

УДК 625.1:691.328

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ З БЕЗПІДКЛАДКОВИМ ПРУЖНИМ РЕЙКОВИМ
СКРІПЛЕННЯМ**

Д-р техн. наук А. А. Пługін, кандидати техн. наук С. В. Мірошніченко, О. А. Калінін,
магістранти Л. В. Ляху, С. Ю. Ганжела

**THE CRACK RESISTANCE OF REINFORCED-CONCRETE SLEEPERS' WITH
ELASTIC RAIL FASTENING SYSTEMS WITHOUT BASE-PLATE. EXPERIMENTAL
RESEARCH**

D. Sc. (Tech.) A. Plugin, PhD (Tech.) S. Miroshnichenko, PhD (Tech.) O. Kalinin,
master L. Liakhu, master S. Hanzhela

Анотація. З метою встановлення впливу різних чинників на пошкодження залізобетонних шпал з проміжними рейковими скріпленнями безпідкладкового типу та підвищення їхньої тріщиностійкості виконано експериментальні дослідження, які включали натурні обстеження та випробування статичними і динамічними навантаженнями. У результаті випробувань шпал статичним навантаженням встановлено вплив відхилення арматурного пакета від проєктного положення і висоти перерізів шпал від проєктних величин на показник їхньої тріщиностійкості. У результаті випробувань шпал динамічними навантаженнями встановлено, що за рахунок підвищення класу бетону ресурс шпал до утворення пошкоджень підвищується. Для шпал з проміжними рейковими скріпленнями безпідкладкового типу рекомендовані заходи щодо зниження пошкоджуваності та підвищення їхнього ресурсу.

Ключові слова: залізобетонна шпала, проміжне рейкове скріплення, тріщиностійкість, клас бетону, пошкодження.

Abstract. In order to establish the influence of various factors on the reinforced-concrete sleepers with elastic rail fastening systems without base-plate and to increase their crack resistance, experimental researches were carried out, including field examinations and tests of static and dynamic (shock and vibration) loads. The full-scale research was made on rail sections under standard operational modes and on a test track section with sleepers of the concrete grades C32/40, C35/45 and C40/50. As a result of the studies, a weak correlation was noted between the tonnage transported and the number of damaged sleepers. The correlation between the traffic density and the number of damaged sleepers was not identified.

Static load tests on sleepers showed the influence of the deviation of the reinforcement package from the design position and the height of the cross-sections on the indicator of sleepers' crack resistance. For the under-rail section, the displacement of the reinforcement package by 5 mm down causes a decrease in the crack resistance limit by 9%, and the strength's decrease of redistribution by 13 %. The downward displacement, on the contrary, causes an increase in the crack resistance and ultimate strength. A decrease of the rail section from 218 to 185 mm leads to a decrease in the crack resistance limit by 33 %, and the ultimate strength by 48 %.

Dynamic load tests on sleepers showed increasing resource of sleepers due to an increase in the class of concrete from C32 / 40 to C35 / 45 and, especially, C40 / 50. We have found the incensement of sleepers' resources before damage: in case of shock impacts - by 14 i 32 %, in case of vibration impacts - by 33 i 187 %. Measures are recommended to reduce damage and increase the resource of reinforced-concrete sleepers with elastic rail fastening systems without base-plate.

These measures include:

- the manufacture of concrete sleepers C35 / 45 (compressive strength);
- a recommendation to manufacturers to observe strictly the requirements for the quality of aggregates, in particular, for the content of reactive silica, as well as requirements for the strength and frost resistance of concrete, crack resistance of sleepers;
- revise the downwarding of the norms' of operating time for corrective-tamping work.

Keywords: reinforced concrete sleeper, intermediate rail fastening, crack resistance, concrete class, damage.

Вступ. Найбільш масовим типом залізобетонних шпал на залізницях України є армовані високоміцним дротом попередньо напружені шпали типу ШІ для

клемно-болтових рейкових скріплень марки КБ [1]. У цій конструкції між підшвою рейки та підрейковою площадкою шпали встановлюється сталева підкладка з

гумовою прокладкою, яка перерозподіляє навантаження по великій площі бетону. Починаючи з 1990-х рр. на залізницях України впроваджуються шпали типу СБЗ (рис. 1) для безпідкладкових пружних рейкових скріплень КПП-5, привабливих своїми малодетальністю, низькими

металомісткістю та експлуатаційною трудомісткістю. Прототипом цих скріплень були польські скріплення СБ-3. Шпали СБЗ відрізняються від Ш1 наявністю замуrowаних у бетон анкерів замість отворів для закладних болтів і більшою висотою підрейкового перерізу.

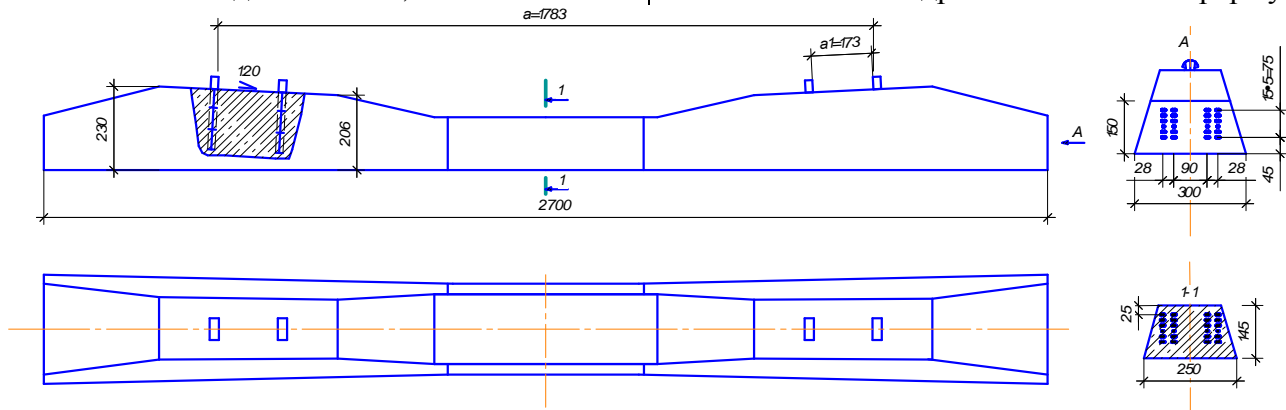


Рис. 1. Конструкція шпал типу СБЗ

Шпали запроектовані з бетону класу С32/40 на відповідність максимальним навантаженням від рухомого складу 232 кН/вісь [2], проходять вихідний контроль згідно з роботою [1]. Проте під час експлуатації з напрацюванням, яке оцінюється пропущеним тоннажем, у шпалах утворюються тріщини та інші пошкодження (дефекти) [3]. Починаючи з 2000-х рр. відмічаються й нові види пошкоджень, наприклад сітка тріщин, яка, як правило, виникає через 1-3 роки експлуатації, у подальшому розвивається в більші тріщини та призводить до руйнування. У фахівців колійного господарства склалося стійке враження, що шпали типу СБЗ є менш надійними, ніж шпали типу Ш1, а їхня пошкоджуваність залежить від вантажонапруженості ділянки. Через це на залізницях України шпали з безпідкладковими пружними рейковими скріпленнями укладаються лише на ділянках з вантажонапруженістю не більше 30 млн т бруто/р. Проте авторам не вдалось знайти обґрунтованого кількісного аналізу, який би це довів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тріщини в залізобетонних

шпалах відзначались практично з початку їх застосування [4-7]. У роботі [4] обґрунтовано умови, за яких не розкриватимуться силові тріщини, і розроблено найбільш тріщиностійку конструкцію шпал, а в роботах [5-7] з метою забезпечення їхньої тріщиностійкості та довговічності удосконалено технологію їх виробництва. У роботах [8-12] утворення сітки тріщин у шпалах справедливо пов'язується з корозією бетону від взаємодії луг цементу з реакційно здатними заповнювачами [13-18]. Проте в роботах [4-7] не досліджувались шпали з безпідкладковими пружними скріпленнями. У роботах [8-12] досліджено вплив лужної корозії, а в роботі [19] – динамічних навантажень, проте недостатньо уваги приділено іншим чинникам, що можуть спричинити пошкодження. Авторам не вдалось знайти даних щодо залежності пошкоджуваності шпал від класу бетону, хоча відомо, що в більшості країн застосовуються більш високі класи бетону, ніж в Україні [19].

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження – встановлення впливу різних чинників на

пошкодження залізобетонних шпал з проміжними рейковими скріпленнями безпідкладкового типу та підвищення їхньої тріщиностійкості.

Завдання досліджень: виконати статистичний аналіз пошкоджуваності шпал; провести статичні випробування шпал зі штучно створеним відхиленням арматурного пакета від проектного положення і штучно зниженою висотою перерізів; провести випробування моделей шпал із бетону різного класу динамічними

ударним та вібраційним навантаженнями; розробити рекомендації щодо підвищення тріщиностійкості та зниження пошкоджуваності шпал.

Основна частина дослідження

Статистичний аналіз пошкоджуваності шпал. У результаті натурних досліджень ділянок колії і статистичного аналізу їхніх результатів встановлено характерні пошкодження шпал, наведені в таблиці.

Таблиця

Розповсюдженість пошкоджень шпал з безпідкладковими пружними рейковими скріпленнями, % шпал з пошкодженням від усіх пошкоджених шпал

| Номер | Пошкодження (дефект) | % | Причина пошкодження, примітка |
|-------|---|------|--|
| 1 | Стирання кінця шпали баластом (рис. 2, а) | 41,4 | Осідання баласту під кінцями шпали та підрейковими площадками, коливання кінців шпали від вертикального динамічного навантаження (призводить до виникнення поперечних тріщин біля анкерів і посередині шпали) |
| 2 | Поперечні тріщини посередині шпали (рис. 2, б) | 24,1 | Осідання баласту під підрейковими площадками, вигин шпали від вертикального навантаження (з часом за цими тріщинами може відбутись злам шпали) |
| 3 | Поперечні тріщини біля анкерів (рис. 2, в) | 20,0 | Утворення тріщин від впливу горизонтальної складової навантаження на анкер. Цьому пошкодженню сприяє осідання баласту під підрейковими площадками (з часом призводить до повного руйнування шпали в зоні анкера) |
| 4 | Подовжні тріщини на кінцях шпали (рис. 2, г) | 19,4 | Нерівномірне осідання баласту під рейковими нитками, утворення дотичних напружень, тріщин і відколу від нерівножорсткості основи (з часом за цими тріщинами може відбутись розколювання шпали) |
| 5 | Сітка тріщин на кінцях шпали, рідше – по всій шпалі (рис. 2, д) | 18,0 | Утворення сітки тріщин від корозії заповнювачів лугами цементу, їх розвиток від позмінного заморожування та відтавання (з часом за цими тріщинами може відбутись повне роздроблення бетону) |
| 6 | Поперечні тріщини під підрейковим перерізом | 4,5 | Осідання баласту під підрейковими площадками, утворення тріщин від вертикального навантаження |
| 7 | Подовжня тріщина крізь анкери | 2,4 | Утворення тріщин від впливу горизонтальної складової навантаження на анкер. З часом за цими тріщинами може відбутись розколювання шпали |

| | | | |
|---|---|-----|---|
| 8 | Подовжні тріщини в середній частині (рис. 2, е) | 2,1 | Корозія заповнювачів лугами цементу, утворення тріщин від попереднього натягу арматури внаслідок втрати бетоном міцності (призводить до розколювання шпали або повного роздроблення бетону) |
|---|---|-----|---|

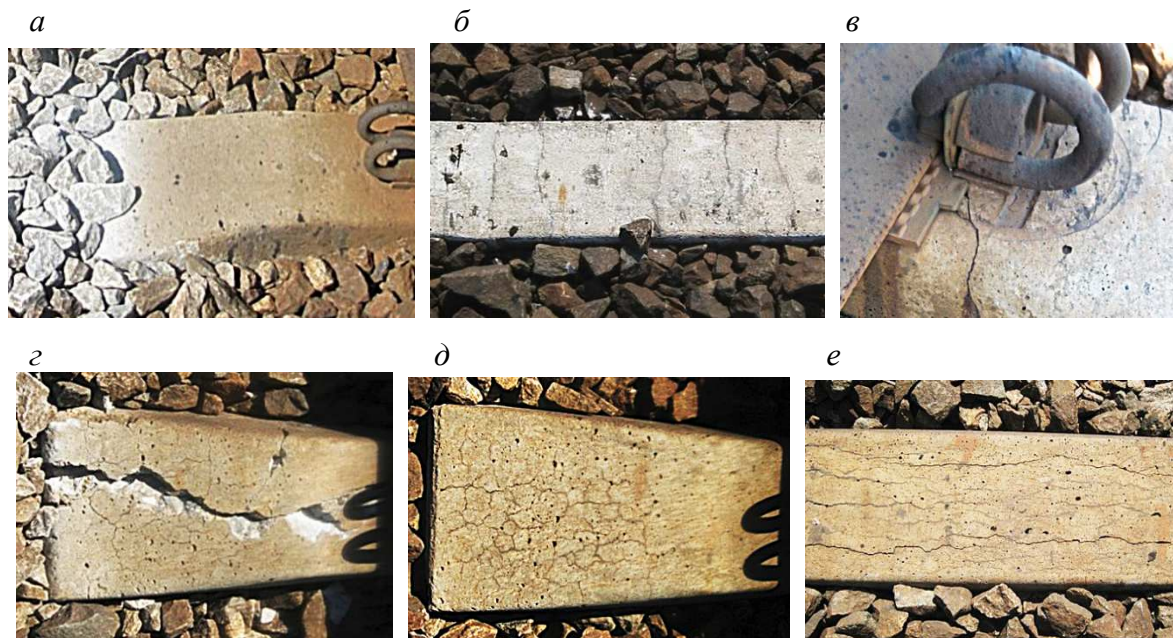


Рис. 2. Пошкодження шпал з безпідкладковими пружними рейковими скріпленнями

Залежність пошкоджуваності шпал від пропущеного тоннажу наведена на рис. 3, 4, а, а від вантажонапруженості ділянки – на рис. 4, б. Спостерігається слабка кореляція, за Чеддоком (квадрат коефіцієнта кореляції R^2 не перевищує 0,3), між пропущеним тоннажем і кількістю

пошкоджених шпал, якій у найбільшому ступені відповідає лінійна залежність. Залежності пошкоджуваності шпал, шт/кмхмлн т, від вантажонапруженості не виявлено.

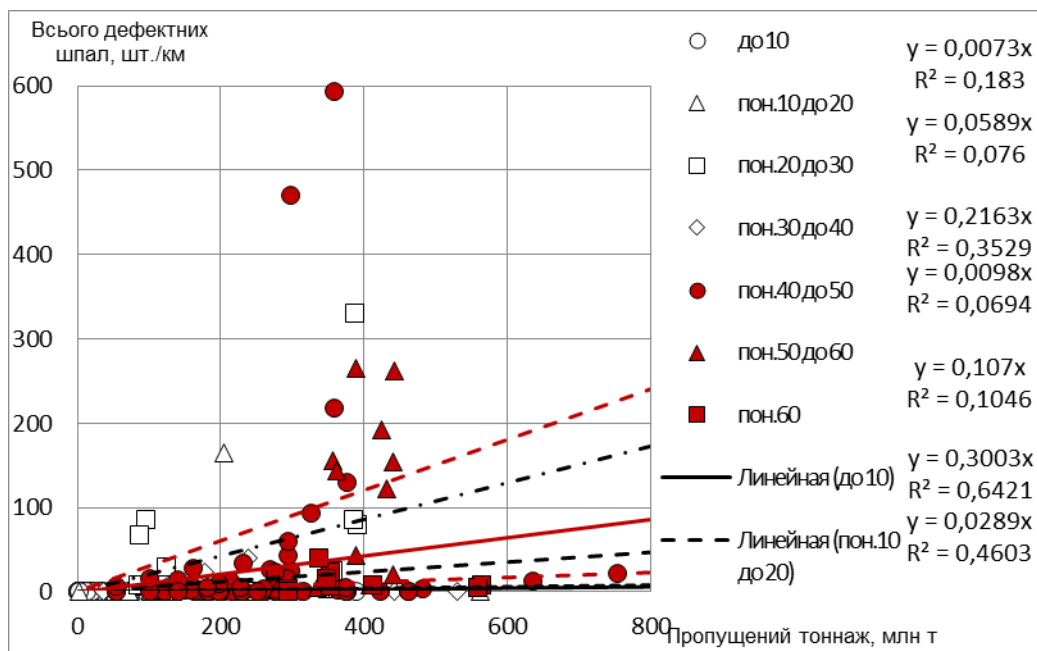


Рис. 3. Залежність кількості дефектних шпал, шт./км, від пропущеного тоннажу, млн т бруто, на ділянках з вантажнапруженістю до 10, понад 10 до 20, понад 20 до 30, понад 30 до 40, понад 40 до 50, понад 50 до 60, понад 60 млн т/р.

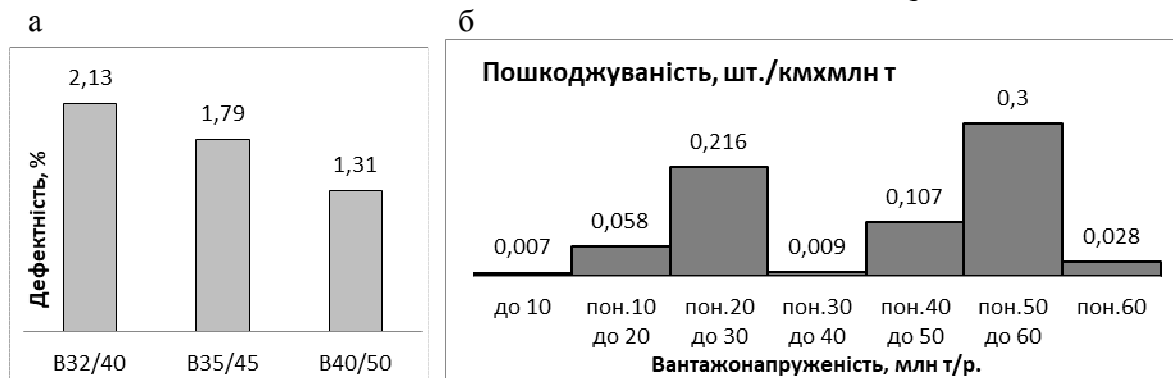


Рис. 4. Залежність кількості шпал з поперечними тріщинами біля анкерів після пропущеного тоннажу 107 млн т бруто від класу бетону (а), залежність пошкоджуваності шпал від вантажнапруженості (б)

Експериментальні дослідження. Проведено статичні випробування шпал спеціально виготовленої експериментальної партії (17 шт.) зі штучно створеним відхиленням арматурного пакета від проектного положення і штучно зниженою висотою

перерізів. Шпали випробували статичним навантаженням за допомогою гідравлічного преса за схемами, наведеними на рис. 5.

Результати дослідження тріщиностійкості та міцності шпал експериментальної партії випробуванням статичним навантаженням наведені на рис. 6.

а

б

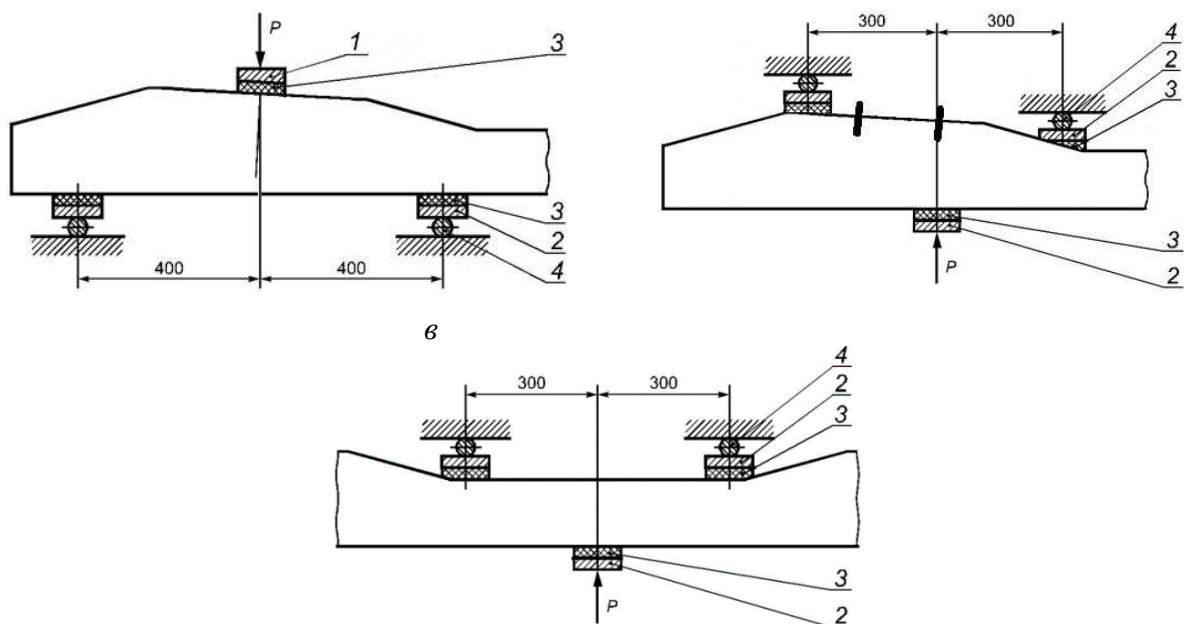
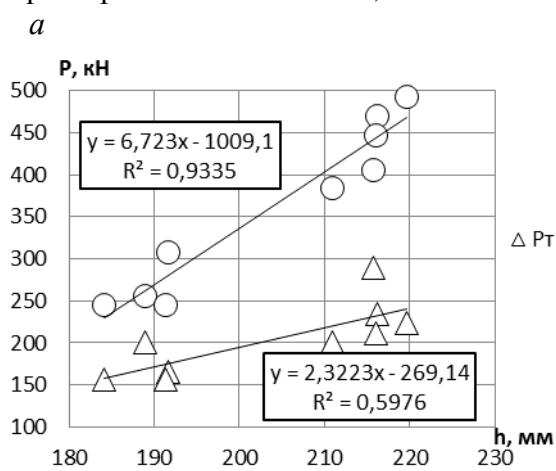
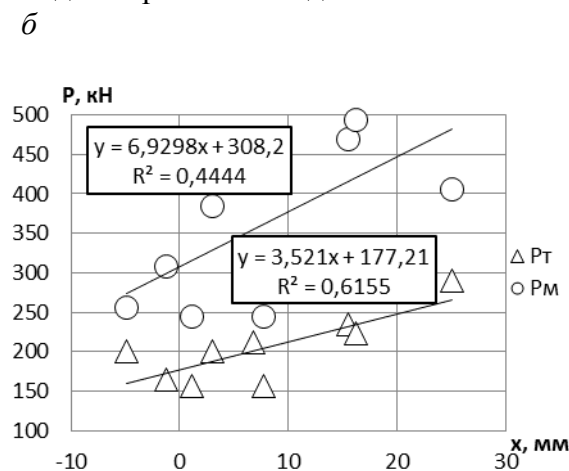


Рис. 5. Схеми випробувань шпали на тріщиностійкість і міцність:

а – підрейкового перерізу у стандартному положенні; *б* – підрейкового перерізу в перегорнутому положенні (сила прикладається під внутрішнім анкером); *в* – середнього перерізу; 1 – сталевая пластина з ухилом нижньої основи 1:20 розміром 250×100 мм середньої товщини 25 мм; 2 – сталевая пластина розміром 250×100×25 мм; 3 – гумова прокладка розміром 250×100×10 мм; 4 – сталевий валик діаметром 40 мм і довжиною 250 мм



а



б

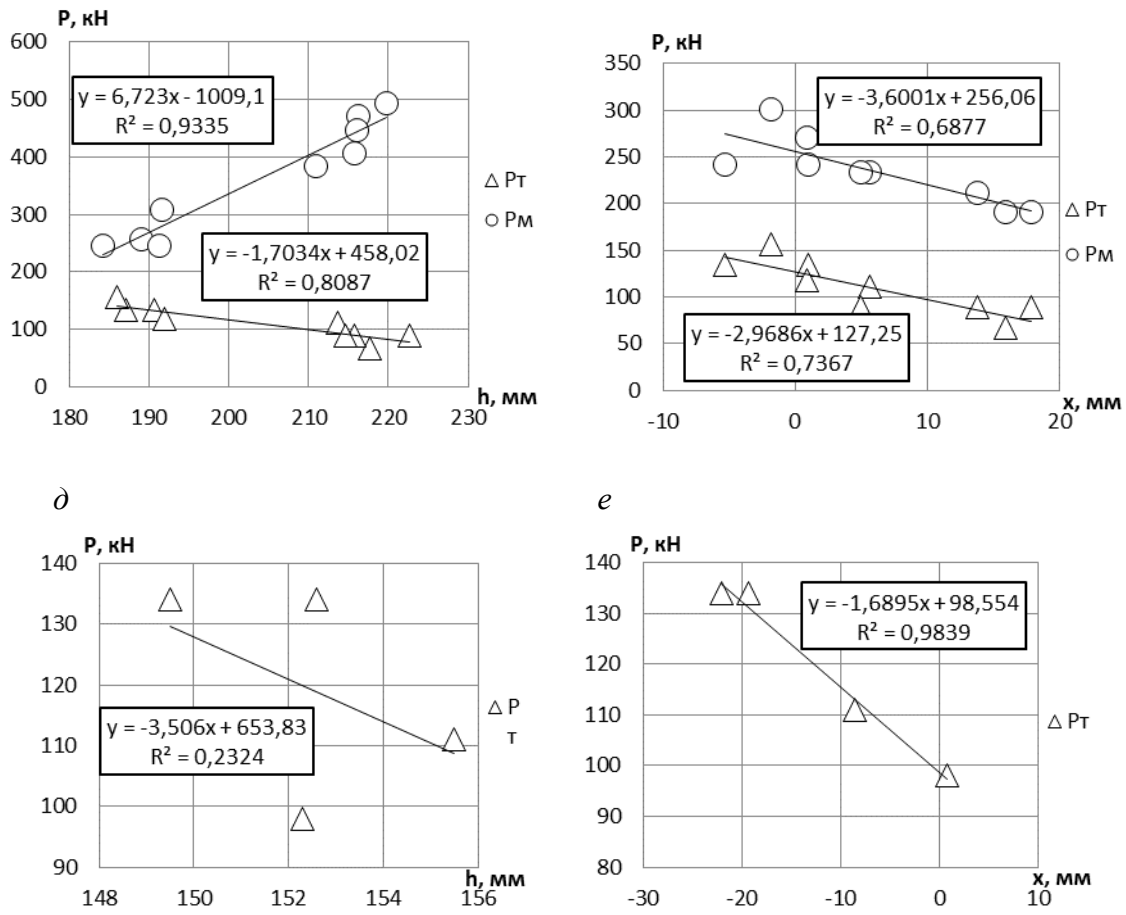


Рис. 6. Залежність границі тріщиностійкості P_T , кН, і границі міцності P_M , кН, шпали в разі навантаження: а, б – підрейкового перерізу зверху від його висоти h (а) і зміщення арматурного пакета x (б); в, з – підрейкового перерізу знизу від його висоти h (в) і зміщення арматурного пакета x (з); д, е – середнього перерізу знизу від його висоти h (д) і зміщення арматурного пакета x (е)

Таким чином, внаслідок статичних випробувань встановлено, що в разі навантаження підрейкового перерізу шпал зверху, що відповідає вертикальній складовій навантаження від рухомого складу, зниження висоти підрейкового перерізу від 218 до 185 мм обумовлює зниження границі тріщиностійкості на 33 %, а границі міцності – на 48 %. Зміщення арматурного пакета вгору на 5 мм обумовлює зниження границі тріщиностійкості на 9 %, а границі міцності – на 13 %. Зміщення арматурного пакета вниз обумовлює підвищення границі тріщиностійкості та границі міцності.

У разі навантаження перерізу шпал під внутрішнім анкером знизу, що моделює вплив горизонтальної складової навантаження від рухомого складу на анкер, зниження висоти підрейкового перерізу від 218 до 185 мм обумовлює збільшення границі тріщиностійкості на 75 %, а границі міцності – зниження на 104 %. Зміщення арматурного пакета вгору обумовлює збільшення границі тріщиностійкості та границі міцності. Зміщення арматурного пакета вниз на 25 мм обумовлює зниження границі тріщиностійкості на 40 %, а границі міцності – на 38 %.

У разі навантаження середнього перерізу шпал знизу, що моделює осідання

баласту під підрейковим площадками, збільшення висоти середнього перерізу від 145 до 155 мм обумовлює зниження границі тріщиностійкості на 16%. Зміщення арматурного пакета вгору обумовлює збільшення границі тріщиностійкості.

Проведено випробування моделей шпал із бетону класу С20/25, С32/40, С35/45, С40/50 динамічним (ударним) навантаженням. Випробування проведено за допомогою копра шляхом багатократного скидання вантажу масою 10 кг з висоти 0,4 м (рис. 7, а). Моделі мали вигляд зразків кубів з розміром ребра 150 мм, у які під час формування встановлені анкери. У бетоні під анкером зроблено надрізи (рис. 7, б–е). Внаслідок скидання ударний ніж вантажу наносив удар по анкеру в напрямку, що відповідає горизонтальній поперечній силі в колії.

Із кожного класу бетону випробувано по 3 моделі. Для кожної моделі та виду пошкодження в ній визначено енергію E , витрачену на утворення цього пошкодження:

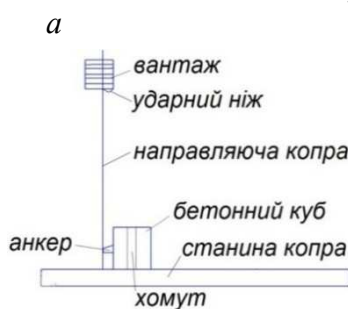
$$E = Nmgh/1000, \quad (1)$$

де N – кількість ударів, після яких утворилось пошкодження;

m – маса вантажу, що вільно падає, 10 кг;

g – прискорення вільного падіння, 9,81 м/с²;

h – висота падіння вантажу, 0,4 м;



а



б



в

1000 – коефіцієнт переведення джоулів у кілоджоулі.

Критерієм, який характеризує збільшення ресурсу або довговічності шпал за рахунок підвищення класу бетону, визначено збільшення енергії руйнування у процентному відношенні до контролю (бетону класу С32/40):

$$\Delta P_{C35/45} = 100 \times (E_{C35/45} - E_{C32/40}) / E_{C32/40}; \quad (2)$$

$$\Delta P_{C40/50} = 100 \times (E_{C40/50} - E_{C32/40}) / E_{C32/40}. \quad (3)$$

Результати дослідження наведені на рис. 8. Залежності апроксимовані: для первинних пошкоджень (тріщин і відколів) – лінійними залежностями; для значних відколів і повного руйнування – ступеневими.

Аналіз цих залежностей показує, що для первинних пошкоджень кореляція між міцністю бетону та кількістю ударів (енергією), за шкалою Чеддока, є дуже слабкою, для значних відколів ($R^2 = 0,57$; $R = 0,75$) – помітною, для повного руйнування ($R^2 = 0,92$; $R = 0,96$) – дуже високою.

Результати оцінювання збільшення ресурсу наведені на рис. 9, із якого видно, що в середньому ресурс шпал до утворення пошкоджень за рахунок підвищення класу бетону з С32/40 до С35/45 і С40/50 збільшиться на 33 і 187 % відповідно.



Рис. 7. Випробування моделей шпал динамічним (ударним) навантаженням: *a* – схема копра для випробувань; *б–e* – моделі шпал з пошкодженнями: первинними тріщинами (*б, в*, бетон класу С35/45 і С40/50 відповідно); первинним відколом, значними відколами, повним руйнуванням з відділенням анкера від бетону (*г, д, e* відповідно бетон класу С20/25)

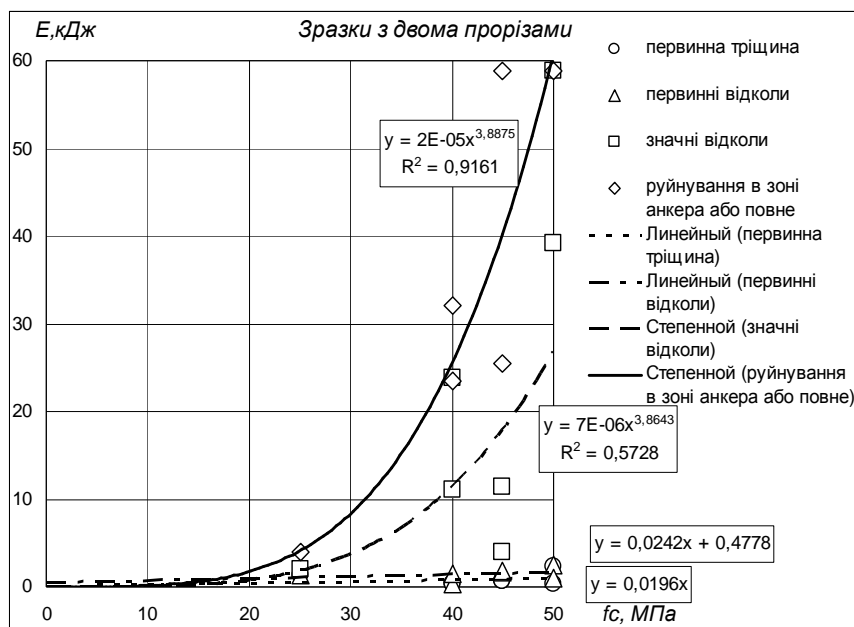


Рис. 8. Залежність енергії E , витраченої на утворення пошкоджень (первинної тріщини, первинних відколів, значних відколів, повного руйнування), від міцності бетону на стиск f_c

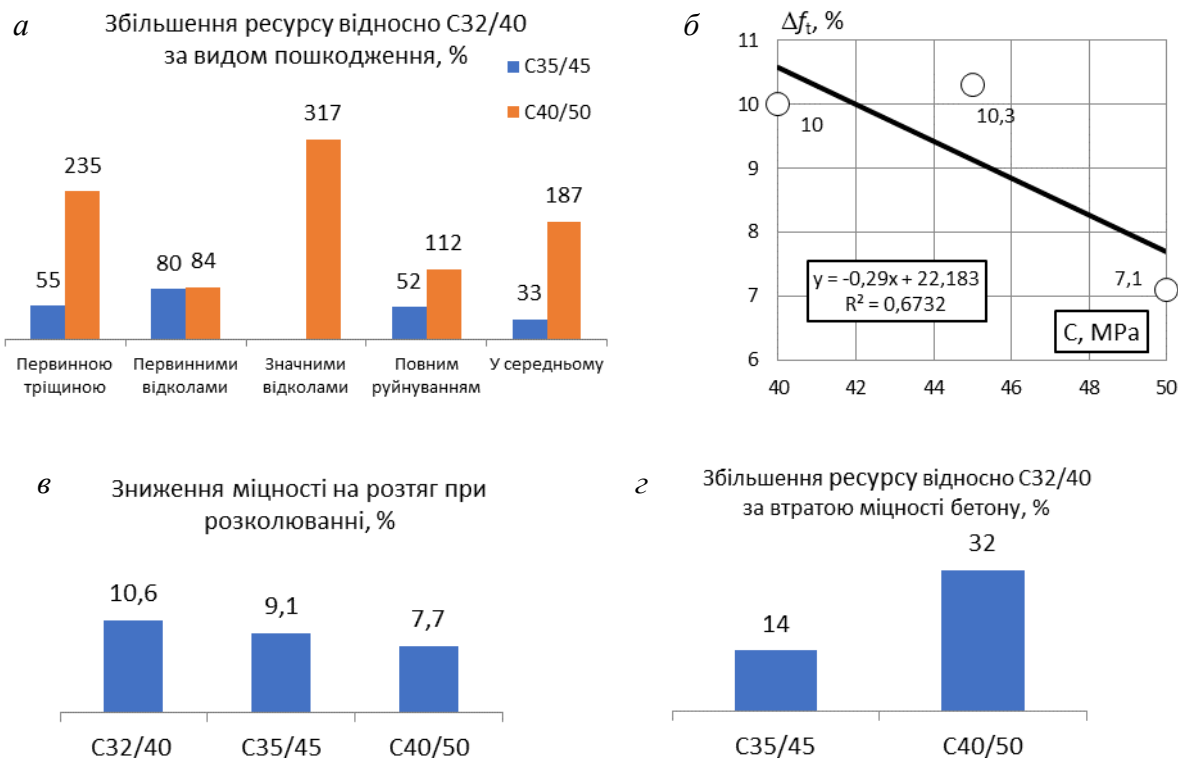


Рис. 9. Результати випробувань моделей шпал динамічним навантаженням: а – ударним – збільшення ресурсу шпал до утворення пошкоджень за рахунок підвищення класу бетону від С32/40 до С35/45 і С40/50; б–г – вібраційним: залежність зниження міцності на розтяг при розколюванні Δf_t від класу бетону С (за показником міцності зразків-кубів, б, в); збільшення ресурсу шпал за втратою міцності бетону при розколюванні за рахунок підвищення класу бетону від С32/40 до С35/45 і С40/50

Проведено випробування моделей шпал із бетону класу С20/25, С32/40, С35/45, С40/50 динамічним (вібраційним) навантаженням. Моделями були напівшпали з фрагментом рейки і зібраною парою скріплень, у якій один полімерний вкладиш замінено на сталевий, що забезпечує безпосереднє передавання горизонтальної складової навантаження на анкер і через нього – на бетон (рис. 10, а, б). Випробування напівшпали з рейкою і парою скріплень проводили вертикальною силою – 22,5 тс з частотою прикладання 9 Гц за допомогою динамічної машини МУП-50, оснащеної підставкою (рис. 10, а), яка забезпечує встановлення напівшпали під кутом 15° до горизонту і відповідне розкладання сили відносно шпали на

нормальну і поперечну складові (аналогі вертикальної і горизонтальної сил у колії).

Після 1,5 млн циклів вібраційного впливу з моделей кільцевим свердлом відбирали керни діаметром 85 мм: із зон біля анкера, у яких динамічний вплив був максимальним (ліворуч на рис. 10, б) і зон, у яких динамічний вплив був мінімальним (праворуч на рис. 10, б). Керни досліджували методом люмінесцентної дефектоскопії, виготовляли з них зразки-циліндри висотою 77–113 мм і визначали за ними найбільш чутливу до впливу мікротріщин фізико-механічну характеристику – міцність на розтяг при розколюванні (рис. 10, г) і її зниження після вібраційного впливу в зоні максимального впливу порівняно з зоною з мінімальним впливом у відсотках.

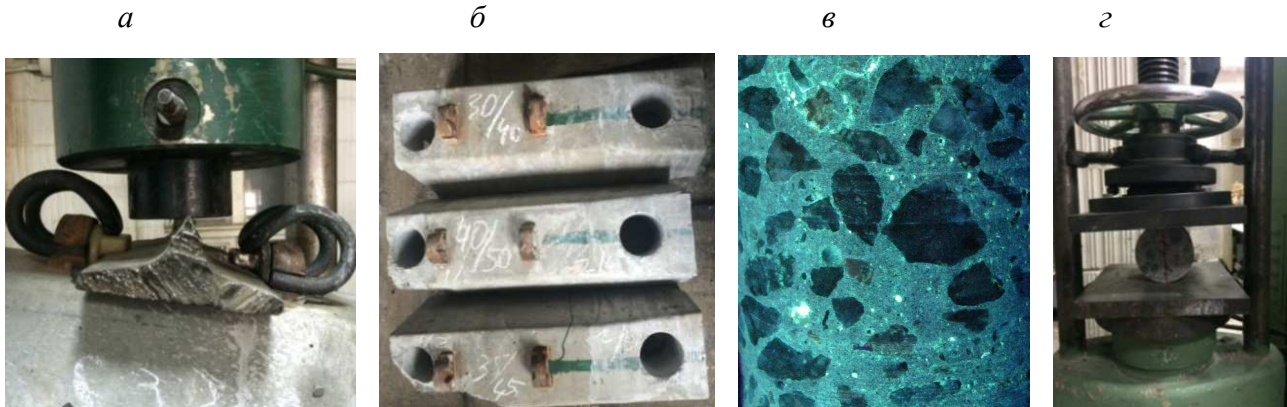


Рис. 10. Динамічні випробування моделі шпали з вузлом скріплення:

- а* – встановлена модель на машині МУП-50 під кутом 15° (правий вкладиш сталевий);
б – моделі після відбору кернів; *в* – вигляд в ультрафіолетовому світлі керна бетону С32/40, обробленого розчином органічного люмінофору жовто-зеленого світіння у вазеліновій олії;
г – визначення міцності бетону на розтяг при розколюванні

За результатами люмінесцентної дефектоскопії встановлена зміна структури бетону класу С32/40 в зоні біля анкера (у лівій верхній частині керна рис. 10, *в*) у вигляді звивистої системи тріщин, що свідчить про початок розшарування бетону біля нього. У бетоні класу С35/45, С40/50 змін структури не відзначено. Зниження міцності в зоні максимального динамічного впливу (рис. 9, *б*) визначене за отриманим рівнянням регресії $\Delta f = -0,29C + 22,18$ (рис. 9, *б*) склало для бетону класу С32/40 – 10,6 %, С35/45 – 9,1 %, С40/50 – 7,7 %. Відповідно збільшення ресурсу шпал за рахунок підвищення класу бетону можна оцінити як 14 % для С35/45 і 32 % для С40/50.

Висновки. У результаті статистичного аналізу пошкоджуваності шпал встановлена слабка кореляція між пропущеним тоннажем і кількістю пошкоджених шпал, якій у найбільшому ступені відповідає лінійна залежність. Кореляції між пошкоджуваністю шпал, шт/кмхмлн т, і вантажонапруженістю не виявлено.

У результаті випробувань шпал статичним навантаженням встановлено вплив відхилення арматурного пакета від проєктного положення та висоти перерізів шпал від проєктних величин на показник їхньої тріщиностійкості в підрейкових і середньому перерізі.

У результаті випробувань шпал динамічними навантаженнями встановлено, що за рахунок підвищення класу бетону з С32/40 до С35/45 і С40/50 ресурс шпал до утворення пошкоджень підвищується відповідно:

- у разі ударних навантажень – на 14 і 32 %;
- вібраційних навантажень – на 33 і 187 %.

Для шпал зі скріпленнями безпідкладкового типу рекомендовано:

- виготовляти їх із бетону класу за міцністю на стиск не менше С35/45;
- підприємствам–виробникам суворо дотримуватись вимог до якості заповнювачів, зокрема до вмісту реакційноздатного кремнезему, а також вимог до показників міцності та морозостійкості бетону, тріщиностійкості шпал, посиливши всі види контролю;

- для ділянок колії на шпалах зі скріпленнями безпідкладкового типу переглянути норми напруцювання на виправно-підбивні роботи в бік зниження, у разі

виявлення ознак обтрушування невідкладно здійснювати підбивання шпал з такими ознаками під час поточного утримання.

Список використаних джерел

1. ДСТУ Б В.2.6-209:2016. Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=64108.
2. ДСТУ 7571:2014. Рухомий склад залізниць. Норми допустимого впливу на залізничну колію. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63585.
3. Технічні вказівки з використання старопридатних матеріалів верхньої будови колії на залізницях України (ЦП-0150) / НКТБ ЦП Укрзалізниці. Київ, 2006. 56 с.
4. Железобетонные шпалы для рельсового пути / А. Ф. Золотарский, Б. А. Евдокимов, Н. М. Исаев и др.; под ред. А. Ф. Золотарского. Москва: Транспорт, 1980. 270 с.
5. Железобетонные шпалы (вопросы изготовления и эксплуатации) / под ред. О. П. Мчедлова-Петросяна. Труды ХИИТа. 1966. Вып.86. 64 с.
6. Железобетонные шпалы (проблемы надежности и долговечности) / под ред. О. П. Мчедлова-Петросяна. Труды ХИИТа. 1969. Вып.109. 64 с.
7. Технологическое обеспечение долговечности железобетонных шпал / под ред. О. П. Мчедлова-Петросяна. Труды ХИИТа. 1971. Вып.122. 64 с.
8. Проведення досліджень по встановленню причин руйнування залізобетонних шпал та розробка рекомендацій по підвищенню міцності бетону: звіт про НДР / В. В. Рибкін, Ю. Л. Заяц, В. П. Лисняк та ін. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2011. 164 с.
9. Дослідження причин передчасного руйнування залізобетонних шпал Ш1-3 виробництва ПрАТ «Коростенський завод ЗБШ»: звіт про НДР / В. В. Коваленко, С. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2015. 33 с.
10. Пшінько П. О. Підвищення надійності залізничних залізобетонних шпал: автореф. дис... канд. техн. наук 05.23.01. Дніпропетровськ: ПДАБА, 2012. 20 с.
11. Провести фізико-хімічні дослідження бетону залізобетонних шпал та надати висновок щодо причин його корозії: звіт про НДР / Л. О. Шейніч, М. Г. Миколаєць, Є. О. Крилов, М. С. Мудрик. Київ: НДІБК, 2019. 129 с.
12. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шисль; под ред. Ф. М. Иванова. Москва: Стройиздат, 1990. 320 с.
13. Штарк Йохан, Вихт Бернд. Долговечность бетона / пер. с нем. А.Тулаганова; под ред. П. Кривенко. Киев: Оранта, 2004. 295 с.
14. Штарк Йохен. Щелочная коррозия бетона / пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. Киев, 2010. 166 с.
15. Розенталь Н. К., Любарская Г. В. Коррозия бетона при взаимодействии щелочей с диоксидом кремния заполнителя. *Бетон и железобетон*. 2012. № 1(6). С. 50-60.
16. Исследования основных производственных факторов, определяющих расходы цемента при изготовлении железобетонных конструкций: отчет о НИР / А. Н. Плугин, О. А. Калинин, А. А. Плугин и др. Харків: ХарДАЖТ, 1998. 36 с.
17. Davies G., Oberholster R. E. Alkali-silica reaction products and their development. *Cement and Concrete Research*. 1988. 18 (4). P. 621–635. doi: 10.1016/0008-8846(88)90055-5.

18. Wang H., Gillott J. E. Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide. *Cement and Concrete Research*. 1991. 21 (4) P. 647–654. doi:10.1016/0008-8846(91)90115-X.

19. Kaewunruen S., Remennikov A. M. Dynamic Crack Propagations in Prestressed Concrete Sleepers in Railway Track Systems Subjected to Severe Impact Loads. *Journal of Structural Engineering*. 2010. 136 (6). doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000152.

Плугін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076.

Тел.: (057)730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Мірошніченко Сергій Валерійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7328-5209. Тел.: (057)730-10-64. E-mail: Miroshnichenko@kart.edu.ua.

Калінін Олег Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-3063-5659.

Тел.: (057)730-10-68. E-mail: kalinin@kart.edu.ua.

Ляху Ліліан Володимирович, магістрант, група 212-зс-319 Українського державного університету залізничного транспорту.

Ганжела Сергій Юрійович, магістрант, група 212-зс-319 Українського державного університету залізничного транспорту.

Plugin Andrii, D. Sc. (Tech.), Professor, Head of Department, Department the Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-6941-2076. Tel.:(057)730-10-58.

E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Miroshnichenko Sergii, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Building Materials and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7328-5209. Tel.:(057)730-10-64.

E-mail: Miroshnichenko@kart.edu.ua.

Kalinin Oleh, PhD (Tech). Associate Professor, Department Building Materials and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-3063-5659. Tel.:(057)730-10-68.

E-mail: kalinin@kart.edu.ua.

Liakhu Lilian, master, Group 212- RS-319, Ukrainian State University of Railway Transport.

Hanzhela Sergii, master, Group 212- RS-319, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 11.09.2020 р.