.

При цьому зміна параметрів зумовлена макродеформаційним впливом на матеріал та відповідає певній стадії деформування [3]. Отже, результати оцінювання математичного сподівання деформаційних утворень характеризують локалізацію деформації мезорівня як наслідок самоорганізації поверхні сплаву (рис. 2a–d). Також зафіксували випадковість розподілу локальної деформації (розмірів морфологічних утворень) по поверхні зразків. Тобто помітна тенденція зростання деформації у нових ядрах, що зароджуються в менш деформованих зонах зразків [17–20].

Відомо, що кожній стадії пластичного течіння відповідають певні параметри локалізації деформацій. Зокрема, дисперсія, яка є одним з критеріїв оцінювання точності статистичної обробки процесу. Дисперсію геометрії рельєфних утворень оцінювали за моделлю циклічного випадкового процесу. Одержані значення свідчать про її достатню фізичну обґрунтованість (рис. 2e–h).

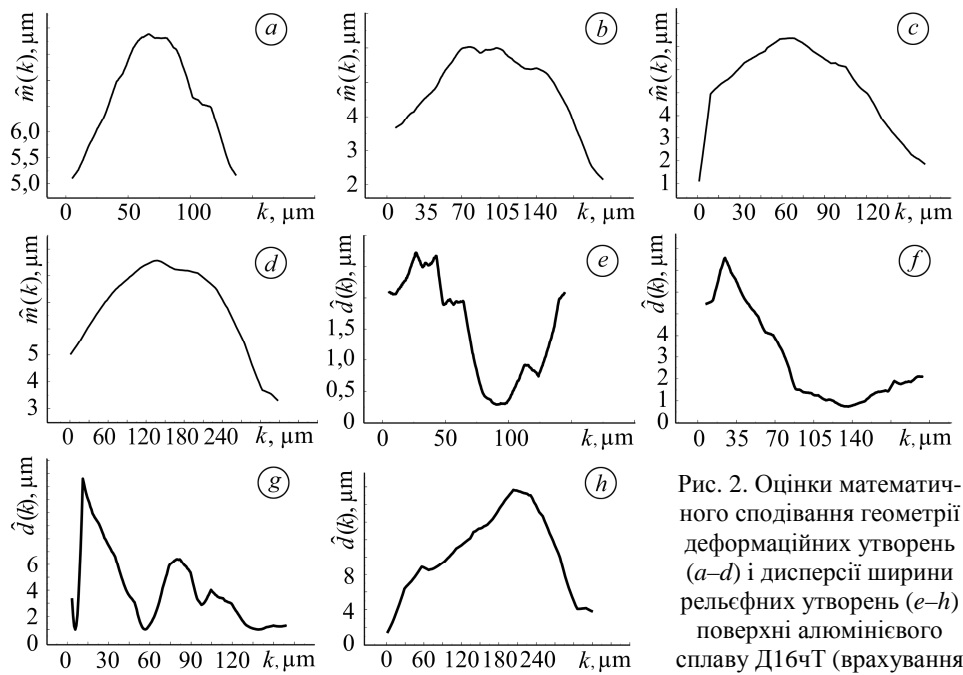


Рис. 2. Оцінки математичного сподівання геометрії деформаційних утворень (а-д) і дисперсії ширини рельєфних утворень (е-н) поверхні алюмінієвого сплаву Д16чТ (врахування

моделі циклічного випадкового процесу) за відносної деформації  $\epsilon = 2,6\%$  (а, е); 13,0 (b, f); 14,6 (c, g) і 15,5% (d, h).

Fig. 2. Estimates of mathematical expectation of deformation structures geometry (a-d) and dispersion of relief structures width (e-h) on the surface of D16chT alloy (taking into account the cyclic model of stochastic process) for strain  $\epsilon = 2.6\%$  (a, e); 13.0 (b, f); 14.6 (c, g) and 15.5% (d, h).

Виявили, що оцінки математичного сподівання чутливі до зміни форми рельєфних утворень деформованого сплаву Д16чТ, що вказує на можливість використання цих ознак в автоматизованих системах технічного діагностування. З ослабленням деформаційних процесів локальних ділянок рельєфоутворення уповільнюється, а отже, змінюються параметри, подані на рис. 2.

Таким чином, оцінки математичного сподівання і дисперсії можна розглядати як інформативні параметри використаної математичної моделі рельєфоутворення з урахуванням впорядкованої природи формування нерівностей поверхні. За розвинутими підходами вдалося встановити закономірності еволюції рельєфних утворень сплаву Д16чТ під час деформування, виявити їх локалізацію на різних стадіях навантажування та побудувати їх залежність від макродеформації зразка. Застосовані моделі є основою математичного опису параметрів рельєфу, які дадуть можливість прогнозувати локалізацію деформації на поверхні конструктивних елементів [21].

**Імітаційне моделювання структури рельєфу.** Розроблені методи комп'ютерного відтворення циклічних сигналів, які, ідентифікуючи алгоритм імітації, дають змогу одночасно керувати морфологічними та ритмічними характеристиками рельєфних утворень сплаву за різних макродеформацій. Зіставляючи результати експерименту та моделюючи сигнали рельєфоутворення за формулами (15) і (16), виявили, що пропонувані підходи враховують стохастичну природу, мінливість та циклічність структури рельєфу (рис. 3).

Похибки моделювання визначали за формулами

$$\Delta h(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |h(j) - \hat{h}(j)|, \quad k = \overline{1, N}, \quad (15)$$

$$\delta h(k) = \frac{\Delta h(k)}{\sum_{j=1}^N |\hat{h}(j)|} \cdot 100\%, \quad k = \overline{1, N}, \quad (16)$$

де  $\Delta h(k)$  – абсолютна похибка моделювання;  $\delta h(k)$  – відносна (виражена у відсотках);  $N$  – кількість відліків реалізації впорядкованого рельєфоутворення;  $k$  – дискретний відлік процесу;  $h(k)$ ,  $\hat{h}(k)$  – експериментальне та змодельоване рельєфоутворення. Результати оцінювання похибок подано на рис. 4.

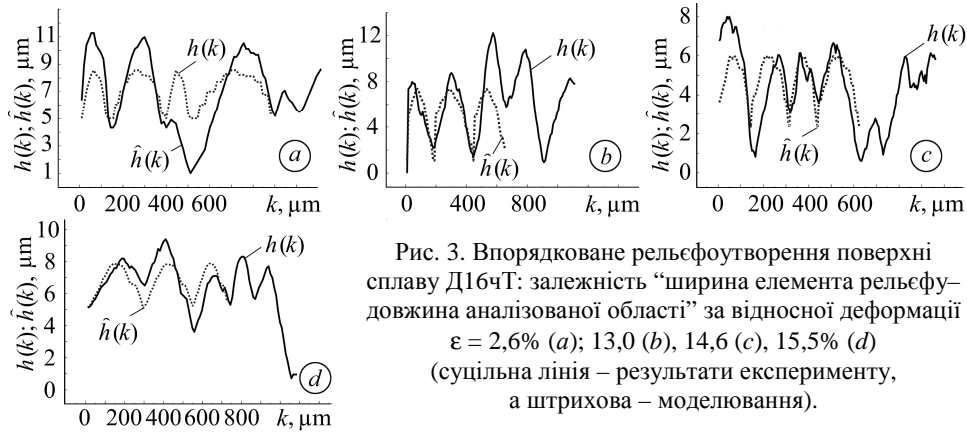


Fig. 3. The ordered relief-forming of the surface of Д16ЧТ alloy: dependence “width of relief element–length of the analyzed area” for strain  $\varepsilon = 2.6\%$  (a); 13.0 (b); 14.6 (c); 15.5% (d) (solid line – experimental data; dashed line – modeling).

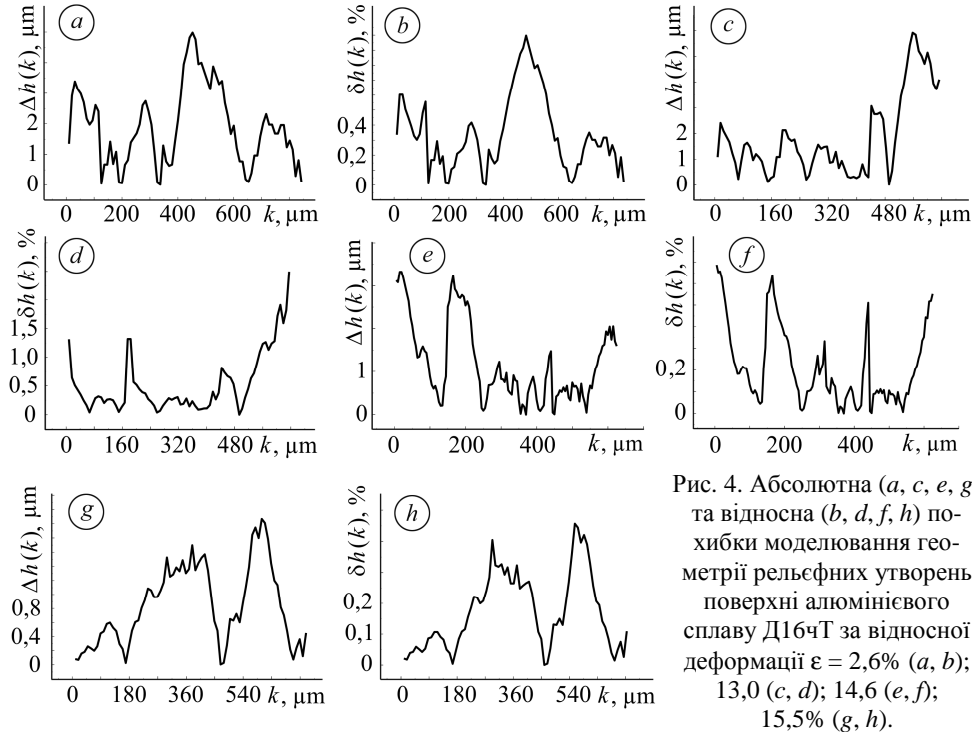


Fig. 4. Absolute (a, c, e, g) and relative (b, d, f, h) geometry modeling errors of the surface relief structures of Д16ЧТ aluminum alloy for strain  $\varepsilon = 2.6\%$  (a, b); 13.0 (c, d); 14.6 (e, f); 15.5% (g, h).

Щоб порівняти реальні та змодельовані рельєфні утворення, виконали серію експериментів за різної макродеформації матеріалу. Виявили, що ці нерівності на поверхні статично деформованого сплаву можна змодельовати за допомогою циклічного випадкового процесу, врахувавши їх циклічність та стохастичність, а також мінливість та подібність геометрії. Похибка моделювання не перевищує 3%.

Підтверджено достовірність математичного опису параметрів самоорганізованої поверхневої структури рельєфних утворень сплаву Д16чТ. Зроблено спробу обґрунтувати нові діагностичні ознаки рельєфоутворення, зокрема математичне сподівання та дисперсію, які отримані методами статистичного оцінювання. Експериментально встановили їх чутливість до зміни стану поверхні матеріалу можливість використання для технічного діагностування [22–24].

Запропоновані математичні моделі деформаційної поведінки сплаву Д16чТ дають можливість прогнозувати пошкодження алюмінієвих сплавів, підданих значним пластичним деформаціям, за експериментальним аналізом рельєфу локальної ділянки. Вони підвищують інформативність висунутих теоретичних постулатів та дають можливість відтворювати деформаційний рельєф на різних стадіях макродеформації.

### ВИСНОВКИ

Подано стохастичну математичну модель циклічного випадкового процесу для обробки та моделювання деформаційного рельєфу. Змодельовано вплив пластичної деформації на самоорганізацію поверхні статично деформованого зразка з алюмінієвого сплаву Д16чТ. Одержані статистичні оцінки є основою нових методів прогнозування стану поверхні. Розвинуто метод моделювання деформаційного рельєфу алюмінієвого сплаву Д16чТ, який враховує просторову структуру поверхні і дає можливість оцінювати стан сенсорів цілісності конструкцій.

*РЕЗЮМЕ.* Предложен математический подход к анализу упорядоченного рельефа поверхности алюминиевого сплава Д16чТ после статического деформирования, который позволяет получить информативные признаки количественной оценки параметров неровностей поверхности в условиях самоорганизации с учетом стохастической и циклической природы процесса.

*SUMMARY.* The approach to mathematical analysis of the relief of the ordered aluminum alloy surface of Д16чТ alloy after static deformation, which allows us obtaining the informative features of quantitative estimation of the parameters of self-organizing surface irregularities with account of stochastic and cyclic nature of the process.

1. *Fatigue damage and sensor development for aircraft structural health monitoring / S. R. Ignatovich, A. Menou, M. V. Karuskevich, P. O. Maruschak // Theoret. and Appl. Fract. Mech. – 2013. – 65. – P. 23–27.*
2. *Харченко Д. О., Харченко В. О., Дворниченко А. В. Процессы упорядочения сложных систем. – К.: Наук. думка, 2011. – 264 с.*
3. *Panin V. E., Egorushkin V. E., and Panin A. V. The plastic shear channeling effect and the nonlinear waves of localized plastic deformation and fracture // Physical Mesomechanics. – 2010. – 13. – P. 215–232.*
4. *Panin V. E. and Egorushkin V. E. Deformable solid as a nonlinear hierarchically organized system // Physical Mesomechanics. – 2011. – 14. – P. 207–223.*
5. *Методы исследования свойств диссипативных структур, образующихся при импульсном вводе энергии в материал / Н. Г. Чаусов, Е. Э. Засимчук, В. Б. Гуцайлюк, Е. М. Волянская // Вісник Терноп. держ. техн. ун-ту. – 2011. – Спец. вип. 2. – С. 92–97.*
6. *Лупенко С. А. Развитие теории моделирования та обробки циклічних сигналів в інформаційних системах: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Львів, 2010. – 40 с.*
7. *Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Студена Ю. В. Методи статистичної обробки сигналів серця на базі їх моделі у вигляді випадкового процесу із зонною часовою структурою // Вісник Терноп. держ. техн. ун-ту. – 2006. – № 4. – С. 189–200.*



8. *Lytvynenko I. V., Maruschak P. O., and Lupenko S. A.* Processing and modeling of ordered relief at the surface of heat-resistant steels after laser irradiation as a cyclic random process // *Automatic Control and Computer Sciences.* – 2014. – **48.** – P. 1–9.
9. *Panin V. E., Egorushkin V. E., and Panin A. V.* Nonlinear wave processes in a deformable solid as a hierarchically organized system // *Physical Mesomechanics.* – 2012. – **15.** – P. 133–146.
10. *Romanova V. A., Balokhonov R. R., and Schmauder S.* Numerical study of mesoscale surface roughening in aluminum polycrystals under tension // *Mater. Sci. and Engng. A.* – 2013. – **564.** – P. 255–263.
11. *Structural self-organization of titanium alloys under impulse force action / M. Chausov, P. Maruschak, A. Pylypenko, V. Berezin, O. Prentkovskis* // *Abstr. of the Int. conf. “Functional Materials and Nanotechnologies”* (October 5–8). – 2015. – Vilnius, Lithuania. – P. 73.
12. *Chinh N. Q. and Szommer P.* Mathematical description of indentation creep and its application for the determination of strain rate sensitivity // *Mater. Sci. and Engng. A.* – 2014. – **611.** – P. 333–336.
13. *Maruschak P., Baran D., and Gliha V.* A multiscale approach to deformation and fracture of heat-resistant steel under static and cyclic loading // *Medžiagotyra.* – 2013. – **19.** – P. 29–33.
14. *Numerical study of the influence of grain size and loading conditions on the deformation of a polycrystalline aluminum alloy / O. Zinovieva, V. Romanova, R. Balokhonov, A. Zinoviev, Zh. Kovalevskaya* // *J. of Appl. Math. and Phys.* – 2014. – **2.** – P. 425–430.
15. *Kubin L. P. and Estrin Y.* Strain nonuniformities and plastic instabilities // *Revue Phys. Appl.* – 1988. – **23.** – C. 573–583.
16. *Experimental study of the surface of steel 15Kh13MF steel after the nanosecond laser shock processing / P. Maruschak, I. Zakiev, V. Mocharsky, Y. Nikiforov* // *Solid State Phenom.* – 2013. – **200.** – P. 60–65.
17. *Масштабные уровни деформации и разрушения теплостойких сталей / П. О. Марущак, С. В. Панин, А. З. Студент, Б. Б. Овечкин.* – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2013. – 236 с.
18. *Aluminum foil based fatigue sensor for structural health monitoring of carbon fiber composites / M. Burkov, S. Panin, P. Lyubutin, A. Eremin, P. Maruschak, A. Menou* // *Procedia Technology.* – 2015. – **19.** – P. 307–312.
19. *Analysis of surface relief evolution of polycrystalline aluminum alloy under static deformation / P. Maruschak, I. Konovalenko, S. Panin, R. Bishchak* // *AIP Conf. Proc. on Physical Mesomechanics of Multilevel Systems, 2014.* – **1623.** – P. 403–406.
20. *Changes in the composition and surface structure of alloys in regions with varying deformation / K. F. Minnebaev, E. I. Rau, A. A. Khaidarov, V. E. Yurasova* // *J. of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* – 2014. – **8.** – P. 175–181.
21. *Прогнозирование живучести алюминиевого сплава по параметрам деформационного рельефа у концентратора напряжений / С. В. Щепак, Д. Н. Костенюк, Г. С. Сейдаметова, М. В. Лисовская* // *Вестник двигателестроения.* – 2011. – № 2. – С. 249–252.
22. *Karuskevich M. V.* Aircraft life prediction by the parameters of foil sensors and skin surface // *Вестник двигателестроения.* – 2006. – № 3. – С. 88–92.
23. *A novel algorithm for damage analysis of fatigue sensor by surface deformation topography parameters / I. Konovalenko, P. Maruschak, A. Menou, M. Karuskevich, S. Ignatovich* // *Proc. of the Int. Symp. “Operational Research and Applications”* (May 8–10). – 2013. – Marrakech, Morocco. – P. 678–684.
24. *Investigation of statically deformed aluminum alloy surface / P. Maruschak, I. Konovalenko, J. Brezinová, I. Zakiev* // *Materials Science Forum.* – 2015. – **818.** – P. 83–88.

*Одержано 04.12.2014*