

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 625.112:625.033.3

М. Б. КУРГАН<sup>1</sup>, Д. М. КУРГАН<sup>2\*</sup>, М. Ю. БРАЖНИК<sup>3</sup>, Д. Л. КОВАЛЬСЬКИЙ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Проектування і будівництво доріг», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709

<sup>2\*</sup>Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

<sup>3</sup>Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта xpunkxxx@gmail.com, ORCID 0000-0003-0670-8475

<sup>4</sup>Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kvalskyid@gmail.com, ORCID 0000-0002-0247-2074

### ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СУМІЩЕНОЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

**Мета.** Можливості залізничного транспорту для організації перевезень між державами Європейського Союзу й України використовують не повною мірою, оскільки є низка технічних несумісностей транспортних систем, а саме: ширина колії, характеристики рухомого складу, напруга в контактній мережі, габарити тощо. Одним із варіантів організації транспортування вантажів у міжнародному сполученні є використання суміщеної колії 1 435/1 520 мм. Метою цієї роботи є аналіз особливостей напружено-деформованого стану суміщеної конструкції колії, перш за все змін у роботі підшпальної основи внаслідок застосування спеціальної конструкції залізобетонної шпали з одночасним кріпленням чотирьох рейкових ниток. **Методика.** Для визначення напружень у баластному шарі під шпалами було обрано просторову модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності. Розглянуто рух по залізничній колії звичайної конструкції (зі шпалами Ш-1-1), взятої як еталон, і по колії для суміщеного руху, відмінної від еталонної застосуванням шпал типу Ш2С-1. Основні результати розрахунків склали матриці напружень у підшпальній основі. **Результати.** Аналіз результатів моделювання напружень у підшпальній основі суміщеної колії не показав їх збільшення за абсолютними значеннями, але виявив циклічну зміну можливих напрямків девіації часток баласту за наявності передумов до виникнення непружних деформацій у баластному шарі. Такий напружено-деформований стан підшпальної основи, у свою чергу, може призвести до виникнення деформацій у шпалах і погіршення загальної геометрії колії. **Наукова новизна.** У роботі набули подальшого розвитку задачі моделювання взаємодії колії й рухомого складу, зокрема для визначення напружено-деформованого стану підшпальної основи суміщеної колії. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані під час визначення термінів ремонтних робіт для ділянок з суміщеною конструкцією колії, обґрунтування необхідного рівня ущільнення баласту й доцільності застосування георешіток або спеціальних зв'язувальних речовин.

**Ключові слова:** міжнародні залізничні перевезення; залізнична колія; суміщена колія; ширина колії; взаємодія колії й рухомого складу; баласт

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

**Вступ**

Завдяки своєму географічному положенню та розвиненій транспортній інфраструктурі Україна має значний потенціал у розвитку вантажних перевезень, зокрема в міжнародному сполученні як країна-транзитер у логістичному ланцюгу товарообміну між Азією та Європою.

Економіка України залежить від ефективного транспортування навалочних і насипних вантажів, таких як вугілля, залізна руда, сталь, зерно, а їх на далекі відстані найбільш вигідно перевозити залізницею. Успішне реформування та реструктуризація Укрзалізниці буде важливою частиною майбутніх українських економічних реформ [16].

Угода про асоціацію між Україною та Європейським Союзом [9], Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року [7] визначають напрями поліпшення якості транспортних послуг, передбачають наближення рівня їх надання й розвитку інфраструктури до європейських стандартів, підвищення рівня безпеки та зменшення негативного впливу на довкілля.

Реалізація Стратегії дозволить отримати високотехнологічну транспортну систему, в якій буде розбудована ключова транспортна мережа (core network) і забезпечена її експлуатаційна сумісність (інтероперабельність) із мультимодальною міжнародною й транс'європейською транспортною мережею TEN-T, у тому числі залізничною мережею колії 1 435 мм. Наслідком стануть масові регулярні перевезення контейнерів та інших вантажів мультимодальним транспортом, зокрема й у транзитному сполученні Європа – Азія.

Приєднання України до міжнародних конвенцій у галузі залізничного транспорту створює передумови для спрощення перевірки вантажів на кордонах, що, у свою чергу, дозволяє прискорити доставку і в цілому вийти на більш якісний рівень спільної роботи.

Наразі можливості залізничного транспорту для організації перевезень між державами Європейського Союзу й України використовують не повною мірою, оскільки є низка технічних несумісностей транспортних систем, а саме: ширина колії, характеристики рухомого складу, напруга в контактній мережі, габарити тощо [13].

До нашого західного кордону йде колія 1 520 мм, а в Європі – 1 435 мм. Україна не перша держава, якій доводиться вирішувати проблему сумісності двох технічних регламентів [3, 10, 20]. Так, у роботі [3] зроблено висновок, що впровадження інтермодальних перевезень з України до ЄС дозволить скоротити витрати на логістику транспортування вантажів залізницею, зменшити джерела ризику шляхом використання більш безпечного транспорту, знизити втрати й пошкодження вантажів, прискорити обіг оборотного капіталу, підвищити ефективність вагонного парку, створити сприятливі умови для користувачів залізничних транспортних послуг.

Аналіз способів організації транспортування вантажів у міжнародному сполученні з країнами Євросоюзу показав, що реалізації можуть підлягати такі варіанти [14]:

- перевантаження вантажів, у тому числі в контейнерах, із рухомого складу колії 1 520 мм на рухомий склад колії 1 435 мм;
- заміна візків у пунктах перестановки вагонів під час переходу стиків колії різного стандарту;
- застосування спеціального рухомого складу, обладнаного візками з розсувними колісними парами;
- продовження колії 1 520 мм від кордонів України на територію Європи;
- продовження колії 1 435 мм від кордонів Європи на територію України;
- використання суміщеної колії 1 435/1 520 мм.

Під час розглядання останнього з наведених варіантів одним із пріоритетних проектів може бути євроколія «Сухий порт» (Мостиська – Родатичі). Проект передбачає розвиток залізничної інфраструктури з будівництва суміщеної колії 1 435 і 1 520 мм на дільниці Мостиська-1 – Родатичі Львівської області. Орієнтовна вартість проекту – 11 млн євро. Термін реалізації – 2020–2022 роки. Ділянка залізничної колії Мостиська – Львів входить до Критського міжнародного транспортного коридору № 3 (Берлін – Вроцлав – Львів – Київ). Ця ділянка двоколійна, з шириною колії 1 520 мм. Одна з колій суміщена з колією 1 435 мм, до 90-х років – до станції Родатичі (протяжність 42 км), на цей час – до ст. Мостиська-1 (рис. 1).

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ



Рис. 1. Залізнична ділянка Перемишль – Львів

Fig. 1. The railroad section Przemysl – Lviv

Прикладом використання суміщеної колії є міжнародний проект «Rail Baltica», реалізований від державного кордону Литви й Польщі до Каунаса. На ділянці залізниці «Rail Baltica» довжиною 120 км була прокладена нова колія європейського стандарту (шириною 1 435 мм), а поруч із нею оновлена залізнична лінія з шириною колії 1 520 мм. На новій трасі укладено 233 км нових рейок для колій шириною 1 435 і 1 520 мм, включаючи парки колій на станціях, оновлено інфраструктуру залізничних інженерних мереж, реконструйовано станції (рис. 2).



Рис. 2. Суміщена колія на ділянці Шяштокай – Моцкава [17]

Fig. 2. The dual gauge on the Shiashtokay-Mozkawa section [17]

У жовтні 2015 року було завершено укладання першої ділянки залізниці, а із 17 червня 2016 року розпочато регулярне пасажирське сполучення з Каунаса (Литва) до Білостока (Польща).

Привабливим міг би стати проект зі з'єднання як мінімум двох ділянок комбінованої колії з подальшим створенням інтермодального хабу. Наприклад, можна було б поєднати європейською колією Мукачево та Мостиська (близько 300 км), побудувавши у Львові вели-

кий перевалочний хаб. Природно, що такого роду плани вимагають залучення іноземних інвестицій.

Яскравим зразком хабу може служити словацький термінал «Добра», який із 2008 року перебуває в довгостроковій оренді у російсько-го ВАТ «Трансконтейнер». Саме завдяки російським інвестиціям і вантажам термінал відіграв ключову роль у розвитку контейнерних перевезень на V єврокоридорі (Італія – Словенія – Угорщина – Словаччина – Україна – Росія).

Україна має подібного роду термінал у Закарпатті. Ще в 1998 році в Чопі було створено термінал «Карпати», виробничі потужності якого знаходяться біля вузлової станції Батьово. Однак він явно програє своєму словацькому конкуренту й вимагає подальшого розвитку.

Крім того, Україна й Польща могли б об'єднати зусилля у створенні спільного інтермодального терміналу з перевалки вантажів і забезпечити таким чином надійним вантажопотоком свої комбіновані (у випадку Польщі – ширококоліїні) залізничні лінії.

Сьогодні на Львівській залізниці сумарна довжина суміщеної колії (1 520 і 1 435 мм) становить близько 150 км (рис. 3).



Рис. 3. Ділянка суміщеної рейкової колії 1 520 і 1 435 мм

Fig. 3. The section of the dual rail gauge is 1 520 and 1 435 mm

### Мета

Зважаючи на вищевикладене, метою цієї роботи є аналіз особливостей напружено-деформованого стану суміщеної конструкції колії, перш за все змін у роботі підшпальної

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

основи внаслідок застосування спеціальної конструкції залізобетонної шпали з одночасним кріпленням чотирьох рейкових ниток.

### Методика

Одним з основних недоліків суміщеної колії є те, що вона потребує розв'язок і обходів роздільних пунктів через необхідність укладання стрілочних переводів нормальної (1 520 мм) і європейської (1 435 мм) колій, що призводить до зниження швидкості руху поїздів під час проходження станцій.

Зараз у дослідній експлуатації перебуває стрілочний перевід Дн-410 типу УІС60 марки 1/11 колії 1 435 мм, на дерев'яних брусах, з хрестовиною з приварними рейковими закінченнями. Особливості конструкції: подовжені гнучкі гостряки довжиною 12 115 мм із жорстким заземленням у корені; криволінійний гостряк дотичного типу з радіусом кривизни 300 м, що поліпшує умови вписування рухомого складу; розріджена еюра шпал; хрестовина-моноблок із приварними рейковими закінченнями, що виключає утворення дефектів ДУ.12.5, ДУ.22.5 і ДС10.1.

Стрілочний перевід проекту Дн-410 укладено у травні 2005 року на I головній колії ст. Косини регіональної філії «Львівська залізниця» (рис. 4).



Рис. 4. По прямому напрямку колія 1 435 мм, по боковому – 1 520 мм

Fig. 4. In the forward direction the track is 1 435 mm, in the side one – 1 520 mm

У вересні 2017 року стрілочний перевід проекту Дн-410 було обстежено і встановлено наступне: вантажонапруженість – 0,05 млн т-км бр./км за рік, пропущений тоннаж – 8,9 млн т-км бр./км за рік, швидкість руху по прямому напрямку 60 км/год, по боковому – 25 км/год.

До стику рамних рейок стрілочного переводу примикають рейки типу Р50, до заднього стику хрестовини – рейки типу Р65. У зв'язку з тим, що суміщена колія вкладається на залізобетонних шпалах для забезпечення її рівнопружності, необхідно перейти до укладання таких стрілочних переводів на залізобетонних брусах.

У листопаді 2001 року на ділянці Батьово – Косини (2–11-ий км) було укладено суміщену колію, а в березні 2004 року покладено рейковий пліт [1]. У вересні 2017 року колієобстежувальна станція ПС-1 філії ЦДЗІ провела обстеження ділянки суміщеної залізничної колії на залізобетонних шпалах Ш2С-1 довжиною 2 850 мм та пружним скріпленням типу КПП-5.

Шпали Ш2С-1 мають спеціальну конструкцію, що дає змогу обпирання чотирьом рейковим ниткам, рис. 5. Такий тип шпал рекомендовано «Технічними вимогами до конструкції залізобетонних шпал суміщеної колії 1 520 мм і 1 435 мм», що затверджені комісією ОСЖД (Організація співробітництва залізничних шляхів) [8].

В Україні шпали Ш2С-1 виготовляє ПАТ «Коростенський завод залізобетонних шпал», що спеціалізується на виготовленні залізобетонних попередньо-напружених шпал і брусів стрілочних переводів для залізничної колії [4].

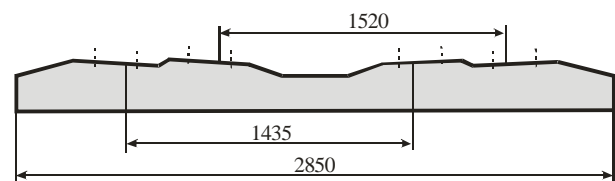


Рис. 5. Залізобетонна шпала Ш2С-1 для суміщеної конструкції колії

Fig. 5. Reinforced sleeper Ш2С-1 for the dual gauge structure

Характеристика обстеженої ділянки колії зведена в табл. 1.

Таблиця 1  
Характеристика ділянки суміщеної залізничної колії

Table 1  
Characteristics of the section of the dual railway gauge

Ширина колії, мм	Пропущений тоннаж, млн тонн бруто	Швидкість, км/год (пас./вант.)
1 520	77,9	80/70
1 435	15,75	80/80

У ході обстеження встановлено наступне: відстань між осями шпал знаходиться в діапазоні 630–700 мм, ширина колії – у межах допусків, угону плітей безстикової колії по всіх чотирьох нитках на даній ділянці немає.

Згідно зі спостереженнями за суміщеною колією, на окремих ділянках на шпалах Ш2С-1 у зоні анкерів спостерігаються тріщини як на колії 1 435 мм, так і на колії 1 520 мм, що може призвести до виходу з ладу шпали та наступних розладів верхньої будови колії. Більшість тріщин у зоні анкерів шпали спостерігались на колії 1 435 мм. Виявлені дефектні шпали мають різний характер пошкоджень: у зоні внутрішніх анкерів колії 1 435 мм (рис. 6, а), поздовжні тріщини на торцях шпал (рис. 6, б), поздовжні тріщини від торця шпал у підрейковій зоні (рис. 6, в), поздовжні тріщини від зони анкера до торця шпал (рис. 6, з).

Тріщини в зоні анкерів шпал на суміщеній колії у зв'язку з малою вантажнапруженістю не мають динамічного розвитку й виникають унаслідок некомплексного виправлення колії. Якщо виправлення суміщеної колії проводять машинним способом по колії 1 520 мм, а колію 1 435 мм не виправляють, то тріщини в зоні анкерів виникають на шпалах в зоні анкерів колії 1 435 мм. Якщо виправляти машинами колію 1 435 мм, то тріщини у зоні анкерів виникають на шпалах Ш2С-1 на колії 1 520 мм (на внутрішній частині шпали, під час навантажень на колію 1 520 мм шпала працює на злам, з польової сторони шпали колія 1 520 мм працює як консоль).

Для попередження виникнення тріщин і зламів шпал на суміщеній колії рекомендовано переглянути порядок транспортування та

вкладання рейко-шпальної решітки зі шпалами для суміщеної колії типу Ш2С-1 довжиною 2 850 мм і технологію виправлення колій 1 435 і 1 520 мм.

До недоліків потрібно віднести також конструкцію залізобетонних шпал і, як наслідок, технологію утримання верхньої будови за нерівномірного завантаження нормальної і європейської колій, що призводить до виходу з ладу шпал (рис. 6, д, б, е).

Для аналізу надійності роботи й строків експлуатації залізобетонних шпал існує декілька підходів [2, 6]. У різних експлуатаційних умовах інформація про характер їх роботи базується на теорії надійності. На основі даних обстеження залізобетонних шпал [6] були встановлені залежності настання непридатності й загальні ураження шпал дефектами залежно від експлуатаційних умов – осьове навантаження, річні перевезення, радіуси кривих. Крім головних факторів – силових, ураховано також фактор часу перебування шпал у колії, природні та кліматичні впливи – кількість циклів заморожування-розмерзання, корозійного впливу та ін.

Робота шпал залежить не тільки безпосередньо від навантаження на них, а й в значній мірі визначається контактом із баластом [15]. Для визначення напружень у підшпальній основі було обрано просторову модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності [5].

У моделі використана просторова система координат, у якій залізнична колія задана як набір об'єктів, які мають геометричні розміри та фізичні властивості. Її основу складає опис напружено-деформованого стану підрейкової основи, до якого прикладені сили, що діють на опори від прогину рейки. Ці сили визначають у процесі моделювання як сполучення, що пов'язує прогин рейки й деформацію підрейкової основи. Коливання рейки, яка спирається на опори, визначають з умови її взаємного прогину з підрейковою основою в місцях опор від сил, що передаються на ці опори від рейки. В об'єктах підрейкової основи виникають напруження, фронт поширення яких змінюється в часі. Зона дії напружень обмежена поверхнею, яку можна описати множиною векторів. Їх положення визначає швидкість поширення

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

в довільному напрямку, яка залежить від поперечної та поздовжньої швидкості руху хвиль у речовині з заданим модулем пружності Юнга, коефіцієнтом Пуассона й щільністю. Із кожним часовим кроком зона дії напружень збільшується, поділяючи підрейкову основу на умовні сегменти. Кожен такий сегмент складається з окремих елементів – простру, обмеженого чотирма суміжними векторами. Сумарні дані по

кожному об'єкту складають інформацію про напружений стан сегмента. Якщо під час розв'язання таких рівнянь з'ясується, що вектор виходить за межі об'єкта (переходить до наступного), його параметри корегують. Динамічна деформація сегмента підпорядкована системі диференціальних рівнянь. Її розв'язок визначає напруження (деформації) будь-якої точки підрейкового простору [5].

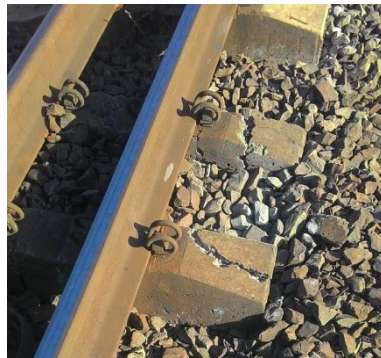
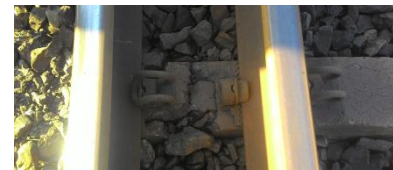
*a – a**б – b**в – c**г – d**д – e**е – f*

Рис. 6. Руйнування залізобетонних шпал у суміщеній колії:

*a* – тріщини в зоні внутрішніх анкерів; *b* – поздовжні тріщини на торцях шпал;  
*в* – поздовжні тріщини в підрейковій зоні; *г* – поздовжні тріщини від зони анкера до торця шпал;  
*д* – вихід із ладу (зовнішні руйнування); *е* – вихід із ладу (внутрішні руйнування)

Fig. 6. Destruction of reinforced sleepers in a dual gauge:

*a* – cracks in the zone of internal anchors; *b* – longitudinal cracks on the ends of sleepers;  
*c* – longitudinal cracks in the under-sleeper base; *d* – longitudinal cracks from the anchor to the end of the sleepers; *e* – out of order (external destruction); *f* – out of order (internal destruction)

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

## Результати

Було розглянуто рух пасажирського вагона по залізничній колії звичайної конструкції, взятої як еталон для подальшого аналізу: рейки Р65, залізобетонні шпали Ш-1-1, щебеневий баласт товщиною 60 см. У наведених прикладах модуль деформації баласту складає 200 МПа, земляного полотна – 35 МПа, що відповідає загальному модулю пружності підрейкової основи зазначеної конструкції залізничної колії на рівні 50 МПа – прийняте значення для більшості типових розрахунків залізничної колії на міцність; величину сили, що діє від рейки на опору, отримано на рівні 30 кН.

Аналогічно було розглянуто конструкцію колії для суміщеного руху, відмінної від еталонної застосуванням шпал типу Ш2С-1.

Основні результати розрахунків склали матриці напружень у підшпальній основі на момент розташування колеса в перерізі дослідної шпали (рис. 7–9). Такий підхід дає можливість проаналізувати значення максимальних напружень, їх поширення й затухання як по довжині шпали, так і по глибині (у баласті, у земляному полотні та в місцях переходів між шарами). Результати, наведені на рис. 7–9, охоплюють 2 м простору вздовж шпали і 1,1 м під шпалою (0,6 м баласту й 0,5 м земляного полотна).

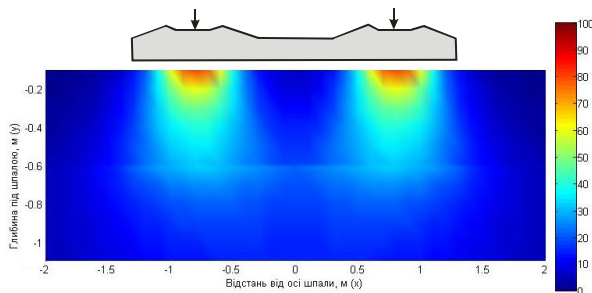


Рис. 7. Поширення напружень під шпалою Ш-1-1 (звичайна конструкція колії з шириною 1 520 мм)

Fig. 7. Distribution of stresses under the sleepers Ш-1-1 (ordinary construction of the track, width of 1 520 mm)

Процес накопичення деформацій баластного шару під час проходження поїздів можна поділити на дві фази: перша відбувається відразу після введення ділянки в експлуатацію як стабілізація колії після укладання завдяки ущільненню структури баласту; друга (суттєво повільніша) – триває весь подальший термін ек-

сплуатації за рахунок багатоциклічного навантаження, потрапляння забруднювачів, появи відступів у геометрії колії тощо. Сьогодні існує багато методик, що описують процес накопичення деформацій від кількості циклів навантажень і низки інших факторів. Найчастіше використовують логарифмічні або експоненціальні залежності, які були отримані в ході лабораторних і натурних випробувань. Детальний огляд таких методик зроблено, наприклад, у роботі [21]. Пошук нових і вдосконалення наявних моделей триває й зараз. Серед нових напрямків можна вказати підходи, які базуються на ентропії системи [5].

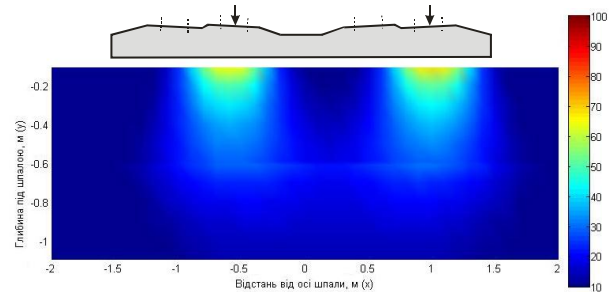


Рис. 8. Поширення напружень під шпалою Ш2С-1 (суміщена конструкція, рух по колії 1 520 мм)

Fig. 8. Distribution of stresses under the sleepers Ш2С-1 (combined construction, movement along the track 1 520 mm)

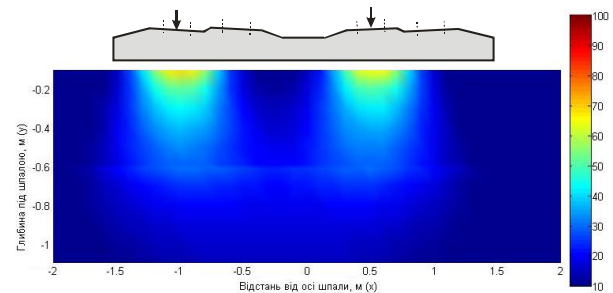


Рис. 9. Поширення напружень під шпалою Ш2С-1 (суміщена конструкція, рух по колії 1 435 мм)

Fig. 9. Distribution of stresses under the sleepers Ш2С-1 (combined structure, movement along the track 1 435 mm)

Також розвиваються й методи лабораторних досліджень роботи баласту [11, 12, 18, 19]. У праці [12] проведено аналіз більшості сучасних підходів щодо лабораторної оцінки напруженого стану й вичерпання ресурсу роботи щебеню.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Наведені в цих працях дослідження, як правило, спрямовані на опис другої фази роботи баластного шару. Ураховуючи, що при цьому розглядаються значні проміжки часу, яким відповідають багатоциклічні навантаження, суттєва деталізація сил і поширення їх дії зайва. Однак для порівняння роботи баласту під час руху по різній ширині суміщеної колії такого підходу недостатньо.

У цьому дослідженні за основу взята матриця напружень у підшпальній основі. У різних точках виникають різні напруження (див. рис. 7–9), що призводить до утворення в баласті зон із різним тиском. Припускаємо гіпотезу, що девіація часток баласту (яка особливо характерна для першої фази деформацій) буде мати пріоритетні напрямки в зону з менши-

ми напруженнями  $\sigma_{ij}$ . Тоді для окремої точки підшпального простору  $(x; y)$  напрямок девіації  $\alpha_{xy}$  будемо визначати так:

$$\left. \begin{array}{l} \min \{ \sigma_{ij} \setminus \sigma_{xy} \} \rightarrow \alpha_{xy}; \\ i \in [x-1; x+1]; \\ j \in [y-1; y+1]. \end{array} \right\} \quad (1)$$

Розрахунки виконані по довжині шпали ( $x$ ) і глибини шару під шпалою ( $y$ ) з кроком 10 см із точністю  $45^\circ$ . Результати розрахунків показані на рис. 10, *a* для шпали Ш-1-1 (ширина колії 1 520 мм) і на рис. 10, *б* для шпали Ш2С-1 (із суміщеною колією 1 520/1 435 мм) відповідно.

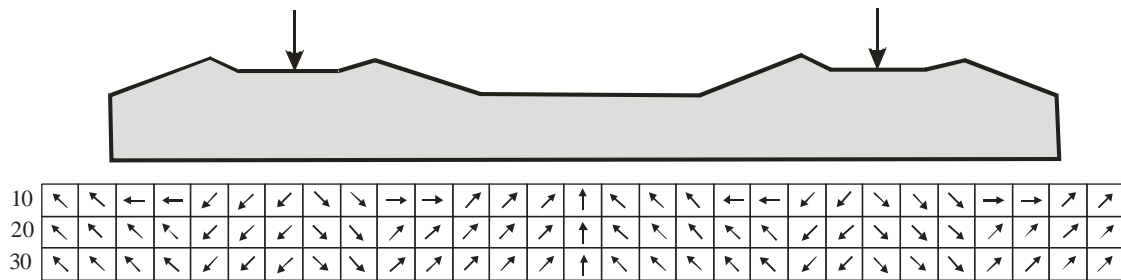
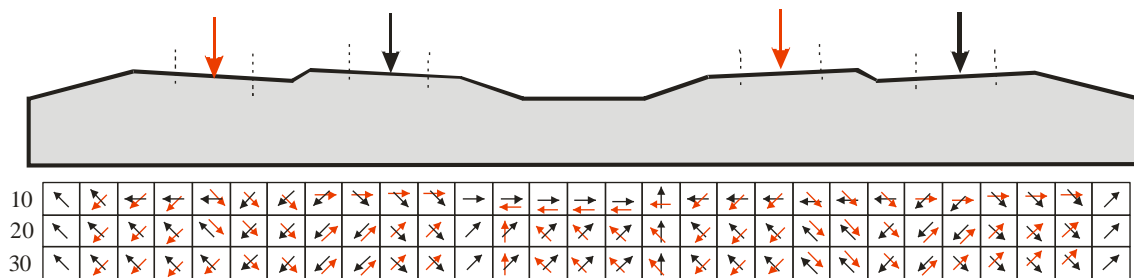
*a–a**б–b*

Рис. 10. Основні напрямки девіації баласту на глибині 10–30 см від підшви шпали:  
*a* – під шпалою Ш-1-1; *б* – під шпалою Ш2С-1 (для колії 1 435 мм показані тільки у випадках від'ємності від колії 1 520 мм)

Fig. 10. The main directions of ballast deviation at a depth of 10–30 cm from the sleeper sole:  
*a* – under the sleeper Ш-1-1; *b* – under the sleeper Ш2С-1  
(for a 1 435 mm track shown only in cases of distance from the track of 1 520 mm)

Для шпали Ш-1-1 девіація баласту має постійні напрямки, симетричні відносно прикладання навантаження і по довжині шпали. Це сприяє швидкому завершенню першої фази

стабілізації й роботі баластного шару в другій фазі в якості, наближеній до пружної.

Під шпалою Ш2С-1 спостерігаємо асиметричне розподілення напрямків девіації баласту



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

для кожного з варіантів експлуатації (рух по колії 1 520 і 1 435 мм) за рахунок як несиметричності конструкції шпали, так і несиметричності прикладання навантаження. Крім того, під час руху по різній ширині колії змінюється й напрямок девіації, у деяких зонах – в основному в перерізах обпирання рейок – напрямком може змінюватись більше ніж на 90° або навіть на протилежний. Напевно, за достатнього й рівномірного первинного ущільнення баластного шару це не є причиною для ускладнення роботи колії, особливо враховуючи відносно невеликі значення загальних напружень (див. рис. 8–9). Однак за наявності відхилень в ущільненні баласту це стає суттєвим фактором, який призводить до збільшення часу першої фази стабілізації й зростання інтенсивності накопичення залишкових деформацій під час подальшої експлуатації. Такий напружено-деформований стан підшпальної основи, у свою чергу, може призвести до виникнення деформацій у шпалах і погіршення загальної геометрії колії.

На підставі отриманих результатів можна рекомендувати ущільнювати баласт і використовувати додаткові засоби для поліпшення стійкості, такі як георешітки або спеціальні зв'язувальні речовини.

#### Наукова новизна та практична значимість

У роботі набули подальшого розвитку задачі моделювання взаємодії колії й рухомого складу, зокрема для визначення напружено-деформованого стану підшпальної основи суміщеної колії.

Отримані результати можуть бути використані під час визначення термінів ремонтних робіт для ділянок суміщеної конструкції колії, обґрунтування необхідного рівня ущільнення баласту й доцільності застосування георешіток або спеціальних зв'язувальних речовин.

#### Висновки

Одним із засобів розв'язання задачі залізничного сполучення України з державами, які використовують європейську ширину колії, є суміщена конструкція залізничної ділянки. Це дозволяє забезпечити пропуск поїздів із вагонами європейської колії в глибину країни для подальшого перевантаження на вузлових станціях і виключає надмірне навантаження на прикордонні станції.

Особливістю конструкції суміщеної колії є застосування спеціальних залізобетонних шпал (типу Ш2С-1), які дають змогу одночасного розташування чотирьох ниток рейок з організацією руху по коліях шириною 1 435 і 1 520 мм на одному залізничному полотні.

Асиметрія в навантаженні такої шпали і, як наслідок, асиметрія в подальшому поширенні напружень у підшпальній основі формує напружено-деформовану роботу суміщеної конструкції, яка відрізняється від роботи звичайної колії на залізобетонних шпалах.

Аналіз результатів моделювання напружень у підшпальній основі суміщеної колії не показав їх збільшення за абсолютними значеннями, але виявив циклічну зміну можливих напрямків девіації часток баласту за наявності передумов до виникнення непружних деформацій у баластному шарі.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арбузов, М. А. Температурний інтервал закріплення плитей суміщеної безстикової колії / М. А. Арбузов // Зб. наук. пр. Донец. ін-ту залізн. трансп. – Донецьк, 2013. – № 34. – С. 133–141.
2. Досвід експлуатації пружних рейкових скріплень типу PRS і залізобетонних шпал із ними / А. А. Пługін, А. М. Пługін, С. В. Мірошніченко [та ін.] // Українські залізниці. – 2015. – № 3-4 (21-22). – С. 60–64.
3. Дьомін, Р. Ю. Впровадження AGCS-технологій – шлях до інтеграції залізниць України в європейську транспортну мережу / Р. Ю. Дьомін, Ю. В. Дьомін // Вагонний парк. – 2017. – № 5-6 (122-123). – С. 20–23.
4. Авдєєв, С. Василь Куницький: «Інноваційна продукція для українських залізниць» / С. Авдєєв // Українські залізниці. – 2014. – № 10 (16). – С. 48–49.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

5. Курган, М. Б. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні : монографія / М. Б. Курган, Д. М. Курган ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро : ДНУЗТ, 2016. – 283 с.
6. Мартинов, І. Е. Параметри надійності роботи залізобетонних шпал у різних експлуатаційних умовах / І. Е. Мартинов, В. Г. Вігольберг, Д. О. Потапов // 36. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізн. трансп. – Харків, 2018. – Вип. 175. – С. 47–57. doi: 10.18664/1994-7852.175.2018.127076
7. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року [Електронний ресурс] // М-во інфраструктури України. – Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/news/28581.html> – Назва з екрана. – Перевірено : 22.01.2019.
8. Технические требования к конструкции железобетонных шпал совмещенной колеи 1 520 мм и 1 435 мм [Електронний ресурс] : Памятка № Р 755/5 // Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД). – Варшава, 2003. – Режим доступу: <http://clc.am/9TOhyg> – Назва з екрана. – Перевірено : 23.01.2019.
9. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони [Електронний ресурс] // Законодавство України. – Режим доступу: [http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011](http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011) – Назва з екрана. – Перевірено : 23.01.2019.
10. Cerniauskaite, L. European-standard railway line between Vilnius and Kaunas / L. Cerniauskaite, K. Sakalauskas, A. Massel // Environmental Engineering : The 7<sup>th</sup> International Conference (May 22–23, 2008). – Vilnius, Lithuania, 2008. – P. 1125–1129.
11. Fischer, S. Breakage Test of Railway Ballast Materials with New Laboratory Method / S. Fischer // Periodica Polytechnica Civil Engineering. – 2017. – Vol. 61, No. 4. – P. 794–802. doi: 10.3311/ppci.8549
12. Fischer, S. Special laboratory testing method for evaluation particle breakage of railway ballast material / S. Fischer, A. Németh // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 2 (74). – С. 87–102. doi: 10.15802/stp2018/130854
13. Kurhan, M. Problems of providing international railway transport / M. Kurhan, D. Kurhan // MATEC Web of Conf. – 2018. – Vol. 230. doi: 10.1051/mateconf/201823001007
14. Kurhan, M. The Effectiveness Evaluation of International Railway Transportation in the Direction of «Ukraine – European Union» / M. Kurhan, D. Kurhan // Transport Means 2018 : Proc. of the 22<sup>nd</sup> Intern. Sci. Conf. (Oct. 03–05, 2018, Trakai, Lithuania). – Kaunas, 2018. – Pt. I. – P. 145–150.
15. Normalised curvature square ratio for detection of ballast voids and pockets under rail track sleepers / S. Kaewunruen, R. Janeliukstis, A. Freimanis, K. Goto // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 1106. doi: 10.1088/1742-6596/1106/1/012002
16. Pittman, R. Reforming and restructuring Ukrzaliznytsia: a crucial task for Ukrainian reformers / R. Pittman // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 34–50. doi: 10.15802/stp2017/92775
17. Rail Baltica [Електронний ресурс] // Вікіпедія. – Режим доступу: [https://lt.wikipedia.org/wiki/Rail\\_Baltica](https://lt.wikipedia.org/wiki/Rail_Baltica) – Назва з екрана. – Перевірено : 23.01.2019.
18. Research of Railway Crashed Stone Use of 40–70 mm Fraction / O. Pshinko, O. Patlasov, V. Andrieiev [et al.] // Transport Means 2018 : Proc. of the 22<sup>nd</sup> Intern. Sci. Conf. (Oct. 03–05, 2018, Trakai, Lithuania). – Kaunas, 2018. – Pt. I. – P. 170–178.
19. Specific assessment method of railway ballast particle degradation based on unique laboratory test / S. Fischer, A. Nemeth, D. Harrach, E. Juhasz // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 3 (75). – С. 87–94. doi: 10.15802/stp2018/134655
20. Szkoda, M. Assessment of reliability, availability and maintainability of rail gauge change systems / M. Szkoda // Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability. – 2014. – Vol. 16 (3). – P. 422–432.
21. The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works / M. Sysyn, U. Gerber, V. Kovalchuk, O. Nabochenko // Archives of Transport. – 2018. – № 47(3). – P. 91–107. doi: 10.5604/01.3001.0012.6512

Н. Б. КУРГАН<sup>1</sup>, Д. Н. КУРГАН<sup>2\*</sup>, М. Ю. БРАЖНИК<sup>3</sup>, Д. Л. КОВАЛЬСКИЙ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Проектирование и строительство дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, эл. почта kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709

<sup>2\*</sup>Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, эл. почта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

<sup>3</sup>Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, эл. почта xpunkxxx@gmail.com, ORCID 0000-0003-0670-8475

<sup>4</sup>Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, эл. почта kvalskyid@gmail.com, ORCID 0000-0002-0247-2074

## ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОВМЕЩЕННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

**Цель.** Возможности железнодорожного транспорта для организации перевозок между странами Европейского Союза и Украины используют не в полной мере, поскольку существует ряд технических различий транспортных систем, а именно: ширина колеи, характеристики подвижного состава, напряжение в контактной сети, габариты и т. д. Один из вариантов организации транспортирования грузов в международном сообщении – это использование совмещенной колеи 1 435/1 520 мм. Цель данной работы – анализ особенностей напряженно-деформированного состояния совмещенной конструкции пути, в первую очередь изменений в работе подшпальной основы вследствие использования специальной конструкции железобетонной шпалы с одновременным креплением четырех рельсовых нитей. **Методика.** Для определения напряжений в подшпальной основе было выбрано пространственную модель динамических деформаций железнодорожного пути на основе теории упругости. Рассмотрено движение по железнодорожному пути обычной конструкции (со шпалами Ш-1-1), принятому в качестве эталонного, и по пути для совмещенного движения, который отличается от эталона использованием шпал типа Ш2С-1. Основные результаты расчетов составили матрицы напряжений в подшпальной основе. **Результаты.** Анализ результатов моделирования напряжений в подшпальной основе совмещенного пути не показал их увеличения по абсолютным значениям, но выявил циклические изменения возможных направлений девиации частиц балласта при наличии предрасположенности к возникновению неупругих деформаций в балластном слое. Такое напряженно-деформированное состояние подшпальной основы, в свою очередь, может привести к появлению деформаций в шпалах и ухудшению общей геометрии пути. **Научная новизна.** В работе получили дальнейшее развитие задачи моделирования взаимодействия пути и подвижного состава, в частности для определения напряженно-деформированного состояния подшпальной основы совмещенного пути. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы для определения сроков ремонтных работ на участках с совмещенной конструкцией пути, обоснования необходимой степени уплотнения балласта, целесообразности применения георешеток или специальных связывающих материалов.

**Ключевые слова:** международные железнодорожные перевозки; железнодорожный путь; совмещенный путь; ширина пути; взаимодействие пути и подвижного состава; балласт

М. В. KURHAN<sup>1</sup>, D. M. KURHAN<sup>2\*</sup>, M. Y. BRAZHNYK<sup>3</sup>, D. L. KOVALSKYI<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Dep. «Roads Design and Construction», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel +38 (056) 373 15 48, e-mail kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709

<sup>2\*</sup> Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

<sup>3</sup> Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail xpunkxxx@gmail.com, ORCID 0000-0003-0670-8475

<sup>4</sup> Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kvalskyid@gmail.com, ORCID 0000-0002-0247-2074

## FEATURES OF STRESS-STRAIN STATE OF THE DUAL RAILWAY GAUGE

**Purpose.** The possibilities of railway transport for organizing transportation between the countries of the European Union and Ukraine are not fully utilized, since there are a number of technical differences in transport systems, namely: wheel gauge, characteristics of rolling stock, voltage in the contact network, dimensions, etc. One of the options in the organization of goods transportation in international traffic is the use of 1.435/1.520 mm dual gauge. The purpose of this study is to analyze the features of the stress-strain state of the combined construction of the track, first of all the changes in the operation of the under-sleeper base due to the use of a special design of reinforced concrete sleepers with simultaneous fastening of four rails. **Methodology.** To determine the stresses in the under-sleeper base, a spatial model of dynamic deformations of the railway track was chosen based on the elasticity theory. The movement on a railway track of a conventional construction (with sleepers III-1-1), accepted as a reference one, and along the track for combined movement, which differs from a standard using sleepers of type III2C-1, was considered. The main results of the calculations were the matrix of stresses in the under-sleeper base. **Findings.** The analysis of the results of the stresses simulation in the under-sleeper base of the dual gauge did not show their increase in absolute values, but revealed cyclical changes in the possible directions in deviation of ballast particles if there is a propensity for the occurrence of inelastic deformations in the ballast layer. Such a stress-strain state of the under-sleeper base, in turn, can lead to the appearance of deformations in the sleepers and the deterioration of the overall track geometry. **Originality.** The tasks of simulation got the further development of the track and rolling stock interaction, in particular to determine the stress-strain state of the under-sleeper base of the dual gauge. **Practical value.** The obtained results can be used to determine the timing of repair work on the sections with a combined track construction, justify the necessary degree of ballast consolidation, the feasibility of using the geogrids or special bonding materials.

**Keywords:** international rail transportation; railway track; dual gauge; railroad gage; track and rolling stock interaction; ballast

### REFERENCES

1. Arbuzov, M. A. (2013). Temperaturnyi interval zakriplennia plitei sumishchenoi bezstykovoi kolii. *Zbirnik naukovih prac' of Donetsk Railway Transport Institute*, 34, 133-141. (in Ukrainian)
2. Pluhin, A. A., Pluhin, A. M., Miroshnichenko, S. V., Kalinin, O. A., Liutyi, V. A., & Tulei, Y. L. (2015). Dosvid ekspluatatsii pruzhnykh reikovykh skriplen typu PRS i zalizobetonnykh shpal iz nymy. *Ukrainski zaliznytsi*, 3-4(21-22), 60-64. (in Ukrainian)
3. Domin, R. Y., & Domin, Y. V. (2017). Vprovadzhennia AGCS-tekhnologii – shliakh do intehratsii zaliznyts Ukrainy v yevropeisku transportnu merezhu. *Car Fleet*, 5-6(122-123), 20-23. (in Ukrainian)
4. Avdieiev, S. (2014). Vasyl Kunytskyi: «Innovatsiina produktsiia dlia ukrainskykh zaliznyts». *Ukrainski zaliznytsi*, 10(16), 48-49. (in Ukrainian)
5. Kurhan, M. B., & Kurhan, D. M. (2016). *Teoretychni osnovy vprovadzhennia vysokoshvydkisnoho rukhu poizdiv v Ukraini: monohrafiia*. Dnipro: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
6. Martynov, I., Vitolberg, V., & Potapov, D. (2018). Parameters of Reliability of Reinforced Concrete Shapes in Different Operating Conditions. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 175, 47-57. doi: 10.18664/1994-7852.175.2018.127076 (in Ukrainian)
7. Natsionalna transportna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku. *Ministerstvo infrastruktury Ukrainy*. Retrieved from <https://mtu.gov.ua/news/28581.html> (in Ukrainian)
8. Tekhnicheskie trebovaniya k konstruktsii zhelezobetonnykh shpal sovmeshchennoy kolei 1 520 mm i 1 435 mm : Pamyatka № P 755/5. (2003). *Organisation for Co-operation Between Railways (OSJD)*. Warsaw. Retrieved from <http://clc.am/9TOhyg> (in Russian)
9. Uhoda pro asotsiatsiiu mizh ukrainoiu, z odniiei storony, ta yevropeiskym soiuzom, yevropeiskym spivtovarystvom z atomnoi enerhii i yikhnimy derzhavamy-chlenamy, z inshoi storony. *Legislation of Ukraine*. Retrieved from [http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011](http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011) (in Ukrainian)
10. Cerniauskaite, L., Sakalauskas, K., & Massel, A. (2008). European-standard railway line between Vilnius and Kaunas. *Environmental Engineering: The 7<sup>th</sup> International Conference (May 22–23, 2008)*. Vilnius. (in English)

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

11. Fischer, S. (2017). Breakage Test of Railway Ballast Materials with New Laboratory Method. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(4), 794-802. doi: 10.3311/ppci.8549 (in English)
12. Fischer, S., & Németh, A. (2018). Special laboratory testing method for evaluation particle breakage of railway ballast material. *Science and Transport Progress*, 2(74), 87-102. doi: 10.15802/stp2018/130854 (in English)
13. Kurhan, M., & Kurhan, D. (2018). Problems of providing international railway transport. *MATEC Web of Conferences*, 230. doi: 10.1051/mateconf/201823001007 (in English)
14. Kurhan, M., & Kurhan, D. (2018, October). The Effectiveness Evaluation of International Railway Transportation in the Direction of «Ukraine – European Union». *Transport Means 2018: Proceedings of 22<sup>nd</sup> International Scientific Conference*. Kaunas. (in English)
15. Kaewunruen, S., Janeliukstis, R., Freimanis, A., & Goto, K. (2018). Normalised curvature square ratio for detection of ballast voids and pockets under rail track sleepers. *Journal of Physics: Conference Series*, 1106. doi: 10.1088/1742-6596/1106/1/012002 (in English)
16. Pittman, R. (2017). Reforming and restructuring Ukrzaliznytsia: a crucial task for Ukrainian reformers. *Science and Transport Progress*. 1(67), 34-50. doi: 10.15802/stp2017/92775 (in English)
17. Rail Baltica. *Vikipedija*. Retrieved from [https://lt.wikipedia.org/wiki/Rail\\_Baltica](https://lt.wikipedia.org/wiki/Rail_Baltica) (in English)
18. Pshinko, O., Patlasov, O., Andrieiev, V., Arbuzov, M., Hubar, O., Hromova, O., & Markul, R. (2018, October). Research of Railway Crashed Stone Use of 40–70 mm Fraction. *Transport Means 2018: Proceedings of 22<sup>nd</sup> International Scientific Conference*. Kaunas. (in English)
19. Fischer, S., Nemeth, A., Harrach, D., & Juhasz, E. (2018). Specific assessment method of railway ballast particle degradation based on unique laboratory test. *Science and Transport Progress*, 3(75), 87-94. doi: 10.15802/stp2018/134655 (in English)
20. Szkoda, M. (2014). Assessment of reliability, availability and maintainability of rail gauge change systems. *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*, 16(3), 422-432. (in English)
21. Sysyn, M., Gerber, U., Kovalchuk, V., & Nabochenko, O. (2018). The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works. *Archives of Transport*, 47(3), 91-107. doi: 10.5604/01.3001.0012.6512 (in English)

Надійшла до редколегії: 06.09.2018

Прийнята до друку: 16.01.2019