

УДК 343.148:625.032.82:539.3

М. О. Кузін, провідний науковий співробітник Львівського НДІСЕ, кандидат технічних наук,

Т. М. Мещерякова, доцент кафедри транспортних технологій Львівської філії Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені ак. В. Лазаряна, кандидат технічних наук, доцент,

О. А. Кузін, доцент кафедри прикладного матеріалознавства та обробки матеріалів Національного університету «Львівська політехніка», кандидат технічних наук, доцент,

О. Ф. Курильова, директор Львівського НДІСЕ, кандидат хімічних наук,

Н. В. Гординська, учений секретар Львівського НДІСЕ

ВИКОРИСТАННЯ ОБЕРНЕНИХ ЗАДАЧ МЕХАНІКИ В СУДОВІЙ ЗАЛІЗНИЧНО-ТРАНСПОРТНІЙ ЕКСПЕРТИЗИ

Розглянуто основні завдання судової залізнично-транспортної експертизи, що виникають при аналізі функціонування й руйнування конструкцій і деталей залізничного транспорту. Запропоновано модель утомного знеміцнення матеріалів, яка враховує утворення й кінетику розвитку пошкоджень, а також поширення тріщин під час дії зовнішніх навантажень. З використанням цих модельних уявлень розроблено методичний підхід до вирішення інженерно-практичних задач судової залізнично-транспортної експертизи.

Ключові слова: судова залізнично-транспортна експертиза, залізничні конструкції, знеміцнення, обернені задачі.

Становлення залізнично-транспортної експертизи в Україні пов'язане з діяльністю колективу Львівського НДІ судових експертиз, зокрема начальника відділу залізнично-транспортних досліджень, доктора технічних наук, професора Е. М. Сокола, за безпосередньою участю якого у період з 1995 по 2012 р. опубліковано понад 80 наукових праць (з них сім монографій), присвячених питанням судово-експертної діяльності в галузі дослідження залізнично-транспортних пригод. У цих роботах було закладено основні засади цього виду експертизи, встановлено об'єкт і предмет дослідження, уведено найбільш важливі означення, виокремлено основні експертні спеціальності та чітко визначено межі компетенції судового залізнично-транспортного експерта¹.

¹ Див.: Сокол Э. Н. Крушения железнодорожных поездов / Э. Н. Сокол. — К. : Феникс, 2009. — 376 с.

Загальним завданням цього виду судової експертизи є розкриття механізму залізнично-транспортної пригоди¹. При цьому основними напрямками розвитку залізнично-транспортної експертизи є такі.

1. Розв'язання діагностичних завдань. Дослідження технічного стану елементів інженерного обладнання верхньої і нижньої будов залізничної колії; дослідження технічного стану ходових частин і конструкцій рухомого складу залізничного транспорту; дослідження технічного стану елементів автоматики, телемеханіки, зв'язку та електропостачання залізниць.

2. Розв'язання ситуаційних завдань. Дослідження обставин залізнично-транспортної пригоди (взаємодії колії й рухомого складу, режиму ведення потяга, фактичних дій учасників залізнично-транспортної пригоди). Установлення (відтворення) реалізованого механізму (механізму-оригіналу) залізнично-транспортної пригоди, що фрагментарно (частково спотворено) відображений у матеріалах кримінальної справи; моделювання механізму залізнично-транспортної пригоди; установлення причини (сукупності причин) безпосереднього виникнення залізнично-транспортної пригоди.

Однією із важливих проблем, яка виникає при дослідженні функціонування залізнично-транспортних систем, є аналізування особливостей роботи елементів конструкцій залізничного транспорту, особливо фрикційних систем, при втраті ними міцнісних властивостей².

Згідно з відкритими науково-технічними джерелами вузли тертя на 80–90 % визначають ефективність роботи рухомого складу залізниць, а втрати на зношування в системі «коесо – рейка» складають від 10 до 30 % енергетичних ресурсів, що витрачаються на тягу потягів³. При цьому найбільший вплив на ймовірність аварій несамохідного рухомого складу мають: 1) стан ходових частин вагонів; 2) зазори в ковзунах і буксових пройомах; 3) знос фрикційних гасників коливань; 4) стан елементів системи «п'ятник – підп'ятник»; 5) зношування поверхонь кочення й гребенів коліс; 6) різниця діаметрів коліс і товщин гребенів однієї колісної пари; 7) зниження демпфірування.

При аналізуванні роботи залізничних трибосистем перед судовим експертом найчастіше постають такі питання:

1. Які властивості повинен мати поверхневий шар деталей, аби забезпечити задану довговічність роботи при відомих навантаженнях?

2. Чи забезпечуються параметри безпеки руху рухомого складу при заданих властивостях деталей і відомих зовнішніх впливах?

3. Яка послідовність причин призвела до знецінення деталей за відомою (найчастіше фрагментарною) інформацією про роботу конструкції та структуру матеріалів виробів, що були вилучені з експлуатації?

4. Чи була забезпечена відповідність властивостей деталей у початковий момент часу (до початку їх експлуатації) нормативним документам за відо-

¹ Див.: Сокол Э. Н. Железнодорожно-транспортное происшествие и его механизм / Э. Н. Сокол. — Львов : Паїс, 2011. — 376 с.

² Див.: Він же. Крушення залізничних поїздів. — С. 19.

³ Див., напр.: Прикладная трибология (трение, износ и смазка) / Под ред. Ю. Н. Дроздова. — М. : Эко-Пресс, 2010. — С. 475–476.

мою (або частково відомою) інформацією про роботу конструкції й параметри структури матеріалу наприкінці експлуатації?

Розв'язання таких завдань вимагає залучення підходів механіки деформованого твердого тіла та матеріалознавства. На даний час утомне знеміцнення розглядають як процес, що складається з таких стадій¹: 1) зародження й зростання мікроструктурно коротких тріщин; 2) зростання фізично малих тріщин і утворення макротріщин; 3) зростання макротріщини до повного руйнування тіла (рис. 1).

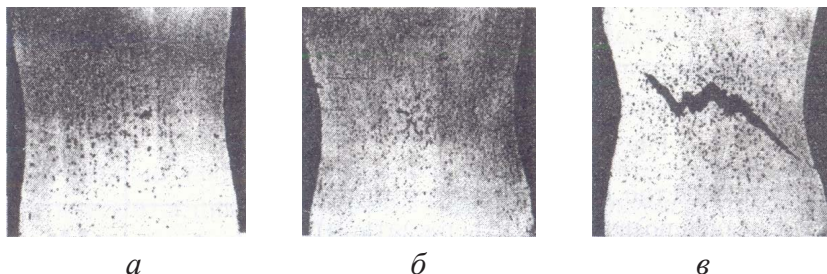


Рис. 1. Різні стадії втомного знеміцнення тіла

Урахування структурних змін у високонавантажених конструкціях рухомого складу в ході проведення судових залізнично-транспортних експертиз викликає необхідність трасолого-матеріалознавчих досліджень вузлів і деталей залізничного транспорту, предметом яких є вивчення сукупності траєкторій динамічних змін у структурі матеріалу залізничних конструкцій під впливом механічних, термічних, хімічних та інших видів навантаження, а також пошук зворотної в часі траєкторії зміни структурних параметрів матеріалу, яка задовольняє всім обмеженням, що накладаються на дану задачу.

Структура матеріалу є складним об'єктом для дослідження й може описуватися великою кількістю змінних².

З огляду на прикладну та інженерну спрямованість цієї роботи для описування динаміки структурних перетворень будемо використовувати лише одну змінну скалярної природи – пошкоджуваність. Фізичні методи вимірювання її змін розроблено А. О. Лебедєвим (метод LM-твердості)³.

Оскільки в практиці судової залізнично-транспортної експертизи перед експертами постають питання не прогнозування поведінки залізничних конструкцій, а встановлення механізму (сукупності причинно-наслідкових

¹ Див.: Волков И. А. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями / И. А. Волков, Ю. Г. Коротких. — М.: Физматлит, 2008. — С. 5–12.

² Див.: Волков И. А. Указ. праця. — С. 158–162.

³ Див.: 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 і судебна експертиза. — К., 2013. — Вып. 58, ч. 2. — С. 471–473.

зв'язків), який безпосередньо призводить до виникнення залізнично-транспортної пригоди, ці задачі належать до обернених зв'язаних задач механіки деформованого твердого тіла. Нині цей розділ механіки тільки починає розвиватись, і тому загальна методологія розв'язання подібних задач з позицій як механіки, так і математики відсутня.

Пропонуємо таку математичну модель утомного знеміцнення тіла, яка одночасно враховує поширення тріщин у матеріалі, у якому присутні роззяні пошкодження:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dl(x, \tau)}{d\tau} = K(l, \{M\}, \hat{\sigma}, T, \tau) \\ \frac{d\omega(x, \tau)}{d\tau} = f(\omega, \hat{\sigma}, T, \tau) \\ \{M(x, \tau)\} \equiv \{M(\omega)\} \end{array} \right. , \quad (1)$$

де $l(x, \tau)$ – траєкторія тріщини; $\{M\}$ – множина (сукупність) досліджуваних властивостей тіла; $\hat{\sigma}$ – тензор напружень; T – температура; τ – час; $\omega(x, \tau)$ – пошкоджуваність; $K(\dots)$ – функціонал, який відповідає за розвиток тріщин; $f(\dots)$ – функціонал, який відповідає за розвиток пошкоджуваності.

У прямій постановці задачі при відомих зовнішніх впливах і початкових умовах згідно з моделлю (1) необхідно встановити значення $l(x, \tau_{кін})$ і $\omega(x, \tau_{кін})$, де $K(\dots)$ – кінцевий час роботи конструкції.

В оберненій (ретроспективній) еволюційній постановці необхідно встановити функціонали $K(\dots)$ і $f(\dots)$ за відомими зовнішніми впливами та кінцевими значеннями цих величин.

Прийmemo, що змінні величини $l(x, \tau)$ і $\omega(x, \tau)$ належать своїм множинам: $l(x, \tau) \in L_0$, $\omega(x, \tau) \in W_0$, на яких задача (1) є умовно коректною (коректною за А. М. Тихоновим)¹. Також, користуючись фізичними, інженерними та практичними міркуваннями, перейдемо від пошуку точного вирішення задачі до пошуку квазірозв'язку за В. К. Івановим², який має задовольняти таким умовам:

$$K_{\delta}(\dots), f_{\delta}(\dots) : \left\{ \begin{array}{l} \left\| l(x, \tau_{кін}) - l_{\delta}(x, \tau_{кін}) \right\|_{L_0} \leq \varepsilon_1^{кін} \\ \left\| \omega(x, \tau_{кін}) - \omega_{\delta}(x, \tau_{кін}) \right\|_{W_0} \leq \varepsilon_2^{кін} \end{array} \right. , \quad (2)$$

де $K_{\delta}(\dots)$, $f_{\delta}(\dots)$ – квазірозв'язок даної еволюційної ретроспективної задачі; $l_{\delta}(x, \tau_{кін})$, $\omega_{\delta}(x, \tau_{кін})$ – розрахункові траєкторії тріщини та пошкоджень у кінцевий момент часу згідно з модельними уявленнями; $K_{\delta}(\dots)$,

¹ Див.: Ватульян А. О. Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела / А. О. Ватульян. — М. : Физматлит, 2007. — С. 16–28.

² Див.: Кабанихин С. И. Обратные и некорректные задачи / С. И. Кабанихин. — Новосибирск : Сибир. науч. изд-во, 2009. — С. 46.

$f_{\delta}(\dots), l(x, \tau_{кін}), \omega(x, \tau_{кін})$ – траєкторії тріщин і пошкоджень на момент замірів; $\|\dots\|$ – норма у відповідному просторі; $\varepsilon_1^{кін}, \varepsilon_2^{кін}$ – задана точність у кінцевий момент часу.

За наявності апріорної інформації про роботу конструкції на квазірозв'язок можуть бути накладено додаткові умови:

$$K_{\delta}(\dots), f_{\delta}(\dots): \begin{cases} \|l(x, \tau_i) - l_{\delta}(x, \tau_i)\|_{L_0} \leq \varepsilon_1^i \\ \|\omega(x, \tau_i) - \omega_{\delta}(x, \tau_i)\|_{W_0} \leq \varepsilon_2^i \end{cases}, \quad (3)$$

де $\tau_i \in [t_0, t_{кін}]$, τ_i – елементи часової осі, на яких виміряні параметри тріщин і пошкоджень; $\varepsilon_1^i, \varepsilon_2^i$ – задана точність у момент часу τ_i .

За наявності апріорної інформації різного рівня значущості систему (3) можна подати в такому вигляді:

$$\begin{cases} \rho_l = \sum_{i=1}^N \alpha_i \|l(x, \tau_i) - l_{\delta}(x, \tau_i)\|_{L_0} \rightarrow 0 \\ \rho_{\omega} = \sum_{i=1}^N \beta_i \|\omega(x, \tau_i) - \omega_{\delta}(x, \tau_i)\|_{W_0} \rightarrow 0 \end{cases}, \quad (4)$$

де α_i, β_i – нормовані рівні значущості інформації: $\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1, \sum_{i=1}^N \beta_i = 1$.

У більш узагальненому вигляді на основі систем (3) і (4), аналогічно як у роботі¹, запропонуємо такий функціонал, який за своїм видом, структурою й призначенням є еквівалентним регулятору Тихонова (R), що широко використовується при вирішенні обернених задач:

$$R = \rho_l + \rho_{\omega} \rightarrow 0. \quad (5)$$

Для ілюстрації наведених модельних уявлень розглянемо задачу про поширення дефектів типу тріщин у поверхневих шарах металічних систем, що мають неоднорідний розподіл властивостей. Для її вирішення використаємо метод скінчених елементів (варіаційна постановка задачі). При цьому була розроблена програма в середовищі Maple, за допомогою якої знаходяться розв'язки в переміщеннях, деформаціях і напруженнях. Роботу програми перевіряли на тестових прикладах, що були отримані з аналітичних розв'язків, які подані в класичних монографіях із контактних задач.

Приймемо, що механічні властивості матеріалів за глибиною змінюється згідно із законом:

$$f(z) = f_0 + f_1 e^{-h \cdot z}, \quad (6)$$

де f_0, f_1, h – сталі, характерні для утворення поверхневих шарів за відомих технологічних (експлуатаційних) впливів; z – віддаль у глибину поверхні матеріалу.

¹ Див.: Кабанихин С. И. Указ. прация. — С. 46.

При встановленні траєкторій поширення тріщин у механіці руйнування використовуються методи, які можна умовно розбити на дві групи: диференціальні (покрокові), засновані на локальних критеріях руйнування, та інтегральні (глобальні), засновані на критеріях, що виражені через інтеграли вздовж шуканої лінії.

Пропонуємо використовувати інтегральний критерій руйнування, згідно з яким траєкторія поширення тріщин проходить на ділянках, де напруження задовольняють співвідношенню критерію Писаренко-Лебедева:

$$\chi \sigma_i + (1 - \chi) P \sigma_1 = [R], \quad (7)$$

де $[R]$ – граничний рівень напружень; σ_i – головні напруження; χ – параметр, що характеризує міру участі в макроруйнуванні деформації зсуву (в'язкість матеріалу), і визначається як: $\chi = R_p / R_{cm}$, де R_{cm} , R_p – границя міцності при стискуванні і розтягуванні відповідно ($0 \leq \chi \leq 1$). Для крихких матеріалів $\chi = 0$, для в'язких $\chi = 1$; P – статистичний аспект міцності, який пов'язується з пошкоджуваністю.

Припустимо, що на момент замірів тріщина мала траєкторію $l(x, \tau)$. Установимо вплив параметру χ на траєкторію поширення тріщини. Знайдемо його згідно із співвідношенням

$$\chi : \|l(x, y) - l_p(x, y, \chi)\| \rightarrow 0, \quad (8)$$

де $l_p(x, y, \chi)$ – розрахункова траєкторія тріщин.

Для пошуку розв'язку параметра χ використовувався ітераційний метод, алгоритм якого наведено на рис. 2.

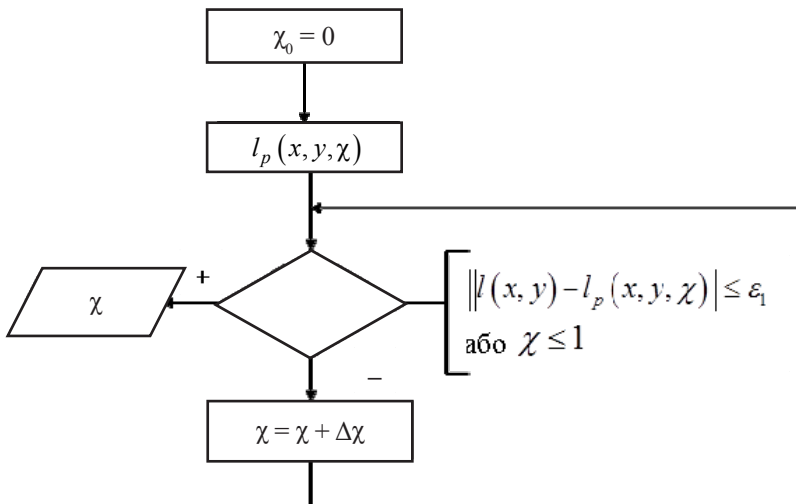


Рис. 2. Ітераційний алгоритм пошуку параметра χ , ε_1 – задана точність

У разі, якщо не існує такого параметра χ , який задовольняє умові $\chi : \|l(x, y) - l_p(x, y, \chi)\| \leq \varepsilon_1$, то слід використовувати інший критерій руйнування, а саме функціонали виду $l_p(x, y, \chi)$, наведені в роботі¹.

Таким чином, нами розроблено методичний підхід до описування втомного знеміцнення тіла як процесу одночасного поширення тріщин і розвитку пошкоджень. З використанням цього модельного уявлення запропоновано вирішувати інженерно-практичні завдання сучасної залізнично-транспортної експертизи зі встановлення еволюційного рівняння механізму руйнування деталей конструкцій рухомого складу, що дозволяє з'ясувати механізм залізнично-транспортної пригоди та надавати більш обґрунтовані відповіді на питання, які постають перед судовими експертами.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ В СУДЕБНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ ЭКСПЕРТИЗЕ

Кузин Н. О., Мещерякова Т. Н., Кузин О. А., Курилева Е. Ф., Гординская Н. В.

Рассмотрены основные задачи судебной железнодорожно-транспортной экспертизы, возникающие при анализе функционирования и разрушения конструкций и деталей железнодорожного транспорта. Предложена модель усталостного разупрочнения материалов, которая учитывает образование и кинетику развития повреждений, а также распространение трещин во время действия внешних нагрузок. С использованием этих модельных представлений разработан методический подход к решению инженерно-практических задач судебной железнодорожно-транспортной экспертизы.

Ключевые слова: судебная железнодорожно-транспортная экспертиза, железнодорожные конструкции, разупрочнение, обратные задачи.

THE USE OF INVERSE TASKS OF MECHANICS IN FORENSIC RAILROAD AND TRANSPORT EXAMINATION

Kuzin N. O., Meshcheriakova T. N., Kuzin O. A., Kuryliova O. F., Hordynska N. V.

The article deals with the main issues of expert studies that arise in tasks of a forensic railroad and transport examination. The article focuses on the processes of softening in the elements of the railroad transport structures. It suggests describing the fatigue failure as a multistage process resulting in considerable changes in the original properties of the material of the parts. In order to describe the dynamics of structural changes in the material of the parts in the process of their operation the article suggests evaluating them by their damageability, that, with the use of methods for inverse tasks of the deformed solid body mechanics, allows to establish the cause-and-effect relations directly resulting in railroad transport accidents. The article provides a mathematical model describing the softening of bodies, which accounts for crack propagation in materials with dispersed damageability. Based on this model and the use of software designed in Maple environment, the article provides a consideration of a task about crack propagation in surface layers of

¹ Див.: Писаренко Г. С. Опір матеріалів : підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квіт-ка, Е. С. Уманський. — К. : Вища шк., 2004. — 655 с.

metal systems with non-uniform property distribution. The suggested approaches allow for better grounded answers to questions that forensic experts face in the course of railroad and transport examinations.

Keywords: forensic railroad and transportation examination, railroad structures, softening, inverse tasks.

УДК 343.983:502.34

В. И. Уберман, ведущий научный сотрудник Харьковского НИИСЭ, кандидат технических наук

ПРИОРИТЕТЫ СУДЕБНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ И АРБИТРАЖНЫЙ ЭФФЕКТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Обоснована необходимость и предложен метод определения приоритетов судебной экологической экспертизы (СЭЭ). Введены характеристики арбитражного эффекта экологического контроля, проводимого Государственной экологической инспекцией Украины. Оценен эффект контроля в регионах Украины и по видам природных ресурсов. Выполнено ранжирование объектов окружающей природной среды и определены приоритеты разработки методик СЭЭ.

Ключевые слова: судебная экологическая экспертиза, экологический контроль, претензионная деятельность, результативность государственного контроля, убытки государства.

Основной проблемой новых видов судебной экспертизы: инженерно-экологической и экологической¹ (далее – СЭЭ), исследующих экологические ситуации, является неразработанность методического обеспечения. В силу большого разнообразия этих экспертиз, вызываемого различными объектами окружающей природной среды, условиями, способами и обстоятельствами природопользования, создание удовлетворительного методического инструментария и экспертных групп в короткие сроки невозможно, поскольку требует значительных ресурсов. Состояние современной украинской экономики не позволяет сосредоточить необходимый объем ресурсов в данной области судебно-экспертной деятельности. *Общая задача исследования заключается в объективном количественном обосновании приоритетных направлений поэтапного развития методического инструментария СЭЭ.* Решение этой задачи позволит эффективно распределить ограниченные временные, финансовые и интеллектуальные ресурсы, сосредоточить их на приоритетных объектах, рассматриваемых СЭЭ, обеспечить первоочередные потребности судебно-экспертной деятельности.

Первичными и определяющими для СЭЭ являются материалы проверок и обследований, полученные органами Государственной экологической

¹ См.: Про внесення змін до наказу Міністерства юстиції України від 08 жовтня 1998 р. № 53/5 : наказ Міністерства юстиції України від 26.12.2012 № 1950/5 [Електронний ресурс]. — Режим доступа : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0001-13>.