

Управління довговічністю виробів при використанні технологій інженерії поверхні

З.А. Стоцько¹, О.А. Кузін, М.О. Кузін^{1,2}

1 – Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

2 – Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз, Львів, Україна

Анотація: Розглянута проблема управління довговічністю виробів за рахунок створення в їх матеріалах областей із заданою часовою та просторовою нелокальністю. Запропоновано математичну модель знеміцнення матеріалів при дії зовнішніх навантажень, яка дозволяє враховувати особливу роль у формуванні пошкоджень місць виходу границь і потрійних стиків зерен на зовнішні поверхні деталей, а також їх взаємодію із концентраторами напружень, що утворені після механічної обробки.

Розроблені модельні уявлення використані для забезпечення експлуатаційної рівномірності елементів конструкцій з концентраторами напружень методами інженерії поверхні, зокрема при визначенні ролі зміни кількісних параметрів мікроструктури на зносотривкість поверхневих шарів деталей рухомого складу залізничного транспорту, що містять концентратори напружень. Встановлено оптимальну глибину плазмового зміцнення приповерхневих шарів бандажів колісних пар локомотивів в залежності від розмірів, розміщення і геометричних характеристик концентраторів напружень. Показано, що врахування динаміки структурних змін в часі при деградації матеріалів в умовах експлуатації згідно запропонованих співвідношень моделі дозволяє досягти заданого життєвого циклу деталей при мінімальних затратах.

Підвищення довговічності виробів досягається при оптимізації технологічних режимів інженерії поверхні, які забезпечують формування структур із меншим градієнтом властивостей.

Ключові слова: матеріали з нелокальністю, концентратори напружень, інженерія поверхні

Вступ

Розвиток сучасного машинобудування, ускладнення умов експлуатації виробів, посилення вимог щодо надійності техніки, вимагає використання нових підходів до експериментального дослідження, моделювання, розрахунків і оптимізації технологій при отриманні продукції високої якості.

Одним із способів вирішення цієї проблеми є формування заданого часового та просторового розподілу механічних та фізико-хімічних властивостей матеріалу у виробі (створення у матеріалі деталей областей із часовою та просторовою нелокальністю).

Відмітимо, що традиційні технологічні шляхи вирішення цього кола питань на даний час досягли певного граничного рівня і вже практично не дозволяють збільшувати ресурс деталей [1].

Тому на даний час склався альтернативний напрямок забезпечення відповідних характеристик виробів – використання технологій інженерії поверхні для створення структур із нелокальними властивостями.

При технологічному підвищенні експлуатаційних властивостей елементів конструкцій слід приділяти увагу формуванню таких структур в зонах внутрішніх та зовнішніх поверхонь поділу. Дані області є джерелом зародження розсіяних дефектів, які при експлуатації виробів можуть переходити в локалізовані пошкодження, що переростають у тріщини. Особливу роль у формуванні пошкоджень відіграють місця виходу границь поділу зерен і їх потрійних стиків на зовнішні поверхні виробів. Створення в них локалізованих дефектів, їх розміри і взаємодія з концентраторами напружень, що утворюються при механічній обробці деталей, суттєво впливають на швидкість розвитку магістральних тріщин.

Для підвищення опору до формування пошкоджень застосовують понад 200 методів інженерії поверхні, більшість з яких є альтернативними [1].

Разом із тим питання оптимального формування нелокальних структур в матеріалах де-

талей із врахуванням часових та просторових особливостей характеристик навантажень, розподілу поверхонь поділу та їх стану, є відкритими і потребують свого вирішення.

Матеріали і методи

В роботі розглянемо проблему забезпечення експлуатаційної довготривалої рівномірності елементів конструкцій з концентраторами напружень, методами інженерії поверхні.

Розглянемо випадок, що деталь, яка містить N концентраторів напружень, працює в умовах силових навантажень на протязі часу $T \in [t_0; t_1]$. Задача полягає у формуванні такого розподілу локальних властивостей у матеріалі, щоб на протязі часу T рівень міцнісних характеристик забезпечував потрібну працездатність деталі.

Перейдемо до математичної формалізації вищенаведеної задачі. Нехай деталь займає область простору X , її поверхню деталі позначимо ∂X . Прийmemo, що деталь не має значних розмірів, і тому можна знехтувати силами тяжіння.

При аналізі функціонування конструкції обмежимося розглядом силових навантажень. Нехай в кожен момент часу $\tau \in T$ на поверхні тіла $\partial X(\tau)$ є три області $\partial X^1(\tau)$, $\partial X^2(\tau)$, $\partial X^3(\tau)$. Тут $\partial X^1(\tau)$ - область поверхні, де задані силові навантаження, $\partial X^2(\tau)$ - область поверхні, де задані переміщення (це може бути і умова закріплення матеріалу), $\partial X^3(\tau)$ - ненавантажена область поверхні. Кожна із областей може складатись із елементарних підобластей: $\partial X^i(\tau) = \bigcup_{j=1}^{s_j} \partial X_j^i(\tau)$, $\partial X_j^i(\tau) \cap \partial X_q^k(\tau) = \emptyset$, $i \neq k$, $j \neq q$, $i=1,2,3$.

В результаті маємо задані крайові умови – силові вектори $\vec{F}_j^i(\tau)$ на $\partial X_j^i(\tau)$, та $\vec{u}_j^i(\tau)$ на $\partial X_j^i(\tau)$.

Прийmemo, що в тілі містяться концентратори напружень, кожен із яких характеризується M розмірним вектором параметрів (Z_1^i, \dots, Z_M^i) , де $i=1, \dots, N$ (номер концентратора напружень); прийmemo, що концентратори напружень не перетинаються.

При дії силових навантажень в тілі в момент часу τ формується напружений стан $\hat{\sigma}(x, \tau)$, де $x \in X$, $\tau \in T$. Оскільки напружений стан не визначає однозначно міцнісні параметри конструкції, тому від тензорної величини $\hat{\sigma}(x, \tau)$ перейдемо до скалярної $\sigma_s(x, \tau)$, де $\sigma_s(x, \tau)$ - скалярний еквівалент тензорної величини $\hat{\sigma}(x, \tau)$, і розглянемо наступний вираз:

$$L(x, \tau) = 1 - \frac{\sigma_s(x, \tau)}{\sigma_*(x, \tau)}, \quad (1)$$

де $\sigma_*(x, \tau)$ - локальні міцнісні параметри.

Вираз $L(x, \tau)$ назвемо величиною запасу міцності деталі. Як видно із виразу (1), при $L \in (0; 1]$ маємо деталь, що працює без знеміцнення, при $L \in (-\infty; 0]$ в деталі відбувається знеміцнення.

Мінімальне значення запасу міцності деталі в момент часу τ будемо визначати із виразу $L_{\min}(\tau) = \min_{x \in X} L(x, \tau)$. Відмітимо, що даний мінімальний вираз не може бути менше заданого $L_{\min}(x, \tau) \geq L_0(\tau)$.

Прийmemo, що умова рівномірності конструкції в інтервалі часу $T \in [t_0; t_1]$ еквівалентна наступному виразу:

$$L_T = L_{\min}(\tau) \rightarrow const \geq L_0, \quad (2)$$

де L_0 - мінімально допустимий рівень знеміцнення на інтервалі часу T .

Зрозуміло, що функціонал L_T в загальному випадку залежить від наступної вхідної множини змінних: $\bar{F}_j^i(\tau)$, $\bar{u}_j^i(\tau)$, $\bar{Z}^k(Z_1^k, \dots, Z_M^k)$, $i=1,2,3$, $j=1, \dots, S_i$, $k=1, \dots, N$.

Крім вхідної множини змінних, функціонал L_T залежить також від внутрішньої множини змінних – розподілу локальних властивостей у матеріалі. Згідно прийнятих у роботі припущень щодо розгляду тільки силових навантажень, обмежимося розглядом наступних властивостей матеріалу – пружні характеристики (модуль пружності $E(x, \tau)$, коефіцієнт Пуасона $\mu(x, \tau)$) та міцнісні (межа міцності - $\sigma_*(x, \tau)$).

Відповідно, задача забезпечення експлуатаційної рівномірності деталі на протязі часу $\tau \in T$ зводиться до технологічного формування такого розподілу $E(x, t_0)$, $\mu(x, t_0)$, $\sigma_*(x, t_0)$ методами інженерії поверхні, який при відомій вхідній множині змінних забезпечує умову функціоналу (2).

Результати

Запропонована математична постановка задачі пройшла своє випробування при встановленні оптимального технологічного розподілу властивостей в приповерхневих шарах на широкому класі прикладних задач для відповідальних деталей рухомого складу залізничного транспорту, що містять концентратори напружень [3, 4].

Було встановлено оптимальну глибину, на яку потрібно проводити зміцнення приповерхневих шарів бандажів колісних пар локомотивів при відсутності концентраторів напружень та при їх наявності.

Так за допомогою розробленої методики було визначено, що оптимальна глибина плазмового зміцнення має бути в три рази більша розміру концентратора напружень.

При наявності еліптичних концентраторів напружень, важливе значення мають їх розміри, орієнтація, співвідношення головних радіусів.

Зокрема, було знайдено, що найбільш “небезпечні” кути орієнтації еліптичних концентраторів відносно нормалі до поверхні є 20° та 110° , а “найгіршими” з позицій забезпечення експлуатаційних властивостей деталей є “голкоподібні” еліптичні дефекти.

В результаті використання запропонованих у роботі математичних співвідношень були розроблені підходи щодо технологічного зміцнення для “максимально можливої нейтралізації” негативного впливу даних концентраторів.

Обговорення

При розгляді фундаментальної проблеми управління довговічністю конструкцій за допомогою технологій інженерії поверхні важливим є врахування часової нелокальності сформованих в результаті технологічної модифікації структур.

Одним із шляхів розв’язання даної проблеми є введення додаткової змінної, що описує зміну властивостей матеріалу в часі – пошкодженість. Ця змінна може бути скалярної, векторної або тензорної природи і має мати властивість адитивності. Разом із тим, питання еволюції структури в часі в локальних областях в околі концентраторів напружень є відкритим.

В цьому зв’язку, для “опосередкованого” врахування динаміки структурних змін на кожному часовому кроці пропонується задавати мінімально допустимий рівень знеміцнення згідно співвідношення (2), що гарантує експлуатацію конструкції навіть із деградацією властивостей матеріалів в часі.

Висновки

1. Розглянута фундаментальна проблема управління довговічністю відповідальних елементів конструкцій із концентраторами напружень за допомогою формування у внутрішніх та зовнішніх поверхнях розділу просторового розподілу структур із нелокальними характеристиками.
2. Запропонована математична постановка задачі технологічного забезпечення оптимальних структурних параметрів деталей для максимальної “нейтралізації” наявності концентраторів.
3. Розглянуто ряд прикладних результатів на прикладі встановлення глибини плазмового зміцнення бандажів локомотивних коліс при наявності еліптичних та кругових концентраторів.
4. Обговорені подальші можливі шляхи розвитку запропонованих співвідношень для врахування реології середовищ зі змінними характеристиками в часі.

Список літератури.

1. Prochnost materialov i konstruktsiy. – K.: Akademperiodika, 2005. 1088 s.
2. Optimizatsiya tehnologii naneseniya pokrytity po kriteriyam prochnosti i iznosostoykosti. – K.: IPP im. G.S. Pisarenko NAN Ukrainyi, 2010. – 193 s.
3. Stotsko Z.A., Kuzin O.A., Kuzin M.O., Mechnik V.A. Estimation of strength properties of functionally graded structures with elliptical stress concentrators// Archives of Materials Science and Engineering. – 2022. – V. 113, Issue 1. – pp. 35–41.
4. Stotsko Z., Kuzin O., Kuzin M. The Optimal Thickness of the Surface Plasma Hardening Layer of Functional-Gradient Parts with Symmetrical Stress Concentrators// Lecture Notes in Mechanical Engineering. 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021. Vol. 2: Mechanical and Chemical Engineering. – 2021. pp. 75–83.

Product durability management using surface engineering technologies

Z.A. Stotsko, O.A. Kuzin, M.O. Kuzin

Abstract. *The problem of managing the durability of products due to the creation of regions in materials with a given temporal and spatial non-locality is considered. A mathematical model of softening of materials under the action of external loads is proposed, allowing to take into account the special role in the formation of damaged places of exit of grain boundaries and their triple junctions on the outer surfaces of parts, as well as their interaction with stress concentrators formed after mechanical processing.*

The developed model representations are used to ensure the operational uniformity of structural elements with concentrators under stress by methods of surface engineering, in particular, when determining the role of changes in the quantitative parameters of the microstructure on the wear resistance of the surface layers of rolling stock parts of railway transport containing stressed concentrators. The optimal depth of the plasma hardening of the subsurface layers of the rims of wheel pairs of locomotives has been established, depending on the size, placement and geometric characteristics of the tension concentrators. It is shown that taking into account the dynamics of structural changes during the degradation of materials in the conditions of operation according to the proposed model ratios allows to achieve the specified life cycle of parts at minimal costs.

Increasing the durability of products is achieved by optimizing technological modes of surface engineering, which ensure the formation of structures with a smaller gradient of properties.

Keywords: *materials with non-locality, stress concentrators, surface engineering.*