

УДК 519.2:330.:658.5

## МОДЕЛЬ НАКОПИЧЕННЯ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ТА ФОРМУВАННЯ ПЕРЕДДЕФЕКТНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

Марченко Д.М., Жидков А.Б.

## MODEL OF ACCUMULATION OF FATIGUE DAMAGE AND FORMATION OF PREDEFECT STATE OF METAL STRUCTURES

Marchenko D.M., Zhydkov A.B.

*Викладено принципи побудови моделі накопичення втомних пошкоджень та формування переддефектного стану металоконструкцій, яка будуються на моделі структурних перетворень у металі при масовому русі дислокацій внаслідок мікропластичної деформації. Розглянуто відповідність моделі експериментальним даним та можливість її застосування для прогнозування настання переддефектного стану, тобто стану, який передує руйнуванню конструкції.*

*Ключові слова: втомне руйнування, модель, гомеостазіс, автоколивання, дислокація, металоконструкція*

**Вступ.** Прогнозування та діагностика переддефектного стану металоконструкцій є важливою технічною задачею, вирішення якої дозволить значно просунути в уявленні про кінетику втомного руйнування та отримати значний економічний ефект від своєчасного виведення об'єктів, які містять металоконструкції з експлуатації.

Дослідженню втомного руйнування присвячено чисельні роботи вітчизняних та закордонних науковців [1-4], але узагальненої та закінченої теорії процесу на даний час не існує.

**Метою роботи** є побудова моделі тонких структурних перетворень в напруженому металі при втомному руйнуванні з виділенням часового проміжку, який передує утворенню небезпечного дефекту.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розглядаючи феноменологічну модель яку засновано на схемі гомеостазиса, при переході від феноменологічної моделі до фізичних уявлень, схема гомеостазиса трансформується для опису процесу накопичення втомних пошкоджень у металоконструкції в модель «хижак - жертва» яка є моделлю періодичних структурних перетворень в рамках дислокаційно-дифузійної кінетики, що відображає колективні ефекти при структурних перетвореннях у напруженому матеріалі.

Згідно принципу гомеостазиса, диссипативні системи є парними утвореннями: якщо формується система  $X(t)$ , то разом з нею формується і її сателіт - система  $Y(X(t))$  [5].

Для  $Y(X(t))$  система  $X(t)$  постачає енергію і визначає просторові межі розвитку і час існування. Динаміка системи, як бінарної структури, здійснюється, з одного боку, за рахунок надходження речовини і енергії з середовища, а, з іншого, - внаслідок обміну ними між складовими її підсистемами.

Складові підсистеми  $X$  і  $Y$  знаходяться у функціональній залежності від вихідних характеристик. Система  $Y$  завжди прагне по своїй величині до  $X$ , і, по суті, її величина виступає як зворотній негативний зв'язок, що уповільнює і стабілізує зростання речовини, енергії і інформації (PEI) в системі  $X \leftrightarrow Y$ .

У диференціальній формі дана закономірність записується в наступному вигляді [5]:

$$\frac{dM}{dt} = Q(M, V, t) - q(M, t), \quad (1)$$

де  $M$  - вихідні характеристики системи;  $Q$  - витрата PEI, що йде на формування сателіта  $Y$ ;  $V$  - місткість середовища;  $q$  - витрата PEI у потоку, створюваному системою  $Y$ ;  $t$  - час.

Доданок  $Q(M, V, t)$  характеризує процес накопичення PEI в системі  $X$ , асимптотично затухаючого у міру заповнення місткості  $V$ . Доданок  $q(M, t)$  характеризує процес накопичення PEI сателітом  $Y$ , який теж відбувається з уповільненням у міру заповнення місткості, але створюваною системою  $X$ . Таким чином, сателіт  $Y$  інгібує розвиток системи  $X$ , і виступає як зворотний негативний зв'язок. А взаємодія

складових елементів (підсистем)  $X(t), Y(t)$  направлена до встановлення балансу витрат РЕІ, що відповідає на фазовій площині аттрактору. Всі фазові траєкторії, розташовані на аттракторі, характеризують об'єктивну спрямованість до дисипації РЕІ, відповідно до другого началу термодинаміки. Завдяки цьому, система переходить в режим сталого автоколивання [5], що не виходить по амплітуді за межі, обумовлені процесами, які відбуваються в системі. Моделюватимемо процес співвідношення процесів в бінарній системі, одна складова якої відповідає «хижаку» – підсистемі з об'ємом, який заповнюється, за рахунок вичерпання іншої її складової – «жертви».

Співвіднесемо цей алгоритм з гомеостазисом. Феноменологічна модель взаємодії відповідних потоків в системі є системою трьох диференціальних рівнянь з сімома параметрами [5]:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \mu u - \nu u^2 - \beta uv, \\ \frac{dv}{dt} &= h\nu w - \alpha v, \\ \frac{dw}{dt} &= \delta\beta uv - \gamma w. \end{aligned} \quad (2)$$

У якості змінних узяті щільності конкуруючих потоків накачування і розсіювання РЕІ ( $u, v, w$ );  $t$  - час.

Перехід до безрозмірних змінних  $x = \nu\mu^{-1}u, y = \beta\mu^{-1}v, z = w, \tau = \mu t$   $x = \nu\mu^{-1}u, y = \beta\mu^{-1}v, z = w, \tau = \mu t$  приводить до системи

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} &= x(1 - x - y) \equiv P(x, y, z), \\ \frac{dy}{d\tau} &= ay(z - 1) \equiv Q(x, y, z), \\ \frac{dz}{d\tau} &= b(xy - cz) \equiv R(x, y, z) \end{aligned} \quad (3)$$

з трьома позитивними параметрами  $a = \alpha\mu^{-1}, b = h\delta\mu(\alpha\nu)^{-1}, c = \alpha\gamma\nu(\delta h)^{-1}\mu^{-2}$ .

З фізичного значення змінних виходить, що всі вони позитивні, отже, фазовий простір даної системи – перший октант простору  $(x, y, z)$ .

Система (3) має наступні стани рівноваги:

- 1)  $O(0,0,0)$  - сідло із стійкою сепаратрисною поверхнею, яка співпадає з площиною  $x = 0$ .
- 2)  $A(1,0,0)$  - стійкий вузол.

Координати решти станів рівноваги визначаються із системи рівнянь:

$$\begin{aligned} 1 - x - y &= 0, \\ z - 1 &= 0, \\ xy - cz &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Для встановлення числа і характеру цих станів рівноваги побудуємо на площині  $(x, c)$  чотири основні криві: криву станів рівноваги і криві  $r = 0, q = 0, pq - r = 0$ .

З перших двох рівнянь (4) виходить, що  $y = 1 - x, z = 1$ . Підставивши ці вирази в третє з рівнянь (4), одержимо рівняння кривої станів рівноваги:

$$c = x - x^2. \quad (5)$$

Ця крива – парабола з вершиною у точці  $(1/2; 1/4)$ , перетинаюча вісь  $x$  при  $x = 0$  і  $x = 1$  (рис. 1). Розглядаючи перетин прямої  $c = \text{const}$  з кривою (5), приходимо до висновку, що при  $c < 1/4$  є два стани рівноваги. При  $c = 1/4$  ці стани рівноваги зливаються, а при  $c > 1/4$  зникають.

Для цих двох станів рівноваги параметри  $p, q$  і  $r$  визначаються виразом  $p = x + bc, q = bc(x - a), r = abc(1 - 2x)$ . Рівняння кривої  $pq - r = 0$  має вигляд

$$c = \frac{a - ax - x^2}{b(x - a)} \quad (6)$$

Ця крива має вертикальну асимптоту  $x = a$ , і її графік може мати різний якісний характер, залежно від значення параметра  $a$ .

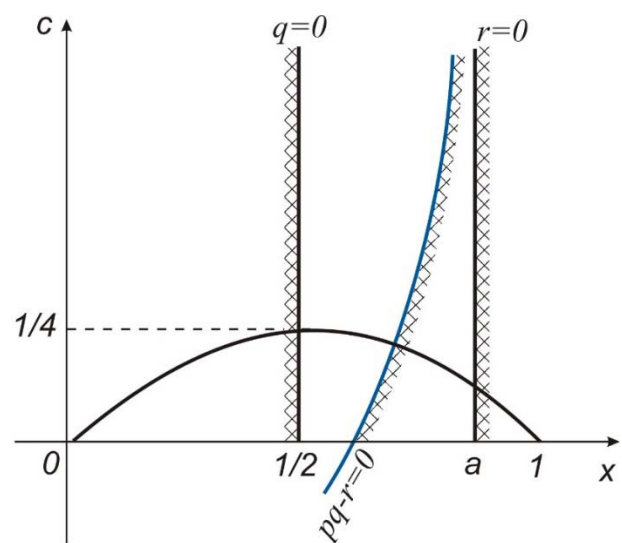


Рис. 1. Крива станів рівноваги (випадок 1)

При  $a < 1/2$   $c(x)$  - убуваюча функція; гілка кривої (6), перетинаюча вісь  $x$  при  $x > 0$ , має в цьому випадку точку перетину з параболою (5)  $a < x < 1/2$ , тобто зліва від її вершини.

При  $a > 1/2$  крива (6) має мінімум при  $x < a$  і максимум при  $x > a$ , причому обидва ці екстремуми розташовані в області  $c < 0$ ; в цьому випадку вона перетинає вісь при  $1/2 < x < a$ , і, отже, перетин кривих (5) і (6) відбувається праворуч від вершини параболі (5).

На рис. 1 зображено взаємне розташування на площині  $x, c$  кривої станів рівноваги і кривої  $r = 0, q = 0$  і  $pq - r = 0$  для  $a < 1 < 2$  (випадок 1). Штрихування на кривих  $r = 0, q = 0, pq - r = 0$  показує, по яку сторону від цих кривих розташовані області, де відповідно  $r > 0, q > 0, pq - r > 0$ .

Позначимо через  $x_0$  абсцису точки перетину кривої станів рівноваги з кривою  $pq - r = 0$ . При  $0 < x < a$   $r > 0, q < 0$ ; при  $a < x < x_0$   $r > 0, q > 0, pq - r < 0$ . Отже, при  $0 < x < x_0$  М - сідло або сідло-фокус з нестійкою сепаратрисною поверхнею.

При  $x_0 < x < 1/2$   $r > 0, q > 0, pq - r > 0$ . В цьому випадку М - стійкий вузол або фокус.

При  $1/2 < x < 1$   $r < 0, q > 0, pq - r > 0$ . Тоді, N - сідло або сідло-фокус із стійкою сепаратрисною поверхнею.

При  $x = 1/2$ , тобто у вершині параболі (5), відбувається злиття М і N. При цьому  $r = 0$ , і один з коренів характеристичного рівняння  $\lambda_1 = 0$ . Два інші кореня визначаються з рівняння

$$\lambda^2 + (1/2 + bc)\lambda + bc(1/2 - a) = 0. \quad (7)$$

Дискримінант цього рівняння  $D = (1/2 - bc)^2 + 4abc > 0$ , значить корені дійсні. Оскільки  $1/2 + bc > 0$  і, то обидва кореня негативні. Беручи до уваги той факт, що досліджуваний складний стан рівноваги парно-кратний, оскільки розпадається на два простих: М і N, визначаємо, що він є сідло-вузлом із стійкою вузловою областю [5].

Поблизу вершини параболі (5), тобто при С, трохи менше  $1/4$ , М буде стійким вузлом, а N - сідлом. При подальшому зменшенні С вузол М десь на кривій станів рівноваги до її перетину з кривою  $pq - r = 0$  повинен перетворитися на фокус, оскільки в точці, де  $pq - r = 0$ , цей стан рівноваги є складним фокусом або центром.

Для з'ясування його характеру була обчислена перша ляпуновська величина, яка виявилася негативною. Це означає, що під час переходу через межу  $pq - r = 0$  стійкий фокус стає складним стійким фокусом, з якого народжується єдиний стійкий граничний цикл; складний фокус при цьому

перетворюється на сідло-фокус з нестійкою сепаратрисною поверхнею [6].

Таким чином, система (3) в певній області значень параметрів описує періодичні зміни параметрів  $x, y, z$ .

На рис. 2 зображено взаємне розташування на площині  $x, c$  чотирьох основних кривих: кривої станів рівноваги,  $r = 0, q = 0, pq - r = 0$  для  $1/2 < a < 1$  (випадок 2).

При  $0 < x < 1/2$   $r > 0, q < 0$ , тоді М - сідло або сідло-фокус з нестійкою сепаратрисною поверхнею.

При  $1/2 < x < 1$   $r < 0, q > 0$ , тоді N - сідло або сідло-фокус із стійкою сепаратрисною поверхнею (оскільки при  $1/2 < x < a$   $r < 0, q < 0$ , а при  $a < x < 1$   $r < 0, q > 0, pq - r > 0$ ).

У вершині параболі (5) М і N зливаються, утворюючи складний стан рівноваги, для якого один з коренів характеристичного рівняння  $\lambda_1 = 0$ , а два інших визначаються з рівняння (7). Оскільки в даному випадку  $bc(1/2 - a) < 0$ , то корені  $\lambda_2$  і  $\lambda_3$  дійсні і різних знаків.

Оскільки даний складний стан рівноваги парно-кратний, то, як впливає з [6], він є станом рівноваги типу С (сідло-сідло).

При  $a > 1$  (випадок 3) розташування основних кривих відрізняється від показаного на рис. 3.2 тільки тим, що точка перетину кривої станів рівноваги і кривої  $pq - r = 0$  лежить нижче осі абсцис. При цьому М і N мають той же якісний характер, що і у випадку 2. Тому випадки 2 і 3 аналогічні.

Покажемо, що дана система (3) не має в I октанті замкнутих інтегральних поверхонь.

Достатньою умовою того, що в деякій області система (3) не має замкнутих інтегральних поверхонь, є існування функції, що безперервно диференціюється, для якої вираз  $\sigma = (PF)'_x + (QF)'_y + (RF)'_z$  зберігає знак в цій області [5, 6].

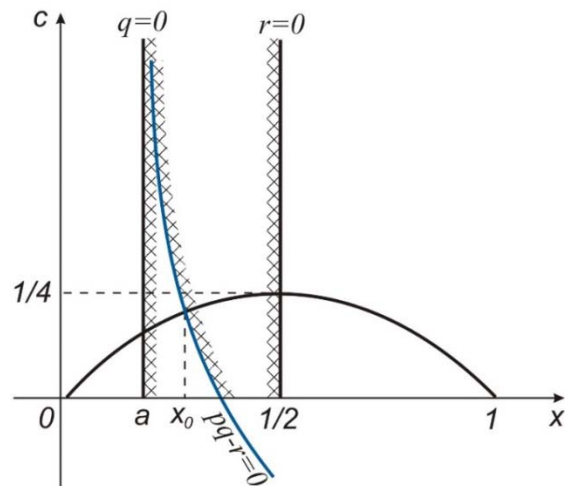


Рис. 2. Крива станів рівноваги (випадок 2)

Візьмемо для системи (3)  $F(x, y, z) = 1/(xyz)$ . Тоді  $\sigma = -1/(yz) - b/z^2 < 0$ . Беручи до уваги той факт, що  $x=0$  і  $y=0$  - інтегральні площини, а  $z=0$  - площина без контакту з траєкторіями, можна заключити, що система (3.3) не має в I октанті замкнутих інтегральних поверхонь.

У припущенні, що, окрім стійких станів рівноваги і стійкого граничного циклу, система (3) не має інших граничних множин, можливі наступні сценарії еволюції бінарної системи залежно від співвідношення параметрів і початкових умов: 1) повна адаптація системи до зовнішніх збурень; 2) періодичний характер розвитку; 3) колапс системи.

Хай початкові умови потрапляють в область тяжіння стійкого вузла N. Тоді можливі два результати: якщо початкові значення  $x, y, z$  невеликі, то це означає, що невеликі початкові пошкодження структури успішно ліквідуються системою; якщо початкові значення  $x, y, z$  великі, то сприятливий сценарій в цьому випадку можна розглядати тільки теоретично, оскільки система повинна зруйнуватися.

Якщо початкові умови потрапляють в область тяжіння стійкого вузла або фокусу M, або в область тяжіння граничного циклу, то це означає автоколивальний характер процесів - «співіснування» конкуруючих потоків [6].

Переходячи від феноменологічної моделі до фізичних уявлень, відповідні потоки РЕІ представимо співвідношенням інтенсивностей взаємного впливу дислокацій і вакансій [7] і інтенсивністю процесів розмноження і анігіляції дефектів.

Тоді п. 2 стану системи може бути представлено ефектом періодичної зміни фізико-механічних властивостей при еволюції структури системи [8].

При теоретичному дослідженні вказаних особливостей представляються можливими два підходи. Перший ґрунтується на розгляді мікромеханізмів дислокаційно-вакансійної взаємодії, включаючи процеси генерації і розмноження вакансій і дислокацій, їх анігіляції і поглинання стоками, які визначаються особливостями мікроструктури, умовами деформації і т.д. Не дивлячись на наочність і передбачуваність такого підходу, він ґрунтується на конкретних механізмах, а це може привести до недооцінки найістотніших з них і зайвої деталізації неістотних. В результаті ускладнюється математична схема і можуть виникнути непереборні формальні труднощі. В рамках другого підходу, що має феноменологічний характер, використовується певний алгоритм, що дозволяє знайти структуру рівнянь руху для основних величин, що характеризують поведінку системи. Очевидні недоліки такого підходу витікають з недооцінки мікромеханізмів явища і полягають в труднощі відбору фізичних параметрів, що впливають на поведінку системи (параметрів мікроструктури матеріалу, умов деформації і т. д.).

Найпривабливішим представляється комплексний метод, коли основні рівняння виводяться феноменологічно, а потім кожен їх доданків представляється в рамках мікроскопічних уявлень. В результаті коефіцієнти феноменологічних рівнянь виражаються через параметри структури.

Феноменологічна модель еволюції системи, як динамічного нелінійного середовища в процесі його деградації, в наближенні схеми гомеостазиса (2) [5, 9], включає ансамблі взаємодіючих дислокацій і мікротріщин [7], кінетика яких описується системою зв'язаних диференціальних рівнянь, впливаючих з (2):

$$\frac{d\rho}{dt} = A\rho - B\rho^2 - C\rho m, \quad (8)$$

$$\frac{dm}{dt} = C_1\rho m - Dm, \quad (9)$$

де  $\rho$  — густина дислокацій,  $m$  — сумарна площа поверхні мікротріщин в одиниці об'єму,  $t$  — час,  $A, B, C, C_1, D$  — постійні коефіцієнти. У правій частині (8) перший член характеризує розмноження дислокацій під впливом механічного навантаження, другий описує анігіляцію дислокацій, а третій — поглинання дислокацій мікротріщинами і зменшення густини дислокацій, новими поверхнями (мікропорожнини, що виникають при втомному руйнуванні, так званий ефект «розпушення» металу), які утворюються за рахунок об'єднання дислокацій. У правій частині (3.9) перший член характеризує зростання мікротріщин за рахунок поглинання дислокацій, а другий — зменшення густини мікротріщин, пов'язане з їх виходом на поверхню мікропорожнин, або поверхню об'єкту.

У фізично цікавому діапазоні коефіцієнтів  $A, B, C, C_1, D$  система (8), (9) має рішення у вигляді затухаючих коливань  $\rho(t)$  і  $m(t)$  з періодом при великих  $t$ , рівним

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{DA - BD^2 / C_1 - (BD / 2C_1)^2}}. \quad (10)$$

Швидкість зростання мікротріщин  $\frac{dN}{dt}$

пов'язана з величиною  $m$  наступним наближеним співвідношенням:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\alpha k S D m}{d^2 m_{lok}}, \quad (11)$$

де  $\alpha$  — частка утворених мікропорожнин до всіх, які утворилися за період реєстрації,  $k$  — відношення площі перетину, в якій відбувається пластична деформація до загальної площі перетину ( $k < 1$ ),  $S$  — площа перетину,  $d$  — розмір області локалізації втомних пошкоджень,  $m_{lok}$  — густина внутрішньої вільної

поверхні, при якій відбувається руйнування. Звідси коливання  $m(t)$  визначають відповідні коливання характеристики  $\frac{dN}{dt}$  процесу руйнування.

Як феноменологічна модель взаємодії відповідних потоків дефектів в рамках схеми гомеостазиса приймемо бруселятор, або систему «хижак – жертва» [5,8].

$$\frac{d\rho}{d\varepsilon} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_0} - \frac{n}{n_0} \right), \quad (12)$$

$$\frac{\partial n}{\partial \varepsilon} = -\frac{n}{\varepsilon_0} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right).$$

Тут  $\rho$  - густина дислокацій, що представляє «хижак»;  $n$  - густина вакансій, що відповідає «жертві»;  $\rho_0, \varepsilon_0$  - позитивні постійні. Перший доданок в правій частині першого рівняння описує розмноження дислокацій в полі деформації, друге – їх анігіляцію, третє – їх анігіляцію при взаємодії з вакансіями. У другому рівнянні перший доданок відповідає процесу регресії густини джерел вакансій, друге описує зворотний процес за рахунок взаємодії з дислокаціями.

Якісний аналіз нелінійних рівнянь показує, що взаємодія складових направлена до встановлення автоколивань [7].

Оскільки кожний з витків відповідає провалу на залежності  $H_V(\varepsilon)$ , то з рис. 3 виходить, що насправді спіраль повинна містити невелику кількість таких витків. Із зростанням деформації  $\varepsilon$  система еволюціонує по одному з них, наприклад витку  $ABCDE$ . При цьому густина дислокацій спочатку зменшується від  $\rho_A$  до  $\rho_C$  (на кривій залежності  $H_V(\varepsilon)$  це відповідає спадаючій гілці провалу мікротвердості) а потім відбувається зворотне зростання  $\rho(\varepsilon)$  по траєкторії  $CDE$  (відповідно потрапляємо на висхідну ділянку залежності  $H_V(\varepsilon)$ ). В ході такої еволюції густина вакансій  $n$  росте на ділянці  $AB$ ; подальше зменшення густини дислокацій  $\rho(\varepsilon)$  і об'єднання цих областей приводить до спаду величини  $n$  на ділянці  $BCD$ ; остаточне збільшення густини  $n$  на ділянці  $DE$  пов'язане із зростанням густини дислокацій  $\rho$ . Звуження спіралі з наближенням до точки  $F$  приводить до зменшення амплітуди коливань густини дислокацій  $\rho$  і, як наслідок, до спаду глибини провалів мікротвердості  $H_V(\varepsilon)$ .

Отримані результати добре корелюють експериментальними результатами по дослідженню мікротвердості у зоні втомного руйнування (рис. 4).

Подібний вигляд має також система осередків пластичної деформації які рухаються під час накопичення втомних пошкоджень у моно- та полікристалах.

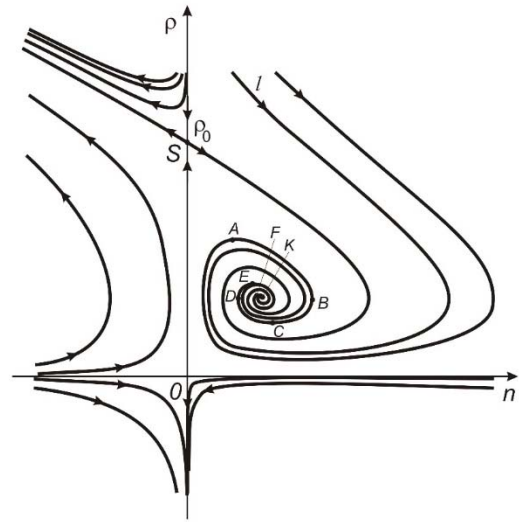


Рис. 3. Періодична зміна параметрів системи (12) [7]

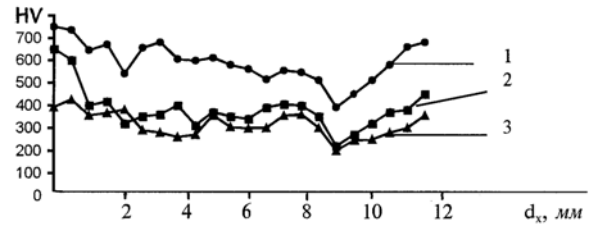


Рис. 4. Розподіл мікротвердості в діаметральному перетині зразка після втомного руйнування: 1- у поверхневому шарі зламу; 2 – на відстані 0,3 мм від зламу; на відстані 0,5 мм від зламу [10]

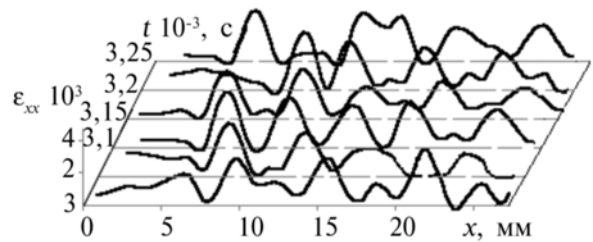


Рис. 5. Еквідистантна система осередків локалізованої деформації, що рухаються на стадії лінійного зміцнення монокристалу Cu [11]

Порівняння рельєфу пачок смуг текучості, які виникають при утворенні «шийки» зразку, що розтягують з розрахунковими результатами, які отримано за допомогою запропонованої моделі (рис. 6) свідчить про задовільну кількісну відповідність моделі з експериментальними даними і, таким чином, можна припустити, що як найважливіша складова задачі вироблення адекватних динамічних образів ключових явищ, що відбуваються в системі в процесі її деградації, є дослідження універсальних механізмів коливально-хвильових процесів, відповідальних за встановлення в системі коливань, що самопідтримуються [6].



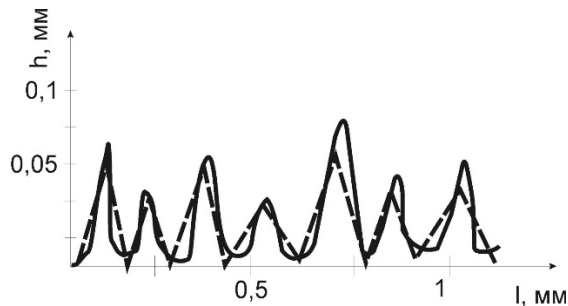


Рис. 6. Мікрорельєф пачок смуг текучості та розрахунки їх висота

**Висновки.** Ця схема може бути коректно реалізована в рамках прийнятої схеми формалізації, якщо виходити з перших принципів, сформульованих польовими теоріями і запропонований підхід може бути застосований для моделювання утворення переддефектного стану металоконструкції

#### Література

1. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов [Текст] / Р. Хоникомб. - М.: Мир, 1972. - 408 с.
2. Романив О. Н. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов [Текст] / [О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин, Н. А. Махутов та ін.]. - К.: Наукова думка, 1990- 680 с.
3. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. - Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др. - К.: Наук. думка, 1990. - 680 с.
4. Pokluda J. and Sandera P. Micromechanisms of Fracture and Fatigue: In a Multi-Scale Context. - Springer, 2010. - 295 p.
5. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Понтрягин Л.С. и др. - М.: Физматгиз, 1961. - 218 с.
6. Олемской А.И. Синергетика пластической деформации / Олемской А.И., Хоменко А.В. // УФМ, 2001. - Т.2. - №3. - С. 189-264.
7. Мозгалецкий А.В. Техническая диагностика / Мозгалецкий А.В., Гаскаров Д.В. - М.: Высшая школа, 1975. - 201 с.
8. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам / Хакен Г. - М.: Мир, 1991. - 240 с.
9. Чукбар К. В. Стохастический перенос и дробные производные / К. В. Чукбар. - ЖЭТФ 108, 1875, 1995.
10. Галечан. Оценка процесса усталостного разрушения методом измерения микротвердости // Известия НАН РА и ГИУА. сер. ТН. 2000. Т. LIII, 3. МАШИНОСТРОЕНИЕ, -2000, с. 281-286
11. Зуев Л. Б. Пространственно-временное упорядочение при пластическом течении твердых тел / Л. Б. Зуев, В. И. Данилов, Б. С. Семухин // Успехи физ. мет. 2002, т. 3, с. 237-304

#### References

1. Honikomb R. Plastic deformation of metals [Text] / R. Honikombe. - Moscow: Mir, 1972. - 408 p.
2. Romanin O. Fatigue and cyclic trash-resistance of structural materials [Text] / [O. N. Romanin, S. Ya. Yarema, GN Nikiforchin, N. A. Makhutov t. ]. - K. : Naukova dumka, 1990- 680 p.
3. Mechanics of destruction and strength of materials: Ref. pos. in 4 tons / Under the general. Ed. V. V. Panasyuk. - T. 4: Fatigue and cyclic crack resistance of structural materials / O. N. Romanin, S. Ya. Yarema, GN Nikiforchin, et al. - K. : Nauk. dumka, 1990. - 680 p.
4. Pokluda J. and Sandera P. Micromechanisms of Fracture and Fatigue: In a Multi-Scale Context. - Springer, 2010. - 295 p.
5. Pontryagin LS Mathematical theory of optimal processes / Pontryagin LS and others. - Moscow: Fizmatgiz, 1961. - 218 p.
6. Olemskoy A.I. Synergetics of plastic deformation / Olemskoy AI, Khomenko AV // UFM, 2001. - T.2. - No. 3. - P. 189-264.
7. Mozgalevsky A.V. Technical diagnostics / Moz-galievsky AV, Gaskarov DV - Moscow: Higher School, 1975. - 201 p.
8. Hacken G. Information and self-organization. Macro-copy approach to complex systems / Haken G. - M. : Mir, 1991. - 240 p.
9. Chukbar K. V. Stochastic transfer and fractional derivatives / K. V. Chukbar. - JETP 108, 1875, 1995.
10. Galechan. Evaluation of the process of fatigue destruction by the method of measuring the microhardness // Izvestiya NAS RA and SEUA. Ser. TN. 2000. T. LIII, No. 3. MACHINE-BUILDING, -2000, p. 281-286
11. Zuev, LB, Spatial-temporal ordering in the plastic flow of solids / LB Zuev, VI Danilov, BS Semukhin // Uspekhi Fiz. meth. 2002, v. 3, p. 237-304

#### Марченко Д.Н., Жидков А.Б. Модель накопления усталостных повреждений и формирования преддефектного состояния металлоконструкций

*Изложены принципы построения модели накопления усталостных повреждений и формирования преддефектного состояния металлоконструкций, которая основана на модели структурных превращений в металле при массовом движении дислокаций в результате микропластической деформации. Рассмотрено соответствие модели экспериментальным данным и возможность ее применения для прогнозирования наступления преддефектного состояния, то есть состояния, которое предшествует разрушению конструкции.*

**Ключевые слова:** усталостное разрушение, модель, гомеостазис, автоколебания, дислокация, металлоконструкция

---

---

**Marchenko D.M., Zhydkov A.B. Model of accumulation of fatigue damage and formation of predefect state of metal structures**

*The principles of constructing a model of accumulation of fatigue damage and the formation of predefect state of metal structures, which are based on the model of structural transformations in a metal with massive motion of dislocations due to microplastic deformation, are described. The compliance of the model with the experimental data and the possibility of its application for predicting the state of the defect state, i.e., a state that prevents the destruction of the structure, is disrupted.*

**Key words:** *fatigue fracture, model, homeostasis, auto-oscillation, dislocation, metal construction*

**Марченко Дмитро Миколайович**, д.т.н., проф. перший проректор СНУ ім. В.Даля, [mdnsnumdn@gmail.com](mailto:mdnsnumdn@gmail.com)

**Жидков Андрій Борисович**, к.т.н., доц., доцент кафедри електричної інженерії СНУ ім. В.Даля [zhand.cmw@ukr.net](mailto:zhand.cmw@ukr.net)

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Рязанцев О.І.**

Стаття подана 11.09.2017