

УДК 539.4.015: 658.512

Й. Лучко<sup>1</sup>, д.т.н., проф., О. Кузін, д.т.н., доц., В. Копилов<sup>2</sup>, д.т.н., проф., М. Кузін<sup>3,4</sup>, д.т.н., проф.

<sup>1</sup>Львівський національний університет природокористування, Україна,

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна,

<sup>3</sup>Львівський інститут Українського державного університету науки і технологій,

<sup>4</sup>Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз

## РОЗРОБКА ПІДХОДІВ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРУЖЕНЬ МЕТОДАМИ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ

Y. Luchko, Dr., Prof., O. Kuzin, Dr., Assoc. Prof., V. Kopylov, Dr., Prof., M. Kuzin, Dr., Prof.

<sup>1</sup> Lviv National Agrarian University, Ukraine,

<sup>2</sup> National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,

<sup>3</sup> Lviv Institute of Ukrainian State University of Science and Technologies, Ukraine,

<sup>4</sup> Lviv Research Institute for Forensic Expertise, Ukraine.

## DEVELOPMENT OF APPROACHES TO OPTIMIZATION TECHNOLOGIES OF HARDENING STRUCTURAL ELEMENTS WITH STRESS CONCENTRATORS BY SURFACE ENGINEERING METHODS

**Abstract.** The problem of ensuring the required level of operational parameters of structures with the presence of stress concentrators is considered. The ways of controlling the contact strength by the formation of a given distribution of mechanical properties in the body are proposed. These approaches make it possible both to optimize the technologies of hardening parts and determine the causes of their failure.

**Вступ.** Однією із важливих особливостей функціонування сучасних машин, механізмів та конструкцій транспортних систем є наявність значної кількості концентраторів напружень, які суттєво впливають на параметри працездатності виробів [1, 2].

В цьому зв'язку необхідно передбачити можливість «технологічного компенсування» наявності концентраторів, щоб мінімізувати їх негативний вплив на надійність виробу в експлуатації і забезпечити задані по тілу міцнісні властивості в умовах силових навантажень [3].

Просторова постійність міцнісних властивостей в тілі має також назву рівномірності і є однією із найбільш поширених експлуатаційних умов для виробів [4].

**Огляд літератури.** Питання ролі концентраторів напружень та їх впливу на експлуатаційні властивості виробів почали активно з'являтися в літературі із першої половини 20 століття [2].

При цьому для встановлення зміни параметрів напружено-деформованого стану навколо концентраторів найпростішої форми використовувався аналітичний апарат математичного моделювання. Він дозволяє визначати якісну картину зміни напружень в тілі навколо концентраторів. Разом із тим аналітичний апарат надзвичайно важко використовувати коли властивості матеріалу мають градієнтну зміну або концентратори напружень є неканонічної форми [1].

Із розвитком комп'ютерної техніки для розв'язання задач зміни міцнісних параметрів конструкції все частіше використовується числове математичне моделювання.

На даний час розглянута оптимізація технології поверхневого плазмового зміцнення при наявності концентраторів напружень кругового типу, запропоновані підходи щодо впливу кута орієнтації еліптичного дефекту та його розмірних параметрів на формування експлуатаційних характеристик функціонально-градієнтних конструкцій [5, 6].

Відмітимо, що під час функціонування конструкції в ній через різні фактори можуть з'являться нові концентратори напружень. Проте питання узагальненого формування просторової неоднорідності властивостей у матеріалі деталей при змінних параметрах концентраторів напружень для забезпечення рівномірності конструкції при заданих режимах експлуатації в літературі не наведені.

**Постановка задачі формування оптимальної просторової структурної неоднорідності при зміні параметрів концентраторів напружень.**

Узагальнена постановка задачі встановлення експлуатаційних характеристик деталей із нелокальними механічними властивостями та довільною орієнтацією еліптичних концентраторів напружень подана у роботі [5]. Базуючись на результатах роботи, запропонуємо наступну двовимірну задачу встановлення оптимальних параметрів функціонально-градієнтних конструкцій при змінних в часі характеристиках концентраторів напружень.

Нехай досліджуване тіло займає область простору  $X$ , елементи поверхні позначимо  $\partial X$ . Поверхню  $\partial X$  в будь-який момент часу  $\tau$  подамо у вигляді наступної сукупності множин:

$$\partial X(\tau) = \partial X_1(\tau) \cup \partial X_2(\tau) \cup \partial X_3(\tau), \quad (1)$$

де  $\partial X_1(\tau)$  - область, де задані силові навантаження,  $\partial X_2(\tau)$  - область, де задані переміщення,  $\partial X_3(\tau)$  - ненавантажена область поверхні.

Прийmemo, що в області  $X$  в будь-який момент часу  $\tau \in N(\tau)$  концентраторів напружень  $Z_i(\tau)$ , кожен із яких характеризується вектором із  $M$  параметрів  $(y_1^i(\tau), \dots, y_M^i(\tau))$ , де  $i$  - номер концентратора.

В якості математичної моделі середовища тіла використаємо модель просторово-нелокального континууму, яка представлена у роботі [7]. В результаті силових навантажень в тілі формується напружений стан, який характеризується тензором  $\hat{\sigma} = \hat{\sigma}(x, \tau)$ ,  $x \in X$ .

Аналіз контактної міцності (деталі) будемо проводити згідно із залежністю:

$$k(x, \tau) = 1 - \frac{\sigma^*(x, \tau)}{\sigma_m(x, \tau)}, \quad (2)$$

де  $k(x, \tau)$  - коефіцієнт запасу міцності,  $\sigma^*(x, \tau)$  - скалярний еквівалент представлення тензора напружень,  $\sigma_m(x, \tau)$  - скалярний міцністний еквівалент матеріалу.

Як видно із співвідношення (2), при  $k(x, \tau) \in (0..1)$  - знеміцнення відсутнє, при  $k(x, \tau) \leq 0$  - знеміцнення відбувається.

Згідно прийнятого апріорі на початку роботи припущення в якості критерію оптимальності рівномірності деталі в умові  $k(x, \tau) = k_*(\tau) = const$ , для  $x \in X$ ,  $k_*(\tau)$  - прийнятий рівень контактної міцності тіла в момент часу  $\tau$ .

При аналізі роботи конструкції в період її експлуатації прийmemo, що функціонал  $L$ , який визначає мінімальний рівень контактної міцності конструкції, має бути вище її критичного значення:

$$L = \min_{\tau \in [t_1, t_2]} k_*(\tau) \geq k_0, \quad (3)$$

де  $k_0$  - критичне значення величини контактної міцності конструкції.

Зрозуміло, що величина  $L$  в загальному випадку залежить від наступної множини:

$$L = L(\partial X_1(\tau), \partial X_2(\tau), \partial X_3(\tau), Z_i(\tau)). \quad (4)$$

В якості параметрів управління виступають складові – константи моделі [7] властивості матеріалу  $K(x)$ ,  $G(x)$ ,  $\alpha_1(x)$ ,  $\alpha_2(x)$ ,  $\alpha_3(x)$ , де  $K(x)$  - модуль об'ємного стиску,  $G(x)$  - модуль зсуву,  $\alpha_1(x)$ ,  $\alpha_2(x)$ ,  $\alpha_3(x)$  - нелокальні характеристики розподілу пошкоджуваності.

В результаті узагальнена постановка задачі управління експлуатаційною міцністю деталей в часі зводиться до забезпечення методами інженерії поверхні властивостей матеріалу  $K(x)$ ,  $G(x)$ ,  $\alpha_1(x)$ ,  $\alpha_2(x)$ ,  $\alpha_3(x)$ , які дозволяють функціонування деталі вище заданого критичного рівня рівномірності конструкції, тобто умову (3).

Відмітимо, що використання запропонованої у роботі методології можна проводити як для оптимізації поверхневого зміцнення деталей і без наявності концентраторів напружень [8], так і для встановлення причин виходу із ладу конструкцій [9].

#### **Висновки.**

1. На основі сучасних підходів прикладної механіки розглянута задача оптимізації конструкцій із концентраторами напружень.

2. Побудований функціонал, який дозволяє оцінювати рівень зміни контактної міцності конструкції в часі.

3. Запропоновані у роботі підходи дозволяють проводити оптимізацію технологій зміцнення деталей за критерієм рівномірності конструкцій і встановлювати причини виходу їх із ладу.

#### **Література.**

1. Murakami Yukitaka Theory of elasticity and stress concentration. – Wiley, 2017. – 446 p.

2. Лучко Й.Й., Распопов О.С. Будова та експлуатація штучних споруд. – Львів: Каменяр, 2011. – 879 с.

3. Ляшенко Б.А., Новиков М.В., Клименко С.А. Дискретное модифицирование поверхностного слоя деталей машин и инструментов. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2017. – 264 с.

4. Черепанов Г.П., Ершов Л.В. Механика разрушения. – М.: Машиностроение, 1977. – 224 с.

5. Stotsko Z.A., Kuzin O.A., Kuzin M.O., Mechnik V.A. Estimation of strength properties of functionally graded structures with elliptical stress// Archives of Materials Science and Engineering. – 2022. – v. 113, No. 1. – p. 35-41.

6. Lyashenko B.A., Stotsko Z.A., Kuzin O.A., Kuzin M.O., The use of computational contact mechanics approaches to assess the performance of parts bearing stress concentrators// Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. - 103/1. – 2020. – p. 25-32.

7. Kuzin O., Lukiynates B., Kuzin N., Continual description of polycrystalline systems taking into account their structure// Technology audit and production reserve. – 1/1(45) – 2019. – p. 25-30.

8. Kopylov V., Kuzin O., Kuzin N. Application of computational mechanics approaches for increasing of tribosystem operational parameters by using plasma hardening method// Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics. – 20/1. – 2021. – p. 61-70.

9. Kuzin N, Meshcheryakova T., Kuzin O., Kurileva E., Gordinskaya N. The use of mathematical and computer modelling in solving the problems or rail transport expert examination// Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics. – 15/4. – 2016. – p. 93-98.