

УДК 620.178.4:621.878.2

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ШИН САМОХІДНИХ СКРЕПЕРІВ

Кочеток Микола, Кривошия Дмитро, Балака Максим

*Київський національний університет будівництва і архітектури
просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037*

Ефективність експлуатації самохідних скреперів значною мірою визначається станом їх пневматичних шин, що сприймають значні динамічні навантаження під час руху по ґрунтових поверхнях. Надмірний знос протектора призводить до зниження тягово-зчіпних властивостей, збільшення питомих витрат палива та зменшення ресурсу машин. За даними [1–4], витрати, пов’язані із заміною шин, становлять до 25% загальних експлуатаційних витрат на скрепер.

В умовах цифровізації машинобудування перспективним напрямом є інтелектуальний моніторинг технічного стану шин, який забезпечує реєстрацію параметрів зносу в реальному часі, прогнозування залишкового ресурсу та адаптивне керування тиском у колесах.

Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації скреперів шляхом розроблення інтелектуальної системи моніторингу стану пневматичних шин і визначення закономірностей їх зношування на основі аналізу контактних та теплових параметрів взаємодії з ґрунтом.

Для цього потрібно дослідити механізми зношування протектора, проаналізувати вплив навантаження, тиску і температури на інтенсивність зносу, розробити структурну схему системи TireWear–Smart, оцінити ефективність запропонованих технологічних рішень.

Зміну висоти протектора у часі опишемо рівнянням

$$\frac{dh}{dt} = -k_1 \sigma_c^m + k_2 T, \quad (1)$$

де h – висота протектора шини, мм; σ_c – контактне напруження, МПа; T – температура поверхні контакту, °C; k_1 , k_2 , m – емпіричні коефіцієнти.

Інтегруючи рівняння (1), отримаємо

$$h_t = h_0 - \int_0^t (k_1 \sigma_c^m - k_2 T) dt, \quad (2)$$

що дозволяє визначити залишкову висоту протектора шини в залежності від реальних експлуатаційних параметрів.

Абразивне стирання (рис. 1, а) виникає внаслідок інтенсивного тертя протектора шини об тверді частинки дорожнього покриття або ґрунту (пісок, щебінь, гравій). Механічна дія абразивних елементів спричиняє зрізування мікрошарів гуми, особливо на ділянках з найбільшим питомим тиском у плямі контакту.

Основними факторами, що впливають на інтенсивність зношування, є шорсткість поверхні дороги, вологість ґрунту, тиск у шині, швидкість руху та жорсткість гумової суміші. При тривалому впливі спостерігається зменшення висоти протектора, згладжування рисунка бігової доріжки та підвищення температури шини [2]. Типовий прояв – рівномірне стирання по всій ширині бігової доріжки або локальні пошкодження у вигляді «здирання» поверхні.

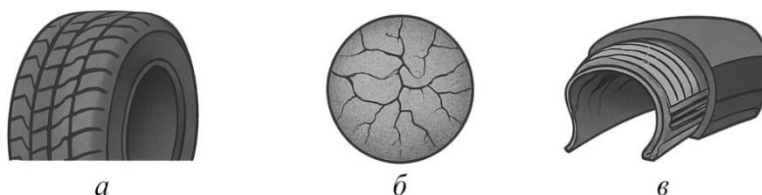


Рис. 1. Механізми зношування протектора шин: а – абразивний; б – скошуванням; в – втомний

Зношування протектора скочуванням (рис. 1, б) є наслідком повторюваних циклів деформації та відновлення гуми під час руху колеса. У процесі скочування в гумовому шарі виникають пружно-в'язкі втрати, що супроводжуються тепловиділенням. Якщо тепловий баланс порушено, температура перевищує оптимальний діапазон (60–90 °С), у структурі гуми відбуваються термоокиснювальні процеси та деструкція полімерного ланцюга [4].

Результатом є зниження еластичності, утворення мікротріщин і поступова деградація зв'язків між наповнювачем і каучуком. Візуально проявляється як гладке, блискуче стирання поверхні протектора, іноді з ознаками локального оплавлення або деформації.

Втомний знос (рис. 1, в) пов'язаний із накопиченням пошкоджень у структурі гуми та каркасу шини під дією багаторазових циклів навантаження. Під час обертання колеса матеріал протектора та підпротекторні шари зазнають постійного чергування напружень стиску та розтягнення. З часом це призводить до утворення мікротріщин у товщі гумового шару, які поступово розповсюджуються у напрямку до корду або сталевого брекера.

У міру розвитку тріщин відбувається розшарування матеріалу, відшаровування бігової доріжки, а в запущених випадках – деформація або руйнування каркасних ниток. Втомне руйнування особливо небезпечне при частих динамічних ударах, русі по нерівній поверхні, низьких температурах або перевантаженні шини. Проявляється у вигляді тріщин по боковій поверхні або між блоками протектора, що можуть перейти у розриви або відшарування.

Сукупний знос протектора визначаємо

$$W_t = W_a + W_r + W_f, \quad (3)$$

де W_a , W_r , W_f – відповідно абразивний, скочуванням та втомний складники зносу.

Розроблена система TireWear–Smart (рис. 2) виконує функції збору, передавання та аналізу даних у реальному часі. Вона включає датчики (сенсори) тиску, температури та деформацій, що з'єднані з мікроконтролером та модулем зв'язку.

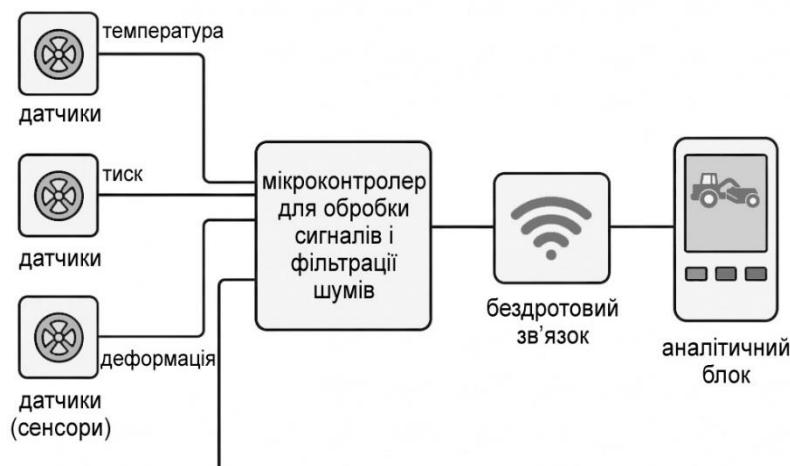


Рис. 2. Структурна схема системи TireWear–Smart для моніторингу шин скрепера

Прогноз залишкового ресурсу визначаємо за виразом

$$R_t = R_0 - \int_0^t I_w dt, \quad (4)$$

де: R_0 – початковий ресурс шини, год; I_w – інтенсивність зносу.

Зниження інтенсивності зносу шин можливе шляхом застосування технологічних, конструктивних та експлуатаційних заходів (таблиця 1) [4–6]. Приміром, заміна традиційних каучуків (NR/SBR) на силіка-наноккомпозити забезпечує підвищення зносостійкості на 20–30% за рахунок зменшення тертя між полімерними ланцюгами, покращення тепловідведення та стійкості до мікротріщиноутворення. Такі матеріали особливо ефективні при роботі скреперів на ґрунтах із високим вмістом абразивних частинок (піски, супіски, щебенисті ґрунти).

Таблиця 1

Порівняльний аналіз технологій зниження інтенсивності зносу шин скрепера

Технологія	Зниження зносу, %	Енергоефективність	Рівень впровадження
Звичайна гума (NR/SBR)	–	базова	широке використання
Силіка-нанокомпозити	15–20	+5 %	промислові випробування
Pressure Management System	10–12	+8 %	дослідні зразки
TireWear–Smart	20–25	+10 %	дослідно-промислова експлуатація

Застосування адаптивних систем керування тиском у шинах (Pressure Management System – PMS) дозволяє автоматично регулювати внутрішній тиск залежно від щільності та вологості ґрунту, що оптимізує пляму контакту та знижує локальні напруження у зоні протектора. Під час руху по м'яких або вологих ґрунтах тиск зменшують на 10–15%, а при транспортуванні по твердих поверхнях – відновлюють до номінального рівня. Це дає змогу знизити нерівномірність стирання і теплові втрати до 12–15%.

Система TireWear – Smart оснащена датчиками температури та тиску, які забезпечують безперервний моніторинг стану шин у реальному часі. Зібрані дані аналізуються у центральній системі управління технічним станом скрепера, що дозволяє виявляти ранні ознаки втомного зносу, локального перегріву або зниження тиску. Завдяки цьому підвищується прогнозованість технічного обслуговування та зменшуються простой машин.

У високотемпературних умовах (понад 35 °С) або при інтенсивних циклах навантаження рекомендується коригувати робочий тиск у шинах на 5–7% нижче номінального, що забезпечує рівномірніший розподіл температурного поля в об'ємі гуми. Одночасно слід уникати тривалих стоянок під навантаженням та перевищення швидкісного режиму, які сприяють перегріву і термоокиснювальній деградації гумової суміші.

Для своєчасного виявлення втомних процесів слід застосовувати неруйнівний контроль (ультразвукові або оптичні методи) для оцінки деформацій боковини та каркасних шарів. Періодичне балансування коліс та контроль радіального биття знижують динамічні навантаження, що пришвидшують руйнування каркасу.

Отже, комплексна система технічного обслуговування шин передбачає оперативний аналіз показників TireWear–Smart, візуальний огляд після кожної зміни, а також ведення журналу технічного стану шин із фіксацією пробігу, температури, тиску і характеру стирання. Це створює основу для персоніфікованого прогнозування ресурсу шин і оптимізації витрат. Впровадження технологій Smart-моніторингу є ефективним напрямом розвитку систем експлуатаційної діагностики землерийно-транспортних машин.

1. Балака М. М. Дослідження часового фактору зносу протектора шин самохідного скрепера. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2021. Вип. 92, т. 2. С. 116–121. URL: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.2.116>.

2. Балака М., Міщук Д., Паламарчук Д. Сучасні уявлення про механізм зносу протекторних гум. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2021. Вип. 98. С. 30–36. URL: <https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.98.0302>.

3. Balaka M., Gorbatyuk Ie., Mishchuk D., Prystailo M. Characteristic properties of support surfaces for self-propelled scrapers motion. *Fundamental and applied research in the modern world: Abstracts of the 6th International scientific and practical conference (January 20–22, 2021)*. Boston, USA, 2021. 53–58.

4. Smith A., Brown K. Rubber fatigue and wear in off-road machinery. *Wear*. 2023. Vol. 526–527, P. 104–119.

5. Балака М. М., Міщук Д. О. Системи технологій земляних робіт у транспортному будівництві. К.: Компрінт, 2025. 224 с.

6. ISO 4250-2:2023. Earth-mover tyres and rims – Part 2: Loads and inflation pressures. Published Edition 7, 2023. URL: <https://www.iso.org/standard/80531.html>.