

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Український державний університет залізничного транспорту

ПАЛАНТ ОЛЕНА ВАЛЕНТИНІВНА



УДК 691.32:620.193 (043.3)

**БЕТОНИ ТА ВИРОБИ ДЛЯ ТРАМВАЙНИХ КОЛІЙ
ПІДВИЩЕНОЇ СТІЙКОСТІ ДО ДИНАМІЧНИХ, ЕЛЕКТРИЧНИХ
І ТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВІВ**

05.23.05 – Будівельні матеріали та вироби

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українському державному університеті залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій та споруд

Науковий керівник – доктор технічних наук, доцент
Плугін Дмитро Артурович,
Український державний університет
залізничного транспорту, професор кафедри
будівельних матеріалів, конструкцій та споруд

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Нетеса Микола Іванович,
Дніпровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка
В. Лазаряна, завідувач кафедри будівельного
виробництва та геодезії;

кандидат технічних наук, доцент,
Сінякін Анатолій Геннадійович
Харківський національний університет
будівництва та архітектури, доцент кафедри
фізико-хімічної механіки та технології
будівельних матеріалів і виробів

Захист відбудеться 25 жовтня 2019 р. о 12:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7 та на сайті <http://kart.edu.ua>

Автореферат розісланий « 23 » вересня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



О.В. Лобяк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електричний трамвай вперше рушив у 1881 р. у Берліні. З кінця XIX століття трамвай розповсюджується світом завдяки зручності, невисокій вартості, екологічній чистоті. На вулицях центрів міст улаштовують інтегровані в проїжджу частину колії, в яких рейки укладають в одному рівні з нею, а шпали та баласт вкривають брущаткою (асфальтобетоном, залізобетонними плитами). На широких вулицях нових районів улаштовують окремі від проїжджої частини колії. Електрична напруга 600 В у електродвигуни трамваїв подається контактною мережею, одним із провідників якої є повітряний контактний провід, другим – рейки. Проте трамваю притаманні й недоліки: він ускладнює рух автотранспорту, який ставав все більш масовим; створює шум та вібрацію; постійні струми витоку з рейок спричиняють електрокорозію металевих і залізобетонних конструкцій і трубопроводів; дерев'яні шпали під покриттям швидко гниють, що спричиняє розлади колії. Мабуть тому у 1930-70-ті роки у світі спостерігався занепад трамвая. Проте до початку 1980-х років удосконалюється рухомий склад, з'являються нові конструктивно-технологічні рішення інфраструктури, ланкова колія замінюється безстиковою, дерев'яні шпали – залізобетонними, костильні скріплення – клемно-болтовими або пружними анкерними, гумові прокладки – полімерними. Це суттєво підвищило стабільність колії, міжремонтні терміни.

Для центрів міст та перехресть впроваджуються інтегровані у дорожнє покриття трамвайні колії з ізольованими рейками на безбаластній залізобетонній основі (рис. 1, а). Головки рейок в них розташовані в одному рівні з дорожнім покриттям, що забезпечується їх встановленням у рейкові канали в залізобетонних плитах основи (рис. 1, б).

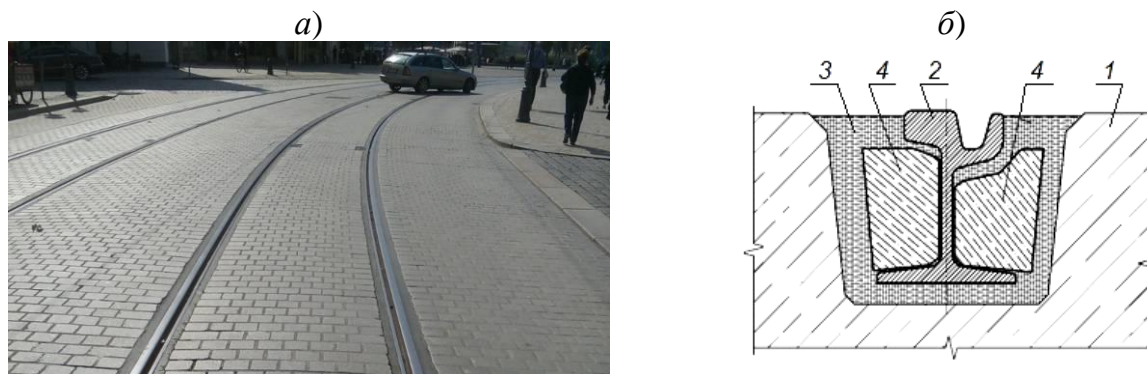


Рис. 1. Інтегрована у дорожнє покриття трамвайна колія з ізольованою рейкою: а – у центрі м. Дрезден, Німеччина; б – схема розташування трамвайної рейки у рейковому каналі залізобетонної плити підрейкової основи, інтегрованої з дорожнім покриттям: 1 – залізобетонна плита; 2 – рейка; 3 – полімерна мастика; 4 – бетонний прирейковий вкладиш

Рейки прикріплюються до бетонних стінок каналів заливкою із органічної мастики, яка забезпечує ще й електричну ізоляцію. Це обумовлює істотне зниження шуму та вібрації, мінімізацію струмів витоку та перешкод для руху інших видів транспорту. Недоліком такої конструкції є висока витрата коштовної мастики, для економії якої у зазор між рейкою та стінкою каналу

вкладаються пластикові труби або до шийки рейки приклеюються бетонні вкладиші (рис. 1). Характерною особливістю такої конструкції є відсутність механічного прикріплення рейок до основи, рейку утримує в каналі тільки мастика. В результаті безстикова трамвайна колія такої конструкції може бути нестійкою, особливо у разі застосування безшийкової рейки, про що свідчать випадки викидів колії від температурних напружень. Відзначаються також пошкодження залізобетонних підрейкових основ – шпал та плит, у т.ч. тріщини поблизу анкерів скріплень, електрокорозійні пошкодження від струмів витоку.

Під час руху трамваїв періодично відбуваються сходи, причинами яких звичайно вважають знос колії та рухомого складу, порушення швидкісного режиму, дорожньо-транспортні події. Разом з тим вплив електричних потенціалів та зарядів на сходи залишається недослідженим. У зв'язку з викладеним тема дисертації, що присвячена удосконаленню матеріалів і деталей трамвайної колії для зниження вібрації, електричних впливів, температурних напружень у рейках і тріщиноутворення в бетоні, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконана на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту у складі держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних робіт: «Теоретичні основи отримання нових корозійностійких композиційних силікатних матеріалів з високими гідрофізичними характеристиками (№ДР0115U000279); «Розвиток теоретичних та експериментальних основ визначення складів водонепроникного тріщиностійкого бетону для конструкцій і споруд залізниць» (№ДР0113U001030); «Проведення досліджень з можливості застосування шпал залізобетонних попередньо напружених колії 1520 мм типу СБЗ зі скріпленнями проміжними пружними типу КПП-5 на ділянках підвищеної вантажонапруженості та розробка рекомендацій» (№ДР0116U003466); «Розробка технічних умов «Вкладиші К1, К2 Моноліт і J1, J2 ПВСТ для улаштування монолітної і збірної залізобетонної верхньої будови трамвайної колії» (№ 6/9-2015); «Розробка технічних умов «Елементи опорні для залізобетонної збірно-монолітної основи трамвайної колії» (№ 6/4-2017); «Розробка технічних умов на комплект скріплення рейкового пружного SRS-T для трамвайної колії» (№ 6/33-2017).

Мета досліджень – удосконалення бетонів і виробів трамвайної колії для зниження вібрації, електричних впливів, температурних напружень в рейках і тріщиноутворення в бетоні.

Завдання досліджень:

- виконати аналіз особливостей улаштування та експлуатації, характерних пошкоджень та недоліків трамвайних колій, аналітичний огляд літературних джерел з питань зниження вібрації, електричних впливів, температурних напружень в рейках і тріщиноутворення в бетоні;
- дослідити вплив струмів витоку та надлишкових електричних зарядів на конструкції трамвайних колій;
- виконати теоретичні та експериментальні дослідження здатності поліуретану поглинати вібрацію та опиратись електричним впливам;

- виконати дослідження зі зниження вібрації і температурних напружень в рейках за рахунок застосування прирейкових вкладишів та управління властивостями бетону для них;
- виконати теоретичні та експериментальні дослідження впливу структурних характеристик бетону на тріщиностійкість бетону в умовах динамічних впливів;
- впровадити результати досліджень під час розробки конструктивно-технологічних рішень та капітального ремонту (реконструкції) трамвайних колій.

Об’єкт досліджень – матеріали і деталі трамвайної колії із бетону та полімерів.

Предмет досліджень – властивості матеріалів і деталей трамвайної колії із бетону та полімерів, процеси, які обумовлюють вібраційні та електричні впливи від трамвайних колій, температурні напруження в рейках і тріщиноутворення в бетоні та забезпечують захист від цих впливів.

Методи досліджень: Фізико-механічні властивості бетону визначали стандартними методами. Адгезійні властивості полімерів, тріщиностійкість бетону в умовах динамічних впливів, параметри вібрації конструкцій трамвайної колії, електричний опір її матеріалів і деталей визначали за оригінальними методиками. Наявність у поліуретановому полімері функціональних груп з подвійними зв’язками визначали аналізом інфрачервоних спектрів поглинання за допомогою ІЧ-Фур’є-спектрометра Bruker Alpha.

Достовірність отриманих результатів забезпечена застосуванням коректних надійних методів експериментальних досліджень – стандартних і оригінальних методів визначення фізико-механічних властивостей, вібраційних, електрометричних, фізико-хімічних досліджень, а також узгодженістю результатів теоретичних та експериментальних досліджень, експлуатаційних випробувань.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше встановлено, що заміна у важкому бетоні гранітного заповнювача кварцовим, а частини цементу – кварцовим наповнювачем обумовлює зниження коефіцієнта лінійного теплового розширення бетону до 3,8 разів від 10×10^{-6} до $2,65 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, а наклеювання на шийку трамвайної рейки вкладишів із такого бетону – зниження температурних напружень в рейці на 10-32%, віброшвидкості коливань підрейкової основи – на 27% від 0,85 до 0,62 мм/с.

2. Удосконалено уявлення про захисні властивості поліуретану від вібраційних та електричних впливів. Зокрема, встановлено, що високій здатності поліуретану поглинати вібрацію сприяє латеральне електростатичне відштовхування між функціональними групами $C=O$ з подвійними зв’язками уретанових груп, а високому електричному опору – висока електронегативність цих груп.

3. Набули подальшого розвитку:

– уявлення про вплив струмів витоку та надлишкових електричних зарядів антропогенного та природного походження на конструкції трамвайних колій. Показано, що крім електрокорозійного впливу на бетон і залізобетон та сприяння тріщиноутворенню в бетоні негативні надлишкові електричні заряди,

що накопичуються на підрейкових основах, за рахунок електростатичних сил можуть сприяти сходам рухомого складу на розладнаних ділянках колії;

– уявлення про залежність фізико-механічних властивостей важкого бетону від коефіцієнтів розсунення зерен крупного та дрібного заповнювачів. Зокрема, встановлено, що забезпечення відповідності коефіцієнту розсунення зерен дрібного заповнювача оптимальній величині $\mu_{\text{опт}} = 1,27$ і товщини прошарку цементного каменю між зернами дрібного заповнювача 20 мкм у бетоні класу С40/50 обумовлює підвищення тріщиностійкості бетону в умовах динамічних впливів за показниками сумарної енергії руйнування у порівнянні з бетоном з $\mu = 1,51$ (С20/25) у 14,9 раз, а з $\mu = 1,36$ (С32/40) – у 2,1 раз.

Практична значимість отриманих результатів обумовлена розробкою та впровадженням в конструкції трамвайних колій, що реконструюються у м. Харкові, Дніпрі, Києві, бетону оптимального складу класу С40/50, прирейкових вкладишів із бетону зі зниженим коефіцієнтом лінійного температурного розширення (у конструкціях з ізолюваною рейкою), оригінальних пружних рейкових скріплень з полімерними (поліуретановими) підрейковими прокладками та дюбелями, що у сукупності забезпечило зниження вібрації, електричних впливів і температурних напружень у трамвайних коліях, підвищення тріщиностійкості та довговічності конструкцій і безпеки руху.

Практична значність результатів підтверджується виготовленням матеріалів та виробів для конструкцій трамвайних колій згідно з розробленими за участю автора технічними умовами України «Вкладиші прирейкові К1, К2 Моноліт і J1, J2 ПВСТ для улаштування монолітної і збірної залізобетонної верхньої будови трамвайної колії», «Скріплення рейкове пружне SRS-T для трамвайної колії», «Клема пружинна RC SRS-T для пружного рейкового скріплення SRS-T», «Вкладиш ізолюючий LI SRS-T для пружного рейкового скріплення SRS-T», «Прокладка амортизуюча RP SRS-T для пружного рейкового скріплення SRS-T», «Скоба притискна CB SRS-T для пружного рейкового скріплення SRS-T», «Елементи опорні для залізобетонної збірно-монолітної основи трамвайної колії», а також отриманням патентів на корисні моделі [19-24].

Матеріали дисертації використовуються у навчальному процесі УкрДУЗТ з підготовки бакалаврів і магістрів зі спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та експериментальні результати отримані автором самостійно, а також у співавторстві. Критичний аналіз літературних та інших джерел з тематики дослідження, більшість фізико-механічних випробувань, електрометричних і фізико-хімічних досліджень, обробка та отримання експериментальних залежностей, а також розрахунки виконані автором особисто. Постановка завдань досліджень, формулювання наукової гіпотези і нових наукових положень виконані спільно з науковим керівником, експлуатаційні та деякі експериментальні дослідження і впровадження результатів досліджень – спільно зі співавторами публікацій, яким автор висловлює щире подяку.

Публікації: Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 24 наукових працях, з яких 5 статей у наукових фахових виданнях,

рекомендованих МОН України, в тому числі – 2 у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз; 9 праць апробаційного характеру, з яких 2 – у виданнях, що індексуються НМБД Scopus; 4 додаткові публікації; 5 патентів України на корисну модель, 1 патент України на промисловий зразок.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження доповідались на 75, 77–80 Міжнародних науково-технічних конференціях «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (Харків, УкрДУЗТ, 2013, 2015–2018); 5–7 Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (Transbud, Харків, 23-24.04.2015, 19-21.04.2017, 14-16.11.2018); Стародубовських читаннях – 2018 (Дніпро, ПДАБА, 20.04.2018); 20 Міжнародній конференції з будівельних матеріалів (20' Ibausil, Веймар, Німеччина, 12–14.09.2018).

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку літератури зі 146 найменувань; містить 158 сторінок основного тексту, 102 рисунки, 22 таблиці, 5 додатків.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, наведено мету і завдання досліджень, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, дані про апробацію та опублікування результатів досліджень, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі наведено результати аналізу особливостей улаштування та експлуатації мережі трамвайних ліній м. Харкова, стану трамвайних колій, виявлення місць, де найчастіше відбувались сходи трамваїв з рейок. Виявлено близько 10 проблемних місць, де найчастіше відбувались сходи трамваїв. На цих ділянках експлуатувались трамвайні колії традиційних конструкцій в основному з протермінованими ремонтами, які перебували у незадовільному стані. Відзначено деякі особливості – близькість більшості з цих ділянок до узбереж річок, залізничних ліній, ліній метрополітену. Показано, що статистика сходів та їх причини в основному аналогічні й в інших містах України та європейських країн. Виявлені випадки викидів безстикової колії від температурних напружень в конструкціях з ізолюваною рейкою у разі застосування безшийкової рейки.

Виконано аналітичний огляд робіт і досліджень, присвячених розповсюдженню та гасінню матеріалами віброколивачів (робіт Нашифа А., Соломатова В.І., Сєдих А.А., Барштейна М.Ф., Коренева Б.Г., Рабиновича І.М. тощо), впливу реології ґрунтів на розповсюдження віброколивачів та осідання основ споруд та шляхів (Ухова С.Б., Титовича Н.А., Шатенка Л.М., Герасименко О.С. тощо), реологічним властивостям полімерів (Виноградова Г.В., Малкіна А.Я., Нільсена Л., Гуля В.Є., Кулезньова В.Н., Попова Ю.В. тощо), впливу структури на фізико-механічні властивості бетону (Толмачов С.М., Калініна О.А., Мірошніченко С.В. тощо), протіканню і впливу струмів витoku і блукаючих струмів на металеві та залізобетонні конструкції (Котельникова А.В., Стрижевського І.В., Старосельського О.О., Бабушкіна В.І.

тощо) і бетон (Плугіна О.А., Борзяк О.С., Дудіна О.А., Несторенка С.Г., Касьянова В.В. тощо). Проте аналізовані роботи останніх авторів на враховували можливості накопичення в матеріалах і на конструкціях надлишкових електричних зарядів, створених цими струмами та іншими чинниками, та їх впливу на матеріали і конструкції. Тому розглянуто також роботи, у яких ці питання розглядалися (Плугіна А.М., Плугіна А.А., Трикоз Л.В., Плугіна Д.А., Лютого В.А., Конєва О.А., Забіяки О.А. тощо).

Зокрема, показано, що зниження шуму та вібрації від трамвайних колій досягається застосуванням масивних плитних підрейкових основ, ізолюванням рейок та підрейкових основ органічними вібропоглинаючими матеріалами, найкращими з яких є поліуретани, застосуванням пружних анкерних рейкових скріплень. Проте анкери цих скріплень створюють в бетоні підрейкових основ високі контактні напруження від динамічних впливів, що часто призводить до утворення в бетоні тріщин і зниження довговічності конструкцій колії.

За результатами аналізу особливостей улаштування та експлуатації трамвайних ліній та аналітичного огляду робіт з тематики досліджень висунуто робочу гіпотезу, яка полягає в тому, що для зниження вібрації, електричних впливів, температурних напружень в рейках, тріщиноутворення в бетоні конструкцій трамвайної колії необхідне максимальне застосування в них поліуретанів з високими віброізолюючими властивостями та електричним опором, пружних деталей прикріплення рейок до підрейкових основ, бетонів оптимального складу з підвищеною тріщиностійкістю в умовах динамічних впливів та зниженим коефіцієнтом лінійного теплового розширення.

У **другому розділі** наведені характеристики застосованих матеріалів і методів досліджень. Як віброелектроізолюючі заливні мастики для конструкцій трамвайної колії з ізолюваною рейкою застосовано двокомпонентні поліуретанові мастики EdilonCorkelast® (Edilon Sedra B.V., Нідерланди), Icosit C340/45F (Sika AG, Швейцарія), композиція «Х» (м. Харків) з відповідними ґрунтовками. Для деталей розроблюваного пружного рейкового скріплення застосовано: для клеми – вуглецеву пружинну сталь 60С2А (55С2А), для дюбеля, ізолюючої втулки та підрейкової прокладки – поліамід ПА6-Л-СВ-30 та поліуретан, у т.ч. для ізолюючої втулки – склонаповнений. Для виготовлення виробів підрейкових основ (плит, блоків) та прирейкових вкладишів і зразків їх бетону застосовано бетон із портландцементу ПЦ І-500Н, щебеню гранітного фракції 5-10 мм та суміші фракцій 5-20 мм, піску кварцового з модулем крупності 1,9, добавки полікарбосилату SikaPlast 2508. Для виготовлення прирейкових вкладишів застосовували замість гранітного щебеню кварцовий, кварцовий пісок та кварц пилоподібний.

Фізико-механічні властивості бетону визначали стандартними методами. Для дослідження адгезійних властивостей полімерів, тріщиностійкості бетону в умовах динамічних впливів, параметрів вібрації конструкцій трамвайної колії, електричного опору матеріалів та виробів трамвайної колії розроблено оригінальні методики, наведені у розд. 4. Наявність у поліуретанах і гумах функціональних груп визначали аналізом інфрачервоних спектрів поглинання, отриманих за допомогою ІЧ-Фур'є-спектрометра Bruker Alpha на відбивання.

У третьому розділі виконані теоретичні дослідження з розробки способів захисту від вібраційних та електричних впливів від трамвайних колій, зниження температурних напружень та запобігання тріщиноутворення в них.

У розвиток робочої гіпотези припущено, що підвищення віброелектроізоляційних властивостей конструкції трамвайної колії має забезпечуватись застосуванням для підрейкових прокладок, ізолюючих втулок, дубелів, заливних мастик поліуретанів різної жорсткості. Структура поліуретану відповідає структурі дисперсної системи з твердою дисперсною фазою та дисперсійним середовищем, яке завдяки побудові з гнучких волокон можна вважати в'язким. Таке уявлення структури підтверджується електронно-мікроскопічними знімками поліуретану. Аналогічною структурою характеризується і гума. Така структура обумовлює відповідність реологічних властивостей поліуретану і гуми моделі еластичного тіла Кельвіна, яке характеризується деформаціями пружної післядії та здатністю до гасіння вібрації. Проте макромолекули поліуретану на відзнаку від гуми містять функціональні групи $C=O$ з подвійним зв'язком. Ці групи характеризуються значним дипольним моментом 2,5 D і повернуті негативним полюсом назовні від макромолекули, створюючи великий негативний поверхневий заряд на ній. Наявність груп $C=O$ на поверхнях структурних елементів (глобул, волокон) на відзнаку від гуми обумовлює його набагато більшу здатність до поглинання вібрації.

Під час стискання структурного елементу його поверхневі паралельно орієнтовані диполі $C=O$ разом із атомами всередині структурного елементу за рахунок латерального електростатичного відштовхування забезпечують пружні властивості поліуретану під час стиску. Ці властивості можуть бути змодельовані простими реологічними тілами Гука (рис. 2, а).

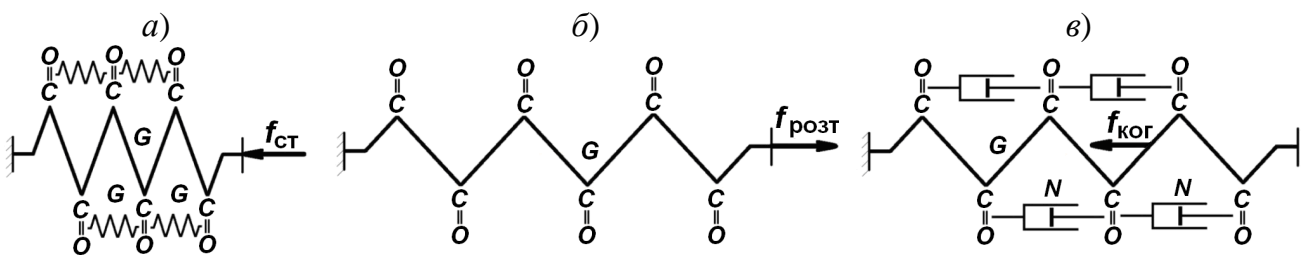


Рис. 2. Реологічні моделі деформування структурного елементу поліуретану (глобули, волокна): а – стиск; б – розтяг; в – зворотна деформація після зняття розтягувального навантаження; G – реологічне тіло Гука; N – реологічне тіло Ньютона; $f_{ст}$ – стискаюча сила; $f_{розт}$ – розтягувальна сила; $f_{ког}$ – сили когезії

Після зняття навантаження електростатичні сили відштовхування швидко повертають поліуретан у вихідний стан. По мірі розтягу структурного елементу відштовхування між його диполями $C=O$ слабшає. Тому під час розтягу структурного елементу деформування відбувається також як для пружної деформації, проте опір її менший за величиною, ніж для стиску (рис. 2, б). Після зняття навантаження структурний елемент під дією когезійних сил намагається повернутись у вихідний стан, проте по мірі цього відштовхування між диполями $C=O$ збільшується і повертання у вихідний стан уповільнюється.

Це може бути змодельоване сполученням простих реологічних тіл Гука і Ньютона (рис. 2, в). В сукупності це відповідає пружній деформації під час стиску та розтягу структурного елементу і деформації пружної післядії під час повертання у вихідний стан після розтягу, що й обумовлює високу здатність до поглинання вібрації у порівнянні з гумою.

Електричні впливи на конструкції трамвайної колії – це впливи безпосередньо струмів витоку та блукаючих струмів і впливи від надлишкових електричних зарядів. Струми витоку з трамвайних колій стікають з рейкової колії через підрейкові основи у ґрунт, спричиняючи електрокорозію розташованих неподалік металевих і залізобетонних конструкцій і трубопроводів, а також електрокорозійне вилугування бетону.

Особливості конструкції трамвайних колій та їх виконання із матеріалів, що фактично є дисперсними системами з водним дисперсійним середовищем, обумовлює можливість накопичення в них надлишкових електричних зарядів антропогенного та природного походження, яке полягає у макрополяризації елементів колії (залізобетонних підрейкових основ, ґрунтових основ тощо) по товщині, а у найбільшому ступені – по її довжині.

Надлишкові електричні заряди антропогенного походження утворюються: від струмів витоку, носієм яких у бетоні та ґрунті є переважно катіони; від винесення атмосферними і ґрунтовими водами із бетону і ґрунту катіонів у водотоки; від перенесення катіонів в результаті водозабору із свердловин тощо. Надлишкові електричні заряди природного походження утворюються від електричного поля Землі. Експериментально визначувана природна напруженість електричного поля біля поверхні Землі в середньому складає близько 130 В/м, проте в різних місцевостях може коливатись від -1000 до $+200$ В/м, що і є проявом надлишкових електричних зарядів. Розрахунками встановлено, що у разі накопичення на конструкції трамвайної колії надлишкових електричних зарядів напруженість електричного поля на них може досягати 120 В/м, що відповідає поверхневій густині заряду близько 120 Кл/м^2 . Така густина заряду може обумовити виникнення у бетоні розтягувальних напружень величиною, порівняною з його границею міцності на стиск, отже, сприяти утворенню тріщин. У разі накопичення на рухомому складі однакового за знаком та порівняного за величиною заряду електростатична сила відштовхування може сприяти сходам рухомого складу з рейок у місцях зносу колії тощо. Це підтверджують результати аналізу статистики сходів трамваїв у м. Харкові, якими відзначена близькість більшості місць сходів до узбереж річок, залізничних ліній, ліній метрополітену, тобто джерел, що сприяють накопиченню надлишкових електричних зарядів.

Саме поліуретан у порівнянні з гумою забезпечить максимальний електричний опір і здатність запобігати накопиченню надлишкового негативного заряду ізолюючих елементів і деталей за рахунок наявності в ньому груп $C=O$ з високою електронегативністю. Ці групи забезпечують негативний заряд поверхонь порового простору, який запобігає перенесенню крізь нього носіїв електричного заряду – аніонів (за рахунок відштовхування) та катіонів (за рахунок адсорбції). Таким чином, поліуретан характеризується

найбільшими здатністю поглинати вібрацію за рахунок електростатичного відштовхування між групами $C=O$ з подвійними зв'язками та високим електричним опором і здатністю запобігати накопиченню надлишкових електричних зарядів за рахунок електронегативності цих груп.

У розвиток робочої гіпотези припущено, що знизити температурні напруження у рейках дозволить застосування прирейкових вкладишів із бетону зі зниженим коефіцієнтом лінійного теплового розширення α_L . У цьому випадку за рахунок спільної роботи рейки та приклеєного до неї вкладиша як композиційного виробу температурна деформація рейки та відповідне термічне напруження в ній, яке може спричинити викид, набагато менші, ніж у рейки без вкладишів або із вкладишами зі звичайного важкого бетону. Відомо, що у сталі та важкого бетону α_L близькі за значеннями, які дорівнюють, відповідно, 13×10^{-6} і $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Близьким до цих значень є й α_L граніту $7,9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. У бетоні об'єм крупного заповнювача із граніту складає близько 50%, дрібного заповнювача із кварцу – 25%, цементного каменю – 25%. Якщо замінити гранітний крупний заповнювач кварцовим, а 50% цементу кварцом меленим, об'єм зерен і частинок кварцу в бетоні може досягати $v_q = 87,5\%$. Кварц характеризується набагато меншими значеннями α_L , в середньому $1,09 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Припущено, що залежність α_L від v_q лінійна та отримано її рівняння:

$$\alpha_L = (-0,118v_q + 12,97) \times 10^{-6}, \text{ K}^{-1}. \quad (1)$$

Згідно з цією залежністю заміна у важкому бетоні гранітного заповнювача кварцовим, а частини цементу – кварцовим наповнювачем обумовлює зниження α_L до 3,8 разів від 10×10^{-6} до $2,65 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Зниження температурних напружень в рейці від наклеювання на неї бетонних вкладишів зі зниженим α_L досліджено шляхом розрахункового експерименту, виконаного на скінчено-елементній моделі рейки з жорстко защемленими від подовжнього переміщення торцями за допомогою програмного комплексу Liga. У складі розрахункового експерименту виконано аналіз напружено-деформованого стану рейки від підвищення температури до 20 і 80 С. Величина стискаючих напружень в рейці без вкладишів досягає 240 МПа, а в рейках із вкладишами складає у шийці – 163-195 МПа, у головці – 175-217 МПа. Таким чином, застосування вкладишів із такого бетону обумовлює зниження температурних напружень в рейці на 10-32%, що суттєво сприятиме запобіганню викидів рейок.

У розвиток робочої гіпотези припущено також, що забезпечення оптимальних величин коефіцієнтів розсунення зерен крупного α_{opt} та дрібного μ_{opt} заповнювача та водоцементного відношення, пов'язаного з коефіцієнтом розсунення клінкерних реліктів продуктами гідратації, забезпечить для бетону підрейкових основ та прирейкових вкладишів максимальну тріщиностійкість в умовах динамічних впливів. У цьому випадку в прошарках між зернами крупного та дрібного заповнювачів, частинками цементу та наповнювача утворюються найбільш щільні структури частинок підлеглих структурних рівнів та максимальна кількість міцних електрогетерогенних контактів (рис. 3, а-в). У разі значного відхилення фактичної величини коефіцієнту розсунення від

оптимальної саме у прошарках між зернами заповнювачів і частинками цементу та наповнювача (рис. 3, а) утворяться розуцільнені зони з незначною кількістю електрогетерогенних контактів, з яких швидко розпочнеться утворення тріщин від динамічних навантажень.

Зазначені структурні характеристики визначаються рівняннями:

$$\alpha_{\text{опт}} = 2,1 \cdot (1 + nd_{\text{п}}/d_{\text{щ}})^3 - 1,1; \mu_{\text{опт}} = 2,1 \cdot (1 + nd_{\text{ц}}/d_{\text{п}})^3 - 1,1; \eta_{\text{опт}} = 2,1 \cdot (1 + \delta_{\text{пг}}/d_{\text{ц}})^3 - 1,1, \quad (2)$$

де $d_{\text{щ}}$, $d_{\text{п}}$, $d_{\text{ц}}$ – розміри зерен крупного та дрібного заповнювачів і частинок цементу та кварцового наповнювача, відповідно; $\delta_{\text{пг}}$ – товщина прошарку продуктів гідратації між клінкерними реліктами.

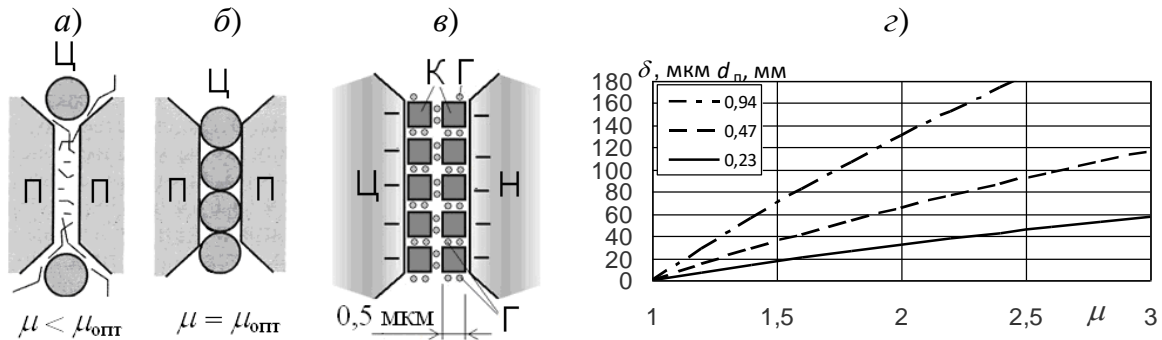


Рис. 3. Структура прошарків між зернами дрібного заповнювача (а, б) і частинками цементу та наповнювача (в): а – неоптимальна, що не забезпечує тріщиностійкості; б, в – оптимальні, що забезпечують тріщиностійкість; П – зерна дрібного заповнювача; Ц – частинки цементу; Н – частинки наповнювача; К – кристалогідрати портландиту та еtringіту; Г – глобули гідросилікатного гелю; з – залежність товщини прошарку δ цементного тіста (каменю) між зернами піску з середнім розміром $d_{\text{п}}$ 0,23, 0,47 і 0,94 мм від коефіцієнту їх розсунення μ

Для $d_{\text{щ}} = 10$ мм (фракція 5–10 мм), $d_{\text{п}} = 0,47$ мм, $d_{\text{ц}} = 0,03$ мм, $\delta_{\text{пг}} = 1$ мкм оптимальні величини структурних характеристик складуть $\alpha_{\text{опт}} = 1,42$, $\mu_{\text{опт}} = 1,43$, $\eta_{\text{опт}} = 1,22$. Для $d_{\text{щ}} = 12,5$ мм (суміш фракцій 5–20 мм) $\alpha_{\text{опт}} = 1,25$.

Величина коефіцієнту розсунення зерен піску μ знаходиться у взаємозв'язку з товщиною прошарку цементного тіста між ними δ (рис. 3, з):

$$\delta = d_n \left(\sqrt[3]{\frac{\mu + 1,1}{2,1}} - 1 \right). \quad (3)$$

У четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень з підтвердження гіпотез та розробки способів захисту від вібраційних та електричних впливів від трамвайних колій, зниження температурних напружень та запобігання тріщиноутворення в них.

Для підтвердження результатів теоретичних досліджень щодо впливу групи $S=O$ на реологічні властивості поліуретанів виконано аналіз ІЧ-спектрів поліуретанів і гум (рис. 4). Наявність цих груп у поліуретанах та їх відсутність у гумах підтверджується наявністю у спектрах усіх досліджених поліуретанів інтенсивної лінії з хвильовим числом 1726–1732 см^{-1} , тоді як у спектрах гум ця лінія відсутня.

Досліджено властивості поліуретанових мастик різних виробників. Для визначення адгезії мастик до металу та бетону розроблено оригінальну методику, згідно з якою випробування проводили на зразках, у яких шаром мастики товщиною 20 мм склеювали дві сталеві пластини розміром 100×100×3 мм та два бетонних куба з розміром ребра 100 мм, оснащених стержнями для захвату у розривній машині Р-5. Склад бетону приймали такий же, як і для плит підрейкової основи. Адгезію визначали у сухому та водонасиченому до постійної маси стані зразків.

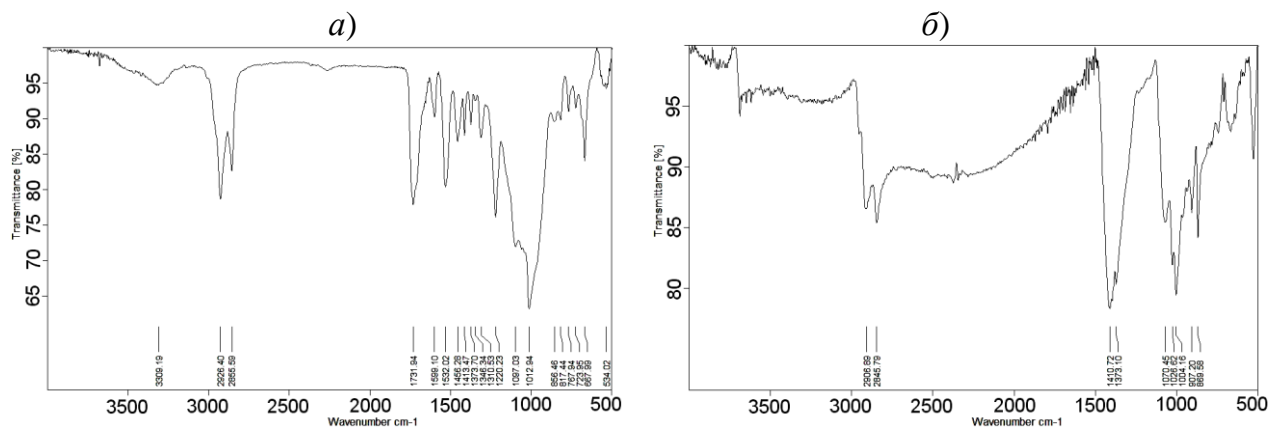


Рис. 4. ІЧ-спектри: *а* – поліуретану EdilonCorkelast; *б* – гуми

Параметри вібрації та електричний опір конструкцій трамвайної колії досліджували у натурних умовах. Параметри вібрації – вібропереміщення та віброшвидкість конструкцій колії від проходження рухомого складу визначали за допомогою віброаналізатора Вибран-2.0. Електричний опір – з оригінальними методиками за допомогою цифрового мультиметра Sanwa PC510 та спеціального електроду, у якому контакт з поверхнею бетону забезпечується пористою губкою, просоченою насиченим розчином мідного купоросу $CuSO_4 \times 5H_2O$.

Результати дослідження адгезії поліуретанових мастик до поверхні сталі та бетону у порівнянні з бітумно-полімерними мастиками наведені у табл. 1, а показників вібрації та електричного опору – у табл. 2.

Таблиця 1

Результати дослідження адгезії поліуретанових мастик

Матеріал	Адгезія, МПа			Коефіцієнт розм'якшення (водостійкості)
	до сталі	до бетону		
		сухого	Водонасиченого	
Edilon Corkelast	понад 0,8	понад 0,8		
Icosit C340/45F	0,88	0,61	0,24	0,39
Композиція «Х»	0,51	0,70	0,43	0,61
Бітумно-полімерна мастика	0,7	0,34		

Таким чином, встановлено, що поліуретанові мастики характеризуються показниками адгезії кращими, ніж модифіковані бітумні мастики і забезпечують зниження віброшвидкості коливань плити підрейкової основи у порівнянні з колією на гумових підрейкових прокладках на 27%, збільшення

електричного опору між рейкою і плитою – у 3,9 раз. Це підтверджує припущення про те, що високим здатності поліуретану гасити вібрацію та електричному опору сприяє наявність у поліуретані груп $C=O$.

Таблиця 2

Результати дослідження в натурних умовах показників вібрації та електричного опору трамвайної колії

Найменування показника	Один. вимір.	Величина для колії		Покращення показника, %
		з ізолюваною Edilon Corkelast рейкою	традиційної з гумовими прокладками	
Віброшвидкість	мм/с	0,62	0,85	27
Вібропереміщення	мм	0,22	0,27	19
Електричний опір в ланцюгах:				
– рейка – плита	МОм	3,9	1	290
– рейка – ґрунт	«	–	0,016	–

Для підтвердження припущення про забезпечення максимальної тріщиностійкості бетону в умовах динамічних впливів за рахунок забезпечення оптимальних величин структурних характеристик бетону – коефіцієнтів розсунення зерен крупного $\alpha_{\text{опт}}$ та дрібного $\mu_{\text{опт}}$ заповнювача та водоцементного В/Ц відношення досліджено залежності міцності на стиск, розтяг при згині, показників тріщиностійкості в умовах динамічних – ударних та вібраційних впливів від вказаних структурних характеристик. В експериментах фактори α і μ варіювали навколо оптимальних величин, визначених за (2), а В/Ц – навколо величини 0,35 шляхом підбору складу бетону експериментальних зразків.

Міцність бетону на стиск f та розтяг при згині f_t визначали стандартними методами випробуванням за ДСТУ Б В.2.7-214, відповідно, зразків-кубів з розміром ребра 100 мм та зразків-призм розміром 400×100×100 мм у кількості трьох штук кожного складу. Для дослідження тріщиностійкості бетону в умовах динамічних – ударних та вібраційних впливів розроблено оригінальні методики. Тріщиностійкість бетону в умовах динамічного (ударного) впливу визначали за допомогою копра оригінальної конструкції (рис. 5, а) на зразках-кубах з розміром ребра 150 мм із забетонованими в них анкерами рейкового скріплення (рис. 5, б).

Ударний вплив створювали на анкер ударним ножом за рахунок багатократного скидання вантажу масою $m = 10$ кг з висоти $h = 0,4$ м. За показники тріщиностійкості приймали сумарну енергію ударного впливу E , витрачену на утворення первинної тріщини (рис. 5, б), первинного відколу, значних відколів та повного руйнування зразка:

$$E = Nmgh, \text{ кг} \times \text{м} / \text{с}^2 \times \text{м} = \text{Дж}, \quad (4)$$

де N – кількість ударів, витрачених на утворення відповідного пошкодження.

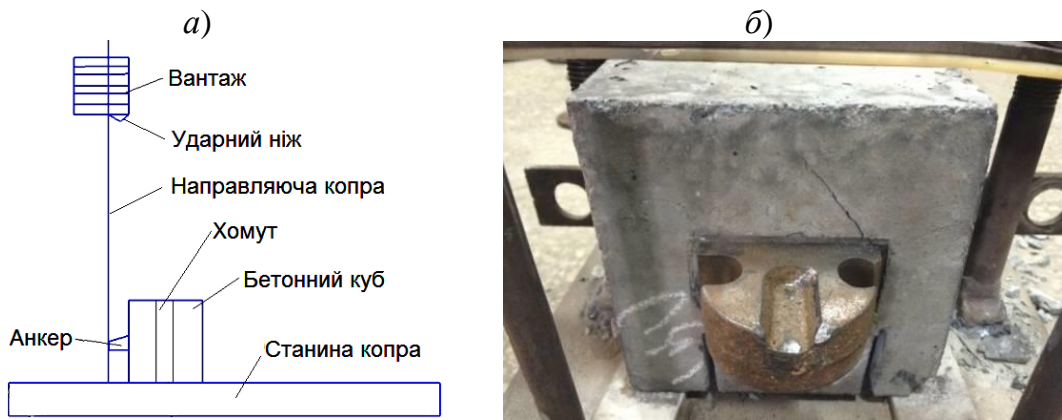


Рис. 5. Дослідження тріщиностійкості бетону в умовах динамічних впливів: *а* – зразок бетону з анкером після випробування ударними впливами; *б* – схема копра для створення ударних впливів

Тріщиностійкість бетону в умовах динамічного (вібраційного) впливу визначали за допомогою випробувальної машини МУП-50, обладнаної пульсатором, на зразках – блоках підрейкової основи з рейковим скріпленням. Зразок встановлювали на площадку випробувальної машини під кутом 15° , як визначено проф. Е.І. Даниленком, та збирали пару скріплень з фрагментом рейки. Навантаження здійснювали вертикально через рейку з частотою 8 Гц, діапазоном сили 100–235 кН, протягом 1,5 млн. циклів. Результати вібраційного впливу на бетон оцінювали дослідженням кернів діаметром 85 мм, висвердлених із блоків. Із одного блока висвердлювали по два керни – із зони біля нижнього анкера, що піддавалась максимальному вібраційному впливу та із найбільш віддаленої зони, що впливу не зазнавала. Керни досліджували методом люмінесцентної дефектоскопії, після чого розрізали на зразки-циліндри довжиною 120 мм та випробували на розтяг при розколюванні згідно ДСТУ Б В.2.7-214.

Результати дослідження залежності міцності бетону на стиск f та розтяг при згині f_t від коефіцієнту розсунення зерен дрібного μ заповнювача наведені на рис. 6. Як видно із рис. 6 залежності f і f_t від μ мають екстремальний хвилеподібний характер і задовільно описуються поліномами 3 і 2 ступеня. Залежності f і f_t від В/Ц мають лінійний характер, що відповідає відомому закону водоцементного відношення. Більш високу кореляцію мають залежності від структурних характеристик міцності бетону на стиск f , для яких екстремуми спостерігаються за величин $\alpha \approx 1,4$ і $\mu \approx 1,4$, що підтверджує правильність теоретично визначених величин $\alpha_{\text{опт}} = 1,42$ і $\mu_{\text{опт}} = 1,43$.

Результати дослідження тріщиностійкості бетону в умовах динамічного (ударного) впливу у вигляді залежності сумарної енергії ударного впливу E , витраченої на повне руйнування зразка, від коефіцієнту розсунення зерен дрібного заповнювача μ наведені на рис. 7, *а*.

Із рис. 7, *а* видно, що залежність E від μ , як і від α , має екстремальний хвилеподібний характер і задовільно описується поліномом 3 ступеня. Екстремуми спостерігаються за величин $\alpha \approx 1,30$ і $\mu \approx 1,27$, що відрізняється від

теоретично визначених оптимальних величин (для $d_{ш} = 12,5$ мм, $d_{п} = 0,47$ мм і $d_{ц} = 0,03$ мм).

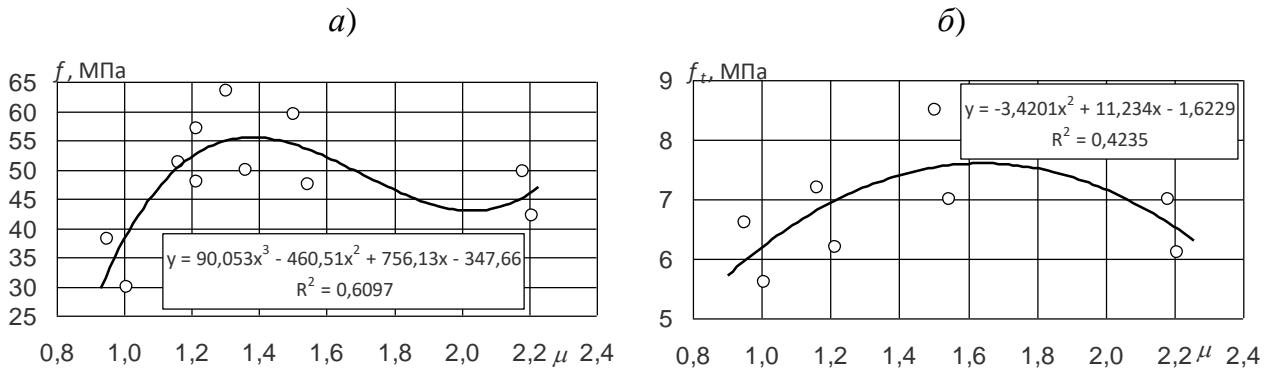


Рис. 6. Залежності міцності бетону на стиск f (а) та розтяг при згині f_t (б) від коефіцієнту розсунення зерен дрібного μ заповнювача

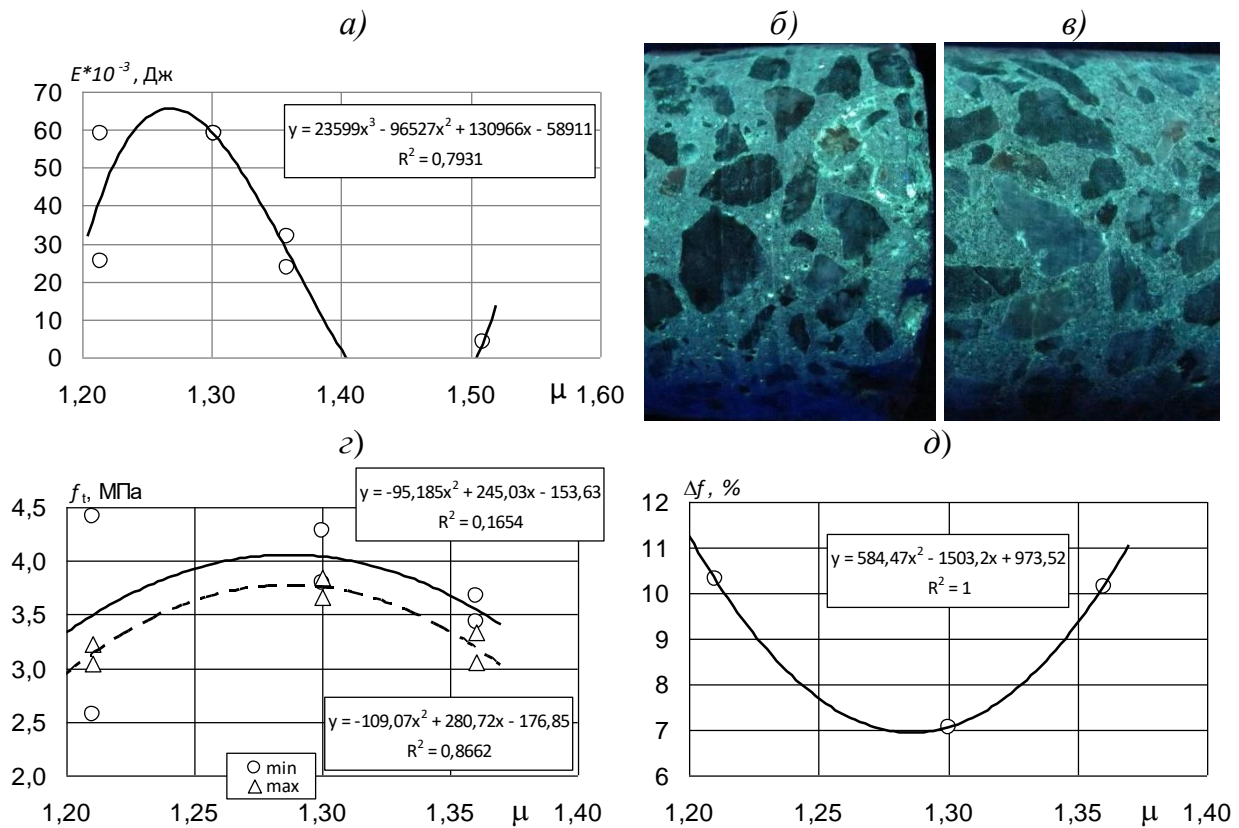


Рис. 7. Результати дослідження тріщиностійкості бетону в умовах динамічних впливів: а – залежність сумарної енергії ударного впливу E , витраченої на повне руйнування зразка, від коефіцієнту розсунення зерен дрібного заповнювача μ ; б, в – оброблені люмінофором керни бетону з коефіцієнтами розсунення зерен дрібного заповнювача $\mu = 1,36$ (z) і 1,30 (d) в ультрафіолетовому світлі; z, d – залежність міцності бетону на розтяг при розколюванні циліндрів f_t після мінімального (min) та максимального (біля анкера, max) динамічного впливу (б) та втрати міцності після цього впливу Δf (d) від коефіцієнту розсунення зерен дрібного заповнювача μ

Це може бути пояснене коливаннями фракційного складу матеріалів. Так, розрахунок для $d_{ш} = 10$ мм, $d_{п} = 0,47$ мм і $d_{ц} = 0,02$ мм дає величини $\alpha_{опт} = 1,31$ і $\mu_{опт} = 1,28$, що відповідає отриманим експериментальним даним. Отже, для

залізобетонних підрейкових основ рекомендується здійснювати підбір складу бетону з урахуванням експериментально уточнених величин $\alpha_{\text{опт}} = 1,30$ і $\mu_{\text{опт}} = 1,27$. Отримані залежності E від В/Ц близькі до лінійних, що відповідає закону водоцементного відношення.

Результати дослідження тріщиностійкості бетону в умовах динамічного (вібраційного) впливу у вигляді знімків оброблених люмінофором кернів із бетону з $\mu = 1,36$ і $1,30$ в ультрафіолетовому світлі та залежності міцності бетону на розтяг при розколюванні f_t та втрати міцності внаслідок динамічного впливу Δf від μ наведені на рис. 7, б–г. На кернах тріщини спостерігались лише у бетоні з $\mu = 1,36$ у вигляді хвилястих ліній (рис. 7, б), що свідчить про віддаленість величини μ від оптимальної. У бетоні з $\mu = 1,30$, близьким до $\mu_{\text{опт}} = 1,27$, тріщини не спостерігались (рис. 7, в).

Залежності f_t і Δf від μ (рис. 7, г, д) апроксимуються поліномом 2 ступеня з високою кореляцією, отже має екстремальний характер з максимумом за $\mu \approx 1,28$, що близько до уточненої оптимальної величини $\mu_{\text{опт}} = 1,27$. Отже, бетон з $\mu \approx 1,28$ зазнає мінімального впливу та його міцність на розтяг знижується не більше, ніж на 7%, тоді як у бетоні з $\mu = 1,21$ та $1,36$ за рахунок формування недостатньо щільної структури прошарків цементного каменю між зернами піску (рис. 3, а) та утворення мікротріщин (рис. 7, б) міцність знизилась на понад 10%. Ці результати узгоджуються також і з результатами люмінесцентної дефектоскопії.

Таким чином підтверджено, що максимальна тріщиностійкість бетону в умовах динамічних впливів забезпечується за рахунок забезпечення оптимальних величин структурних характеристик бетону – коефіцієнтів розсунення зерен крупного заповнювача $\alpha_{\text{опт}}$ та, особливо, дрібного заповнювача $\mu_{\text{опт}}$, а також можливо низького водоцементного відношення В/Ц. Для досліджених цементу та заповнювачів оптимальні величини структурних характеристик склали $\alpha_{\text{опт}} = 1,30$, $\mu_{\text{опт}} = 1,27$, В/Ц_{опт} = 0,23. Зазначеному μ згідно рівнянню (2) і графіку рис. 3, г відповідає товщина прошарку цементного каменю між зернами дрібного заповнювача 20 мкм. Оптимальні величини структурних характеристик забезпечують відповідність міцності бетону вимогам до класу С40/50.

П'ятий розділ присвячений впровадженню результатів досліджень. Для реконструкції трамвайних ліній у центральній частині м. Харкова за участю автора впроваджено дві конструкції колії, інтегрованої у дорожнє покриття – зі збірною підрейковою основою із залізобетонних плит та зі збірно-монолітною підрейковою основою із збірних залізобетонних блоків та монолітної плити, які за рахунок застосування удосконалених матеріалів та деталей забезпечують зниження вібрації, електричних впливів, температурних напружень в рейках і тріщиноутворення в бетоні у порівнянні із традиційними конструкціями колії.

Конструкція трамвайної колії зі збірною підрейковою основою із залізобетонних плит з рейками, ізольованими у рейкових каналах (рис. 8, а), призначена для найбільш відповідальних ділянок з жорсткими вимогами до рівня шуму та вібрації. Для цієї конструкції автором разом зі співавторами

розроблено: конструкцію плит, у яких удосконалено відносно аналогів арматурний каркас та форму рейкового каналу та на які отримано патенти на корисні моделі [19–24] і склад бетону з оптимальними коефіцієнтами розсунення зерен крупного та дрібного заповнювача для них; конструкцію прирейкових вкладишів, технічні умови і склад бетону для них. Для ізоляції рейки придатними визначені поліуретанові мастики декількох виробників (остаточний вибір має здійснюватись з урахуванням поточної ціни).

Конструкція трамвайної колії зі збірно-монолітною підрейковою основою із збірних залізобетонних блоків та монолітної плити з рейками, прикріпленими пружними рейковими скріпленнями (рис. 8, б), з дорожнім покриттям із асфальтобетону, призначена для інших ділянок та кривих. Для цієї конструкції автором разом зі співавторами розроблено: конструкцію блоків підрейкової основи, технічні умови, склад бетону з оптимальними коефіцієнтами розсунення зерен крупного та дрібного заповнювача для блоків і монолітної плити; пружне рейкове скріплення SRS-T.

а)



б)



Рис. 8. Зведення трамвайної колії: а – зі збірною підрейковою основою із залізобетонних плит з ізольованими рейками (м. Харків, пр. Московський, 2016 р.); б – зі збірно-монолітною підрейковою основою із збірних залізобетонних блоків та монолітної плити (м. Харків, вул. Конєва, 2017 р.)

Пружне рейкове скріплення SRS-T (рис. 9) за рахунок застосування пружної клеми, закладеного у бетон полімерного дюбеля та шурупа замість анкера, поліуретанових ізолюючих деталей із поліуретану різної твердості забезпечує зниження вібрації, електричних впливів, тріщиноутворення в бетоні у порівнянні з рейковими скріпленнями інших типів. На скріплення подано заявку на видачу патенту на винахід.



Рис. 9. Пружне рейкове скріплення SRS-T для трамвайної колії на двоблокових опорних елементах. Дослідна партія у галузевій науково-дослідній лабораторії підрейкових основ і спецзалізобетону УкрДУЗТ

Економічний ефект від впровадження результатів досліджень, обумовлений підвищенням довговічності конструкцій трамвайної колії, вираженим у збільшенні міжремонтного періоду, протягом якого вона зберігається у справному стані (забезпечується стабільність положення у плані та профілі у допустимих границях), склав 2317 тис. грн.

Економічний ефект, що не піддається обрахунку, досягається за рахунок зниження струмів витоку і запобігання електрокорозійних пошкоджень розташованих поруч з колією залізобетонних і металевих конструкцій і трубопроводів. Соціальний ефект досягається за рахунок запобігання травмування людей під час сходів, зниження вібрації та створеного нею шуму, підвищення комфортності їзди.

Результати досліджень використовуються у навчальному процесі УкрДУЗТ з підготовки бакалаврів і магістрів зі спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, освітньої програми «Будівництво та експлуатація інженерних споруд залізничного транспорту».

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз особливостей улаштування та експлуатації трамвайних колій. Встановлено, що їм притаманні численні недоліки, а саме: вібрація та шум, електрокорозійні пошкодження, викиди рейок від температурних напружень, тріщиноутворення в бетоні підрейкових основ, сходи трамваїв з рейок. Відзначено близькість більшості місць сходів до джерел струмів витоку і надлишкових електричних зарядів.

2. Розвинуто уявлення про вплив струмів витоку та надлишкових електричних зарядів антропогенного та природного походження на конструкції трамвайних колій. Показано, що крім електрокорозійного впливу на бетон і залізобетон та сприяння тріщиноутворенню в бетоні негативні надлишкові електричні заряди, що накопичуються на підрейкових основах, за рахунок електростатичних сил можуть сприяти сходам рухомого складу на розладнаних ділянках колії.

3. Теоретичними та експериментальними дослідженнями доведено, що високій здатності поліуретану поглинати вібрацію сприяє латеральне електростатичне відштовхування між функціональними групами $C=O$ з подвійними зв'язками уретанових груп, а високому електричному опору – висока електронегативність цих груп.

4. Встановлено, що заміна у важкому бетоні гранітного заповнювача кварцовим, а частини цементу кварцом меленим пилоподібним, обумовлює зниження коефіцієнта лінійного теплового розширення бетону до 3,8 разів від 10×10^{-6} до $2,65 \times 10^{-6} K^{-1}$, а наклеювання на шийку трамвайної рейки вкладишів із такого бетону – зниження температурних напружень в рейці на 10 – 32%, віброшвидкості коливань підрейкової основи – на 27% від 0,85 до 0,62 мм/с.

5. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що залежність тріщиностійкості бетону в умовах динамічних впливів від коефіцієнтів розсунення зерен крупного α та дрібного μ заповнювачів та водоцементного відношення має екстремальний характер. Для

досліджених матеріалів забезпечення відповідності коефіцієнту розсунення зерен дрібного заповнювача оптимальній величині $\mu_{\text{опт}} = 1,27$ і товщини прошарку цементного каменю між зернами дрібного заповнювача 20 мкм у бетоні класу С40/50 забезпечило підвищення тріщиностійкості бетону в умовах динамічних впливів за показниками сумарної енергії руйнування у порівнянні з бетоном з $\mu = 1,51$ (С20/25) у 14,9 раз, а з $\mu = 1,36$ (С32/40) – у 2,1 раз.

6. Результати досліджень впроваджено під час реконструкції трамвайних ліній міст Харкова, Дніпра, Києва у двох конструкціях колії, інтегрованої у дорожнє покриття – зі збірною підрейковою основою із залізобетонних плит та зі збірно-монолітною підрейковою основою із збірних залізобетонних блоків та монолітної плити. Впроваджені матеріали та деталі забезпечили зниження вібрації, електричних впливів, температурних напружень в рейках і тріщиноутворення в бетоні. Економічний ефект обумовлений збільшенням міжремонтного терміну, протягом якого колія зберігається у справному стані, складає 2317 тис. грн. Соціальний ефект досягається за рахунок запобігання травмування людей під час сходів, зниження вібрації та створеного нею шуму, підвищення комфортності руху. Результати досліджень використовуються у навчальному процесі УкрДУЗТ всіх рівнів підготовки зі спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових виданнях України

1. Палант О.В. Спільний руйнівний вплив постійного та перемінного струму витoku на обводнені конструкції. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Зб. Наук. праць Луцького нац. техн. ун-ту.* 2018. Вип. 10. С. 106–112.

2. Палант О.В., Савченко О.М., Плугін Д.А., Плугін А.А. Зниження електричних і вібраційних впливів від рейкового транспорту. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. Зб. наук. праць Придніпровської держ. акад. буд. та арх.* 2018. Вип. 104. С. 194–199. *Особистий внесок:* визначено параметри вібрації та електричного опору у натурних умовах, визначено величини віброшвидкості та віброприскорення.

3. Плугин А.Н., Палант Е.В., Плугин Д.А., Плугин Ал.А., Борзяк О.С. Механизм защитных свойств полиуретана и композиций на основе жидкого стекла от электрических и вибрационных воздействий. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ».* 2018. Вип. 35. С. 25–28. *Особистий внесок:* розроблено схеми деформування структурного елементу поліуретану, обґрунтовано вплив функціональних груп С=О на реологічні та електричні властивості поліуретану.

4. Плугин Д.А., Савченко О.М., Палант О.В. Электро- та віброізоляційні матеріали на залізниці. Можливості їх виготовлення в Україні *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізн. тр-ту.* 2017. Вип. 169. С. 11–18. *Особистий внесок:* виконано аналітичний огляд існуючих електро- та віброізоляційних матеріалів, визначено їх придатність для конструкцій колії.

5. Шуба Т., Чистяк В., Перестук В., Єлякіна О., Забіяка О.А., Плугін А.А. Досвід застосування нових конструкцій безбаластного залізничного полотна у

Польщі та оцінка перспектив їх застосування в Україні. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізн. тр-ту*. 2011. Вип. 122. С. 201–221. *Особистий внесок*: виконано аналіз стану трамвайних колій в Польщі, характеру їх пошкоджень та способів запобігання у нових конструкціях колії.

Публікації апробаційного характеру

6. Palant O., Plugin D., Plugin A., Lobiak A., Pluhin O. Use of liners made of concrete on quartz aggregates and polyurethane composition to reduce vibration, noise and improve the stability of tramway track. *Matec Web of Conferences*. V.230. 03014 (2018). 9 pp. DOI: 10.1051/mateconf/201823003014 (Scopus). *Особистий внесок*: досліджено залежність коефіцієнту лінійного температурного розширення бетону від вмісту кварцових заповнювачів і наповнювачів.

7. Plugin A.M., Pluhin O., Palant O., Konev O., Nykutytskyj A. Electric potentials and charges on the buildings and the area around the deep water wells. *Matec Web of Conference*. V.116, 01011 (2017). 7 pp. DOI: 10.1051/mateconf/201711601011 (Scopus). *Особистий внесок*: взято участь у вимірюванні електричних потенціалів на конструкціях будівлі та місцевості та аналізі результатів вимірювань.

8. Palant O.V., Plugin A.A., Plugin D.A., Pluhin O.A. Reduction of electric and vibrational impacts of city tram to the structures and buildings. 20 Internationale Baustofftagung, 12-14 September 2018, Weimar, Bundesrepublik Deutschland: Tagungsbericht. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, 2018. P 3.03. Band 2. P. 1073–1079. *Особистий внесок*: визначено параметри вібрації та електричний опір в натурних умовах для традиційних і запропонованих конструкцій, виконано аналіз результатів вимірювань.

9. Палант О.В., Плугін Д.А., Плугін А.А., Лобяк О.В., Плугін О.А. Застосування вкладишів з бетону на кварцових заповнювачах і поліуретанової композиції для зниження вібрації, шуму і підвищення стійкості трамвайної колії. Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті: 7 Міжнар. наук.-техн. конфер., Харків, 14-16.11.2018: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 208–209. *Особистий внесок*: досліджено залежність коефіцієнту лінійного температурного розширення бетону від вмісту кварцових заповнювачів і наповнювачів.

10. Плугін А.А., Мірошніченко С.В., Конєв О.А., Партала Н.М., Суханова Ю.А., Палант О.В. Фізико-механічні властивості прокладного шару безбаластного мостового полотна із просторово армованої полімерним волокнистим матеріалом цементної композиції. Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: 6 Міжнар. наук.-техн. конфер., Харків, 19-21.04.2017: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2017. С. 64–65. *Особистий внесок*: Прийнято участь у розробці методики експериментальних досліджень.

11. Палант О.В., Плугін А.А., Плугін Д.А. Досвід і перспективи улаштування трамвайних колій на суцільній залізобетонній основі з ізолюваною рейкою у м. Харків. Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті: 5 Міжнар. науково-техн. конфер., Харків, 23–24.04.2015 р.: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ,

2015. С. 17. *Особистий внесок*: Узагальнено інформацію щодо виконаних у м. Харкові ремонтів трамвайних колій.

12. Плугін А.М., Плугін О.А., Палант О.В., Конєв О.А., Плугін А.А. Вплив електричних потенціалів від водозабірних свердловин на пошкодження конструкцій будівель. Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: 6 Міжнар. наук.-техн. конфер., Харків, 19-21.04.2017: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2017. С. 67. *Особистий внесок*: взято участь у вимірюванні електричних потенціалів на конструкціях будівлі та місцевості та аналізі результатів вимірювань.

13. Палант О.В., Плугін Д.А., Плугін А.А. Сучасні конструктивно-технологічні рішення підрейкових основ трамвайних колій, реалізовані у м. Харків. Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: тези допов. 78-ї Міжнар. наук.-техн. конфер., Харків, УкрДУЗТ, 26-28.04.2016. Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. 160 (дод.). С. 80–81. *Особистий внесок*: Узагальнено інформацію, із аналізом конструктивних рішень, щодо виконаних ремонтів трамвайних колій.

14. Савченко О.М., Палант О.В., Плугін Д.А. Захист будівель та споруд від вібраційних коливань та струмів витоку: Аналіз методів електро- та віброізоляції рейкових колій. Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: тези доповідей 79-ї Міжнар. наук.-техн. конфер., Харків, УкрДУЗТ, 25–27.04.2017. Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 169 (дод.). С. 50–51. *Особистий внесок*: Виконано аналіз результатів вимірювань електричного опору, віброшвидкості та вібропереміщення різних конструкцій трамвайної колії.

Додаткові публікації та патенти

15. Захаров Д.С., Палант О.В., Толмачов Д.С., Усік П.С. Спосіб установаження рейки в підрейковому каналі за допомогою кондуктору. *Науковий вісник будівництва*. 2016. № 3 (85). С. 245–248. *Особистий внесок*: виконано аналітичний огляд відомих способів встановлення та закріплення рейок, обрано придатні для встановлення у підрейкові канали.

16. Плугін Д.А., Плугін А.А., Борзяк О.С., Палант О.В., Савченко О.М. Захист об'єктів транспортної інфраструктури від електричних і вібраційних впливів наземного рейкового транспорту. *Науковий вісник будівництва*. 2017. № 4 (90). С. 250–254. *Особистий внесок*: визначено параметри вібрації та електричні потенціали в натурних умовах, виконано аналіз результатів вимірювань.

17. Захаров Д.С., Палант О.В., Толмачов С.М., Плугін Д.А., Мойсєєва П.Є. Вплив коефіцієнта розсунення зерен щебеню розчином на міцність цементних бетонів при згині. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізн. тр-ту*. 2017. Вип. 169. С. 64–72. *Особистий внесок*: Прийнято участь у розробці методики досліджень та аналізі експериментальних даних.

18. Захаров Д.С., Палант О.В., Толмачов Д.С., Усік П.С. Конструкція деформаційних швів при монолітній підрейковій основі трамвайних колій. *Науковий вісник будівництва*. 2016. № 3 (85). С. 242–245. *Особистий внесок*:

Виконано аналітичний огляд існуючих конструкцій деформаційних швів, запропоновано заливання у шов еластичного полімерного матеріалу.

19. Арматурний каркас для залізобетонної плити підрейкової основи : пат. на кор. модель 88466 Україна. № u 2013 14609 ; зявл. 13.12.2013 ; опубл. 11.03.2014, Бюл. № 5. 4 с. *Особистий внесок*: визначено слабкі місця у бетоні плит і запропоновано встановити додаткові арматурні стержні.

20. Плита залізобетонна підрейкової основи : пат. на кор. модель 88467 Україна. № u 2013 14611 ; зявл. 13.12.2013 ; опубл. 11.03.2014, Бюл. № 5. 4 с. *Особистий внесок*: запропонована форма поперечного перерізу рейкового каналу.

21. Залізобетонна плита підрейкової основи : пат. на кор. модель 88468 Україна. № u 2013 14615 ; зявл. 13.12.2013 ; опубл. 11.03.2014, Бюл. № 5. 4 с. *Особистий внесок*: визначено розташування у плитах отворів для стропування з урахуванням властивостей бетону.

22. Армowana залізобетонна плита підрейкової основи : пат. на кор. модель 89731 Україна. № u 2013 14618 ; зявл. 13.12.2013 ; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8. 4 с. *Особистий внесок*: визначено слабкі місця у бетоні плит і запропоновано встановити додаткові арматурні стержні.

23. Залізобетонна плита підрейкової основи : пат. на кор. модель 91916 Україна. № u 2014 00136 ; зявл. 09.01.2014 ; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14. 4 с. *Особистий внесок*: визначено розташування у плитах закладних деталей з урахуванням властивостей бетону.

24. Залізобетонна плита підрейкової основи : пат. на пром. зразок 29871 Україна. № s 2014 00125 ; зявл. 22.01.2014 ; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. 6 с. *Особистий внесок*: запропонована форма поперечного перерізу рейкового каналу.

АНОТАЦІЯ

Палант О.В. Бетони та вироби для трамвайних колій підвищеної стійкості до динамічних, електричних і температурних впливів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироби. – Український державний університет залізничного транспорту, Харків, 2019.

Дисертація присвячена удосконаленню матеріалів і деталей трамвайної колії для зниження вібрації, електричних впливів, температурних напружень в рейках і тріщиноутворення в бетоні. Виконано аналіз особливостей улаштування та експлуатації мережі трамвайних ліній, встановлені недоліки традиційних конструкцій трамвайної колії, серед яких вібрація та шум, електрокорозійні пошкодження, викиди рейок від температурних напружень, тріщиноутворення в бетоні підрейкових основ, сходи трамваїв з рейок тощо. Виконано теоретичні та експериментальні дослідження, в результаті яких встановлено: вплив струмів витоку та надлишкових електричних зарядів на конструкції трамвайних колій; високій здатності поліуретану гасити вібрацію сприяє електростатичне відштовхування між функціональними групами $C=O$ з подвійними зв'язками уретанових груп, а високому електричному опору –

висока електронегативність цих груп; заміна у важкому бетоні гранітного заповнювача кварцовим, а частини цементу – кварцовим наповнювачем обумовлює зниження коефіцієнта лінійного теплового розширення бетону, а наклеювання на шийку трамвайної рейки вкладишів із такого бетону – зниження температурних напружень в рейці, а також зниження віброшвидкості коливань підрейкової основи; залежність тріщиностійкості бетону в умовах динамічних впливів від коефіцієнтів розсунення зерен крупного α та дрібного μ заповнювачів та водоцементного відношення. Результати досліджень впроваджено під час реконструкції трамвайних ліній м. Харкова, Дніпра, Києва. Економічний ефект складає 2317 тис. грн. та обумовлений збільшенням міжремонтного терміну, протягом якого колія зберігається у справному стані.

Ключові слова: трамвайна колія, поліуретан, бетон, вібрація, електричні впливи, тріщини, захист.

АННОТАЦІЯ

Палант Е.В. Бетоны и изделия для трамвайных путей повышенной устойчивости к динамическим, электрическим и температурным воздействиям. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, Харьков, 2019.

Диссертация посвящена совершенствованию материалов и деталей трамвайного пути для снижения вибрации, электрических воздействий, температурных напряжений в рельсах и трещинообразования в бетоне.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная гипотеза, новизна и практическая значимость полученных результатов. Приведены сведения об апробации основных результатов диссертации, количестве публикаций, структуре и объеме работы.

В первом разделе в результате анализа особенностей устройства и эксплуатации трамвайных линий установлено, что традиционным конструкциям пути присущи недостатки, а именно: вибрация и шум, электрокоррозионные повреждения, выбросы рельсов от температурных напряжений, трещинообразования в бетоне подрельсовых оснований, сходы трамваев с рельсов. В результате теоретических исследований развиты представления о влиянии токов утечки и избыточных электрических зарядов антропогенного и природного происхождения на конструкции трамвайных путей. Представлен аналитический обзор конструктивных решений и материалов для снижения вибрации, шума и электрических воздействий от трамвайного пути.

Во втором разделе приведены характеристики основных материалов и методов исследований. Физико-механические свойства бетона определяли стандартными методами. Для исследования адгезионных свойств полимеров, параметров вибрации конструкций и электрического сопротивления материалов

и изделий трамвайного пути, трещиностойкости бетона в условиях динамических воздействий разработаны оригинальные методики исследований.

В третьем разделе выполнены теоретические исследования по разработке способов защиты от вибрационных и электрических воздействий от трамвайных путей, снижения температурных напряжений и предотвращения трещинообразования в них. Установлено, что высокой способности полиуретана поглощать вибрацию способствует латеральное электростатическое отталкивание между функциональными группами $C=O$ с двойными связями уретановых групп, а высокому электрическому сопротивлению – высокая электроотрицательность этих групп.

Установлено, что замена в тяжелом бетоне гранитного заполнителя кварцевым, а части цемента – кварцевым наполнителем обуславливает снижение коэффициента линейного теплового расширения бетона, а наклеивания на шейку трамвайного рельса вкладышей из такого бетона – снижение температурных напряжений в рельсе.

В четвертом разделе представлены результаты экспериментальных исследований по подтверждению гипотез и разработке способов защиты от вибрационных и электрических воздействий от трамвайных путей, снижение температурных напряжений и предотвращения трещинообразования в них. В результате исследований установлено: зависимость трещиностойкости бетона в условиях динамических воздействий от коэффициентов раздвижки зерен крупного α и мелкого μ заполнителей и водоцементного отношения; обеспечение полиуретановыми мастиками снижения виброскорости колебаний плиты подрельсового основания и увеличение электрического сопротивления между рельсом и плитой.

В пятом разделе представлены данные о внедрении результатов исследований при реконструкции трамвайных линий г. Харькова, Днепра, Киева. Экономический эффект составляет 2317 тыс. грн. и обусловлен увеличением межремонтного срока, в течение которого путь сохраняется в исправном состоянии и т.п.

Ключевые слова: трамвайный путь, полиуретан, бетон, вибрация, электрические воздействия, трещины, защита.

ABSTRACT

Palant O.V. Concretes and products for tram tracks with high resistance to dynamic, electrical and temperature impacts. – Manuscript. Dissertation for the Candidate Degree in Engineering Science (PhD in Sci. Eng.) in specialty 05.23.05 – Building Materials and Products. – Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2019.

The dissertation considers the improvement of materials and parts of the tram track to reduce vibration, electrical impacts, temperature stresses in rails and crack formation in concrete. The specific features of arrangement and operation of the tramway lines were analyzed and disadvantages of conventional tram track structure were identified, including vibration and noise, electric corrosion damages, thermal rail stressing, crack formation in concrete rail seats, derailment of trams, etc.

Theoretical and experimental studies were conducted which allowed to identify the influence of leakage currents and excess electric charges on the tram track structure; high vibration damping capacity of polyurethane is promoted by electrostatic repulsion between $C=O$ functional groups with double bonds of the urethane groups, while high electrical resistance is facilitated by high electronegativity of these groups; in heavy concrete, substitution of crushed granite with quartz aggregate, and partial substitution of cement with quartz aggregate results in reduction of the linear temperature expansion coefficient of concrete; also, gluing of liners made of such concrete on the tram rail web reduces thermal stresses in the rails and decreases vibration velocity of the rail seat; and dependence of crack resistance of concrete under dynamic impacts from the coefficients of displacement of coarse α and fine μ aggregate grains and water-cement ratio. The results of the study were implemented during the reconstruction of the tram lines in Kharkiv, Dnipro, Kyiv. The economic effect of UAH 2,317,000 is determined by a prolongation of the period between repairs during which the track is maintained in proper condition.

Keywords: tram track, polyurethane, concrete, vibration, electrical impacts, cracks, protection.

Підписано до друку 16.09.2019 р.
Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк-цифровий . Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. №19091901

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. 7-170-354
www.modelist.in.ua