

УДК 629.488.25 «401»:629.463.3

А. Р. МІЛЯНИЧ^{1*}

^{1*}Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (067) 747 46 46, ел. пошта milyan_74@ukr.net, ORCID 0000-0003-3583-792X

ПОШКОДЖЕННЯ РОБОЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІНСТРУМЕНТУ, ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ ЗАТВЕРДІЛИХ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

Мета. Найбільша частина вантажних перевезень в Україні здійснюється залізничним транспортом. Державна статистика щорічних вантажних перевезень залізницями (січень-листопад) фіксує наступні дані: 2011 р. – 468 млн. т (108,2 % до 2010 р.); 2012 р. – 421,5 млн. т (98,5 % до 2011 р.); 2013 р. – 441,8 млн. т (96,6 % до 2012 р.). Незважаючи на щорічне зменшення обсягів вантажних перевезень, вагомий внесок при транспортуванні вантажів належить перевозкам у цистернах. Тому при експлуатації цистерн надзвичайно актуальним на сьогодні є подовження терміну їх довговічності. Сучасні уявлення про накопичення втомних пошкоджень в деталях рухомого складу залізничного транспорту ґрунтуються на моделях, які оцінюють довговічність металевих систем, залежно від умов навантажень. Ці моделі дозволяють з достатнім рівнем точності виконувати оцінку знеміцнення металевих систем в умовах багатоциклової втоми та за наявності пружних деформацій. Водночас, особливості поведінки контргіл ці моделі не враховують. Метою цієї роботи є побудова математичної моделі, яка дозволяє оцінювати довговічність робочих інструментів, що використовуються при очищенні затверділих органічних вантажів залізничних цистерн. **Методика.** З використанням сучасних підходів механіки деформованого твердого тіла було виконано аналіз впливу параметрів будови органічних речовин на довговічність високонавантажених елементів конструкцій. Введення в даній роботі співвідношення взаємодії пошкоджень відноситься, головним чином, до тих елементів конструкції інструменту, які, внаслідок впливу широкопоздовжових гауссівських випадкових навантажень, здійснюють коливання зі своїми резонансними або навоколорезонансними частотами. **Результати.** Вивчено вплив особливостей втомних навантажень на довговічність конструкції. Так, отримані результати свідчать про зростання пошкоджень, які вносяться циклами із малими амплітудами напружень, із-за нелінійного ефекту взаємодії робочого елемента інструменту з органічним матеріалом. Для наведеного прикладу була розрахована довговічність стомлюваності, яка, згідно уточненої оцінки, виявилась зниженою на 10...15 %. Зниження на 10 % відповідає максимальній амплітуді напруження 5σ , а зниження на 15 % – максимальній амплітуді 7σ . **Наукова новизна.** Аналітично показано, що параметри знеміцнення металевих систем пов'язані з кінетикою втомних пошкоджень, що накопичуються у металевих конструкціях під час зовнішніх навантажень. **Практична значимість.** Автором було запропоновано співвідношення, які дозволяють оцінювати залишковий ресурс деталі в умовах заданого послідовного багаторівневого циклічного навантаження.

Ключові слова: цикл; довговічність; пошкодження; втома; напруження; цистерни рухомого складу; залізничний транспорт

Вступ

Найбільша частина вантажних перевезень в Україні здійснюється залізничним транспортом. Державна статистика щорічних вантажних перевезень залізницями (січень-листопад) фіксує такі дані:

– 2011 р. – перевезення вантажів складають 468 млн т (108,2 % до 2010 р.); вантажооборот дорівнює 243 556,4 млн т/км (111,7 % до 2010 р.);

– 2012 р. – перевезення вантажів складають 421,5 млн т (98,5 % до 2011 р.); вантажооборот дорівнює 218 026,2 млн т/км (98,1 % до 2011 р.);

– 2013 р. – перевезення вантажів складають 441,8 млн т (96,6 % до 2012 р.); вантажооборот дорівнює 224 017,8 млн т/км (94,2 % до 2012 р.) [2].

Незважаючи на щорічне зменшення обсягів вантажних перевезень, вагоме значення під час транспортування вантажів належить перевезенням у цистернах. Тому при експлуатації цистерн надзвичайно актуальним на сьогодні є подовження терміну їх придатності.

Питання щодо подовження терміну експлуатації в деталях рухомого складу та безпечного перевезення вантажів у цистернах постійно до-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

сліджується українськими та іноземними вченими [1, 7–14]. Так, аналіз причин пошкодження залізничних цистерн, автоцистерн і контейнерів-цистерн, а також порівняння їхнього експлуатаційного «життя» досліджено німецькими вченими [14]. Розгляду компромісних рішень між ефективністю перевезень залізничними цистернами та забезпеченням їх безпечного транспортування присвячена робота американських дослідників [13]. Темі моделювання динамічних пошкоджень залізничних цистерн з використанням фізично мотивованої внутрішньої змінної пластичності присвячено публікацію [12]. Дослідження процесів втоми матеріалів під дією випадкової вібрації та їх аналіз стали провідними у публікаціях [1, 9–11]. Можливість постійного ознайомлення та обговорення варіантів конструктивних і технічних рішень, що дозволяють підвищити показники ефективності перевезень речовин в залізничних цистернах, надається вченим на сторінках наукового журналу «Наука та прогрес транспорту» [3, 6].

У той же час недостатньо дослідженою залишається проблема пластичного деформування, яка виникає внаслідок контактів органічного матеріалу із робочими елементами інструмента.

Мета

Сучасні уявлення про накопичення втомних пошкоджень в деталях рухомого складу залізничного транспорту ґрунтуються на моделях, які оцінюють довговічність металевих систем залежно від умов навантажень. Ці моделі дозволяють з достатнім рівнем точності виконувати оцінку знеміцнення металевих систем в умовах багатоциклової втоми та за наявності пружних деформацій. Водночас особливості поведінки контртілі ці моделі не враховують. Метою цієї роботи є побудова математичної моделі, яка дозволяє оцінювати довговічність робочих інструментів, що використовуються під час очищення затверділих органічних вантажів залізничних цистерн.

Методика

До виконання досліджень і роботи над цією статтею спонукав аналіз кількості залишків у залізничних цистернах застиглих органічних вантажів (рідкий пек, рідка сірка, капролактамі, паста сульфонола, суперфосфорна кислота, оле-

ум, жовтий фосфор, нафтобітум тощо), які перед повторним завантаженням необхідно видалити із порожнин котлів цистерн. Для виконання досліджень був вибраний матеріал пек, який після вивантаження рідкого пеку, залишався у цистерні у вигляді застиглого пеку, що підлягав видаленню, яке на практиці здійснювалось на промивально-пропарювальній станції (ППС) вагонного депо. Труднощі технологічного процесу видалення застиглого пеку в першу чергу полягали у складності руйнування його монолітності та порушення адгезійності із металом внутрішньої поверхні цистерни.

Відомо, що пек – тверда або в'язка маса чорного кольору, яка залишається від перегонки кам'яного вугілля, торф'яного або деревного дьогтю, сірки, смоли тощо. Він застосовується для виготовлення покривельного гідроізоляційного матеріалу, графітових електродів тощо.

На цей час для органічних матеріалів, яким властиві міцнісні та пружнісні характеристики, ще недостатньо розроблені, створені і впроваджені надійні методи, які дозволяють визначити умови руйнування таких матеріалів при складному напруженому стані. [8]. Потреби проектувальників задовольняли методи розрахунку умов пластичного руйнування при комбінованих навантаженнях. У цьому наданому дослідженні припускається, що енергія формозмінення є основою для опису пружно-пластичної поведінки застиглого органічного матеріалу у випадку, коли головні напруження за напрямом співпадають з осями матеріалу [5].

Введення у цій роботі співвідношення взаємодії пошкоджень відноситься головним чином до таких елементів конструкції інструменту, які внаслідок впливу широкосмугових гауссівських випадкових навантажень здійснюють коливання із своїми резонансними або навоколорезонансними частотами. При таких коливаннях напруження в робочих елементах є вузькосмуговим гауссівським випадковим процесом із наближеними до нуля середніми значеннями та із середньоквадратичним значенням σ . Густина ймовірності згинаючої кривої циклів (амплітуд) такого напруження наближено підпорядковується розподіленню Релея [4]. Такі закони зміни напружень за часом характеризуються незначною кількістю циклів напруження високої амплітуди порівняно із циклами невеликих амплітуд [9]. Цикл високої амплітуди призво-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

дить до перевантаження, тобто до підвищення деформації. Зв'язок між ефектами від таких циклів і більш частіших циклів менших амплітуд є причиною так званого явища послідовності (або чергування циклів) навантаження [11].

Максимальний пік напружень та модифіковане правило лінійного додавання. Величина максимального піку S_m вузькосмугових гауссівських випадкових напружень залежить від ширини спектра напруження та від тривалості навантаження. Чим ширшим є спектр напруження і тривалішим є процес навантаження, тим більшим є величина S_m . Типове значення S_m в 4...7 разів переважає σ [11].

Далі покажемо, як запропонована Морроу модель взаємодії [1], пов'язаної із роботою пластичного деформування, і відповідне правило додавання поширюється на ситуацію вузькосмугових гауссівських випадкових напружень. Пошкодження D_S від піку напружень S визначається:

$$D_S = \frac{n_S}{N_S} \left(\frac{S}{S_m} \right)^d, \quad (1)$$

де n_S – кількість циклів напруження з амплітудою S ; N_S – кількість циклів до руйнування при амплітуді напружень S ; d – показник роботи пластичного деформування.

Зауважимо, що $S \leq S_m$ і що (n_S/N_S) є відношення, яке використовується у правилах лінійного додавання. Ефект накопичення пошкоджень описується інтегруванням нелінійної функції (1) по всім рівням амплітуд напруження до S_m . Умова руйнування виражатиметься:

$$\int_0^{S_m} D_S dS = 1 \quad (2)$$

Співвідношення (1) і (2) будемо називати запропонованим модифікованим правилом лінійного додавання.

Опис методики аналізу. Довговічність стомленістю, тобто очікувана кількість циклів до руйнування N_M , можна встановити на основі запропонованого модифікованого правила лінійного додавання шляхом підстановки в (1) і (2) параметрів вузькосмугових гауссівських випадкових напружень. Внаслідок цього отримується степенева залежність довговічності від σ .

Крім того, виведена масштабована густина ймовірності руйнувань $G(S)m$, яка характеризує розподілення пошкоджень від кожного циклу напруження.

Висновок залежності довговічності від напруження. Позначимо:

$$l = S_m / \sigma, \quad (3)$$

$$P(S) = n_S / N_M, \quad (4)$$

де $P(S)$ – доля циклів напружень з амплітудою S ; n_S – кількість таких циклів; N_M – середня кількість циклів до руйнування.

Підставивши прийняті вирази в (1), отримуємо:

$$D_S = \frac{P(S)}{N_S} N_M \left(\frac{S}{l\sigma} \right)^d. \quad (5)$$

Зауважимо, що при $d = 0$ ця функція пошкодження відповідає правилу лінійного додавання.

Враховуємо вирази (2) і (5) у процесі руйнування:

$$1 = \int_0^{S_m} D_S dS = \frac{N_M}{(l\sigma)^d} \int_0^{l\sigma} S^d \frac{P(S)}{N_S} dS, \quad (6)$$

$$N_M = \frac{(l\sigma)^d}{\int_0^{l\sigma} S^d \frac{P(S)}{N_S} dS} \quad (7)$$

Якщо напруження є вузькосмуговим гауссівським випадковим процесом, то густина ймовірності огинаючих амплітуд $P(S)$ підпорядковується розподіленню Релея [4]:

$$P(S) = \frac{S}{\sigma^2} \exp \left[-\frac{S^2}{2\sigma^2} \right], \text{ де } S \geq 0, \quad (8)$$

причому $P(S) = 0$ при $S < 0$.

Застосовуємо рівняння кривої стомленості $S - N$ при синусоїдальному напруженні

$$N_S = \left[\frac{S}{2^{-1/\beta} \sigma_f'} \right]^{-\beta}, \quad (9)$$

$$\beta = -1/b, \quad (10)$$

де σ_f' , β та b – параметри стомленої міцності органічного матеріалу при циклічному навантаженні.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Після чого отримуємо:

$$N_M = \frac{(l\sigma)^d}{\frac{2}{\sigma^2 \sigma_f \beta} \int_0^{l\sigma} S^{1+\beta+d_e-S^2/2\sigma^2} dS}, \quad (11)$$

звідки:

$$N_M = H_M \sigma^{-\beta}, \quad (12)$$

$$H_M = \frac{\sigma_f \beta}{l^{-d} \left[2^{1+\beta/2+d/2} \right] \gamma \left[\left(1 + \frac{\beta}{2} + \frac{d}{2} \right) \frac{l^2}{2} \right]}, \quad (13)$$

де $\gamma(\alpha, \tau)$ – неповна гамма – функція [5]

$$\gamma(\alpha, \tau) = \int_0^\tau x^{\alpha-1} e^{-x} dx. \quad (14)$$

Формулу (12) можна переписати таким чином:

$$\sigma = \tilde{C}_M N_M^{-1/\beta}; \quad (15)$$

$$\tilde{C}_M = H_M^{1/\beta}. \quad (16)$$

Вирази (12) і (13) разом із (15) та (16) визначають шукану залежність довговічності стомленістю від σ .

При застосуванні правила лінійного додавання слід приймати $d = 0$. Тоді вираз (13) матиме такий вигляд:

$$H_L = \sigma_f \beta \left\{ \left[2^{1+\beta/2} \right] \gamma \left[\left(1 + \frac{\beta}{2} \right) \frac{l^2}{2} \right] \right\}^{-1}, \quad (17)$$

де індексом L позначені результати, які ґрунтуються на основі правила лінійного додавання та отримані при $d = 0$ [1].

Для очікуваної (середньої) довговічності N_L отримуємо:

$$N_L = H_L \alpha^{-\beta}, \quad (18)$$

$$\frac{N_M}{N_L} = \frac{H_M}{H_L} = \left[\frac{1}{l^{-d/2}} \right] \left\{ \frac{\gamma \left[\left(1 + \beta/2 \right) \left(l^2/2 \right) \right]}{\gamma \left[\left(1 + \beta/2 + d/2 \right) \left(l^2/2 \right) \right]} \right\}. \quad (19)$$

Згідно з виразами (6) та (11)

$$N_M \int_0^\infty G(S)_M dS = 1, \quad (20)$$

$$G(S)_M = \left[\frac{2^{1/\beta}}{\sigma^2 \sigma_f \beta} \right] \left(\frac{1}{l\sigma} \right)^d S^{1+\beta+d_e-S^2/2\sigma^2}. \quad (21)$$

У цих виразах $G(S)_M$ – масштабована густина ймовірності пошкоджень D_S із нормуючим множником N_M .

Підставивши в останній вираз (21) значення $d = 0$, визначаємо масштабовану густину ймовірності пошкодження $G(S)_L$ згідно з правилом лінійного додавання:

$$\frac{G(S)_M}{G(S)_L} = \left(\frac{S}{S_M} \right)^d. \quad (22)$$

Результати

Автором досліджено вплив особливостей втомних навантажень на довговічність конструкції.

Розглянемо як приклад такі параметри. Нехай задано:

$$\sigma_f = 1\,152 \text{ МПа}; \quad \beta = 9,65; \quad d = -0,207.$$

Визначимо N_M/N_L при $l = 3, 5$ і 7 та побудуємо графіки $G(S)_M$ і $G(S)_L$ при $l = 5$.

Розрахунки виконуються згідно з наведеними виразами (12)...(22), результати яких подають:

l	N_M/N_L
3	0,97
5	0,90
7	0,85

Отримані результати свідчать про зниження розрахункової оцінки довговічності на (10...15) %.

S	S/S_m	$G(S)_M/G(S)_L$
σ	0,2	1,40
2σ	0,4	1,21
3σ	0,6	1,11
4σ	0,8	1,05
5σ	1,0	1,00

Отримані результати в той же час свідчать про зростання пошкоджень, які вносяться циклами із малими амплітудами напружень, із-за нелінійного ефекту взаємодії робочого елемента інструменту з органічним матеріалом.

На рис. 1 наведені масштабовані густини ймовірностей пошкоджуваностей, визначені

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

правилами лінійного та нелінійного додавання. Зауважимо, що найбільше пошкоджень виникають циклами напружень з амплітудою від 2σ до 5σ . Цикли з амплітудою вище 5σ можуть викликати дуже значні пошкодження; однак такі цикли, якщо і виникають, то дуже рідко. Цикли з амплітудою менше 2σ виникають доволі часто, однак будь-яких значних пошкоджень не спричиняють. Максимум пошкоджень у наведеному прикладі припадає на цикли з амплітудою $3,23\sigma$.

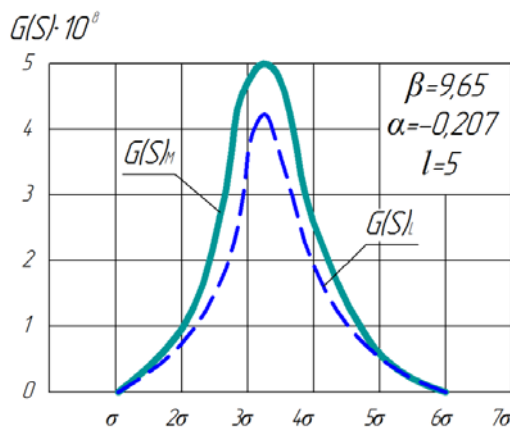


Рис. 1. Масштабована густина ймовірності пошкоджень згідно з правилом лінійного та нелінійного додавання

Fig. 1. Scalable density of damage probability according to the rules of linear and nonlinear addition

Таким чином, на прикладі цієї моделі було розраховано довговічність стомлюваністю, яка згідно з уточненою оцінкою виявилась зниженою на (10...15)%. Зниження на 10% відповідає максимальній амплітуді напруження 5σ , а зниження на 15% – максимальній амплітуді 7σ .

Криві напруження – довговічність експлуатації в логарифмічних координатах мають однаковий кутовий коефіцієнт.

Густина ймовірності пошкоджень ілюструє вплив нелінійної взаємодії на різних рівнях взаємодії; найбільше підвищення рівня руйнування за рахунок цього ефекту спостерігається в області малих амплітуд напруження. Основна частина пошкоджень утворюється циклами напружень з амплітудою від 2σ до 5σ .

Побудована математична модель дозволяє оцінювати довговічність робочих інструментів, що використовуються під час очищення затверділих органічних вантажів залізничних цистерн.

Наукова новизна та практична значимість

У виконаному автором дослідженні було аналітично наведено, що параметри знеміцнення металевих систем пов'язані з кінетикою втомних пошкоджень, що накопичуються у металевих конструкціях під час зовнішніх навантажень. Запропоновані автором співвідношення, які дозволяють оцінювати залишковий ресурс деталі в умовах заданого послідовного багаторівневого циклічного навантаження, дозволять подовжити термін експлуатації деталей рухомого складу та забезпечити безпечне перевезення вантажів у цистернах на залізничному транспорті.

Висновки

В результаті виконаного дослідження було встановлено, що існують способи очистки цистерн від залишків застиглих органічних вантажів, які перед повторним завантаженням необхідно видалити із порожнин котлів цистерн.

Автор запропонував методику встановлення впливу фізико-механічних характеристик органічних речовин на довговічність високонавантажених елементів інструменту руйнування та видалення залишків застиглого пеку з котлів залізничних цистерн.

Запропоновані співвідношення дозволять оцінювати залишковий ресурс робочих елементів інструменту в умовах ефективного технологічного навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрейків, О. Є. Розрахункова модель зародження втомних тріщин біля наводненого вирізу / О. Є. Андрейків, Д. В. Рудавський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 5. – С. 63–66.
2. Вантажні перевезення. Статистична інформація [Електронний ресурс] / Державна служба статистики України. – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua/>. – Назва з екрана. – Перевірено : 15.06.2014.
3. Воропай, В. С. Разработка метода принятия решения относительно вагона-цистерны с истекшим назначенным сроком службы в условиях окончания III стадии жизненного цикла / В. С. Воропай // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 201–204.
4. Ибагуллин, Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев :

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- монографія / Д. Ибатуллин. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.
5. Куліченко, А. Я. Вплив методу термомеханічної очистки котлів залізничних цистерн на ймовірність розтріскування поверхневого шару металу / А. Я. Куліченко, В. В. Ковальчук // Зб. наук. пр. Донецького ін-ту залізн. трансп. – Донецьк, 2012. – Вип. 29. – С. 228–234.
 6. Куліченко, А. Я. Теорія руйнування ортотропних матеріалів у вигляді залишків застиглої пеку в котлах залізничних цистерн / А. Я. Куліченко, А. Р. Мілянчик // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 41. – С. 64–70.
 7. Пительгузов, Н. А. Особенности технологических операций подготовки цистерн при перевозке химически опасных грузов / Н. А. Пительгузов, Т. Б. Ивченко, В. В. Федорченко // Вісн. Східноукраїн. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2011. – № 6. – С. 135–139.
 8. Hess, G. Tank car travails: Regulators mull new safeguards for railcars that carry liquid hazardous materials / G. Hess // Chemical and Engineering News. – 2013. – № 91 (41). – P. 27–28.
 9. Lambert, R. G. Analysis of Fatigue Under Random Vibration / R. G. Lambert // The Shock and Vibration Bulletin. – 1976. – № 46 (3). – P. 55–72.
 10. Lambert, R. G. Computation Methods. Technical Report AD A 103211 / R. G. Lambert. – Alexandria : Defense Technical Information Center, Mar. 1980. – P 57–74.
 11. Lambert, R. G. Fracture Mechanics Applied to Step-Stress Fatigue Under Sine/Random Vibration / R. G. Lambert // The Shock and Vibration Bulletin. – 1978. – № 48 (3). – P. 93–101.
 12. Modeling the Dynamic Failure of Railroad tank cars using a physically motivated internal state variable plasticity/damage nonlocal model / F. R. Ahad, K. Enakoutsa, K. N. Solanki et al. // Modelling and Simulation in Engineering. – 2013. – Vol. 2013. – 11 p. doi: 10.1155/2013/815158.
 13. Saat, M. R. Generalized railway tank car safety design optimization for hazardous materials transport: Addressing the trade-off between transportation efficiency and safety / M. R. Saat, C. P. L. Barkan // J. of Hazardous Materials. – 2011. – № 189 (1–2). – P. 62–68. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.136.
 14. Weltshev, M. Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage / M. Weltshev, S. Schwarzer, F. Otremba // Chemical Engineering Transactions. – 2013. – № 31. – P. 559–564. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.13610.3303/CET1331094.

А. Р. МИЛЯНИЧ^{1*}

^{1*}Каф. «Подвижной состав и путь», Львовский филиал Днепрпетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич, 12а, Львов, Украина, 79052, тел. +38 (067) 747 46 46, эл. почта milyan_74@ukr.net, ORCID 0000-0003-3583-792X

ПОВРЕЖДЕНИЯ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНСТРУМЕНТА, СВЯЗАННЫХ С ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ЗАТВЕРДЕВШИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Цель. Наибольшая часть грузовых перевозок в Украине совершается железнодорожным транспортом. Государственная статистика ежегодных железнодорожных грузовых перевозок (январь–ноябрь) фиксирует следующие данные: 2011 г. – 468 млн. т (108,2 % до 2010 г.); 2012 г. – 421,5 млн. т (98,5 % до 2011 г.); 2013 г. – 441,8 млн. т (96,6 % до 2012 г.). Несмотря на ежегодное уменьшение объемов грузовых перевозок, весомый вклад при транспортировке грузов принадлежит перевозкам в цистернах. Именно поэтому при эксплуатации цистерн сегодня очень актуальным является продолжение термина их долговечности. Современные представления о накоплении усталостных повреждений в деталях подвижного состава железнодорожного транспорта основываются на моделях, оценивающих долговечность металлических систем в зависимости от условий нагрузок. Эти модели позволяют с достаточным уровнем точности выполнять оценку разупрочнения металлических систем в условиях многоциклового утомления и при наличии упругих деформаций. В то же время, особенности поведения контртел эти модели не учитывают. Целью этой работы является построение математической модели, позволяющей оценивать долговечность рабочих инструментов, которые используются при очищении затвердевших органических грузов железнодорожных цистерн. **Методика.** С использованием современных подходов механики деформированного твердого тела был произведен анализ влияния параметров строения органических веществ на долговечность большегрузных элементов конструкций. Введение в данной работе соотношения взаимодействия повреждений относится, главным образом, к тем элементам

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

конструкции инструмента, которые, вследствие влияния широкополосных гауссовских случайных нагрузок, совершают колебания со своими резонансными или околорезонансными частотами. **Результаты.** Изучено влияние особенностей усталостных нагрузок на долговечность конструкции. Так, полученные результаты свидетельствуют о росте повреждений, которые вносятся циклами с малыми амплитудами напряжений, из-за нелинейного эффекта взаимодействия рабочего элемента инструмента с органическим материалом. Для приведенного примера была рассчитана долговечность утомляемостью, которая, согласно уточненной оценке, оказалась пониженной на 10...15 %. Снижение на 10 % соответствует максимальной амплитуде напряжения 5σ , а снижение на 15 % – максимальной амплитуде 7σ . **Научная новизна.** Аналитически показано, что параметры разупрочнения металлических систем связаны с кинетикой усталостных повреждений, которые накапливаются в металлических конструкциях при внешних нагрузках. **Практическая значимость.** Автором были предложены соотношения, которые позволяют оценивать остаточный ресурс детали в условиях заданной последовательной многоуровневой циклической нагрузки.

Ключевые слова: цикл; долговечность; повреждения; усталость; напряжения; цистерны подвижного состава; железнодорожный транспорт

A. R. MILIANYCH^{1*}

^{1*}Dep. «Rolling Stock and Track», Lviv Branch of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych St., 12a, Lviv, Ukraine, 79052, tel. +38 (067) 747 46 46, e-mail milyan_74@ukr.net, ORCID 0000-0003-3583-792X

OPERATING ELEMENTS DAMAGE OF TOOLS CONNECTED WITH THE PLASTIC DEFORMATION OF HARDENED ORGANIC COMPOUNDS

Purpose. Most of the freight traffic in Ukraine is made by railway transport. Government statistics of annual railway freight traffic (January–November) records the following data: 2011 - 468 million tons (108.2% to 2010); 2012 – 421.5 million tons (98.5% to 2011); 2013 – 441.8 million tons (96.6% by 2012). Despite the annual decrease of freight traffic volumes, a significant contribution during the freight traffic belongs to transportation in tanks. That is why the term of their service life extension is very topical today at the operation of tanks. Modern ideas about the accumulation of fatigue damages in the details of railway vehicles are based on models that assess the service life of metallic systems, depending on the load conditions. These models with sufficient accuracy let carry out an assessment of softening of metallic systems in high-cycle fatigue conditions and at the presence of elastic deformation. At the same time, peculiarities of counterbodies' behavior these models do not take into account. The purpose of this paper is to construct a mathematical model to evaluate the durability of the operating tools, which are used in the purification of solidified organic cargo of tank cars. **Methodology.** With the use of modern approaches of deformed solid body mechanics the parameters impact of organic substances structure on the service life of heavy structural elements was analyzed. We present the interaction of damages ratio in this article. It relates mainly to those elements of the tool structure, which due to the influence of broadband Gaussian random loadings oscillate with their resonant or near-resonant frequencies. **Findings.** The influence of the fatigue loads features on the structure durability was studied. Thus, the obtained results suggest the increase of damages that are entered with low-amplitude cycles of strain, because of the nonlinear effect of the interaction between instrument operational elements with organic material. For the given example durability with fatigue which, according to an updated assessment, had been reduced by 10...15% was calculated. A decrease of 10% corresponds to the maximum amplitude of the voltage 5σ , and a decrease of 15% - the maximum amplitude 7σ . **Originality.** It is analytically shown that parameters of the metallic systems softening are connected with the kinetics of fatigue damages that accumulate in the metal structures under external loads. **Practical value.** Authors have proposed correlation that allows estimating the residual life of the part in conditions of a given sequence of multilevel cyclic loading.

Keywords: cycle; durability; damages; fatigue; voltage; tanks of rolling stock; railway transport

REFERENCES

1. Andreikiv O.Ye., Rudavskiy D.V. Rozrakhunkova model zarodzhennia vtomnykh trishchyn bilia navodnoho vyrizu [The computational model of fatigue cracks nucleation near flood cutout]. *Fiziko-khimichna mekhanika materialiv – Physics and chemical mechanics of materials*, 2004, no. 5, pp. 63-66.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

2. *Vantazhni perevezennia. Statystychna informatsiia* [Freight traffic. Statistic information]. Available at: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (Accessed 15 June 2014).
3. Voropay V.S. Razrabotka metoda prinyatiya resheniya otnositelno vagona-tsisterny s istekshim naznachennym srokom sluzhby v usloviyakh okonchaniya III stadii zhiznenogo tsikla [Development of a method to make decision concerning the tank-car with the assigned expired lifetime in terms of final III-rd stage of the life cycle]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznichnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 201-204.
4. Ibatullin D. *Kinetika ustalostnoy povrezhdayemosti i razrusheniya poverkhnostnykh sloyev* [Kinetics of damage and fatigue fracture surface layers]. Samara, SSTU Publ., 2008. 387 p.
5. Kulichenko A.Ya., Kovalchuk V.V. Vplyv metodu termomekhanichnoi ochystky kotliv zaliznychnykh tsystem na ymovirnist roztriskuvannya poverkhnovoho sharu metalu [Effect of thermomechanical treatment method of railway tanks boilers on the cracking probability of the surface layer of the metal]. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu* [Proc. of Donetsk Institute of Railway Transport], 2012, issue 29, pp. 228–234.
6. Kulichenko A.Ya., Milianych A.R. Teoriia ruinuvannya ortotropnykh materialiv u vyhliadi zalyshkiv zastyhloho peku v kotlakh zaliznychnykh tsystem [Theory of failure of orthotropic materials in the form of a frozen pitch residues in boilers tanks]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznichnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 41, pp. 64-70.
7. Pitelguzov N.A., Ivchenko T.B., Fedorchenko V.V. Osobennosti tekhnologicheskikh operatsiy podgotovki tsistem pri perevozke khimicheskii opasnykh tovarov [Technological features of the tanks preparation during transportation of chemically dangerous goods]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia* [Bulletin of V. Dahl East-European National University], 2011, no. 6, pp. 135-139.
8. Hess G. Tank car travails: Regulators mull new safeguards for railcars that carry liquid hazardous materials. *Chemical and Engineering News*, 2013, no. 91 (41), pp. 27-28.
9. Lambert R.G. Analysis of Fatigue Under Random Vibration. *The Shock and Vibration Bulletin*, 1976, no. 46 (3), pp. 55-72.
10. Lambert R.G. Computation Methods. Technical Report AD A 103211. Alexandria, Defense Technical Information Center Publ., Mar. 1980, pp. 57-74.
11. Lambert R.G. Fracture Mechanics Applied to Step-Stress Fatigue Under Sine/Random Vibration. *The Shock and Vibration Bulletin*, 1978, no. 48 (3), pp. 93-101.
12. Ahad F.R., Enakoutsu K., Solanki K.N., Tjiptowidjojo Y., Bammann D.J. Modeling the Dynamic Failure of Railroad tank cars using a physically motivated internal state variable plasticity/damage nonlocal model. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2013, vol. 2013, 11 p. doi: 10.1155/2013/815158.
13. Saat M.R., Barkan C.P.L. Generalized railway tank car safety design optimization for hazardous materials transport: Addressing the trade-off between transportation efficiency and safety. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, no. 189 (1–2), pp. 62-68. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.136.
14. Weltshev M., Schwarzer S., Otremba F. Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage. *Chemical Engineering Transactions*, 2013, no. 31, pp. 559-564. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.13610.3303/CET1331094.

Стаття рекомендована до публікації к.т.н., доц. М. О. Кузінім (Україна); д.т.н., проф. В. В. Артемчуком (Україна)

Надійшла до редколегії: 20.06.2014

Прийнята до друку: 20.09.2014