

**ПРОФІЛЬ ОБОДА КОЛІС ВАНТАЖНОГО ВАГОНА З ПЕРСПЕКТИВНИМИ
ВІЗКАМИ ДЛЯ УМОВ СПІЛЬНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА УКРАЇНСЬКИХ І
ЄВРОПЕЙСЬКИХ ЗАЛІЗНИЦЯХ***Інститут технічної механіки**Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: mokriyt@gmail.com*

Для вирішення актуальної проблеми прискорення інтеграції України до європейських залізничних перевезень останнім часом зростає інтерес до впровадження технології переходу вагонів з колії однієї ширини на колію іншої ширини в автоматичному режимі з використанням так званих розсувних колісних пар, що дозволяє потягам долати пункти зміни ширини колії без заміни вагонних візків або перевантаження вантажів і значно скоротити час їх доставки до пункту призначення. Однак умови спільної експлуатації потягів на українських (ширина колії 1520 мм) і європейських (ширина колії 1435 мм) залізницях при застосуванні розсувних колісних пар вимагають також забезпечення доброї сумісності пари «колесо–рейка» на обох коліях, які відрізняються за формою робочої поверхні рейок та їх підхилом: рейки Р65 з підхилом 1/20 (Україна) та рейки UIC60 з підхилом 1/40 (Європа).

Мета даної роботи полягає в розробці профілю обода коліс для вантажного вагона з перспективними візками моделі 18-7020 для спільної експлуатації на вітчизняних і європейських залізницях, прогнозуванні показників динамічних якостей вагона з такими колесами і процесів його динамічної взаємодії з рейками обох залізниць.

На підставі аналізу результатів досліджень показників контактної взаємодії з колією та динамічних якостей вантажного вагона з перспективними візками моделі 18-7020, обладнаними колесами з існуючими профілями ободів, показано доцільність розробки нового профілю обода коліс для підвищення експлуатаційної сумісності українських і європейських транспортних мереж. Побудовано низку нових профілів ободів коліс та за результатами розрахунків ефективності застосування кожного профілю за критеріями стійкості ходу вагона при експлуатаційних швидкостях руху та гребеневого зносу коліс на українських і європейських залізницях обрано компромісний варіант (профіль ІТМ-73ЕС). Показано, що застосування коліс з обраним профілем обода у вагоні з візками моделі 18-7020 дозволить забезпечити високі динамічні якості екіпажа, а також покращити показники його взаємодії з коліями обох залізниць.

Ключові слова: вантажний вагон, профілі ободів коліс, динамічні показники, процеси взаємодії, знос коліс і рейок.

To solve the important problem of speeding up the integration of Ukraine into the European railway transportation, an interest has recently grown in the introduction of automatic car transfer from one track gauge to another using gauge-changeable wheelsets, thus dispensing with truck exchange or transshipment and thereby significantly shortening the delivery time. However, the combined operation of trains on the Ukrainian (1,520 mm gauge) and European (1,435 mm gauge) railways calls for the compatibility of the wheel-rail contact pair on both railways: R65 rails and a cant of 1/20 in Ukraine and UIC60 rails and a cant of 1/40 in Europe.

The goal of this work is to develop a wheel profile for a freight car with prospective 18-7020 trucks for combined operation on the Ukrainian and European railways and predict the ride performance of a car with that wheel profile and its dynamic interaction with rails on both railways.

An investigation was conducted into the wheel–rail interaction indices and the ride performance of a freight car with prospective 18-7020 trucks and wheels with existing profiles. It was shown that it is expedient to develop a new wheel profile to improve the service compatibility of the Ukrainian and European networks. A number of new wheel profiles were constructed, the efficiency of each profile in terms of dynamic stability at service speeds and wheel flange wear on the Ukrainian and European railways was calculated, and a compromise profile, ITM-73ES, was chosen. It was shown that the use of the chosen profile in a car with 18-7020 trucks will offer a high dynamic performance and improved indices of wheel–rail interaction for both truck gauges.

Keywords: freight car, wheel profile, dynamic performance, interaction processes, wheel and rail wear.

Зараз найбільш ефективним способом подолання кордонів між країнами з різною шириною колії є застосування розсувних колісних пар – системи, яка здатна без зупинки руху залізничного складу змінюватися під ширину колії на спеціальних перекладних колійних пристроях [1 – 4], що дозволяє потягам долати пункти зміни ширини колії без заміни вагонних візків.

У європейській залізничній практиці відомо декілька систем автоматизованого переходу вагонів з однієї колії на іншу, які доведено до практичного

використання: Talgo RD, CAF-BRAVA (Іспанія), DBAG/Rafil Type V (Німеччина), система БТ (Болгарія), SUW 2000 (Польща) [5]. При цьому особлива увага приділяється забезпеченню високої якості взаємодії коліс і рейок, від якої істотно залежить безпека руху поїздів.

У разі практичного застосування ходових частин з розсувними колісними парами на українських (ширина колії 1520 мм) та європейських (ширина колії 1435 мм) залізницях однією з проблем, що потребує вирішення, є забезпечення необхідної сумісності пари "колесо–рейка" з урахуванням профілів головок рейок Р65 (Україна) і UIC (Європа) та їх підхилу 1/20 і 1/40 відповідно [6]. Це дозволить при збереженні високих динамічних якостей екіпажів отримувати добрі показники їхньої взаємодії з коліями обох залізниць.

Для вирішення цієї проблеми в умовах спільної експлуатації на українських та європейських залізницях пасажирських вагонів з підвищеними швидкостями (до 160 км/год) в роботі [7] запропоновано використання коліс з новим профілем ободів ІТМ-73ЕР. При виборі форми профілю коліс переважна увага приділялась забезпеченню стійкості ходу екіпажів на обох залізницях в усьому діапазоні швидкостей руху.

Мета даної роботи полягає в розробці профілю обода коліс вантажного вагона для спільної експлуатації на цих залізницях. При цьому важливим є забезпечення як стійкості його ходу на прямолінійних ділянках колії (при швидкостях руху до 120 км/год), так і покращених показників взаємодії з коліями обох залізниць на криволінійних ділянках.

Розробка профілю коліс виконувалась для вітчизняного вантажного вагона нового покоління з візками перспективної конструкції моделі 18-7020 [8]. Цей візок призначений для встановлення під вантажні вагони з навантаженням від колісної пари на рейки 23,5 тс, що експлуатуються на магістральних залізницях колії 1520 мм. Конструкція візка передбачає можливість використання його і на залізницях колії 1435 мм (при підкочуванні відповідних колісних пар та переобладнанні гальмівної важільного передачі).

В теоретичних дослідженнях використовується просторова математична модель взаємодії залізничного екіпажа та інерційної пружнодисипативної колії, в якій враховуються розміри плям контакту та розподіл по них нормальних та дотичних сил взаємодії [9]. Задача контакту розв'язується у припущенні про безвідривний рух колеса по рейці. Вхідними параметрами є кути бічної хитаєвості та вилання колісної пари, взаємне поперечне зміщення колеса та рейки.

Розподіл сил взаємодії по поверхні контактної плями визначається шляхом поділу її на малі елементи, у кожному з яких контакт вважається одноточковим і обчислюються елементарні сили. Дотичні елементарні сили вважаються силами крипу. Повна поздовжня та поперечна складові розподіленої сили крипу дорівнюють сумі відповідних елементарних сил. Елементарні вертикальні сили взаємодії обчислюються шляхом розподілу повної вертикальної сили між елементами контактної плями пропорційно величині заглиблення колеса в рейку в кожному елементі.

За результатами розв'язання контактної задачі виконано порівняння процесів взаємодії завантаженого вантажного вагона з візками моделі 18-7020, обладнаних колесами з існуючими профілями ободів, і коліями з рейками Р65 з підхилом 1/20 (Україна) та рейками UIC60 з підхилом 1/40 (Європа).

Досліджувались колеса зі стандартним українським профілем ободів за ДСТУ ГОСТ 10791:2016 [10], європейським профілем S1002 [11] та для порівняння із зносостійким профілем ІТМ-73-02, розробленим в Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України для використання у візках моделі 18-7020 з метою суттєвого зниження гребеневого зносу коліс при експлуатації вагонів на залізницях шириною 1520 мм (рейки Р65) [12]. Порівняння вказаних профілів обода коліс приведено на рис. 1.

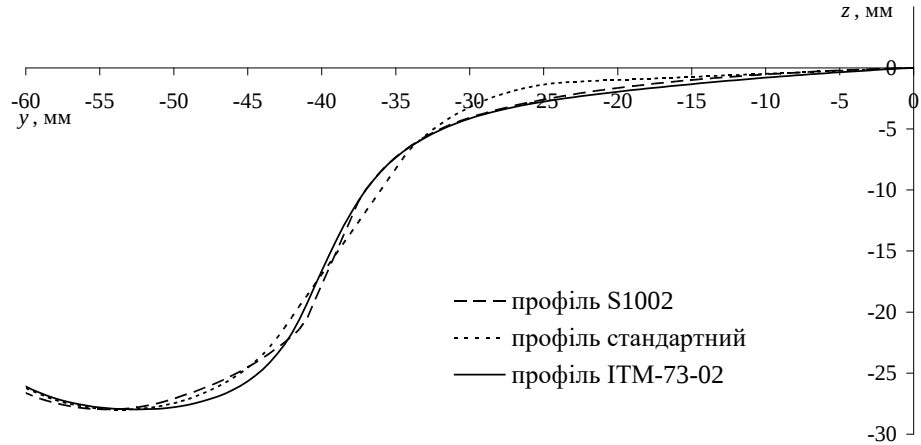
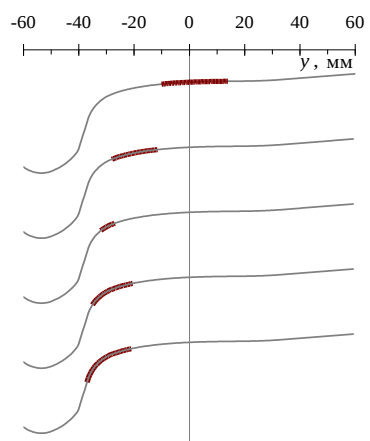


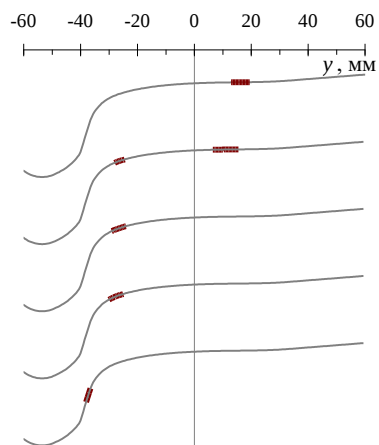
Рис. 1

Розташування плям контакту на ободах коліс при однакових горизонтальних зміщеннях відносно рейки UIC60 показано для коліс з профілем S1002 на рис. 2, а), зі стандартним українським профілем — на рис. 2, в), профілем ІТМ-73-02 — на рис. 2, д), а при зміщеннях відносно рейки Р65 — на рис. 2, б), рис. 2, г), рис. 2, е) відповідно.

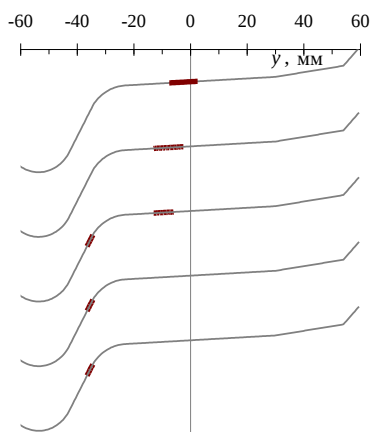
Як свідчать отримані результати, при застосуванні стандартних коліс українських і європейських залізниць показники взаємодії вагона з коліями цих залізниць значно кращі у випадках контакту коліс і рейок, традиційних для відповідної залізниці. Так, у фазі гребеневого контакту з рейкою Р65 взаємодія вітчизняного стандартного колеса двоточкова з розташуванням однієї з плям в зоні кола кочення, а взаємодія колеса з профілем S1002 — одноточкова (з малою плямою контакту) на гребені (порівн. рис. 2, г) і рис. 2, б)). При цьому тиск на гребені європейського колеса буде суттєво вищий, ніж українського. Взаємодія даних коліс із рейкою UIC60 іншої якості: стандартне українське колесо має гребневий контакт, тоді як європейське колесо з профілем S1002 проходить фазу конформного контакту з розташуванням великої плями на галтелі й поверхні кочення (порівн. рис. 2, в) і рис. 2, а)). Найкращі контактні показники з обома типами рейок мають колеса з профілем ІТМ-73-02, бо гребневий контакт відсутній (порівн. рис. 2, д) і рис. 2, е)).



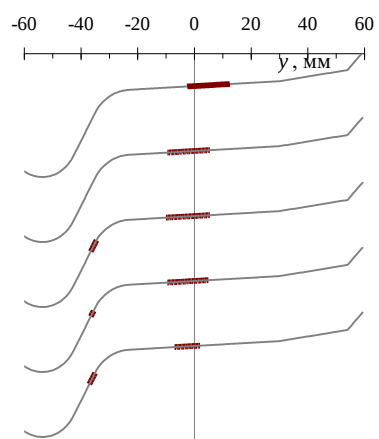
а)



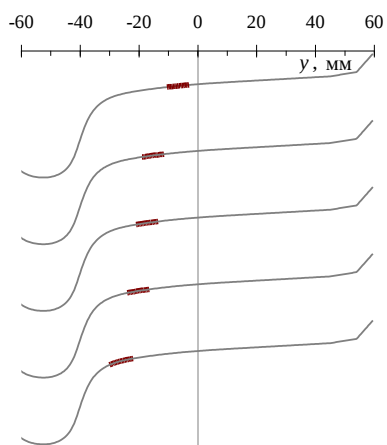
б)



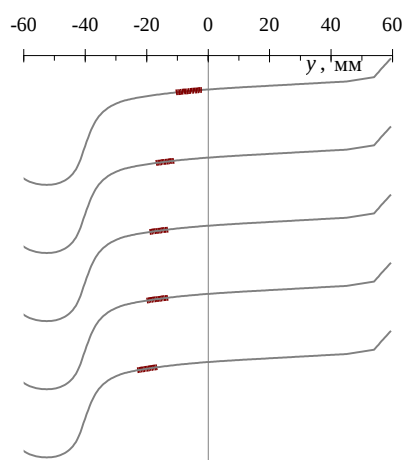
в)



г)



д)



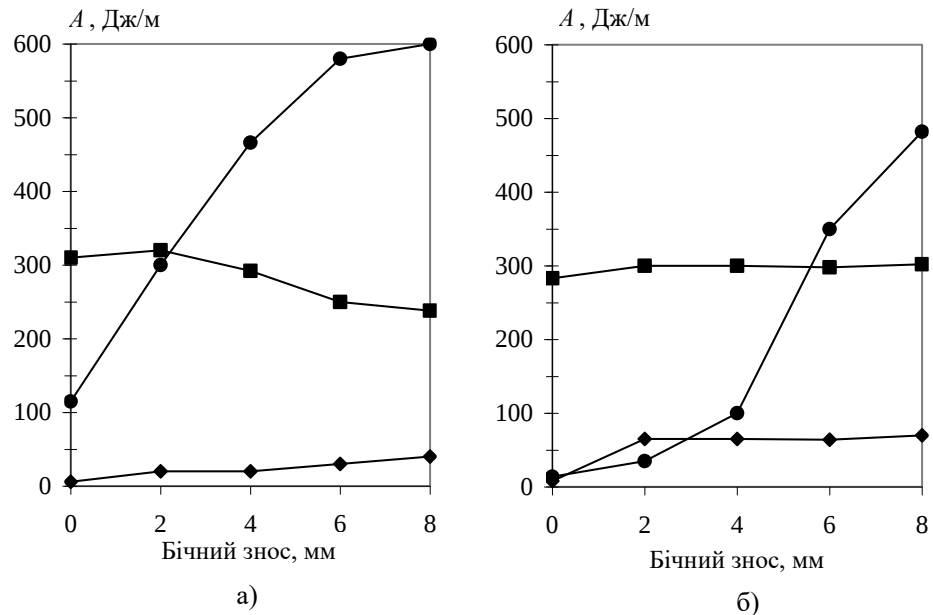
е)

Рис. 2

Виконано оцінку впливу використання розглянутих профілів ободів коліс на динамічні показники вантажного піввагона та його взаємодію з коліями різних залізниць. Для розрахунків динамічних показників системи «екіпаж–колія» використано процеси збурень, що діють з боку колії на екіпаж, сформовані на базі фактичних нерівностей рейкових ниток реальних ділянок залізниць [13, 14].

Слід зазначити, що на українських і європейських залізницях рейки зношуються переважно внаслідок контакту з колесами відповідних залізниць, тому природно, що форми зношених поверхонь рейок на обох залізницях відрізняються [15, 16]. Застосування іншого профілю коліс в умовах руху екіпажа по коліях зі зношеними рейками може призвести до погіршення процесів взаємодії пари «колесо–рейка», підвищення гребеневого зносу коліс та погіршення їх ресурсних показників за цим критерієм. Далі при розрахунках розглядалися як незношені форми головок рейок українських і європейських залізниць, так і з різним ступенем їх бічного зносу.

На рис. 3 показано залежності від ступеня бічного зносу рейок Р65 (рис. 3, а) і UIC60 (рис. 3, б)) максимальних значень гребеневого зносу A (питома робота сил тертя) набіжних на зовнішню рейку коліс із різними профілями при русі вантажного вагона в круговій кривій радіуса 300 м зі швидкістю 60 км/год. Терміном «гребеневий» позначено знос гребеня і галтелі.



■ профіль коліс стандартний
 ● профіль коліс S1002
 ◆ профіль коліс ITM-73-02

а) – рейки Р65;
 б) – рейки UIC60

Рис. 3

Бачимо, що значення показника A стандартного українського колеса при контакті з рейками UIC60 і P65 є високим при незношених рейках (на рис. 3 бічний знос дорівнює нулю) і мало змінюється з ростом бічного зносу рейок. У порівнянні з ним значення показника зносу колеса з профілем S1002 суттєво нижче у випадку незношених рейок, але уже при їх малому бічному зносі починає інтенсивно зростати і перевищує значення показника A колеса з українським профілем, що пояснюється переміщенням плями контакту з галтелі на гребінь колеса з профілем S1002. Колеса з профілем обода ITM-73-02 мають найменші показники інтенсивності гребеневого зносу практично у всіх випадках бічного зношування обох типів рейок.

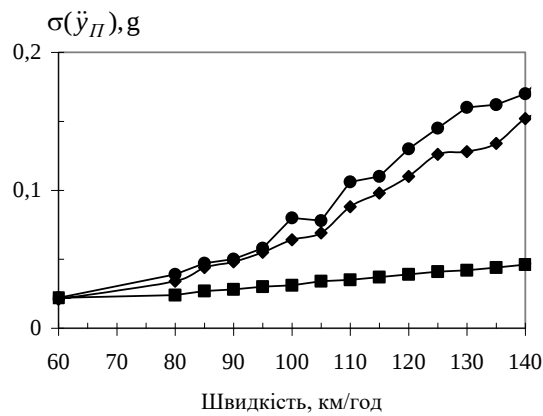
Одним із найважливіших показників безпеки руху залізничних екіпажів, їх динамічних якостей є забезпечення стійкості руху в усьому діапазоні експлуатаційних швидкостей. Виконано розрахунки динамічних показників вантажного вагона з візками моделі 18-7020, обладнаними колесами з різними профілями ободів, при русі у порожньому і навантаженому станах на прямолінійних ділянках колій. Аналіз отриманих результатів показав, що найбільший вплив зміна профілів коліс чинить на динамічні якості порожнього вагона. На рис. 4 показано залежність середньоквадратичних відхилень $\sigma(\ddot{y}_{\Pi})$ поперечних прискорень п'ятників кузова $\ddot{y}_{\Pi}$ в частках прискорення вільного падіння g від швидкості руху вагона в порожньому стані на коліях з двома типами рейок: UIC60 (рис. 4, а)) та P65 (рис. 4, б)).

Як впливає з аналізу приведених результатів, при використанні у вантажному вагоні коліс з профілем S1002 і профілем ITM-73-02 у порівнянні зі стандартним українським профілем показники $\sigma(\ddot{y}_{\Pi})$ починають різко зростати з ростом швидкості руху на колії з рейками UIC60, а вагона з профілем коліс ITM-73-02 також і при русі на колії з рейками P65.

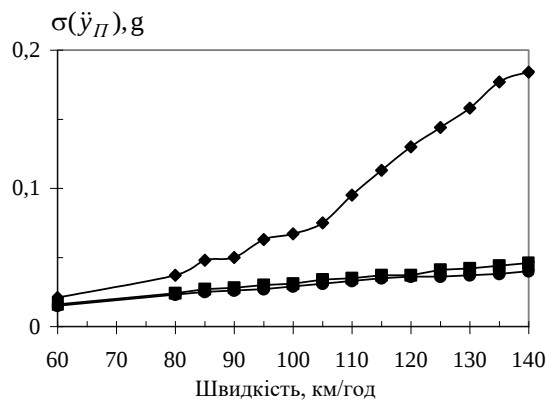
Таким чином, отримані результати свідчать, що при русі вагона з візками моделі 18-7020 зі стандартними профілями коліс (як українським, так і європейським) в криволінійних ділянках колій обох залізниць має місце інтенсивний гребеневий знос коліс, що знижує ресурсні показники колісних пар за цим критерієм. Окрім того, у дослідного вагона з профілем коліс S1002 низький запас стійкості ходу при русі по колії з європейськими рейками UIC60. При використанні коліс з профілем ITM-73-02 інтенсивність зносу гребенів коліс в криволінійних ділянках колій обох залізниць низька, але при цьому неприйнятні показники стійкості руху вагона на прямолінійних ділянках колій. Слід відзначити, що підвищення запасу стійкості екіпажа з візками моделі 18-7020 можна досягнути за рахунок оптимізації параметрів ходових частин, наприклад, в конструкцію візка додати пружні елементи: адаптери у буксових вузлах або діагональні зв'язки між бічними рамами [12].

Підвищити експлуатаційну сумісність українських і європейських залізничних транспортних мереж можливо також за рахунок розробки нового профілю коліс, який би забезпечував високі показники динамічних якостей екіпажів і добрі умови їх взаємодії з рейками як на українських, так і на європейських залізницях.

При побудові форми нового профілю коліс урахувалась низка базових вимог: кут нахилу робочої грані гребеня повинен бути досить великим для



а)



б)

- профіль коліс S1002
- профіль коліс стандартний
- ◆— профіль коліс ITM-73-02

- а) – рейки UIC60;
- б) – рейки P65

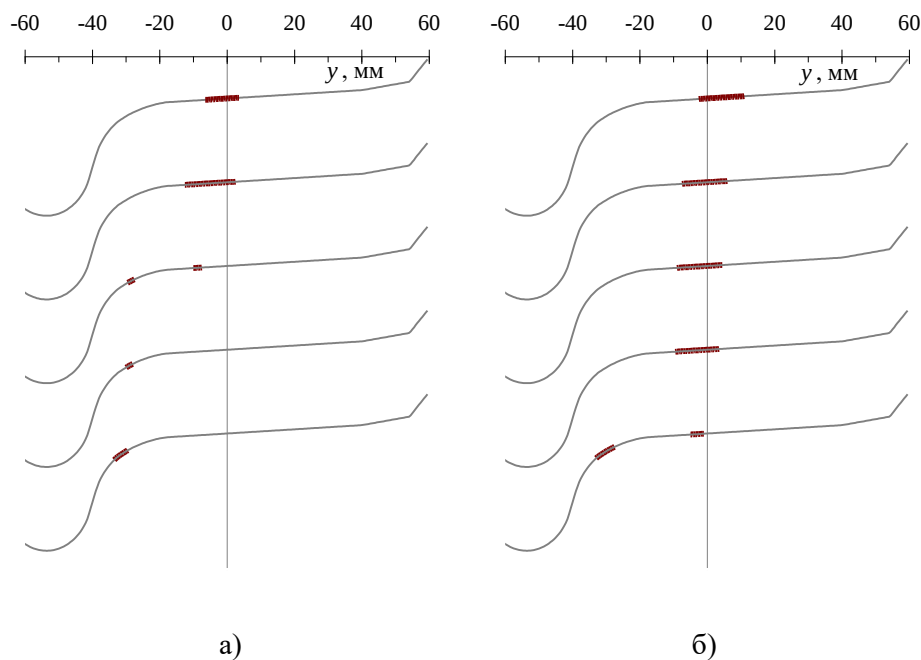
Рис. 4

запобігання сходу екіпажу через вкочення колеса на рейку; поверхня катання колеса має забезпечувати стійкість руху екіпажа; форма галтелі біля основи гребеня колеса повинна забезпечувати сприятливі умови вписування екіпажа у криволінійні ділянки колії. За вихідний було прийнято профіль ITM-73-02. На його основі побудовано сімейство профілів з різними змінами обрису поверхонь катання і галтелі. Ставилася задача вибору компромісного варіанта між підвищенням запасу стійкості руху екіпажа і збереженням низького гребеневого зносу коліс.

Для кожного варіанта профілю вирішувалася задача контакту коліс та рейок, аналізувалися параметри взаємодії, у тому числі розміри та положення

контактних плям. Також проводилися розрахунки вписування вагона з такими колесами в кругову криву малого радіуса ($R = 300$ м) з незношеними та зношеними зовнішніми рейками та його руху по прямих ділянках колії зі швидкостями від 60 км/год до 140 км/год. Обраний компромісний варіант профілю отримав назву ІТМ-73ЕС.

На рис. 5 показано розташування плям контакту на колесах з профілем ІТМ-73ЕС при тих же зміщеннях, що і на рис. 2, відносно рейок UIC60 (рис. 5, а) і Р65 (рис. 5, б)). Як бачимо, гребеневий контакт коліс з профілем ІТМ-73ЕС з обома рейками відсутній. Плями контакту у коліс з цим профілем при всіх зміщеннях знаходяться на поверхні кочення і (або) на галтелі, що відповідає місцям основного зносу коліс при експлуатації.

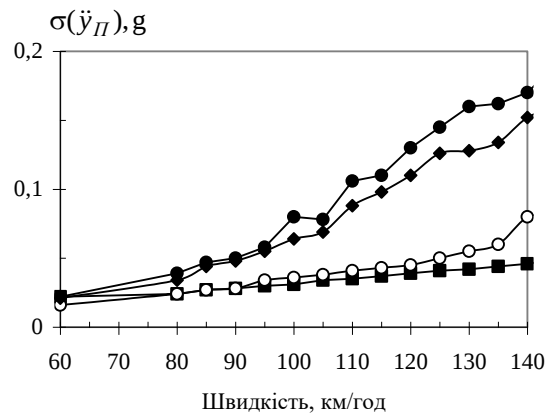


а) – рейки UIC60;
б) – рейки Р65

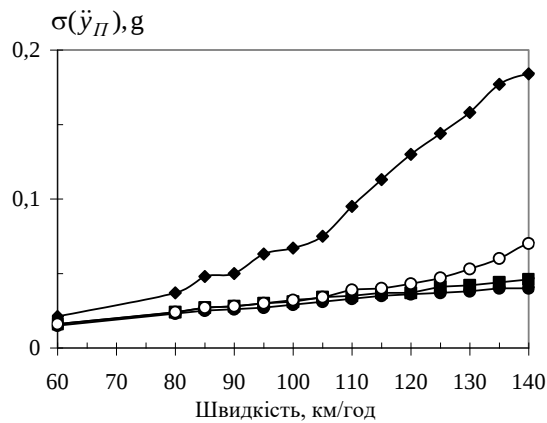
Рис. 5

Порівняння стійкості руху екіпажа з новим профілем коліс і розглянутими раніше показано на рис. 6, де наведено залежності середньоквадратичних відхилень $\sigma(\ddot{y}_n)$ поперечних прискорень п'ятників кузова від швидкості руху піввагонів у порожньому стані з постійною швидкістю на прямих ділянках колії українських і європейських залізниць.

Як бачимо, екіпаж з колесами, що мають профіль ІТМ-73ЕС, має достатньо високу критичну швидкість (відсутнє різке зростання $\sigma(\ddot{y}_n)$).



а)



б)

- профіль коліс S1002
- профіль коліс стандартний
- ◆ профіль коліс ITM-73-02
- профіль коліс ITM-73EC
- а) – рейки UIC60;
- б) – рейки P65

Рис. 6

На рис. 7 наведено залежності від ступеня бічного зносу рейок Р65 (рис. 7, а)) і UIC60 (рис. 7, б)) максимальних значень гребеневого зносу A на біжних на зовнішню рейку коліс навантаженого вагона з профілем ITM-73EC та для порівняння коліс зі стандартним українським і європейським профілями, а також із профілем ITM-73-02 при русі екіпажа в круговій кривій радіуса 300 м зі швидкістю 60 км/год.

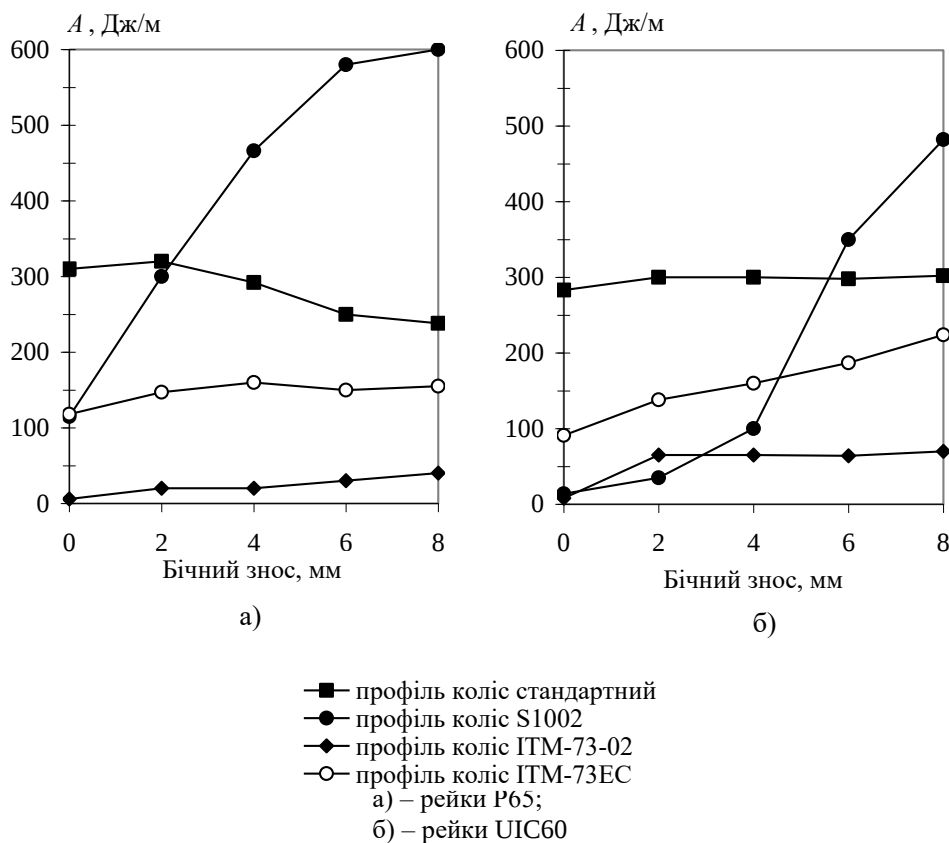


Рис. 7

Як бачимо, значення показника зносу A обода колеса з профілем ITM-73ES у порівнянні зі стандартним українським профілем у 2 – 2,5 рази нижче у випадку контакту з незношеними рейками, мало змінюється з ростом зносу бічної грані рейок і залишається нижчим в 1,4 – 1,7 рази при максимальному бічному зносі (8 мм) рейок.

У порівнянні з профілем колеса S1002 значення показника зносу колеса з профілем ITM-73ES дещо більше при контакті з незношеними головками рейок UIC60. Але з ростом величини бічного зносу рейок цей показник A для колеса з профілем S1002 суттєво зростає, і вже починаючи з малого бічного зносу рейок, перевищує відповідне значення A для колеса з профілем ITM-73ES, досягаючи різниці у 2,5 – 3 рази при бічному зносі рейок 8 мм.

Проведено розрахунки і виконано порівняльний аналіз нормованих показників динамічних якостей піввагона з візками моделі 18-7020, обладнаних колесами з новим профілем коліс ITM-73ES та розглянутими раніше профілями, при його русі в порожньому і навантаженому станах з постійною швидкістю від 60 км/год до 140 км/год по прямих ділянках колії з рейками P65 і UIC60. Аналізувалися залежності від швидкості руху максимальних значень

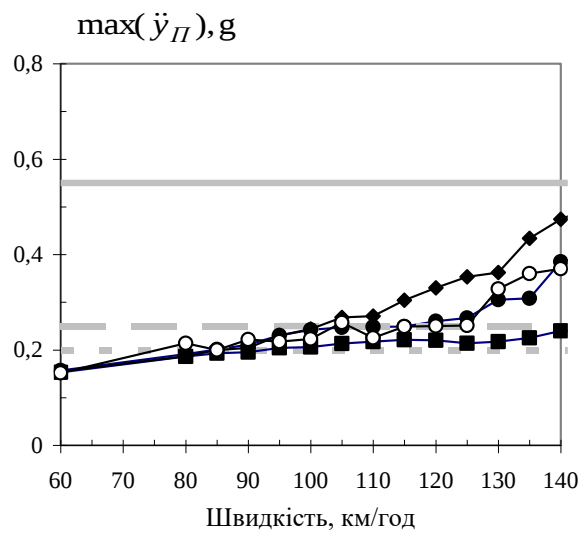
показників динамічних якостей вагона: вертикальних $\ddot{z}_\Pi$ і горизонтальних поперечних $\ddot{y}_\Pi$ прискорень п'ятників кузова в долях прискорення вільного падіння g , коефіцієнтів вертикальної динаміки кузова $K_{ДК}$ та рамних сил H_p в долях статичного осевого навантаження P_0 .

Результати розрахунків показали, що і на європейських, і на вітчизняних рейках динамічні показники вагона у вертикальній площині ($\ddot{z}_\Pi$, $K_{ДК}$) несуттєво залежать від форми розглянутих профілів коліс і головок рейок, знаходяться в діапазоні допустимих нормативних значень і, переважно, нижчі за граничні значення для доброго ходу: в навантаженому стані при швидкостях руху екіпажа до 140 км/год, в порожньому – до 120 км/год.

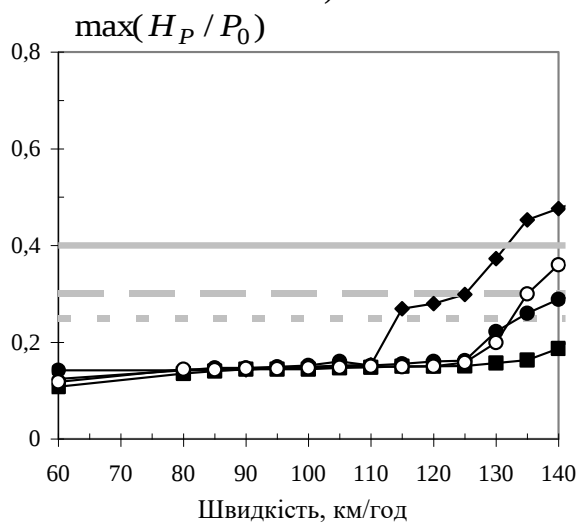
Найбільш чутливими до зміни профілів коліс є динамічні показники екіпажа у горизонтальній площині при його русі у порожньому стані. Показники $\ddot{y}_\Pi$, H_p/P_0 для випадків руху піввагона в порожньому стані на українській колії приведені на рис. 8 (рейки Р65), на європейській колії – на рис. 9 (рейки UIC60).

Бачимо, що у випадку застосування коліс з профілем ITM-73ЕС динамічні показники вагона при підвищених швидкостях руху (більших за 125 км/год) по колії з рейками Р65 дещо зростають у порівнянні з використанням коліс з українським стандартним профілем, але залишаються нижче граничного допустимого значення у всьому діапазоні швидкостей (див. рис. 8). При русі по колії з рейками UIC60 порожнього вантажного вагона найгірші динамічні показники $\ddot{y}_\Pi$, H_p/P_0 при швидкостях руху більших за 120 км/год мають місце при застосуванні коліс з профілем S1002 і ITM-73-02. При використанні коліс з профілями українським стандартним або ITM-73ЕС динамічні показники вагона близькі й найкращі (див. рис. 9).

Використання профілю коліс ITM-73ЕС замість стандартного українського і європейського профілів мало впливає на динамічні якості навантаженого вагона у горизонтальній площині при його русі по коліях з рейками Р65 зі швидкостями до 140 км/год, а з рейками UIC60 – до 130 км/год. При подальшому зростанні швидкості руху по колії з рейками UIC60 динамічні показники вагона з новим профілем коліс ITM-73ЕС є кращими, ніж при використанні профілю S1002. В усіх випадках показники $\ddot{y}_\Pi$ не перевищують допустимі значення, а H_p/P_0 – граничні значення для відмінного ходу.



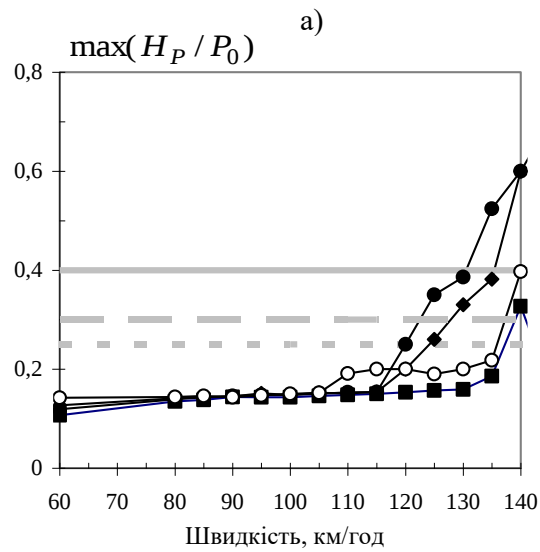
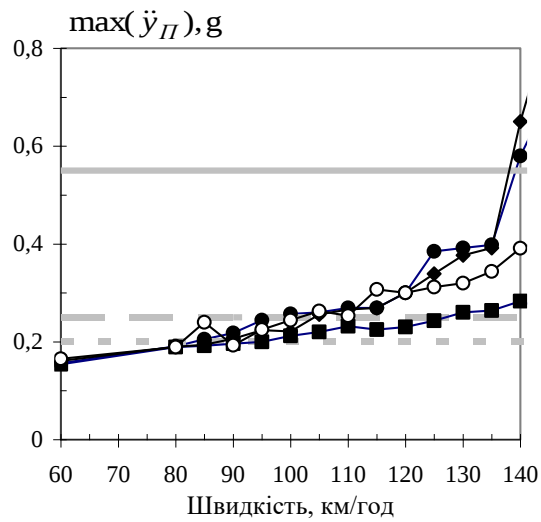
а)



б)

- профіль коліс S1002
- профіль коліс стандартний
- ◆— профіль коліс ITM-73-02
- профіль коліс ITM-73ES
- - - граничне значення для відмінного ходу
- граничне значення для доброго ходу
- допустиме значення

Рис. 8



б)

- профіль коліс S1002
- профіль коліс стандартний
- ◆— профіль коліс ITM-73-02
- профіль коліс ITM-73EC
- — — граничне значення для відмінного ходу
- — — граничне значення для доброго ходу
- — — допустиме значення

Рис. 9

Висновок: Розроблено новий зносостійкий профіль обода залізничного колеса ITM-73EC, при застосуванні якого у вантажних вагонах з перспективними візками моделі 18-7020 в умовах спільної експлуатації на українських та європейських залізницях за прогнозними даними будуть забезпечені високі динамічні якості екіпажів, а також покращені показники їхньої взаємодії з колією, у тому числі зі зношеними рейками цих залізниць, що сприятиме зниженню гребеневого зносу коліс та підвищенню їх ресурсних показників за цим критерієм.

Дослідження виконані за рахунок фінансування за бюджетною програмою «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень (КПКВК 6541230) на 2023 – 2024 роки».

1. Колесная пара с раздвижными на оси колесами. URL: <https://www.railway.supply/razdvizhnye-zheleznodorozhnye-kolesnye-pary/> (дата звернення 29.07.2023).
2. Михайлов Е. В. История создания и перспективы применения раздвижных колесных пар на железнодорожном транспорте. Вагонный парк. 2010. № 9. С. 50–53. <https://doi.org/10.3103/S1068799810020194>
3. Михайлов Е. В. История создания и перспективы применения раздвижных колесных пар на железнодорожном транспорте (окончание). Вагонный парк. 2010. № 10. С. 35–39
4. Демин Ю. В., Терещак Ю. В. Шляхи розвитку міжнародних перевезень на основі без перевантажувальних технологій. Залізничний транспорт України. 2009. № 1. С. 3–6.
5. Піх Б. П., Корженевич І. П., Курган М. Б. Використання рухомого складу з розсувними колісними парами на напрямку Київ–Львів–Мостиська П. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2004. Вип. 3. С. 82–89. <https://doi.org/10.15802/stp2004/20907>
6. Курган Н., Возня Е. Повышение интероперабельности в международном железнодорожном сообщении Австрия – Словакия – Украина – Россия. Українські залізниці. 2014. № 12 (18). С. 24–33.
7. Мокрий Т. Ф., Малышева І. Ю., Лапіна Л. Г., Безрукавий Н. В. Профіль ободу коліс пасажирського вагона для умов спільної експлуатації на українських і європейських залізницях. Технічна механіка. 2022. № 4. С. 111–120. <https://doi.org/10.15407/itm2022.04.111>
8. Двухосная тележка модель 18-7020 тип 2. URL: <https://www.kvsz.com/index.php/ru/produksiya/gruzovoe-vagonostroenie/vagony-khoppery/item/833> (дата звернення 21.05.2023).
9. Ушкалов В. Ф., Мокрий Т. Ф., Малышева И. Ю. Математическая модель взаимодействия железнодорожного экипажа и пути с учетом распределения контактных сил по пятнам контакта. Техническая механика. 2015. № 2. С. 79–89.
10. ДСТУ ГОСТ 10791:2016 (ГОСТ 10791-2011, IDT). Колеса суцільнокатані. Технічні умови. Чинний від 01-09-2016. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 53 с.
11. Esveld C. Modern Railway Track. Second Edition. MRT-Productions. 2001. 654 p.
12. Ушкалов В. Ф., Мокрий Т. Ф., Малышева И. Ю., Безрукавий Н. В. Усовершенствование ходовых частей перспективного грузового вагона. Технічна механіка. 2017. № 4. С. 79–88. <https://doi.org/10.15407/itm2017.04.079>
13. Ушкалов В. Ф., Лапина Л. Г., Мащенко И. А. Расчетные возмущения для исследования динамики железнодорожных вагонов. Залізничний транспорт України. 2012. №1. С. 38–41.
14. Bondarenko I., Lunys O., Neduzha L., Keršys R. Dynamic track irregularities modeling when studying rolling stock dynamics. Transport Means. Proceedings of the International Conference 2019-October, P. 1014–1019.
15. Olofsson U., Telliskivi T. Wear, plastic deformation and friction of two rail steels – a full-scale test and a laboratory study. Wear. 2003. № 254 (1-2). P. 80–93. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00291-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00291-0)
16. Подъяльников И. В. Определение типовых форм изношенных профилей головок рельсов на криволинейных участках пути. Техническая механика. 2009. № 3. С. 39–43.

Отримано 03.11.2023,
в остаточному варіанті 01.12.2023