

ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ПОШКОДЖЕНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ В ЗАДАЧАХ СУДОВОЇ ЕКСПЕРТИЗИ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИСКРЕТНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

М.О. Кузін¹, Й.Й. Лучко²

1 – Львівській науково-дослідний інститут судових експертиз, 2 - Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя

In work on the basis of the cellular automata approach, a technique is proposed for modeling the life cycle of assemblies of rolling stock parts, taking into account internal structural changes in the material. This technique allows you to restore the features of operational behavior of railway equipment under external influences.

1. Вступ. Особливості постановки задач судової залізнично-транспортної експертизи при руйнуванні конструкцій.

Сучасні тенденції розвитку транспортних систем характеризуються підвищенням експлуатаційних навантажень, збільшенням міжремонтних періодів і жорсткістю вимог щодо безпеки функціонування рухомого складу.

При проектуванні технологій виготовлення деталей і вузлів, а також розслідування причин їх руйнування, ці вимоги змушують проводити аналіз поведінки матеріалів конструкцій із залученням нових модельних уявлень, які повинні враховувати вплив зовнішніх полів різної природи, а також зміни структури і властивостей матеріалу деталі в процесі експлуатації.

Відзначимо, що в практиці судової експертизи перед експертами часто постають питання встановлення механізму (сукупності причинно-наслідкових зв'язків), які безпосередньо призводять до виникнення залізнично-транспортних пригод.

Основні проблеми, які виникають при аналізі життєвого циклу деталей і вузлів рухомого складу наведені в роботі [1], де також представлені підходи до вирішення цих завдань з позицій механіки деформівного твердого тіла. Зокрема, динаміку структурних змін в матеріалі запропоновано описувати за допомогою введеної адитивної змінної, а час роботи конструкції апріорно зіставляти з граничним значенням цієї величини.

Найбільш важливим, як з позицій практики судової експертизи, так і модельного опису поведінки залізничних конструкцій в умовах термомеханічних впливів, - це вибір фізичного і модельного наближення доступного для обчислювальної реалізації, яке адекватно описує процеси структурних змін в матеріалі під час експлуатації [2].

При цьому критерієм перевірки правильності і коректності запропонованих в експертному дослідженні модельних уявлень є відповідність апріорно достовірної інформації матеріалів кримінальної справи тим результатам, які отримані при розрахунках, а деяке відхилення може розглядатися як накопичення похибок отриманих при аналізі об'єкта дослідження - інструментальної, модельних уявлень і обчислювального експерименту .

У зв'язку з цим використання для опису життєвого циклу високонавантажених деталей тих математичних моделей, які найбільше відповідають умовам експлуатації, є актуальним завданням, що дозволяє підвищити точність експертних досліджень.

2. Моделювання життєвого циклу деталей з урахуванням структурних змін в матеріалі деталей.

Під дією зовнішніх навантажень матеріал деталей (особливо поверхневі шари) зазнає ряд структурних змін, фізичний опис яких досить повно наведено в роботі [3].

Для аналізу даного явища вводиться скінчена множина змінних (скалярної, векторної або тензорною природи), які за встановленими правилами зіставляються з результатами натурних вимірювань механічних (експлуатаційних) макровластивостей або кінетичних змін

структури. З точністю достатньою для вирішення завдань інженерної практики вводиться скалярна змінна пошкоджуваність (або пошкодженість в деяких літературних джерелах), яка зв'язується зі зміною макровластивостей [3, 4]. Необхідність і «достатність» введення змінної даного роду при дослідженні кінетики макровластивостей в часі обґрунтована в роботах академіка Лебедева А.О. [5]. У ряді робіт [6] розроблено методики математичного моделювання зміни цієї величини в часі при дії зовнішніх силових і температурних факторів.

Не заперечуючи важливості отриманих результатів, відзначимо ті моменти, які є необхідними для обліку зміни пошкодження:

- 1) «заліковування» (регенерації) структури за допомогою спеціально створених технологічних режимів [7];
- 2) «фазова» і топологічна перебудова матеріалу під дією зовнішніх навантажень [3];
- 3) властивість «ієрархічності» досліджуваних поверхневих шарів деталей [6];
- 4) стохастичність як початкового стану матеріалу, так і структурних перетворень під дією поточних зовнішніх навантажень і історії їх зміни.

Найбільш природнім врахування вищевикладених фізичних особливостей поведінки матеріалу під навантаженням можливе за допомогою апарату дискретних математичних структур - клітинних автоматів, який володіє наступними методологічними перевагами [8]: 1) при моделюванні клітинними автоматами не виникає проблем пов'язаних з точністю округлення, збіжністю; 2) клітинні автомати також можна використовувати при описі динамічних систем, що не формалізуються за допомогою диференціальних рівнянь або мають стохастичні складові.

Оскільки клітинний автомат - це дискретний математичний (комп'ютерний) об'єкт з дискретним простором станів, часом і сукупністю правил переходів між станами, задамо його у вигляді:

$$\chi = \langle A, M, \Theta \rangle, \quad (1)$$

де $A = \{A_1, \dots, A_n\}$ - множина станів клітинного автомата, $M = \{m_{ijk}\}$ - сукупність координат клітин в дискретному просторі, Θ - локальний оператор переходу.

Якщо завдання множини M є тривіальною задачею (при використанні відповідних алгоритмів дискретного розбиття просторових областей), то вибір змінних A і Θ забезпечує адекватність математичного опису фізичного явища (або об'єкта).

Запишемо основні фізичні уявлення, які будуть основою при записі змінних A та Θ .

Під множиною станів скінченного клітинного автомата приймали сукупність можливих величин пошкодженості, які можуть мати місце при роботі конструкції. При розгляді в даній роботі пошкоджуваність ω приймали як скалярну величину, інтервал якої змінюється в межах $[0; 1]$, під множиною A будемо розуміти скінченоточкове інтерполювання (не обов'язково рівномірне) зазначеного інтервалу: $A = \{A_i\}_{i=1, n}$, де $0 \leq A_i \leq 1$. При цьому $A_1 = 0$ відповідає апріорно працездатного стану, $A_n = 1$ - апріорно непрацездатному стану. Величина n інтерполяції інтервалу залежить від необхідної точності аналізу результатів.

Оскільки даний апарат використовували для вирішення завдань механіки деформівного твердого тіла, до множини станів A клітинного автомата додали множину B як сукупність механічних, у тому числі теплофізичних, і міцнісних, властивостей матеріалу:

$$B = \left\langle \{R_i\}_{i=1, m}^j \right\rangle_{j=1, k}, \quad (2)$$

де величина k залежить від деталізації постановки завдань.

Завдання локального оператора переходів Θ на даний момент є відкритим питанням, оскільки фізичні співвідношення зміни пошкоджуваності в залежності від зовнішніх умов і їх вплив на властивості матеріалів є до кінця не вивчені.

Приймемо, що оператор Θ є сукупністю двох множин:

$$\Theta = \langle \Theta^I, \Theta^{II} \rangle, \quad (3)$$

де Θ^I – правила переходів між станами A , Θ^{II} – оператор зв'язку між множинами A і B (Θ^{II} являє собою функціональну залежність властивостей матеріалу від пошкодженості).

Запишемо основні фізичні уявлення, які будуть використовуватися при запису оператора Θ [6]:

1. На величину пошкоджень впливають – поточний рівень пошкоджень, температура тіла, значення (величина) і вид напружено-деформованого стану, поточні властивості матеріалу, величина часового інтервалу, в якому діє даний вид навантаження.

2. Функціонально приріст пошкоджуваності має дві складові – детерміністичну і стохастичну, які залежать від перерахованих вище факторів. Природа стохастичної пошкоджуваності проявляється через стохастичну природу будови матеріалу, можливості фазових перетворень і неврахованості додаткових умов (стохастичність зовнішніх навантажень, вплив фізико-хімічних взаємодій і т.д.).

Подамо приріст пошкодженості у вигляді наступних операторних залежностей:

- для квазістатичних процесів:

$$\Delta\omega \sim (\omega(t), T(t), \hat{\sigma}(t), \langle B \rangle, p(t), \Delta t), \quad (4)$$

де $\Delta\omega$ – приріст пошкоджуваності в інтервалі $(t, t + \Delta t)$, $\omega(t)$ – поточний рівень пошкодженості, $T(t)$ – поточний рівень температури, $\hat{\sigma}(t)$ – поточне значення тензора напружень, $\langle B \rangle$ – множина, що описує поточне значення властивостей матеріалів, $p(t)$ – стохастична складова.

- для швидкісних динамічних процесів:

$$\Delta\omega \sim (\omega(t), T(t), \hat{\sigma}(t), \dot{T}(t), \dot{\hat{\sigma}}(t), \langle B \rangle, p(t), \Delta t), \quad (5)$$

де $\dot{T}(t)$, $\dot{\hat{\sigma}}(t)$ – швидкості зміни температури і напружень.

У термінології клітинних автоматів залежності (4) і (5) можна подати у вигляді:

$$\Theta = \begin{cases} \Theta^I : \{A, B, Z\} \rightarrow A \\ \Theta^{II} : \{A, B\} \rightarrow B \end{cases}. \quad (6)$$

3. Конкретизація і чисельне моделювання побудованих співвідношень

В якості прикладу побудови клітинного автомата розглянемо нелінійне кінетичне рівняння пошкоджуваності - рівняння Леметра [9] в його дискретному поданні:

$$\Delta\omega = D \left(\frac{\sigma}{1-\omega} \right)^k \frac{1}{(1-\omega)^q} \Delta t, \quad (7)$$

де $\Delta\omega$ – приріст пошкоджуваності, Δt – часовий інтервал, σ – рівень напружень, ω – поточний рівень пошкоджень, D , k , q – коефіцієнти, що визначаються експериментально.

В якості силової навантаження був запропонований «класичний» вигляд симетричною зовнішнього навантаження.

Дане навантаження, що викликає в тілі часову зміну напружено-деформованого стану, з позицій клітинних автоматів призводить до появи одночасно двох процесів - знеміцнення (утворення пошкодженості) і його заліковування. З позицій лінійної кінетичної теорії пошкодження ми маємо стандартну ситуацію - погіршення експлуатаційних характеристик тіла під дією зовнішніх впливів (рис. 1).

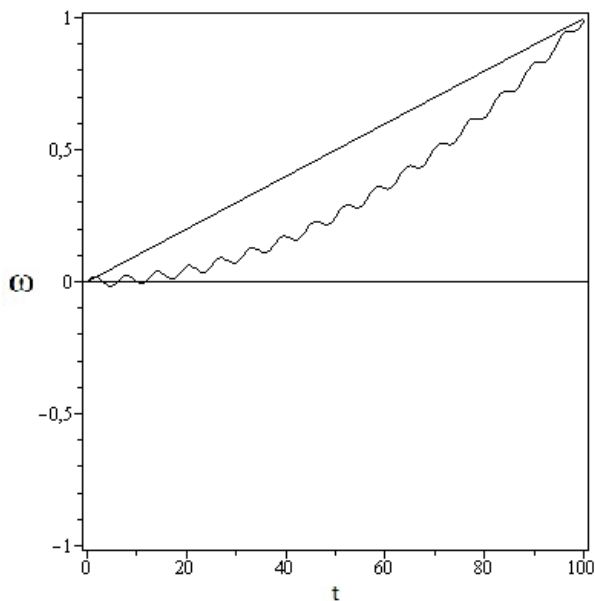


Рис. 1. - Якісний характер зміни пошкоджуваності в часі: ω - рівень пошкоджень, t - час (пряма лінія - розрахунок пошкоджуваності згідно лінійної кінетичної теорії, періодична зростаюча - розрахунок пошкоджуваності згідно з методологією клітинних автоматів).

Відзначимо, що показані шляхи моделювання життєвого циклу необхідно зіставляти з даними аналізу конкретних об'єктів, зокрема, за методикою, яка наведена в роботі [5].

Висновки.

1. Проаналізовано сучасний стан проблеми інтелектуально-методологічного забезпечення залізнично-транспортної експертизи.

2. З використанням сучасних підходів математичного та комп'ютерного моделювання запропоновано інженерну методику дослідження життєвого циклу деталей залізничної техніки, які найбільш схильні до виходу з ладу при експлуатації.

3. Запропонована методика комп'ютерного моделювання пошкоджуваності у випадках відсутності точної і достовірної інформації про характеристики життєвого циклу деталей рухомого складу є єдиною, яку можна реалізовувати при аналізі залізнично-транспортних пригод.

Література.

1. Кузін М.О. Побудова методики ретроспективного дослідження знеміцнення залізничних конструкцій на основі фрагментарно відображеної інформації/ М.О. Кузін, О.Ф. Курильова, Н.В. Гординська// Криміналістика и судебная экспертиза. Вып. 58, ч. 2. (Посвящается 100-летию Киевского научно-исследовательского института судебных экспертиз) – К.: Министерство юстиции Украины, 2013. – с. 471 – 473.

2. Лучко Й.Й., Ковальчук В.В. Вимірювання напружено-деформованого стану конструкцій мостів при змінних температурах і навантаженнях. – Львів: Каменяр, 2012. – 235 с.

3. Кузін М.О. Аналіз впливу адгезійно-деформаційної та теплофізичної складової фрикційної взаємодії на параметри працездатності трибологічних систем рухомого складу/ М.О. Кузін// Залізничний транспорт України. - 2012. - № 3/4. – с.23-27.

4. Прочность материалов и конструкций: Серия монографий/ Под общей редакцией В.Т. Трощенко. – К.: ИПП, 2009. Т. 2: Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия. – 2009. – 664 с.

5. Лебедев А.А. Оценка поврежденности конструкционных сталей по параметрам рассеяния характеристик твердости материалов в нагруженном и разгруженном состояниях/ А.А. Лебедев, В.П. Швец// Проблемы прочности. – 2008. - №3. - с. 29 –37.

6. Волков И.А. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями/ И.А. Волков, Ю.Г. Коротких. – М.: Физматлит, 2008. – 424 с.

7. Ляшенко Б.А. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости. – К.: ИПП, 2010. – 193 с.

8. Алексеев Д.В.. Моделирование кинетики накопления повреждений вероятностным клеточным автоматом/ Дмитрий Валентинович Алексеев, Галина Алексеевна Казунина// Физика твердого тела. – 2006. – т. 48, вып. 2. – с. 255 – 261.

9. Голуб В.П. Определяющие уравнения в нелинейной механике поврежденности/ В.П. Голуб // Прикладная механика. – 1993. – т. 29, № 10. – с. 37-49.