

С. В. МЯМЛІН (ДІПТ), Д. М. БАРАНОВСЬКИЙ (КНУ ім. М. Остроградського, Кременчук)

ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ТРИБОСИСТЕМ ДИЗЕЛІВ СПЕЦІАЛЬНОГО САМОХІДНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ЇХ ЗНОСУ

Теоретично доведено, що інтенсивність зносу трибосистем дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць при лазерному модифікуванні буде зменшуватись при зростанні концентрації надлишкових вакансій у поверхневих шарах. При цьому буде спостерігатись процес вакансійно-дислокаційного переповзання у сполучених поверхневих шарах трибосистем дизелів, тобто протікання процесів самоорганізації. Останнього можна досягти при застосуванні дискретного лазерного модифікування робочих поверхонь трибосистем дизелів з основним елементом вуглецем у вигляді вуглекислого газу чи природного графіту з ніобієм.

Ключові слова: спеціальний самохідний рухомий склад залізниць, трибосистеми дизелів, сполучені поверхневі шари

Теоретически доказано, что интенсивность износа трибосистем дизелей специального самоходного подвижного состава железных дорог при лазерной модификации будет уменьшаться при росте концентрации избыточных вакансий в поверхностных слоях. При этом будет наблюдаться процесс вакансионно-дислокационного переползания в сопряженных поверхностных слоях трибосистем дизелей, т.е. протекание процессов самоорганизации. Последнего можно достичь при применении дискретной лазерной модификации рабочих поверхностей трибосистем дизелей с основным элементом углеродом в виде углекислого газа или природного графита с ниобием.

Ключевые слова: специальный самоходный подвижной состав железных дорог, трибосистемы дизелей, сопряженные поверхностные слои

It is proved in a theory that the wear intensity of tribosystem of diesels of the special-purpose self-propelled railway rolling stock at laser modification will diminish at growth of concentration of surplus vacancies in superficial layers. Thus there will be the process of crawling over the vacancies and dislocations in the adjacent superficial layers of diesel tribosystems, i.e. running the processes of self-organization. The latter can be achieved at application of discrete laser modification of working surfaces of diesel tribosystems with carbon as a basic element in the form of carbon dioxide or natural graphite with niobium.

Keywords: special-purpose self-propelled railway rolling stock, tribosystems of diesels, adjacent superficial layers

Вступ

Проблема підвищення довговічності дизелів спеціального самохідного рухомого складу (ССРС) залізниць є актуальною [1], оскільки єдине рішення цієї проблеми ще не обґрунтовано.

На довговічність дизелів основний вплив здійснює зносостійкість їх відповідальних трибосистем (ТС), якими виступають ТС циліндропоршневої групи (ЦПГ) та кривошипношатунного механізму (КШМ) [2, 3].

Серед відомих і ефективних способів підвищення зносостійкості поверхонь тертя багато з них не застосовуються для зміцнення сполучень ТС ЦПГ і КШМ з причини високої вартості та масштабного фактора. При виборі методу зміцнення робочих поверхонь деталей ЦПГ і КШМ дизелів потрібно виходити з виробничого масштабу та враховувати техніко-економічну доцільність цього зміцнення. Тому, існуючі методи підвищення зносостійкості по-

верхонь тертя не можуть бути застосовані до дизелів ССРС у повному обсязі.

У роботі [4] запропоновано лазерне модифікування відповідальних ТС дизелів та проведено теоретичне обґрунтування його доцільності. Проведемо аналіз досліджень впливу лазерного модифікування на інтенсивність зносу ТС дизелів ССРС.

Аналіз попередніх досліджень

Виходячи з теорій термодинаміки та еволюції систем Пригожина-Гленсдорфа, було теоретично встановлено [5], що для зменшення інтенсивності зношування ТС дизелів ССРС залізниць необхідно забезпечити на їх контактуючих поверхнях тертя протікання процесу самоорганізації за рахунок градієнтів хімічних потенціалів та густини дислокацій взаємодіючих матеріалів.

Для протікання процесу самоорганізації без

зносу потрібно на одному з контактуючих тіл довести структуру матеріалу до максимальної кількості рухомих дислокацій, тим самим зменшити кількість нерухомих. На вторинних структурах, які можна заздалегідь утворити (існує багато методів) або які самі утворюються, повинні утворюватися вільні місця – вакансії,

$$I = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\lambda^*}{T\nu} \sum_{i=0}^k a_i \delta^i} \left(\frac{(kP\nu)^2}{\lambda} - \left(\frac{\chi^2 q_0^2 K_n^2 m^2}{\eta^2 \bar{m}^2 b^2 \lambda^2 k_0^2 \left(1 - \frac{2,5kT}{Gb^3} \ln \frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}_i}\right)^2} \left\{ \frac{1+\mu}{3\chi\sqrt{\pi\chi t}} {}_2F_1\left(\frac{3}{2}; 2; \frac{5}{2}; -\frac{1}{4k_0\chi t}\right) - \sqrt{\frac{t}{\chi\pi}} \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \times \frac{2k_0}{1+4k_0\chi t} - \frac{\mu-1}{2\chi} \left[\sqrt{\pi k_0} - \frac{1}{\sqrt{\pi\chi t}} {}_2F_1\left(\frac{1}{2}; 1; \frac{3}{2}; -\frac{1}{4k_0\chi t}\right) \right] \right\}^2 v_{gs} - \rho_s \cdot v_{sg} \right) \text{grad} \rho \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

де T – абсолютна температура;
 μ_i – хімічні потенціали;
 ρ – потенціал щільності дислокацій;
 λ – теплопровідність;
 k – коефіцієнт тертя;
 P – сила тиску в контакт;
 $n = dN/dV$ – об'ємна концентрація частинок;
 dV – нескінченно малий об'єм;
 I – інтенсивність зношування;
 ν – швидкість ковзання;
 A_{zn} – площа зносу;
 D^* – коефіцієнт квазидифузії;
 ρ_s та ρ_g – середні за об'ємом щільності нерухомих та рухомих дислокацій;
 v_{sg}, v_{gs} – середні швидкості ковзання дислокацій;
 χ, λ – коефіцієнти температуропровідності і теплопровідності;
 r, Z – радіус і глибина зони впливу;
 K_n – коефіцієнт поглинання;
 ∇ – оператор Гамільтона;
 k_0 – коефіцієнт, $k_0 = 8/d^2$;
 d – ширина лазерної доріжки;
 T – абсолютна температура;
 q_0 – густина потужності лазерного випромінювання, що падає на поверхню матеріалу ТС;
 m – коефіцієнт, $m = \alpha(1+\mu)/(1-\mu)$;
 α – коефіцієнт температурного лінійного розширення;
 μ – коефіцієнт Пуассона;
 $m_0 = \frac{4}{d} {}_1F_1(\alpha, \beta, \gamma)$ – гіпергеометрична функція;

для виходу рухомих дислокацій на поверхню цих вторинних структур [4]. При цьому, було отримано вираз для інтенсивності зношування ТС дизелів ССРС з урахуванням залежності густини рухомих дислокацій на поверхні матеріалу та параметрів лазерного модифікування:

E – модуль Юнга.

Отриманий вираз вказує на те, що при лазерному модифікуванні поверхонь ТС дизелів ССРС можна досягти проходження процесів самоорганізації у їх сполученні і досягти зниження інтенсивності зносу.

Також, відомо, що лазерне опромінення приводить до утворення надлишкових вакансій в матеріалі [5], які в свою чергу приводять до виникнення поля напружень. Розподіл таких вакансій є нестійким. Вони рухаються в створеному додатковому полі напружень.

Метою роботи є уточнення впливу модифікування ТС дизелів ССРС на інтенсивність їх зносу з урахуванням утворення вакансійного механізму.

Результати досліджень

Спробуємо отримати залежність напружень від концентрації надлишкових вакансій. Для цього використаємо найпростішу модель «обірваних зв'язків» [5], в яких враховується тільки взаємодія між сусідніми атомами. В моделі розглянемо три кристалічні площини металу: $i-1$, i , $i+1$.

При зміщенні кристалічних площин напруження в середній площині можна оцінити за виразом [5]:

$$\sigma_i = KC_o(y_{i+1} + y_{i-1} - 2y_i), \quad (2)$$

де C_o – поверхнева щільність атомів в кристалічній площині;

K – жорсткість одного зв'язку;

y_{i-1}, y_i, y_{i+1} – відповідні зміщення площин кристалічної ґратки.

Вважаючи, що наявність вакансій в одній з

площин приводять до зменшення зв'язків між цією площиною і сусідніми на одиницю, маємо:

$$\sigma = K(C_o - C_i - C_{i+1})(y_{i+1} - y_i) + K(C_o - C_i - C_{i-1})(y_{i-1} - y_i), \quad (3)$$

де C_{i-1} , C_i , C_{i+1} – відповідні поверхневі концентрації вакансій в досліджуваних площинах.

Після розкладу C_{i-1} і C_{i+1} в ряд Тейлора і переходу до об'ємних концентрацій вакансій отримуємо вираз для напружень, обумовлених наявністю вакансій у випадку неоднорідного їх розподілу:

$$\sigma' = A' \left(C + b \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{b^2}{4} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right), \quad (4)$$

де b – відстань між кристалічними площинами металу;

$$I = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\lambda^*}{Tv} \sum_{i=0}^k a_i \delta^i} \left[\frac{(kPv)^2}{\lambda} + \frac{\chi^2 q_0^2 K_n^2 m^2}{\eta^2 \bar{m}^2 b^2 \lambda^2 k_0^2 \left(1 - \frac{2,5kT}{Gb^3} \ln \frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}_i} \right)^2} \cdot \left\{ \frac{1+\mu}{3\chi\sqrt{\pi\chi t}} {}_2F_1 \left(\frac{3}{2}; 2; \frac{5}{2}; -\frac{1}{4k_0\chi t} \right) - \sqrt{\frac{t}{\chi\pi}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{2k_0}{1+4k_0\chi t} - \frac{\mu-1}{2\chi} \left[\sqrt{\pi k_0} - \frac{1}{\sqrt{\pi\chi t}} {}_2F_1 \left(\frac{1}{2}; 1; \frac{3}{2}; -\frac{1}{4k_0\chi t} \right) \right] \right\}^2 v_{gs} - \rho_s \cdot v_{sg} \right] D \left(1 - \frac{A' C \psi}{k_b T} \right) \frac{\partial C}{\partial x} \Bigg|_2^1. \quad (7)$$

Отриманий вираз (7) свідчить про наступне. Інтенсивність зносу ТС дизелів ССРС при лазерному модифікуванні буде зменшуватись при зростанні концентрації надлишкових вакансій у поверхневих шарах.

Для встановлення кількісних показників поверхонь ТС дизелів при модифікуванні з подачею вуглекислого газу та природного графіту у зону лазерного опромінення були проведені експериментальні дослідження.

Для модифікування гільз циліндрів дизелів у режимі безперервного випромінювання на довжині хвилі 10,6 мкм було використано модернізований лазерний технологічний модуль «Комета-2». Принципова технологічна схема модифікування наведена у роботі [4].

Після модифікування поверхонь ТС дизелів визначали розмір блоків мозаїки і величину мікроспотворень решітки методом моментів другого порядку.

Результати вимірювань щільності дислокацій та розмірів блоків кристалічної ґратки чавуну наведені в табл. 1.

Значення щільності дислокацій, розміру блоків та мікроспотворень кристалічної ґратки модифікованих поверхонь ТС дизелів мають

A' – параметр, що характеризує пружні властивості матеріалу.

Потоки вакансій можна визначити через градієнт густини дислокацій у наближенні їх однорідного розподілу:

$$\text{grad } \rho = -D \left(1 - \frac{A' C \psi}{k_b T} \right) \frac{\partial C}{\partial x}. \quad (5)$$

Якщо функція концентрації вакансій не зменшується, а зростає, то у випадку, коли вихідна дифузія менша нуля, то має місце умова:

$$A' \psi C > k_b T. \quad (6)$$

Об'єднавши рівняння (1) та (5), отримуємо залежність інтенсивності зношування модифікованих ТС дизелів ССРС залізниць лазерним випромінюванням:

нелінійні залежності від режимів лазерного модифікування.

Таблиця 1

Характеристики поверхонь зразків при лазерному модифікуванні

Поверхня ТС	Концентрація вакансій, $\times 10^{14}$, м ⁻²	Розмір блоків, $\times 10^{-5}$, м	Щільність дислокацій, $\times 10^{14}$, м ⁻²
Модифікована з введенням природного графіту ($P = 1000$ Вт; $d = 6$ мм; $v = 15$ мм/с)	210	107	285
Модифікована з введенням вуглекислого газу ($P = 800$ Вт; $d = 8$ мм; $v = 15$ мм/с)	215	101	293

Використавши експериментальні дані, що отримані у роботі [4] при модифікуванні ТС дизелів, розрахуємо інтенсивність їх зношування за виразом (7) та представимо результати у вигляді діаграм (рис. 1, 2).

Порівняємо теоретичні результати з практичними, що отримані при експлуатації дизелів

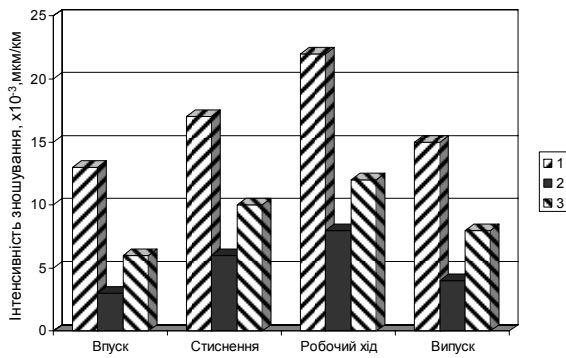


Рис. 1. Теоретична залежність інтенсивності зношування ТС «гільза циліндрів – компресійне кільце» дизеля ЯМЗ-238 Б при номінальних режимах роботи для різних тактів роботи при оліві М10Г₂К: 1 – базовий варіант; 2 – модифікованих з введенням вуглекислого газу у зону опромінення; 3 – модифікованих з подачею природного графіту у зону опромінення

ССРС залізниць, та узагальнимо їх у вигляді подовження ресурсу (рис. 3).

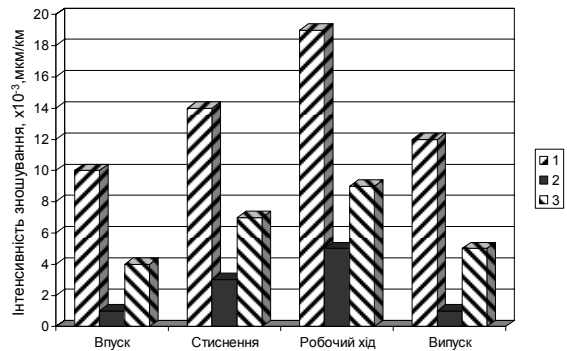


Рис. 2. Теоретична залежність інтенсивності зношування ТС «колінчастий вал – корінний вкладиш» дизеля ЯМЗ-238 Б при номінальних режимах роботи для різних тактів роботи при оліві М10Г₂К: 1 – базовий варіант; 2 – модифікованих з введенням вуглекислого газу у зону опромінення; 3 – модифікованих з подачею природного графіту у зону опромінення

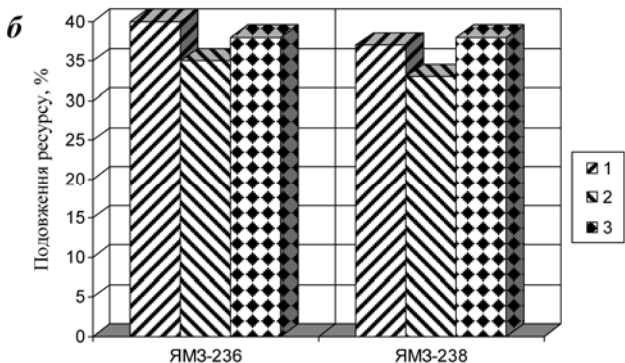
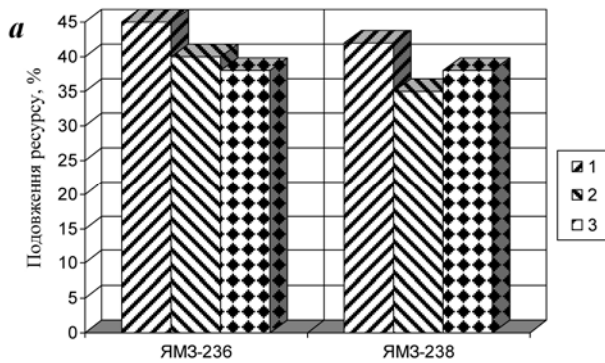


Рис. 3. Подовження ресурсу ТС дизелів ССРС залізниць «гільза циліндрів – компресійне кільце» (а) та «колінчастий вал – корінний вкладиш» (б), модифікованих лазерним випромінюванням: 1 – з подачею вуглекислого газу; 2 – з подачею природного графіту; 3 – теоретичне усереднене значення

Висновки

Застосування дискретного лазерного модифікування робочих поверхонь ТС дизелів з основним елементом вуглецем у вигляді вуглекислого газу та природного графіту забезпечує протікання процесу вакансійно-дислокаційного механізму переповзання у сполучених поверхневих шарах. Дослідження доводять доцільність застосування лазерного модифікування, оскільки ресурс дизелів збільшується до 40 %.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Барановський, Д. М. Проблема довговічності дизелів засобів транспорту [Текст] / Д. М. Барановський // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту ім. М. Остроградського. – 2009. – Вип. 5/2009 (58), ч. 1. – С. 96-99.
2. Барановський, Д. М. Загальний підхід до оцінки та прогнозування ресурсу дизелів засобів транспорту [Текст] / Д. М. Барановський // Вос-

- точно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 4/10(40). – С. 49-52.
3. Барановський, Д. М. Прогнозування довговічності, технічного обслуговування та ремонту дизелів за експлуатаційними характеристиками [Текст] / Д. М. Барановський // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту ім. М. Остроградського. – 2010. – Вип. 2 (61). – С. 95-100.
4. Барановський, Д. М. Теоретичне обґрунтування зниження зносу трибосистем дизелів при лазерному модифікуванні [Текст] / Д. М. Барановський // Проблеми машиностроєння. – 2010. – № 2. – С. 25-31.
5. Гленсдорф, П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций [Текст] / П. Гленсдорф, И. Пригожин. – М.: Мир, 1973. – 273 с.

Надійшла до редколегії 30.08.2010.

Прийнята до друку 06.09.2010.