

УДК 629.113. 012.5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ШИНИ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ

© Ларін О. М., 2000

Харківський інститут пожежної безпеки МВС України

Наведені результати експериментального дослідження температури шини легкового автомобіля в процесі її кочення. Визначено розподіл енергетичних затрат по елементах шини, а також вплив її конструкції на теплоутворення при коченні. Запропонована методика для визначення деформацій в елементах шини по величині температури в локальних зонах. Вивчена можливість знаходження внутрішніх дефектів шини.

Автомобільні шини виходять з експлуатації із-за зносу, із-за механічних і втомливих пошкоджень. До втомливих руйнувань шин відносяться розриви і зломи кордних шарів, руйнування гуми, відділення гуми від корду, розтріскування. Припинення експлуатації шин з цих причин не можна вважати нормальним явищем. По-перше, руйнування шин призводить до виникнення аварійної ситуації. По-друге, шини, що зруйнувалися, не можуть бути відремонтовані.

За критерій визначення пробігу шини прийнята втомлива міцність матеріалів шини в зонах, де діють максимальні деформації. Характерними зонами руйнування є кромки брекеру шини, де більше всього виявляються дефекти.

Ресурс шини до появи втомливих тріщин між шарами брекеру і каркасу, які виникли в результаті втоми, можна визначити по залежності $L = 2\pi R_K N$, де R_K - радіус кочення; N - число циклів до руйнування.

Визначення числа циклів, при яких виникають втомливі тріщини, можна виконати по такій залежності, запропонованої в роботі [1]:

$$N = N_B \left(K_u \cdot \frac{W_p}{W_m} \right)^{n_w}, \quad (1)$$

де N_B - базове число циклів руйнування; W_B - енергія руйнування при базовому числі циклів; W_p - енергія деформації за цикл деформування; n_w - коефіцієнт втомливої витривалості; K_u - коефіцієнт, що враховує форму циклу навантаження.

Енергія деформування за цикл є такою:

$$W = \frac{E}{2(1-\mu^2)} (\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + 2\varepsilon_x \varepsilon_y), \quad (2)$$

де E - модуль Юнга гуми; μ - коефіцієнт Пуассона; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ - відповідно головні деформації в меридіональ-

ному і екваторіальному напрямках.

Величина головних деформацій залежить від безліч експлуатаційних факторів, таких як навантаження на колесо, внутрішній тиск повітря в шині, стан дорожнього покриття, температура шини, вплив доквілля і т.п. Для того, щоб врахувати всі ці фактори, вводяться відповідні коефіцієнти. Тоді головні деформації обчислюються за допомогою наступних залежностей:

$$\varepsilon_x = K_D K_T K_C \varepsilon_{x0}; \quad \varepsilon_y = K_D K_T K_C \varepsilon_{y0}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_{x0}, \varepsilon_{y0}$ - головні деформації, певні при коченні колеса по рівній поверхні при малій швидкості руху; K_D - коефіцієнт, що враховує швидкість руху автомобіля і стан дорожнього покриття; K_T - коефіцієнт, що враховує температуру розігріву шини; K_C - коефіцієнт, що враховує вплив доквілля.

Наведені деформації для плоского напруженого стану визначаються по відомій залежності з теорії пружності

$$\varepsilon_0 = \sqrt{0,5(1-\mu^2)(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + 2\varepsilon_1 \varepsilon_2)}, \quad (4)$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - головні деформації.

Отримання експериментальних значень головних деформацій пов'язане з деякими труднощами. По-перше, вимірювання внутрішніх деформацій в шині пов'язане з необхідністю встановлення в них вимірювального приладу деформацій, що можливо лише на стадії виготовлення шини. По-друге, для даного вимірювання вимагається громіздкий комплекс вимірювальної апаратури, а процес вимірювання вимагає багато часу для обробки і аналізу кінцевого результату. По-третє, знижується вірогідність інформації, оскільки вимірювання відбуваються при малій швидкості і на прямолінійній ділянці дороги. Тому для аналізу ресурсу шини потрібно використати побічні показники.

Встановлено, що температура автомобільної шини в експлуатації є одним з показників, що характеризують її працездатність. Ця температура залежить не тільки від конструкції шини, але і від режимів її роботи на автомобілі. Критичною температурою для шин є температура її вулканізації 130...145 °С, тому що при цій температурі відбувається процес рекристалізації молекул гуми і порушуються їхні міжмолекулярні зв'язки.

Температурний стан шини визначається сукупністю значень температури в усіх її точках і в кожний момент часу. Температурне поле шини є тривимірним. Це найбільш яскраво виявляється на початку руху шини, коли її температура дорівнює температурі навколишнього середовища. В цей момент теплоутворення значно більше тепловіддачі і температура шини швидко росте. На протязі часу росте тепловіддача, темп зростання температури зменшується і через певний час температурне поле з прийнятими допущеннями стає стаціонарним.

Інтенсивність тепловіддачі різноманітна з різних поверхонь шини. Із зовнішньої поверхні шини в навколишнє повітря передається значно більше тепла, ніж з внутрішньої через камеру і обід колеса. Інтенсивність термальних потоків по нормалі до поверхні значно вище інтенсивності термальних потоків в напрямленні меридіану. Якщо зневажити меридіональний потік тепла, то двовимірна задача теплопровідності шини розпадається на ряд одновимірних задач, що вирішуються значно простіше.

Інтенсивність теплоутворення в гумі як міра витраченої за цикл або в одиницю часу енергії деформації може бути визначена в початковий період рухомості шини. В цей період саморозігріву шини виключається ряд факторів, не зв'язаних з режимом навантаження і гістерезисними властивостями матеріалу. Вважаємо, що все тепло витрачається на розігрів шини.

За один цикл навантаження шини виділиться термальна енергія деформації $W = W_t / \Delta\tau v$, а термальна енергія тіла визначається як $W = C\rho_{\Delta}T$, тому

$$W_t = \frac{C\rho_{\Delta}T}{\Delta\tau v}$$

v - частота обертання шини, $\Delta\tau$ - приріст часу, C - питома теплоємність матеріалу шини, ρ - густина матеріалу шини, ΔT - приріст температури на даному відрізьку часу Δt .

Величину збільшення температури в точці заміру, за невеликий проміжок часу, для випадку періодичного навантаження визначаємо згідно з таким виразом [2]:

$$\Delta T = \frac{1}{2} \frac{0,15 E_{\infty} \varepsilon_0^2 v_{\Delta} \tau}{C\rho} \quad \text{або} \quad \varepsilon_0 = \sqrt{\frac{2C\rho_{\Delta}T}{0,15 E_{\infty} v_{\Delta} \tau}}, \quad (6)$$

де E_{∞} - рівноважний модуль пружності, τ - час навантаження.

По даній методиці можна розрахувати ресурс шини по критерію втомливої витривалості, використовуючи інтенсивність теплоутворення в гумовому масиві шини.

Для експериментального визначення температурних полів шини по шарах і зонах в залежності від швидкості руху і часу руху колеса було виготовлене спеціальне устаткування для вимірювання температури в шині, а також термопари різноманітної конструкції [3].

Термопари встановлюють в процесі виготовлення шини на кожні з її шарів і зон, а їхні кінці виводять на поверхню шини і через спеціальний пристрій електричний сигнал передається на балансувальний пристрій і далі на реєструючий прилад. Дослідження проводилися по методиці, відповідній двофакторному експерименту. Змінними величинами при цьому є швидкість руху колеса, тиск повітря в шині і навантаження на колесо.

Дослідження проводилось на різноманітних моделях шин розміру: 175/70R13; 175/70R13 моделі Ex-85 і 205/70R14 моделі ИД-220. Результати експериментів наведені на рис. 1, 2.



Рис. 1. Температура по шарах в шині 175/70R13 мод. EX-85.

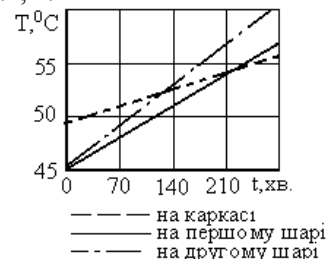


Рис. 2. Температура по шарах в шині 205/70R14 мод. ИД-220.

З аналізу цих графіків слідує, що шина інтенсивно розігрівається в період перших 10...15 хвилин, після чого збільшення температури зменшується, після цього зовсім стабілізується.

Для дослідження впливу внутрішніх дефектів шини на її внутрішній температурний режим в період руху використовувалися дефекти розміром 3 × 3 мм, які утворювалися штучно під час виготовлення шини. Термопару розміщували в місці дефекту. Підвищення температури було найбільшим в шині 205/70R14, середнім в шині 175/70R13, а найменшим в шині 165/70R13. Характерним є те, що в момент встановлення тимчасової температурної рів-

новаги в бездефектних зонах температура в місці дефекту продовжувала збільшуватися (рис. 3, 4). Так, для шини 205/70R14 температура в місці дефекту становила 65 °С, що перевищило температуру бездефектної зони на тому же шарі на 25 %.

В результаті аналізу експериментальних даних встановлено, що з початку руху шини через 9 хвилин температура в зоні дефекту перевищувала температуру в інших зонах до 4 °С. Враховуючи, що температура в гумовому масиві шини розповсюджується в усіх напрямках однаково, замір температури здійснювався на поверхні шини. Відхилення температури на поверхні в зоні дефекту по відношенню до максимальної температури в подібних зонах складало (2... 4) °С.

В даний час є значна кількість математичних залежностей, що описують втрати на кочення пневматичних шин. Однак, в наведених залежностях не враховуються характеристики шини безпосередньо. Вони містяться в виді радіусів і величини зміщення вертикального навантаження в контакт, тому практичне використання аналітичних залежностей призводить до великої похибки результатів. Для математичного опису втрат на кочення окрім умов експлуатації, до яких відносяться внутрішній тиск повітря в шині, великі деформації, обертання і взаємодія з поверхнею дороги, необхідно враховувати характеристики матеріалів складальних елементів шини.



Рис. 3. Розподіл температур по шарах в шині 175/70R13 мод. EX-85.



Рис. 4. Розподіл температур по шарах в шині 205/70R14 мод. ИД-220.

Модель з використанням методу кінцевих елементів застосовується для моделювання шини і дозволяє створення докладної тривимірної моделі взаємодії шини з опорною поверхнею.

Існуючі засоби експериментальної оцінки опору кочення можна поділити по ряду ознак. По способу визначення: лабораторний та в реальних дорожніх умовах. По принципу оцінки опору кочення шин: інерційний, заснований на вимірюванні уповільнення обертання барабану, на якому під наванта-

женням обертається шина або вимірювання інтенсивності уповільнення автомобіля при вибігу, і динамометричний, при якому вимірюються реактивний або підведений до валу барабана момент або сила і моменти, діючі на колесо при коченні по дорозі. По призначенню: безпосередня оцінка визначення втрат на кочення і побічна.

Спосіб лабораторної оцінки коефіцієнту опору кочення - один із найбільш розповсюджених. Однак, цей спосіб оцінки не може замінити собою дослідження шин в дійсних дорожніх умовах. Результати, отримані в лабораторних умовах, є дещо занижені і не цілком відображають реальну картину взаємодії шини з твердим покриттям доріг.

Другим не менше розповсюдженим способом визначення коефіцієнту опору кочення шини є динамометрування. Результати експериментів, отримані динамометруванням, добре співпадають з теоретичними розрахунками. Однак, оцінка коефіцієнту опору кочення динамометруванням не дозволяє вивчити вплив окремих експлуатаційних факторів на величину втрат енергії в шині. Немає можливості створення фіксованих експлуатаційних факторів.

Задача оптимізування параметрів конструкції і матеріалів шини на стадії проектування вимагає створення способів прогнозування такої характеристики шини як опір коченню. Для здійснення такого прогнозу необхідно визначити взаємозв'язок між втратами енергії в елементах шини при різноманітних видах її навантаження в експлуатації (вільний рух, рух з моментом тощо) і параметрами її конструкції, матеріалами і умовами навантаження.

Взаємозв'язок між коефіцієнтом опору кочення і втратою енергії за цикл навантаження висловлюється залежністю

$$f = \frac{W}{2\pi R_k G_k}, \quad (7)$$

де W - енергія деформації за цикл навантаження, R_k - радіус колеса, G_k - навантаження на колесо.

Втрати енергії розраховуються як добуток енергії деформації за цикл навантаження в кожному кінцевому елементі на коефіцієнт відносних механічних втрат матеріалу.

Енергія деформації пружного тіла, що деформується, визначається згідно із залежністю (2).

Методом кінцевих елементів була розрахована шина легкового автомобіля розміру 175/70K13 моделі EX-85. На рис. 5 наведений розподіл втрат енергії в різноманітних зонах цієї шини.



бігова частина шини	бортове кільце	щоківина
Металокорд 20%	Металокорд 60%	Металокорд
Гума 75%	Гума 30%	Гума 20%
Корд 5%	Корд 10%	Корд 80%

Рис. 5. Розподіл втрат енергії в різних зонах шини.

Для експериментального визначення величини коефіцієнту опору кочення було розроблене устаткування, яке дозволило визначати силу опору кочення [4]. В ньому міститься чутливий елемент, прикріплений до рухомого майданчика розтягнутого спицями з двох сторін до рамки пристрою; рухомий майданчик, моделюючий дорожнє покриття, закріплений до рамки влаштування з допомогою чотирьох пружних пластин, що дає можливість майданчику рухатися.

Для дослідів були вибрані нові шини типорозмірів 155\70R13, 165\70R13, 175\70R13 виробництва ПО "Білоцерківщина" моделей Ех-85, ІН-251 та імпорного виробництва фірм Michelin, Pirelli з різноманітними схемами укладки шарів у брекері.

Використання відомих способів планування експерименту при обробці експериментальних даних дозволило отримати регресійні рівняння для визначення коефіцієнту опору кочення f для шин, які досліджувалися. Результати експериментального дослідження по визначенню впливу навантаження на величину коефіцієнту опору кочення при різноманітних тисках повітря в шині наведені на рис. 6, 7

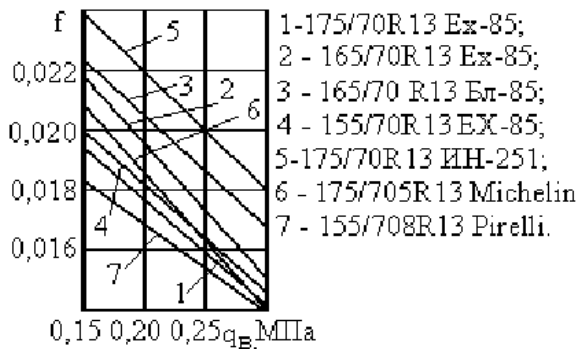


Рис. 6. Залежність коефіцієнта опору кочення від внутрішнього тиску повітря

Збільшення швидкостей руху сучасних автомобілів, зменшення їх ваги, привели до перегляду конструкцій шин. Так, в сучасних шинах стали застосовувати металокорд в брекері для збільшення жорсткості і екрануючий шар для його додаткового захисту. Ці конструктивні рішення дозволили зменшити вагу шини, збільшити навантаження на неї і

швидкість її кочення. Однак при цьому появились і недоліки. Так, наприклад, збільшилася кількість виходу шин з експлуатації по причині руйнування плечової зони і руйнувань в брекері. Однією з причин такого дефекту є підвищення термонапруженого стану шини в означеній зоні.

Відомо, що відвід тепла від шини в навколишнє повітря відбувається інтенсивніше, ніж у внутрі-

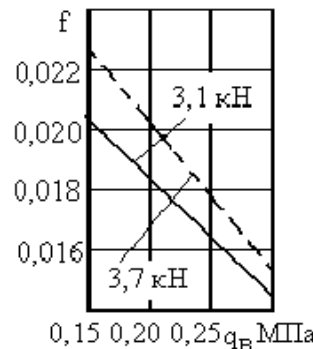
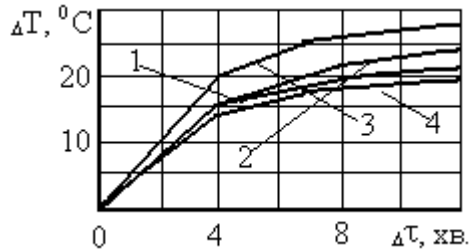


Рис. 7. Залежність коефіцієнту опору кочення від внутрішнього тиску повітря при різноманітних навантаженнях на колесо для шини 175/705R13 моделі ІН-251.

шню порожнину шини за рахунок охолодження зустрічним потоком повітря. В цьому зв'язку порівняльним дослідженням на температурний і деформований стан внутрішніх шарів наражалися різноманітні конструкції шин. Шини 175/70R13 моделі Бл-85 були виготовлені як з екрануючим шаром, так і без нього. Вимірювальний прилад деформацій і термопари встановлювали на каркасі і по всім шарах шини на кромках брекеру. Дослідження проводилися при експлуатаційних режимах навантаження. Шина на барабанному стенді розганялася до швидкості 25 м/с. При такій швидкості записувався саморозігрів шини на протязі 15 хв. Деформації шини записувалися при швидкості не більше 10 м/с. Результати дослідів наведені на рис. 8, 9. Експериментальні залежності саморозігріву шин вказують, що найбільш навантаженим по температурному стану є другий шар. З цих залежностей видно, що до застосування екрануючого шару в шині інтенсивність теплоутворення розподілилася так: каркас, перший шар, другий шар (рис. 8). Після застосування екрану

в цій же шині інтенсивність теплоутворення збільшилася: по каркасу на 6°C , по першому шару на 6°C і по другому шару на 12°C (рис. 9). При цьому температура перерозподілилася наступним чином: каркас, перший шар, екран, другий шар. З цього слідує, що застосування екрануючого шару погіршило термонапружений стан шини.

Відомо, що шина виходить з ладу не тільки по причині зносу протектора, але і в результаті руйнування конструкції. Оскільки в місцях виникнення



1 – каркас, 2 – перший шар, 3 – другий шар.
Рис. 8. Збільшення температури внутрішніх шарів шини 175/70R13 моделі Бл-85 (без екрану).

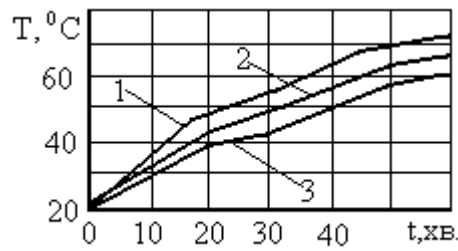
В зв'язку з тим, що виникнення і розвиток дефекту шини супроводжується виділенням термальної енергії, проводилися експерименти по заміру полів температур на поверхні шини з дефектами порізу по шоквині. Досліджена шина 205/70R14 моделі Бл-85 випробовувалася на барабанному стенді при швидкості руху 25 - 40 м/с. На шині були порізи різноманітної глибини і форми (поздовжні, поперечні). Результати досліджень наведені на рис. 9, з якого видно, що після 10 хв. кочення шини настає період уповільненого нагріву. Після цього через 20 хв. кочення шини період уповільненого нагріву знов змінюється інтенсивним розігрівом.

До 20 хв. від початку кочення шини по її температурі на поверхні можна судити про наявність і розміри дефектів шини.

По збільшенню температури на протязі до 10 хв. після початку руху можна судити про зміну режиму роботи елементів конструкції при конструктивних або рецептурних модифікаціях і кількісно оцінювати їхню інтенсивність роботи і довговічність.

На основі отриманих значень температури і величин деформацій можна судити про втрати енергії на нагрів шини і енергії, що витрачується на кочен-

дефектів окрім гістерезисних втрат в гумі виникають втрати на тертя між шарами, то в цих місцях спостерігаються локальні підвищення температури. Отже, по підвищенню температури в деяких зонах, яке проявлялось по величині відхилень від основного температурного поля на поверхні шини, можна судити про наявність в шині дефектів. В цьому зв'язку проводилися заміри температури шин на їхній поверхні. Дослідження проводилися на барабанному стенді шинного заводу.



1 – поздовжній розріз, 2 – поперечний розріз, 3 – розрив на шоквині.
Рис. 9. Залежність температури на поверхні шини від часу її кочення на випробувальному стенді при швидкості 90...150 км/год для різноманітних форм дефектів.

ня.

На основі досліджень поверхневих температурних полів шини можна судити про наявність в ній внутрішніх дефектів (конструктивних або експлуатаційних). Це дозволяє прогнозувати поведінку шини, що знаходиться в експлуатації.

1. Хромов М. К. Усталостное разрушение шинных резин в режимах циклического нагружения: Дис... докт. техн. наук: 05.17.12. - М., 1987. - 390 с.
2. Индейкин Б. А. Об исследовании работы шин и шинных резин методом тепловых измерений // Каучук и резина. - 1969. - № 10. - С. 26-28.
3. Ларин А. Н., Коханенко В. Б., Кривошей Б. И. Диагностика работоспособности пневматической шины косвенными методами // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сб. науч. тр. ХГПУ в пяти частях. Вып. 5. - Ч.5. - Харьков: - 1997. - С. 123-125. 4.А.С. 16814611 СССР, МКИ G01M17/02. Устройство для определения сил сопротивления качению колес транспортного средства / Макеев Ю. П., Ларин А. Н., Артеменко О. А. (СССР) - № 4738100/11; Заявлено 13.09.89; Опубл. 15.10.91. Бюл. № 38.