

В.М. Твердомед

Київський інститут залізничного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій,
вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна.
Телефон: +380673187916, E-mail: tverdomed@gsuite.duit.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0695-1304>

СТАБІЛЬНІСТЬ ШИРИНИ РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ З РІЗНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ РЕЙКОВОГО СКРІПЛЕННЯ ПРИ ШВИДКОСТЯХ РУХУ ПОЇЗДІВ ДО 160 КМ/ГОД

Рейкова колія являє собою багатoeлементну конструкцію, до якої висуваються вимоги щодо забезпечення сталості багатьох геометричних параметрів. Із зростанням швидкостей руху поїздів, відповідно, висуваються більш жорсткі вимоги до цих параметрів. Одним із таких параметрів є ширина рейкової колії. Сталість цього параметру залежить від багатьох конструктивних вузлів верхньої будови колії та рухомого складу. Враховуючи те, що Українська залізниця тільки планує переходити на швидкості, що перевищують 160 км/год, з'являється необхідність в аналізі здатності конструктивних елементів верхньої будови колії, що вже використовуються на залізниці, забезпечити безпеку руху поїздів.

У роботі розглянуто вплив конструкції проміжного рейкового скріплення на його здатність забезпечувати стабільну ширину рейкової колії. Для порівняння приймалися найбільш поширені на Українських залізницях проміжні рейкові скріплення, зокрема, скріплення типу КБ-65, скріплення типу КПП-1 та скріплення типу КПП-5. Для того, щоб визначити саме вплив одного конструктивного вузла, інші параметри колії для всіх трьох типів скріплень були еквівалентними. Геометричні розміри ширини рейкової колії були отримані з результатів планових вимірювань геометричних розмірів залізничної рейкової колії колісвимірвальним вагоном.

З отриманими даними було проведено статистичний аналіз, який дозволив зробити висновки щодо здатності проміжних рейкових скріплень забезпечувати сталість ширини рейкової колії.

Ключові слова: рейкове скріплення, залізнична колія, ширина рейкової колії, рухомий склад, статистичний аналіз, відхилення.

©Твердомед В.М., 2022

В. Н. Твердомед

Киевский институт железнодорожного транспорта
Государственного университета инфраструктуры и технологий,
ул. Кирилловская, 9, г. Киев, 04071, Украина.
Телефон: +380673187916, E-mail: tverdomed@gsuite.duit.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0695-1304>

СТАБИЛЬНОСТЬ ШИРИНЫ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ С РАЗНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ РЕЛЬСОВОГО СКРЕПЛЕНИЯ НА СКОРОСТЯХ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ДО 160 КМ/ГОД

Рельсовый путь представляет собой многоэлементную конструкцию, к которой выдвигаются требования по обеспечению постоянства многих геометрических параметров. С увеличением скоростей движения поездов соответственно предъявляются более жесткие требования к этим параметрам. Одним из таких параметров является ширина рельсового пути. Постоянство этого параметра зависит от множества конструктивных узлов верхнего строения пути и подвижного состава. Учитывая то, что Украинская железная дорога только планирует переходить на скорости более 160 км/ч, возникает необходимость в проведении анализа способности конструктивных элементов верхнего строения пути, которые уже используются на железной дороге, обеспечить безопасность движения поездов.

В работе рассмотрено влияние конструкции промежуточного рельсового скрепления на его способность обеспечивать стабильную ширину рельсового пути. Для сравнения принимались наиболее распространенные на железных дорогах промежуточные рельсовые скрепления, в частности, скрепление типа КБ-65, скрепление типа КПП-1 и скрепление типа КПП-5. Для того чтобы определить именно влияние одного конструктивного узла, другие параметры пути для всех трех типов скреплений были эквивалентны. Геометрические размеры ширины рельсового пути были получены на основании результатов плановых измерений геометрических размеров железнодорожного рельсового пути путеизмерительным вагоном.

На основании полученных данных был проведен статистический анализ, позволивший сделать выводы о способности промежуточных рельсовых скреплений обеспечивать постоянство ширины рельсового пути.

Ключевые слова: рельсовое скрепление, железнодорожный путь, ширина рельсового пути, подвижной состав, статистический анализ, отклонение.

Вступ. Зростання швидкостей руху поїздів, збільшення рівня силової взаємодії в системі колесо-рейка, з одного боку, призводить до зростання геометричних відхилень під час експлуатації колійної інфраструктури, а з іншого боку, стають більш жорсткими вимоги щодо граничних рівнів відхилень верхньої будови колії.

Названі фактори ускладнюють поточне утримання колії та призводять до збільшення об'єму робіт забезпечення її роботоздатності.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

У такому випадку велике значення починає відігравати правильний підбір конструкції верхньої будови колії, яка б могла забезпечити максимальний період її роботи при мінімальному зовнішньому втручанні.

Одним із основних параметрів, що постійно контролюється, є ширина рейкової колії. Це пов'язано із тим, що перевищення допустимої ширини колії може призвести до провалювання екіпажу, а зменшення ширини нижче допустимого значення призводить до заклинювання колісної пари та всповзання гребня на рейку.

На українських залізницях у відповідності із [1] норма ширини колії в прямих та в кривих ділянках на залізобетонних шпалах радіусом більше 300 м при швидкостях руху 50-140 км/год встановлюється рівною 1520 мм. Допуск відхилення за розширенням становить +8 мм, за звуженням -4 мм.

Конструктивні особливості рухомого екіпажу, особливо система зв'язку кузова з візком, в значній мірі впливають на характер його вписування в рейкову колію. До таких особливостей належать: розміщення кузова на візках, які під час руху можуть повертатися. Вертикальні навантаження від кузова передаються на візки центрально через шворні (у вантажних вагонів) чи через бокові опори (ковзуни) в такому випадку на шворні передаються лише поздовжні сили (тяги, гальмування); між візками та кузовом є демпферні та повертаючі пристрої. Демпферні пристрої сприяють гасінню (демпфіруванню) бокових коливань (вилянь) візків на прямих, але збільшують поперечні сили в кривих. Сили тертя в шворнях та в ковзунах створюють демпферні моменти тертя, які заважають вільному повороту візка в кривій.

Основними конструктивними елементами, що впливають на стабільність ширини рейкової колії та її поздовжню стійкість, є проміжні скріплення [2]. Тому в роботі досліджується вплив конструкції рейкового скріплення на сталість показників ширини рейкової колії.

Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми. На залізницях світу не припиняються наукові пошуки й експерименти, що стосуються вдосконалення конструкції рейкової колії та скріплень. Для створення оптимальних варіантів вивчають дію різних комбінацій сил, що впливають на вузол скріплення при різних умовах експлуатації, які визначаються осьовим навантаженням, особливостями конструктивного облаштування ходових частин рухомого екіпажу, швидкістю руху поїздів, їх довжиною та масою.

Практика експлуатації залізниць показала, що для всіх конструкцій верхньої будови колії найбільш складним в конструктивному та технологічному відношенні елементом рейко-шпальної решітки являються рейкові скріплення, які істотно впливають на надійність колії, витрати та об'єми робіт при поточному її утриманні [3].

На залізницях країн світу застосовується декілька десятків типів скріплень, а дослідні конструкції нараховуються сотнями. Вони можуть бути поділені за рядом ознак: за способом прикріплення рейки до опори; за типом прикріплювачей; за наявністю підрейкової металевої підкладки; за типом опор.

Із конструкцій рейкових скріплень, що застосовуються на залізницях країн світу, можна визначити, що переважають розробки безпідкладкових скріплень з пружними клемами на залізобетонних шпалах, які забезпечують стабільність притискання рейки до опор та оптимальне поєднання пружних властивостей у вертикальній та горизонтальній площинах при достатньому опорі поздовжнім температурним силам та силам угону. Оскільки залізобетон добре працює на стиск, від металевих прокладок часто відмовляються, що дає велику економію. Але в складних умовах

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

експлуатації (з великою вантажонапруженістю, осьовими навантаженнями та наявності кривих малих радіусів) для забезпечення стабільності колії застосовуються металеві підкладки.

В сучасних умовах експлуатації для безстикової колії на залізобетонних шпалах на зарубіжних залізницях використовують декілька типів конструкцій безпідкладкових пружних рейкових скріплень з використанням замоноличених анкерів чи дюбелів. На вітчизняних залізницях застосовуються, як підкладкові скріплення типу КБ, так і безпідкладкові типів, КПП-1, КПП-5. Підкладкові конструкції застосовуються переважно на вантажонапружених напрямках. Застосування безпідкладкових конструкцій на вантажонапружених напрямках експлуатації залізниць України потребує додаткових досліджень [4].

Відомо, що дослідження можна проводити як за допомогою методів математичного моделювання [5-6], так і за допомогою лабораторних [7-11] та експлуатаційних випробувань [12-13].

Оскільки досліджувалися конструкції рейкових скріплень, що експлуатуються на залізницях, то автор проводив аналіз даних, які були отримані під час експлуатації колії.

Мета цієї статті полягає в проведенні дослідження впливу конструкції рейкового скріплення на стабільність ширини рейкової колії на вантажонапружених ділянках залізниць України з обертанням сучасного рухомого екіпажу.

Матеріал та результати досліджень. Дослідження проводилися на прямій ділянці колії з вантажонапруженістю 60 млн. т. бр. на рік із змішаним вантажопасажирським рухом. На ділянці, що розглядалася, застосовуються три типи проміжних рейкових скріплень: КБ-65, КПП-1 та КПП-5.

Скріплення типу КБ, найбільш розповсюджені на колії із залізобетонними шпалами, мають підкладкову клемно-болтову конструкцію. Скріплення типу КПП мають безпідкладкову конструкцію з використанням пружних пруткових клем.

До розгляду приймалися дані за три роки вимірювань, які були отримані колієвимірювальним вагоном. Оскільки зазначені заходи проводяться один раз на 3 місяці, то впродовж трьох років було проведено дванадцять вимірювань.

Аналіз проводився за допомогою стандартних методів математичної статистики. Були отримані такі показники стану верхньої будови колії, як максимальна ширина, мінімальна ширина, мода, медіана, середньоквадратичне відхилення, дисперсія вибірки.

Дисперсією вибірки називається величина відхилення випадкової величини від її середнього значення [14]:

$$D[X] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i, \quad (1)$$

де m_x – центр розподілення випадкової величини;

p_i – ймовірність появи випадкової величини;

x_i – значення дискретної випадкової величини.

Середньоквадратичне відхилення, що характеризує розсіювання випадкової величини від її середнього значення, визначається за формулою [14]:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$\sigma[X] = (D[X])^{1/2} \quad (2)$$

Модую називають значення x_i , для якого ймовірність p_i появи є максимальним. Медіаною називають те значення x_i , для якого ймовірність появи випадкової величини меншого або більшого значення однакова.

На рисунку 1 відображено графік зміни показника мінімальної ширини колії на ділянці, де проводились вимірювання.

Як видно на рисунку 1, максимальне відхилення звуження ширини рейкової колії характерне для скріплень типу КПП-1 та КПП-5. Для скріплень КБ характерне в більшості випадків перевищення показника мінімальної ширини колії у порівнянні із встановленим. Однак всі три типи скріплень забезпечують роботу колії.

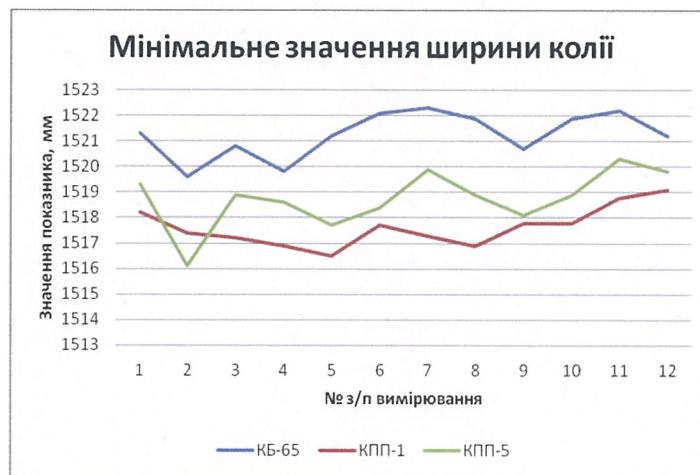


Рис. 1. Зміна мінімального значення ширини рейкової колії (за результатами спостережень впродовж 3 років)

На рисунку 2 зображено графік зміни показника максимальної ширини колії на ділянці, де проводились вимірювання.

Як видно на рисунку 2, максимальне відхилення у бік розширення було зафіксовано для скріплень типу КПП-1 та КПП-5. Скріплення типу КБ показали найменшу амплітуду зміни показників впродовж часу спостереження. Скріплення типу КПП-5 та КБ забезпечували роботу колії в межах допустимих значень відхилень. Для скріплення КПП-1 були зафіксовані випадки, коли ширина колії перевищувала допустимі межі, хоча слід відмітити, що це не було системним явищем.

На рисунку 3 зображено графік зміни моди вимірювань ширини колії на ділянці, що розглядалася.

Мінімальна амплітуда зміни моди вимірювань зафіксована для скріплення КБ. Максимальна – для скріплення КПП-5.

На рисунку 4 зображено дисперсію показників ширини рейкової колії на ділянці.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Мінімальне значення дисперсії зафіксовано для скріплень типу КБ, максимальне для скріплень типу КПП-1. Найбільше середнє значення дисперсії характерне для скріплень типу КПП-5.

На рисунку 5 зображено зміну медіанного значення ширини рейкової колії на ділянці під час спостережень.

Найбільшим є показник медіани ширини рейкової колії для скріплень типу КБ, при цьому для цих скріплень характерна мінімальна амплітуда зміни цього показника.

Мінімальна медіана показника ширини колії характерна для скріплення типу КПП-1. Максимальна амплітуда зміни медіани ширини рейкової колії характерна для скріплення типу КПП-5.

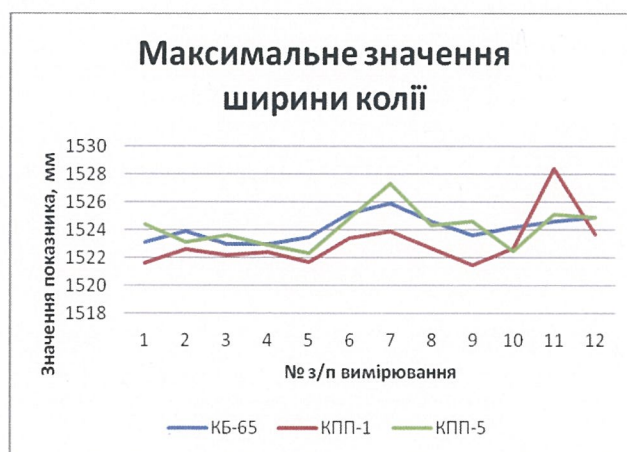


Рис. 2. Зміна максимального значення ширини рейкової колії (за результатами спостережень впродовж 3 років)

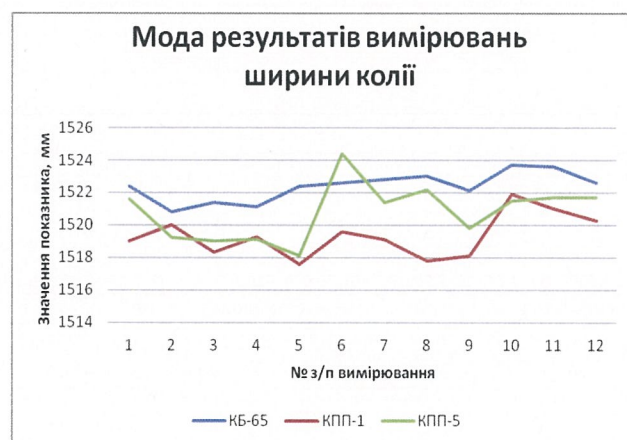


Рис. 3. Зміна значення моди показників ширини рейкової колії (за результатами спостережень впродовж 3 років)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

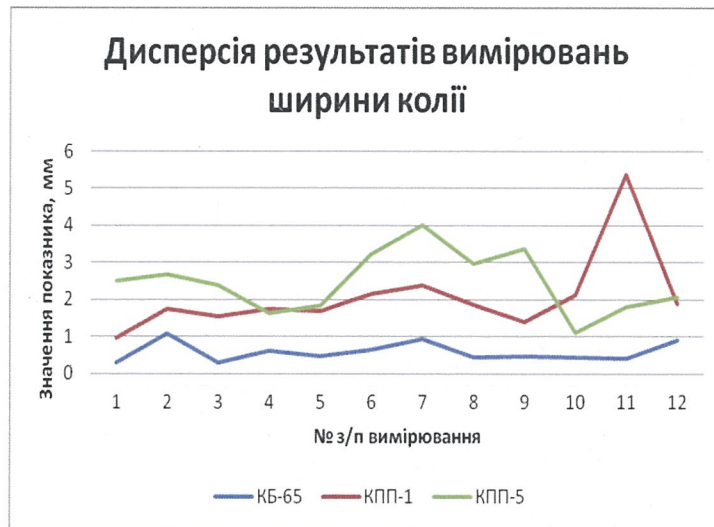


Рис. 4. Зміна дисперсії показників ширини рейкової колії (за результатами спостережень впродовж 3 років)

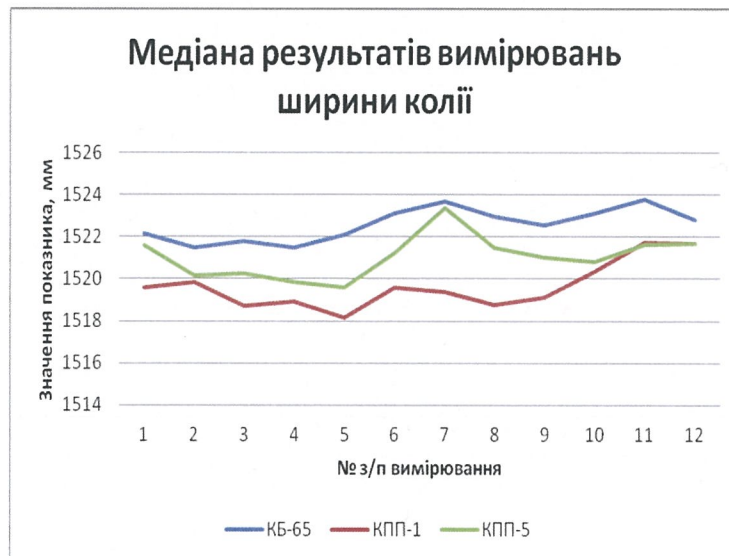


Рис. 5. Зміна медіанного значення ширини рейкової колії (за результатами спостережень впродовж 3 років)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Висновки.

З проведених статистичних досліджень видно, що усі три типи скріплень здатні забезпечити показник ширини рейкової колії в межах допустимих відхилень. Для скріплення КПП-1 були зафіксовані поодинокі випадки, коли ширина рейкової колії незначно перевищила встановлені інструкцією допуски відхилень.

Слід також відмітити, що скріплення типу КБ продемонстрували найвищу стабільність ширини рейкової колії за більшістю статистичних показників.

Такі результати можуть бути пов'язані із тим, що ділянка колії, де проводились дослідження, має досить високу вантажнапруженість, а вантажний рухомий склад має вищу динамічну дію на колію у порівнянні із пасажирським.

Для того щоб зробити однозначні висновки, потрібно провести додаткові дослідження на ділянках колії із інтенсивним рухом пасажирських поїздів при швидкостях в межах 140-160 км/год та з низькою інтенсивністю руху вантажних поїздів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Даніленко Е.І., Орловський А.М., Курган М.Б., Яковлеві В.О. і інші.. Інструкція з експлуатації та утримання залізничної колії України К.: ТОВ «НПП Поліграфсервіс», 2012. 456 с.
2. Tverdomed V., Tkachenko V., Saponova S., Aharkov O., & Fedorova O. (2019). Stability of the Railroad Track Gauge with Railpad and Railpad-free Designs of Rail Fastening System. *Proceedings of 23rd International Scientific Conference. Transport Means*.
3. Твердомед В.М., Карпінський С.Л., Сорока О.О. Вплив конструктивного оформлення вузла рейкового скріплення на забезпечення поздовжньої стійкості безстикової колії. Зб. наук. праць УкрДУЗТ. Х.: УкрДАЗТ, 2017, Вип. 169, С. 47-54. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2017_169_8.
4. Tverdomed V., Aharkov O., Boiko V., & Kushmar L. (2020). Calculation of Transverse Horizontal Forces. *The Proceedings of the 24th International Scientific Conference Transport Means*. pp. 1037–1042.
5. Ferreño, D., Casado, J. A., Carrascal, I. A., Diego, S., Ruiz, E., Saiz, M., & Cimentada, A. I. (2019). Experimental and finite element fatigue assessment of the spring clip of the SKL-1 railway fastening system. *Engineering Structures*, 188, 553–563
6. Oregui, M., Li, Z., & Dollevoet, R. (2015). An investigation into the modeling of railway fastening. *International Journal of Mechanical Sciences*, 92, 1–11
7. Даніленко Е.І., Твердомед В.М., Жученко О.М. Дослідження проміжних рейкових скріплень для залізобетонних шпал на витривалість при впливі циклічного навантаження. Збірник наукових праць Київського університету економіки і технологій транспорту. Київ: КУЕТТ. 2005. Вип. 7. С. 28-37.
8. Xiao, H., Wang, J.B., & Zhang, Y.R. (2017). The fractures of e-type fastening clips used in the subway: Theory and experiment. *Engineering Failure Analysis*, 81, 57–68
9. Sung, D., & Chang, S. (2019). Nonlinear behavior of rail fastening system on slab track at railway bridge ends: FEA and experimental study. *Engineering Structures*, 195, 84–95
10. Carrascal, I. A., Casado, J. A., Diego, S., & Polanco, J. A. (2016). Dynamic behaviour of high-speed rail fastenings in the presence of desert sand. *Construction and Building Materials*, 117, 220–228
11. Holder, D. E., Csenge, M. V., Qian, Y., Dersch, M. S., Edwards, J. R., & Van Dyk, B. J. (2017). Laboratory investigation of the Skl-style fastening system's lateral load performance under heavy haul freight railroad loads. *Engineering Structures*, 139, 71–80
12. Sadeghi, J. (2010). Development of Railway Track Geometry Indexes Based on Statistical Distribution of Geometry Data. *Journal of Transportation Engineering*, 136(8), 693–700
13. Koc, W., Wilk, A., Chrostowski, P., & Grulkowski, S. (2013). Representation of mechanic hysteresis in a railway track using the Preisach model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 227(3), 217–228
14. Володарський Є.Т., Кошева Л.О. Статистична обробка даних: Навч. посібник. К.: НАУ, 2008. 308 с.

V.N. Tverdomed

Kiev Institute of Rail Transport

State University of Infrastructure and Technology

StKyrylivska9, Kyiv, 04071, Ukraine

Телефон: +380673187916, E-mail: tverdomed@gsuite.duit.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0695-1304>

STABILITY OF RAILWAY WIDTH WITH DIFFERENT RAIL COUPLING DESIGNS AT TRAIL SPEEDS UP TO 160 KM/H

The rail track is a multi-element structure, which is subject to requirements to ensure the stability of many geometric parameters. With the growth of train speeds, stricter requirements are put forward for these parameters, respectively. One of these parameters is the width of the rail track. The stability of this parameter depends on many structural nodes of the track superstructure and rolling stock. Considering the fact that the Ukrainian Railways is only planning to switch to speeds exceeding 160 km/h, there is a need to analyze the ability of the structural elements of the track superstructure, which are already used on the railway, to ensure the safety of train traffic.

The paper considers the influence of the design of the intermediate rail connection on its ability to provide a stable width of the rail track. For comparison, the most common intermediate rail fasteners on Ukrainian railways were used, in particular, fasteners of the KB-65 type, fasteners of the KPP-1 type and fasteners of the KPP-5 type. In order to determine exactly the influence of one structural node, the other parameters of the track for all three types of fasteners were equivalent. The geometric dimensions of the rail track width were obtained from the results of planned measurements of the geometric dimensions of the railway rail track by a gauge car.

With the obtained data, a statistical analysis was carried out, which made it possible to draw conclusions about the ability of intermediate rail fasteners to ensure the stability of the width of the rail track.

Key words: rail connection, railway track, rail track width, rolling stock, statistical analysis, deviation.

REFERENCES

1. Danilenko, E.I., Orlovskiy, A.M., Kurhan, M.B., Yakovlevi, V.O. et al. (2012). *Instruktsiia z ekspluatatsii ta utrymannia zaliznychnoi kolii Ukrainy [Instructions for operation and maintenance of railway track of Ukraine]*. Kyiv: TOV "NPP Polihrafservis" [in Ukrainian]
2. Tverdomed, V., Tkachenko, V., Sapronova, S., Aharkov, O., & Fedorova, O. (2019). Stability of the Railroad Track Gauge with Railpad and Railpad-free Designs of Rail Fastening System. *Proceedings of 23rd International Scientific Conference. Transport Means*.
3. Tverdomed, V.M., Karpinskiy, S.L., & Soroka, O.O. (2017). Vplyv konstruktyvnoho oformlennia vuzla reikovooho skriplennia na zabezpechennia pozdovzhnoi stiikosti bezstykovoi kolii [The influence of the structural design of the rail fastening unit on ensuring the longitudinal stability of the non-contact track]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT - Collection of science works of UkrDUZT*, 169, 47-54. Kharkiv: UkrDAZT. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2017_169_8 [in Ukrainian].
4. Tverdomed, V., Aharkov, O., Boiko, V., & Kushmar, L. (2020). Calculation of Transverse Horizontal Forces. *The Proceedings of the 24th International Scientific Conference Transport Means*. p. 1037 – 1042.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

5. Ferreño, D., Casado, J. A., Carrascal, I. A., Diego, S., Ruiz, E., Saiz, M., & Cimentada, A. I. (2019). Experimental and finite element fatigue assessment of the spring clip of the SKL-1 railway fastening system. *Engineering Structures*, 188, 553–563
6. Oregui, M., Li, Z., & Dollevoet, R. (2015). An investigation into the modeling of railway fastening. *International Journal of Mechanical Sciences*, 92, 1–11
7. Danilenko, E.I., Tverdomed, V.M., & Zhuchenko, O.M. (2005). Doslidzhennia promizhnykh reikovykh skriplen dlia zalizobetonnykh shpal na vytryvalist pry vplyvi tsyklichnoho navantazhennia [Research of intermediate rail fastenings for reinforced concrete sleepers on durability under the influence of cyclic loading] *Collection of scientific papers of Kyiv University of Economics and Transport Technologies - Zbirnyk naukovykh prats Kyivskoho universytetu ekonomiky i tekhnolohii transportu*, 7, 28-37. Kyiv: KUETT [in Ukrainian]
8. Xiao, H., Wan, J.-B., & Zhang, Y. R. (2017). *The fractures of e-type fastening clips used in the subway: Theory and experiment. Engineering Failure Analysis*, 81, 57–68
9. Sung, D., & Chang, S. (2019). *Nonlinear behavior of rail fastening system on slab track at railway bridge ends: FEA and experimental study. Engineering Structures*, 195, 84–95
10. Carrascal, I. A., Casado, J. A., Diego, S., & Polanco, J. A. (2016). *Dynamic behaviour of high-speed rail fastenings in the presence of desert sand. Construction and Building Materials*, 117, 220–228
11. Holder, D. E., Csenge, M. V., Qian, Y., Dersch, M. S., Edwards, J. R., & Van Dyk, B. J. (2017). *Laboratory investigation of the Skl-style fastening system's lateral load performance under heavy haul freight railroad loads. Engineering Structures*, 139, 71–80
12. Sadeghi, J. (2010). *Development of Railway Track Geometry Indexes Based on Statistical Distribution of Geometry Data. Journal of Transportation Engineering*, 136 (8), 693–700
13. Koc, W., Wilk, A., Chrostowski, P., & Grulkowski, S. (2013). *Representation of mechanic hysteresis in a railway track using the Preisach model. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 227(3), 217–228
14. Volodarskyi, Ye.T., & Kosheva, L.O. (2008). *Statystychna obrobka danykh: Navchalnyi posibnyk [Statistical data processing: Handbook]. Kyiv: NAU [in Ukrainian].*