

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 629.45|.46.02:539.3

А. Я. КУЛІЧЕНКО<sup>1</sup>, М. О. КУЗІН<sup>1\*</sup>, Л. І. ВАКУЛЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, 79052, Львів, Україна, тел. +38 (093) 741 51 27, ел. пошта kulan47@mail.ru

<sup>1\*</sup>Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, 79052, Львів, Україна, тел. +38 (050) 170 28 18, ел. пошта n\_kuzin@mail.ru

<sup>2</sup>ДП «Придніпровська залізниця», пр. Карла Маркса, 108, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (095) 795 81 24, ел. пошта vakulenko\_leonid@mail.ru

## НАКОПИЧЕННЯ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ ВАГОНІВ ЗГІДНО З КРИТЕРІЄМ ПИТОМОЇ ЕНЕРГІЇ ПОВНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

**Мета.** Сучасні уявлення про накопичення втомних пошкоджень у деталях рухомого складу залізничного транспорту ґрунтуються на моделях, які оцінюють довговічність металевих систем залежно від кількості циклів та розмаху деформацій або напружень. Ці моделі дозволяють з достатнім рівнем адекватності виконувати оцінку знеміцнення металевих систем в умовах багатоциклової втоми та за наявності тільки пружних деформацій у деталях рухомого складу. Водночас можливість появи пластичних деформацій при роботі залізничних транспортних конструкцій у них не враховується. Метою цієї роботи є побудова математичної моделі, яка дозволяє оцінювати довговічність металевих систем з урахуванням появи пластичної складової в процесі деформування деталей рухомого складу залізничного транспорту. **Методика.** З використанням сучасних підходів механіки деформованого твердого тіла було виконано аналіз впливу параметрів пластичних деформацій на довговічність високонавантажених елементів конструкцій. **Результати.** Вивчено вплив пружного та пластичного деформування на розсіяння енергії під час циклічного навантаження. **Наукова новизна.** Аналітично показано, що параметри знеміцнення металевих систем пов'язані з повною енергією деформації, яка характеризує особливості деградаційних процесів у металевих конструкціях під час зовнішніх навантажень. **Практична значимість.** Запропоновано співвідношення, які дозволяють оцінювати залишковий ресурс деталі в умовах заданого послідовного багаторівневого циклічного навантаження.

*Ключові слова:* цикл; деформація; пошкодження; втома; енергія

### Вступ

У наукових працях низки дослідників [2, 5, 9] аналіз результатів експериментальних досліджень з питання вивчення втоми матеріалу в основному був спрямований на те, щоб встановити зв'язок між характеристиками довговічності (залежно від кількості циклів  $N_f$ ) та амплітудою деформації або напруження. Отримані при цьому криві, які прийнято називати  $S-N$ -кривими і які широко застосовуються в розрахунковій практиці, не відображають процесу накопичення пошкоджень матеріалу деталей і конструкцій, зокрема, у деталях рухомого складу залізничного транспорту, які здебільшого експлуатуються в доволі складних умовах. Тому як альтернативний підхід була запропонована ідея встановлення зв'язку між втомою і довговічністю та роботою пластичної деформації протягом одного циклу напруження [10].

Однак при зменшенні розмаху циклічної деформації  $\Delta \epsilon$  її пластична складова  $\Delta \epsilon^p$  прямує до нуля. Таким чином, для випадку багатоциклової втоми слід приймати інший критерій руйнування.

### Мета

Метою статті є виклад результатів систематичного дослідження питомої енергії циклічної деформації, яка впливає в процесі активної експлуатації на хребтову балку залізничних цистерн, що виготовляється як складальна зварна конструкція, основним несучим елементом якої є швелер № 30 із матеріалу Сталь 30 (ГОСТ 1050-88).

Відомі дослідження [8, 9], спрямовані на встановлення втомної довговічності матеріалу із значними розмахами деформації або напруженнями. Математичний вираз результатів для

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

випадку малоциклової втоми при симетричному навантаженні з розгляду деформації можна записати таким чином:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon^e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon^p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \varepsilon'_f N_f^c, \quad (1)$$

де  $\Delta \varepsilon^e$  – пружна складова розмаху деформації;  $\sigma'_f$  – коефіцієнт міцності від утомленості;  $E$  – модуль Юнга;  $N_f^b$ ,  $N_f^c$  – кількість циклів до руйнування, де показники  $b$  і  $c$  вказують відповідно на міцність від утомленості при пружному та пластичному деформуванні;  $\varepsilon'_f$  – коефіцієнт пластичності міцності від утомленості для одного циклу напруження.

Апроксимацію для неконтрольованого напруження можна записати в такому вигляді:

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = E \frac{\Delta \varepsilon^e}{2} = \sigma'_f N_f^b. \quad (2)$$

У деяких зарубіжних наукових публікаціях [11, 12] наводиться зв'язок втомної довговічності з енергією пластичної деформації, яка поглинається протягом одного циклу. Для опису характеристик втоми матеріалу використано співвідношення вигляду

$$\Delta W^p = K' N_f^{\alpha'}, \quad (3)$$

де  $\Delta W^p$  – пластична складова питомої енергії циклічної деформації;  $K'$  – енергетичний коефіцієнт.

Перевага енергії пластичної деформації  $\Delta W^p$ , яка розсіюється за один цикл, полягає в тому, що вона залишається майже постійною протягом усього періоду навантаження на матеріал хребтової балки. Однак при зменшенні розмаху деформації  $\Delta \varepsilon$  маємо  $\Delta \varepsilon^p \rightarrow 0$ , що відповідає енергії пластичної деформації  $\Delta W^p \rightarrow 0$ . Тому вважається, що пошкодження, викликані циклічним навантаженням, залежать від поглинання енергії пластичної деформації і в тій частині енергії пружної деформації, яка сприяє утворенню й росту тріщин. Таким чином, необхідно встановити як пружну, так і пластичну складові енергії деформацій, які припадають на один цикл деформування

$$\Delta W^t = \Delta W^p + \Delta W^e, \quad (4)$$

де  $\Delta W^t$  – питома енергія повної деформації;  $\Delta W^e$  – пружна складова питомої енергії деформації.

Величини енергії деформацій, які пов'язані із накопиченням пошкоджень і показані на рис. 1, мають розмах циклічного напруження  $\Delta \sigma$ , рівний  $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ .

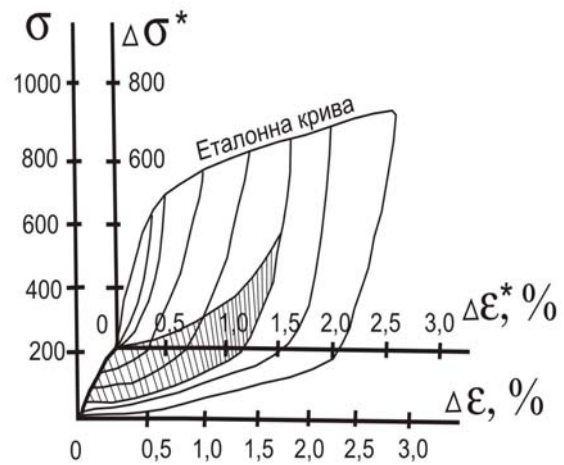


Рис. 1. Втомні петлі гістерезису після половини терміну втомної довговічності

### Результати

Слід зауважити, що вирази для розрахунку питомої енергії пластичної циклічної деформації  $\Delta W^p$  є прийнятними як для матеріалів, які задовольняють ідеалізовані моделі Мазінга (відомі одномірні моделі, що являють собою систему паралельних стержнів при рівномірному одномісному деформуванні, доповнені умовою руйнування стержнів, що дозволяє прогнозувати наявність спадної кривої на діаграмі деформування матеріалу [7]), так і для матеріалів, які не вписуються в цю модель. У загальному випадку будується еталонна крива, яка відрізняється від циклічної кривої. Її отримують шляхом з'єднання верхніх гілок петель гістерезису після зміщення кожної петлі вздовж її лінійної ділянки (рис. 1).

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

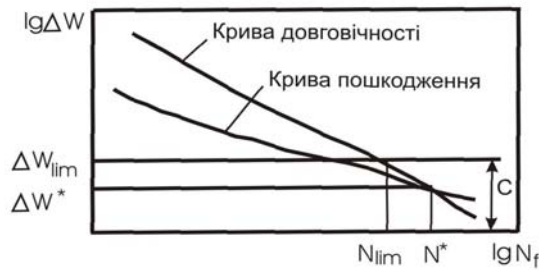


Рис. 2. Криві довговічності та критичної пошкодженості, які перетинаються в точці, що визначає «приведену» межу втоми

Вираз для еталонної кривої із початком координат у нижній точці найменшої пластичної петлі гістерезису  $0^*$  матиме такий вигляд:

$$\Delta \varepsilon^* = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left( \frac{\Delta \sigma^*}{2K^*} \right)^{1/n^*}, \quad (5)$$

де  $\Delta \sigma^*$  – розмах циклічного напруження, який відраховується від точки  $0^*$  (рис. 1);  $K^*$  – коефіцієнт міцності;  $n^*$  – показник циклічного деформаційного зміцнення для еталонної кривої.

Енергія циклічної пластичної деформації розраховується за формулою:

$$\Delta W^p = \frac{1-n^*}{1+n^*} (\Delta \sigma - \delta \sigma_0) \Delta \varepsilon^p + \delta \sigma_0 \Delta \varepsilon^p, \quad (6)$$

де

$$\sigma_0 = \Delta \sigma - \Delta \sigma^* = \Delta \sigma - 2K^* \left( \frac{\Delta \varepsilon^p}{2} \right)^{n^*} \quad (7)$$

є зростання напруження в межах пропорційності, зумовленої відхиленням поведінки матеріалу від моделі Мазінга (див. рис. 1). Слід зауважити, що для ідеального матеріалу Мазінга еталонна крива та циклічна крива збігаються, тобто  $n^* = n'$  та  $\delta \sigma_0 = 0$ , а формула (6) набуває такого вигляду:

$$\Delta W^p = \frac{1-n'}{1+n'} \Delta \sigma \Delta \varepsilon^p. \quad (8)$$

Підставляючи вирази (1) і (2) у формулу (8), отримуємо:

$$\Delta W^p = 4\sigma_f' \varepsilon_f' \frac{c-b}{c+b} N_f^{b+c}, \quad (9)$$

де  $b$  і  $c$  – показники міцності від втоменості при пружному та пластичному деформуванні відповідно.

Питома енергія повернутої пружної деформації розраховується згідно з формулою:

$$\Delta W^e = \frac{1}{2E} \left( \frac{\Delta \sigma}{2} + \sigma_m \right), \quad (10)$$

де  $\sigma_m$  – середнє напруження,  $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$ .

Таким чином, питома енергія повної деформації  $\Delta W^t$ , яка призводить до накопичення пошкоджень, у розрахунку на одиницю об'єму матеріалу рівна:

$$\Delta W^t = \Delta W^p + \Delta W^e = \frac{1-n^*}{1+n^*} (\Delta \sigma - \delta \sigma_0). \quad (11)$$

Основна частина енергії  $\Delta W^p$ , що поглинається, переходить у теплову, а решта механічної енергії викликає переміщення дислокацій та зміни об'єму. Ці регулярно повторені впливи на матеріал конструкції хребтової балки призводять до зародження тріщин з подальшим їх поширенням аж до руйнування. Отже, довговічність експлуатації матеріалу конструкції є функцією визначеного вище «повного» припливу енергії, тобто  $\Delta W^t = g(N_f)$ . Такі припущення підтверджуються математичними міркуваннями [6], що дозволяє припускати степеневе співвідношення вигляду

$$\Delta W^t = KN_f^0 + C. \quad (12)$$

Стала  $C$  в останній формулі відповідає тій частині пружної енергії розтягу, яка не приводить до значного пошкодження. Вона пов'язана із величиною питомої енергії деформації, яка відповідає межі втоми матеріалу, тобто

$$C \cong \Delta W_{\lim} \frac{1}{\delta} \left( \Delta \sigma \cdot \Delta \varepsilon^e \right)_{\lim}. \quad (13)$$

### Наукова новизна та практична значимість

Універсальний характер критерію втоми руйнування (12) для випадків мало- і багатоциклової втоми стає очевидним. Питома енергія повної циклічної деформації  $\Delta W^t$ , що визначається формулою (11), має фізичну інтерпрета-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

цію й узгоджується з уявленням про зародження й подальше поширення тріщин. Час роботи зразка до його руйнування за умов мало- і багатоциклової втоми поділяється на два етапи: зародження початкових тріщин та їх подальше поширення аж до руйнування. Відмінність етапів зародження та поширення тріщин можна зобразити кривою пошкодження. Припускаємо, що криву критичної пошкодженості, яка описана межею між зародженням і поширенням тріщин, можна пов'язати з кривою Френча [4], яка призначена для прогнозування багатоциклового втомного руйнування до моменту зародження мікротріщини (див. рис. 2). Вважається, що на етапі поширення тріщин матеріал має «приведену» межу втоми, яка визначається рівнем питомої енергії деформації  $\Delta W^*$  та довговічності  $N^*$ . Як видно із рис. 2,  $\Delta W^* < \Delta W_{\text{lim}}$ , причому величина  $\Delta W^*$  визначається точкою перетину кривої  $\Delta W^t - N_f$  із кривою критичної пошкодженості.

Критерій втомного руйнування при багаторівневому навантаженні розроблений у роботі [1]. У загальному випадку для  $j$  етапів навантаження отримана така залежність:

$$\sum_{i=1}^j \left( \frac{n_i}{N_{fi}} \right)^{\lg \left( \frac{N_{fi}}{N^*} \right)} / \lg \left( \frac{N_{fi-1}}{N^*} \right) = 1. \quad (14)$$

Згідно з наведеним рівнянням (14) відбувається наближення до закону лінійного накопичення пошкоджень Пальмгрена – Майнера [13], тобто

$$\sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_{fi}} = 1. \quad (15)$$

Зауважимо, що у випадках, коли нахил ліній пошкодження є сталим і рівний нахилу кривої довговічності, рівняння (14) також буде відповідати закону Пальмгрена – Майнера.

Рівняння (14) дозволяє розраховувати залишковий ресурс деталі, якщо задана послідовність багаторівневого циклічного навантаження. Параметр матеріалу, який для цього необхідно визначити, – це енергія  $\Delta W^*$ , пов'язана з межею втоми матеріалу. Щоб встановити кількість циклів до руйнування для кожного за-

даного етапу навантаження, необхідно також знайти криву довговічності (12).

## Висновки

Поведінку матеріалу при циклічному навантаженні як у малоциклового, так і багатоциклового режимі можна описати за допомогою критерію накопичення пошкоджень, що базується на питомій енергії циклічної деформації  $\Delta W^t$ . Питома енергія циклічної деформації визначається як сума енергії пластичної деформації (рівної площі петлі гістерезису) та енергії пружної деформації розтягу. Отриманий аналітичний вираз (11) є прийнятним як для матеріалу Мазінга, так і для інших матеріалів.

Критерій руйнування пов'язує питому енергію повної прикладеної механічної деформації  $\Delta W^t$  з кількістю циклів до руйнування  $N_f$  згідно з рівнянням (12). Показано, що цей критерій руйнування достатньо добре узгоджується з одержаними експериментальними даними для різних видів випробовувань.

Крива пошкодження, на якій виділені етапи зародження і поширення тріщин у процесі розвитку втоми матеріалу, також визначається через питому енергію повної деформації. Ця крива разом із критерієм руйнування повністю визначає нелінійний закон накопичення пошкоджень.

Докладні та систематичні дані про поведінку матеріалів у різних умовах навантаження, а також аналітичні вирази для величин накопичених пошкоджень і втомної довговічності принесуть значну користь спеціалістам, пов'язаним як з проектуванням, так і з експлуатацією засобів залізничного транспорту [3].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вакуленко, І. О. Втома металевих матеріалів в конструкціях рухомого складу / І. О. Вакуленко. – Д. : Маковецький, 2012. – 152 с.
2. Кузін, М. О. Математичне моделювання параметрів втомної міцності структурно-неоднорідних металічних систем / М. О. Кузін, Т. М. Мещерякова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 38. – С. 213–219.
3. Кузін, О. А. Роль структури в процесах зношування ферито-перлітних сталей / О. А. Кузін, Т. М. Мещерякова, М. О. Кузін // Вісник Дніп-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- ропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 37. – С. 224–229.
4. Манжула, К. П. Об использовании кривых Френча при прогнозировании циклической долговечности / К. П. Манжула // Проблемы прочности. – 2005. – № 1. – С. 88–95.
  5. Мруз, З. Упрочнение и накопление повреждений в металлах при монотонном и циклическом нагружении / З. Мруз // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1983. – № 2. – С. 44–50.
  6. Привалова, В. В. Некоторые закономерности изменения свойств материалов в ходе циклического растяжения / В. В. Привалова, В. В. Стружанов // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та. Сер. : Физ.-мат. науки. – Самара, 2012. – № 1 (26). – С. 110–115.
  7. Стружанов, В. В. Модификационная модель Мазинга / В. В. Стружанов, В. В. Башуров // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та. Сер. : Физ.-мат. науки. – Самара, 2007. – № 1 (14). – С. 29–39.
  8. Фелтнер, Э. Энергия гистерезиса микропластической деформации как критерий усталостного разрушения / Э. Фелтнер, А. Морроу // Техническая механика. – 1961. – № 1. – С. 20.
  9. Хлыбов, А. А. Моделирование накопления усталостных повреждений и создание системы диагностирования тонкостенных конструкций : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01. 02. 06 / Хлыбов Александр Анатольевич ; НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2002. – 15 с.
  10. Эльин, Ф. Влияние растягивающей средней деформации на энергию пластической деформации и циклические свойства / Ф. Эльин // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1985. – № 2. – С. 25.
  11. Helforl, G. R. The Energy Required for Fatigue / G. R. Helforl // Journal of Materials. – 1966. – Vol. 1, № 1. – P. 3–18.
  12. Lefebvre, D. Cyclic Response and Inelastic Strain Energy in Low Cyclic Fatigue / D. Lefebvre, F. Ellyin // International Journal of Fatigue. – 1984. – Vol. 6, № 1. – P. 9–15.
  13. Miner, M. A. Cumulative Damage in Fatigue / M. A. Miner // ASME Journal of Applied Mechanics. – 1955. – Vol. 12. – P. A159 – A164.

А. Я. КУЛИЧЕНКО<sup>1</sup>, Н. О. КУЗИН<sup>1\*</sup>, Л. И. ВАКУЛЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Подвижной состав и путь», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич, 12а, 79052, Львов, Украина, тел. +38 (093) 741 51 27, эл. почта kulan47@mail.ru

<sup>1\*</sup>Каф. «Подвижной состав и путь», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич, 12а, 79052, Львов, Украина, тел. +38 (050) 170 28 18, эл. почта n\_kuzin@mail.ru

<sup>2</sup>ГП «Приднепровская железная дорога», пр. Карла Маркса, 108, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (095) 795 81 24, эл. почта vakulenko\_leonid@mail.ru

## НАКОПЛЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ВАГОНОВ ПО КРИТЕРИЮ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ПОЛНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Цель.** Современные представления о накоплении усталостных повреждений в деталях подвижного состава железнодорожного транспорта основываются на моделях, которые оценивают долговечность металлических систем в зависимости от числа циклов и размаха деформаций или напряжений. Данные модели позволяют с достаточной степенью адекватности проводить оценку разупрочнения металлических систем в условиях многоциклической усталости и при наличии только упругих деформаций в деталях подвижного состава. Вместе с тем возможность появления пластических деформаций при работе железнодорожно-транспортных конструкций они не учитывают. Целью данной работы является построение математической модели, которая позволяет оценивать долговечность металлических систем с учетом появления пластической составляющей в процессе деформирования деталей подвижного состава железнодорожного транспорта. **Методика.** С использованием современных подходов механики деформируемого твердого тела проведен анализ влияния параметров пластических деформаций на долговечность высоконагруженных элементов конструкций. **Результаты.** Изучено влияние упругого и пластического деформирования на рассеяние энергии при циклической нагрузке. **Научная новизна.** Аналитически показано, что параметры разупрочнения металлических систем связаны с полной энергией деформации, которая характеризует особенности деградационных процессов в металлических конструкциях при внешних нагрузках. **Практическая значимость.**

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Предложены соотношения, которые позволяют оценивать остаточный ресурс детали в условиях заданной последовательной многоуровневой циклической нагрузки.

*Ключевые слова:* цикл; деформация; повреждение; усталость; энергия

A. YA. KULICHENKO<sup>1</sup>, N. O. KUZIN<sup>1\*</sup>, L. I. VAKULENKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Rolling Stock and Track», Lviv branch office of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych Str., 12a, 79052, Lviv, Ukraine, tel. +38 (093) 741 51 27, e-mail kulan47@mail.ru

<sup>1\*</sup>Dep. «Rolling Stock and Track», Lviv branch office of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych Str., 12a, 79052, Lviv, Ukraine, tel. +38 (050) 170 28 18, e-mail n\_kuzin@mail.ru

<sup>2</sup>Prydneprovskaya Railway, Karl Marx Av., 108, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (095) 795 81 24, e-mail vakulenko\_leonid@mail.ru

## FATIGUE DAMAGE ACCUMULATION OF DETAILS IN CARS ACCORDING TO CRITERION OF SPECIFIC ENERGY OF TOTAL STRAIN

**Purpose.** Modern ideas about the accumulation of fatigue damages in the details of railway vehicles are based on models that estimate the durability of metal systems and depend on the number of cycles and the magnitude of deformations or stresses. These models allow one to assess with a sufficient degree of adequacy the weakening of metal systems in polycyclic fatigue and at the presence of the elastic strain only in the details of rolling stock. However, the possibility of plastic deformation appearing during operation of rail transport structures is not taken into account. The aim of this work is a construction of a mathematical model that allows estimating the durability of metal systems with regard to the appearing of the plastic component in the process of deformation of parts of railway vehicles. **Methodology.** With the use of modern methods of solid mechanics the influence of the parameters of plastic deformation on the durability of highly loaded structural elements was analyzed. **Findings.** The effect of elastic and plastic deformation on the energy dissipation under cyclic loading was studied. **Originality.** It was shown analytically that the softening parameters of metal systems are related to the total energy of deformation, which characterizes features of the degradation processes in the metal structures under external loads. **Practical value.** Ratios were proposed, they allow estimating residual life of details in a sequential multilevel cyclic loading.

*Keywords:* cycle; deformation; damage; fatigue; energy

### REFERENCES

1. Vakulenko I.O. *Vtoma metalevykh materialiv v konstruktsiakh rukhomoho skladu* [Fatigue of metallic materials in the construction of rolling stock]. Dnipropetrovsk, Makovetskyi Publ., 2012. 152 p.
2. Kuzin M.O. Matematychni modeliuvannya parametriv vtomnoi mitsnosti strukturno-neodnorodnykh metalichnykh system [Mathematical simulation of fatigue strength parameters in structural non-uniform metallic systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 38, pp. 213-219.
3. Kuzin O.A. Rol struktury v protsesakh znoshuvannya feryto-perlitnykh stalei [The role of structure in the ferrite-pearlitic steel wear processes]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 37, pp. 224-229.
4. Manzhula K.P. Ob ispolzovanii krivykh Frencha pri prognozirovani tsiklicheskoj dolgovechnosti [On the use of French curves in predicting the cyclic life]. *Problemy prochnosti – Strength of Materials*, 2005, no. 1, pp. 88-95.
5. Mruz Z. Uprochneniye i nakopleniye povrezhdeniy v metallakh pri monotonnom i tsiklicheskom nagruzhenii [Hardening and accumulation damages in metals under monotonic and cyclic loading]. *Teoreticheskiye osnovy inzhenernykh raschetov – Theoretical foundations of engineering calculations*, 1983, no. 2, pp. 44-50.
6. Privalova V.V., Struzhanov V.V. Nekotoryye zakonomernosti izmeneniya svoystv materialov v khode tsiklicheskogo rastyazheniya [Some patterns of change in the material properties in the course of cyclic tension]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskiye*

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Science], 2012, no. 1 (26), pp. 110-115.
7. Struzhanov V.V., Bashurov V.V. Modifikatsionnaya model Mazinga [Masing modification model]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskiye nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Science], no. 1 (14), 2007, pp. 29-39.
  8. Feltner E., Morrou A. Energiya gisterezisa mikroplasticheskoy deformatsii kak kriteriy ustalostnogo razrusheniya [The hysteresis energy of microplastic deformation as a criterion for fatigue failure]. *Tekhnicheskaya mekhanika – Technical Mechanics*, 1961, no. 1, pp. 20.
  9. Hlybov A.A. *Modelirovaniye nakopleniya ustalostnykh povrezhdeniy i sozdaniye sistemy diagnostirovaniya tonkostennykh konstruksiy*. Avtoreferat Dis. [Simulation of fatigue damage accumulation and the creation a system of thin-walled structures diagnosis. Author's abstract]. Novgorod, 2002. 15 p.
  10. Elin F. Vliyaniye rastyagivayushchey sredney deformatsii na energiyu plasticheskoy deformatsii i tsiklicheskiye svoystva [Effect of mean tensile strain on the energy of plastic deformation and the cyclic properties]. *Teoreticheskiye osnovy inzhenernykh raschetov – Theoretical foundations of engineering calculations*, 1985, no. 2, 25 p.
  11. Helforl G.R. The Energy Required for Fatigue. *Journal of Materials*, 1966, vol. 1, no. 1, pp. 3-18.
  12. Lefebvre D., Ellyin F. Cyclic Response and Inelastic Strain Energy in Low Cyclic Farigue. *International Journal of Fatigue*, 1984, vol. 6, no. 1, 1984, pp. 9-15.
  13. Miner M.A. Cumulative Damage in Fatigue. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1955, vol. 12, pp. A159 – A164.

Стаття рекомендована до публікації к.т.н., доц. А. І. Кондирем (Україна); к.т.н., доц. С. В. Пройдаком (Україна)

Надійшла до редколегії 25.04.2013

Прийнята до друку 26.07.2013