

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет залізничного транспорту

ЗАБІЯКА Олександр Анатолійович



УДК 691.32:620.193.7 (043.3)

МЕХАНІЗМ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ У ПЛИТАХ
БЕЗБАЛАСТНОГО ПОЛОТНА ТА ОПОРАХ ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТІВ
І ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків 2015

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, професор
Плугін Андрій Аркадійович,
Український державний університет
залізничного транспорту,
завідувач кафедри будівельних матеріалів,
конструкцій та споруд.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Вандоловський Олександр Георгійович,
Харківський національний університет
будівництва і архітектури,
завідувач кафедри будівельних матеріалів та виробів;
кандидат технічних наук
Беліченко Олена Анатоліївна,
Харківський національний автомобільно-дорожній
Університет,
науковий співробітник кафедри технології
дорожньо-будівельних матеріалів.

Захист відбудеться 25 грудня 2015 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майд. Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майд. Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий «23» листопада 2015 р.

В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради
д.т.н., професор



А.П. Фалендиш

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Безбаластне мостове полотно (БМП) із залізобетонних плит на металевих залізничних мостах має цілий ряд переваг над іншими конструкціями мостового полотна: забезпечує високу стабільність колії, запобігає забрудненню і корозії верхніх поясів балок проїзної частини; є найбільш економічним за сумарною вартістю виготовлення, укладання та експлуатації; у випадку сходу рухомого складу з рейок забезпечує безпечний прохід мостом колісних пар до його остаточного зупинення. Разом з тим під час планових обстежень мостів мостовипробувальними станціями залізниць у нещодавно укладених залізобетонних плитах БМП виявляється значна кількість тріщин, які вважають силовими або усадковими. Заходи у вигляді збільшення перерізів та армування, дисперсного або зовнішнього армування тощо до суттєвого зменшення тріщиноутворення не приводять. Досвід обстежень показує також, що тріщиноутворення в плитах БМП значно посилюється на мостах через водотоки з пошкодженими тріщинами мостовими опорами. Фактори, що спричиняють тріщиноутворення в плитах БМП і мостових опорах, не є очевидними, тріщиноутворення не пояснюється сучасними уявленнями про поведінку бетону і конструкції в таких умовах експлуатації. Отже, існує невирішена наукова проблема виявлення механізму тріщиноутворення в плитах БМП та підвищення їх тріщиностійкості у зазначених умовах експлуатації. Розв'язання цієї проблеми надасть змогу зменшити витрати від бракування продукції і передчасної заміни плит з тріщинами, витрати на експлуатацію плит і мостових опор, забезпечить підвищення їх надійності та безпеки руху поїздів. Дисертація присвячена вирішенню саме цієї наукової проблеми – встановленню дійсних факторів і механізму тріщиноутворення у плитах БМП і мостових опорах та підвищенню їх тріщиностійкості, що свідчить про актуальність її теми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Української державної академії залізничного транспорту (з 2015 року – Український державний університет залізничного транспорту) у складі держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних робіт: «Теоретичні та експериментальні дослідження впливу електрокорозійного і напружено-деформованого стану залізничних споруд і колії на їх надійність і безпеку руху» (ДР № 0113U001031), «Проведення досліджень технології улаштування полімеркомпозиційного прокладного шару під збірним та збірно-монолітним залізобетонним безбаластним мостовим полотном та розробка рекомендацій» (ДР № 0113U008421); «Розвиток теоретичних та експериментальних основ визначення складів водонепроникного тріщиностійкого бетону для конструкцій і споруд залізниць» (ДР № 0113U001030); «Проведення досліджень сумісності існуючих лакофарбових матеріалів із сучасними антикорозійними системами та розробка рекомендацій із збільшення міжремонтних термінів фарбування мостів» (ДР № 0112U006926) тощо.

Мета дослідження – встановлення механізму тріщиноутворення у плитах безбаластного полотна та опорах залізничних мостів і підвищення їх тріщиностійкості.

Наукова гіпотеза: тріщиноутворенню у бетоні, залізобетоні, бутовій і кам'яній кладці плит БМП та опор експлуатованих металевих залізничних мостів сприяють надлишкові електричні заряди, обумовлені струмами витоку з рейкової колії, а також електричними полями антропогенного та природного походження. Підвищення тріщиностійкості плит БМП і мостових опор можливе за рахунок нейтралізації цих надлишкових зарядів та захисту від струмів витоку та електричних полів.

Задачі дослідження:

- критичний аналіз літературних даних про тріщиноутворення в бетоні та конструкціях із нього, про електричні потенціали і заряди, обумовлені струмами витоку і блукаючими струмами, електричними полями та зарядами антропогенного та природного походження;
- розвинення теоретичних уявлень: про структуру і деформативність бетону плит БМП і бутової кладки мостових опор; виникнення надлишкових електричних зарядів на конструкціях мостів від струмів витоку, електричних полів та зарядів антропогенного та природного походження; їх вплив на тріщиноутворення;
- проведення натурних та експлуатаційних досліджень з виявлення умов і факторів тріщиноутворення у плитах БМП та мостових опорах, класифікація тріщин та інших пошкоджень;
- розроблення оригінальних методик і проведення експериментальних досліджень впливу механічних навантажень, електричних потенціалів і зарядів на міцність бетону і тріщиноутворення в бетоні та плитах БМП;
- розробка рекомендацій з підвищення тріщиностійкості плит БМП і мостових опор, впровадження результатів досліджень.

Об'єкт дослідження – бетон, залізобетон, розчин бутової і кам'яної кладки, з яких виготовлені плити безбаластного мостового полотна (БМП) та зведені опори металевих залізничних мостів, експлуатованих на електрифікованих постійним струмом ділянках залізниць.

Предмет дослідження – процеси в бетоні, розчині та цементному камені, які обумовлюють або запобігають тріщиноутворенню у плитах БМП та опорах металевих залізничних мостів, експлуатованих на електрифікованих постійним струмом ділянках залізниць, способи їх захисту і ремонту.

Методи дослідження. Дослідження впливу механічних навантажень та електричних потенціалів і надлишкових зарядів на тріщиноутворення у плитах БМП та мостових опорах виконано за допомогою методів: вимірювань електричних потенціалів на рейковій колії та у конструкціях; натурних обстежень; анкетування та опитування причетних фахівців; розрахункового і лабораторного експерименту з дослідження напружено-деформованого стану плит БМП та мостових опор. Для лабораторного дослідження сумісного впливу механічного навантаження і надлишкових електричних зарядів на міцність бетону на розтяг в умовах, що наближені до експлуатаційних, розроблено оригінальну методику, яка полягає у визначенні міцності на згин зразків-балочок, між верхньою та нижньою гранями яких накладено різницю потенціалів.

Обґрунтованість і достовірність результатів досліджень забезпечено використанням: у теоретичних дослідженнях – фундаментальних положень і закономірностей колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів; в експериментальних дослідженнях – комплексу незалежних стандартних і оригінальних фізико-механічних, електрометричних методів випробувань і досліджень, статистичної обробки їх результатів, методів обчислювального експерименту, а також збіжністю результатів теоретичних, експериментальних та експлуатаційних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше встановлено вплив надлишкового електричного заряду на міцність бетону і утворення тріщин у конструкціях із нього, зокрема:

- встановлено, що наявність електричного потенціалу величиною 40 В і відповідних надлишкових електричних зарядів не знижує міцності бетону (і розчину) класу до С8/10 (В10) і спричиняє зниження міцності на розтяг водонасиченого бетону більш високих класів, зокрема С25/30 (В30) – на 10 – 15 %;
- встановлено, що наявність електричного потенціалу не впливає на розвиток тріщин у сухому бетоні, а у водонасиченому бетоні потенціал понад 10 В обумовлює відштовхування частинок гідросилікатного гелю, виникнення в цементному камені розтягувальних напружень, а також тиску від електростатичного відштовхування між стінками мікротріщин через плівки води, який досягає величин, порівнянних з міцністю бетону на розтяг.

Отримали подальшого розвитку уявлення про руйнівні фактори на плити безбаластного полотна та опори залізничних мостів, зокрема:

- уточнено функціонування металевого залізничного мосту із залізобетонним безбаластним мостовим полотном і кам'яними або бетонними опорами як єдиного електричного ланцюга, яким розповсюджуються електричні потенціали від струмів витоку з рейкових колій та електричних полів і зарядів місцевості антропогенного та природного походження;
- поглиблено уявлення про формування електричних полів і надлишкових зарядів місцевості антропогенного та природного походження навколо мостів і на їх конструкціях, зокрема, за рахунок вимивання катіонів із ґрунтів насипу і їх винесенням водотоком, через який зведено міст, а також за рахунок перенесення вільних електронів від ядра до підшови земної кори, утворення у волозі кори надлишку гідроксильних іонів OH^- , їх перенесення до денної поверхні місцевості;
- встановлено напружено-деформований стан плит БМП; показано, що напруження від поїзного навантаження і натягу високоміцних шпильок не може самостійно спричинити утворення силових тріщин у плитах крім локальних зон поблизу шпильок;
- уточнено механізм довготривалої повзучості бетону плит БМП і бутобетону мостових опор, вплив складу бетону на неї; показано, що повзучість бетону в найбільш напружених зонах поблизу високоміцних шпильок не є фактором, що може самостійно спричинити утворення тріщин у плитах; показано, що в бутобетоні мостових опор через застосування пісних розчинів з незначною витратою в'язучої речовини всі види повзучості бетону не проявляються;
- класифіковано всі види тріщин у плитах БМП за їх розташуванням і характе-

ром у зв'язку з факторами, що їх спричиняють, всього 13 видів.

Практичне значення одержаних результатів. Вперше розроблено класифікацію пошкоджень плит БМП з їх розподілом на категорії за впливом на довговічність, несучу здатність і безпеку руху поїздів та заходами з їх запобігання та усунення. Розроблено рекомендації із забезпечення тріщиностійкості плит БМП (ЦП-0224), а також захисту плит БМП і мостових опор від руйнівного впливу електричних потенціалів і надлишкових зарядів від струмів витоку з рейкових колій та електричних полів і зарядів місцевості антропогенного та природного походження. Укрзалізницею прийняті відповідні інструктивні документи. Економічний ефект від впровадження результатів досліджень склав 1102 тис. грн. Результати досліджень використовуються в навчальному процесі УкрДУЗТ для підготовки спеціалістів і магістрів спеціальностей «Залізничні споруди і колійне господарство» і «Промислове та цивільне будівництво».

Особистий внесок здобувача. Всі положення і результати, які виносяться на захист, отримані автором самостійно, а також у спільних зі співавторами теоретичних, експериментальних і практичних роботах. Огляд існуючих уявлень з досліджуваних питань, формулювання наукової гіпотези, виведення залежностей і розрахунки виконані автором особисто. Також особисто виконані більшість лабораторних досліджень, натурних досліджень і вимірювань на мостах, розроблені основні уявлення про механізм впливу електричних потенціалів і надлишкових зарядів на тріщиноутворення в плитах БМП і мостових опорах. Спільно із співавторами виконано частину натурних досліджень, розроблено механізм формування природних електричних полів і надлишкових зарядів місцевості навколо мостів і на їх конструкціях, впроваджено результати досліджень. Творчий внесок автора у спільні публікації відображено в переліку опублікованих робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи повідомлені на щорічних наукових конференціях Українського державного університету залізничного транспорту (м. Харків, 2008 – 2015 рр.), 7-й Міжнародній конференції з Дунайських мостів «Theory and practice in bridge engineering» (м. Софія, 14 – 15 жовтня 2010 р.), 3-й, 4-й і 5-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2011, 2013, 2015 рр.), Міжнародній науково-технічній конференції «Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві і на транспорті» (м. Харків, 26 – 28 листопада 2014 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 13 друкованих праць, з яких 9 є науковими статтями у виданнях, визначених МОН для публікації результатів дисертаційних досліджень [1 – 9], 3 – у виданнях, включених до наукометричних баз [7 – 9], 1 – інструктивним документом Укрзалізниці, виданим типографським способом у вигляді брошури [13].

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку літератури з 113 найменувань на 12 сторінках; містить 130 сторінок основного тексту, 105 рисунків, 12 таблиць, 3 додатки; повний обсяг – 217 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету дослідження, викладені завдання досліджень, застосовані стандартні та оригінальні методи досліджень, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, відомості про структуру дисертації, публікації та апробації роботи.

У розділі 1 виконано критичний аналіз літературних даних щодо БМП, інших мостових конструкцій, тріщиноутворення в них та заходів з підвищення тріщиностійкості. БМП улаштовують на металевих прогонових спорудах із збірних залізобетонних плит, які прикріплюють за допомогою високоміцних шпильок до верхньої полиці головних або поздовжніх балок через прокладний шар із дерев'яної дошки і гумової транспортерної стрічки (рис. 1).

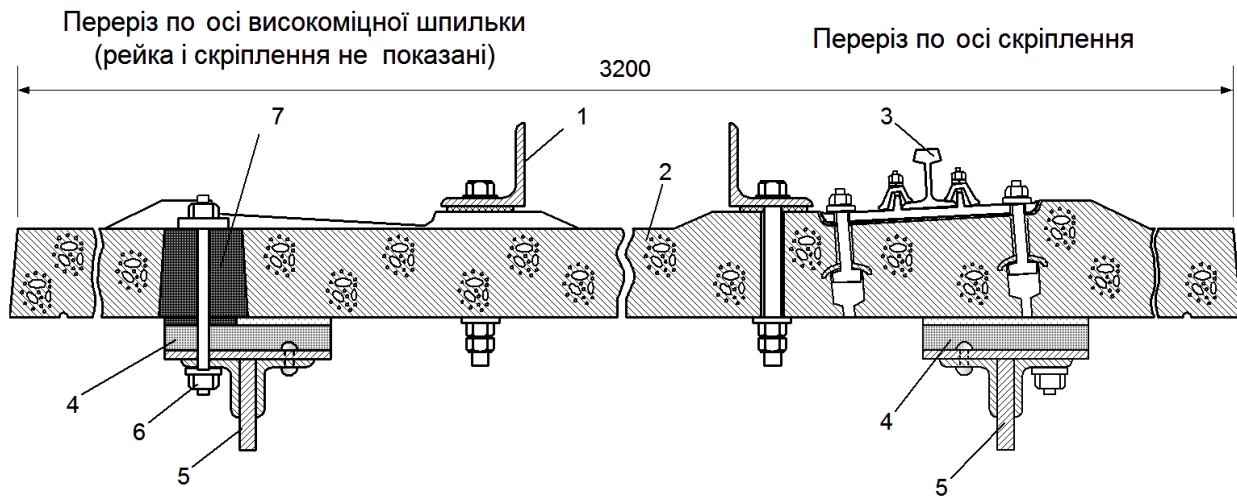


Рис. 1. Поперечні перерізи безбаластного мостового полотна: 1 – контруктник (охоронний пристрій), прикріплений болтами або шурупами з полімерними дюбелями; 2 – плита БМП; 3 – колійна рейка; 4 – прокладний шар; 5 – головна або поздовжня балка; 6 – високоміцна шпилька; 7 – отвір для шпильки

БМП у СРСР вперше були укладені в 1961 р. Перші 10 років експлуатації показали їх високу ефективність і з 80-х рр. було розпочато масову заміну ними дерев'яних брусів. Проте в подальшому у БМП почали утворюватись пошкодження у вигляді поздовжніх тріщин у плитах, викришування і руйнування прокладного шару, ослаблення натягу і обриву високоміцних шпильок. Підвищенню експлуатаційної надійності БМП присвячені роботи А.С. Антіпової, А.В. Беніна, А.Л. Брика, А.А. Довгої, В.В. Кондратова, Ф.Г. Костирка, А.А. Нікітіна, В.Г. Орлової, Е.М. Паніна, А.Ю. Симкіна, С.С. Ткаченко, О.М. Уздіна, Ю.А. Харіної, С.А. Шульмана тощо. Запропоновані технічні рішення дали змогу усунути деякі недоліки БМП. Проте до теперішнього часу тріщиноутворення у плитах БМП залишається невирішеною проблемою. Вважають, що тріщини мають силовий характер і пов'язані з недоліками конструкції плити, неправильними деформативними властивостями прокладного шару або натягом високоміцних шпильок. Але ці фактори враховані ще під час конструювання БМП, а плити успішно витримують заводські випробування. Тріщини утворюються під час експлуатації від додаткових факторів, які не враховані розрахунками і методикою випробувань. Це структура і властивості бетону, обводненість конструкцій, струми витоку з рейкової колії, які протікають через

БМП, прогонові споруди, мостові опори. Тобто існуючі уявлення про тріщиностійкість плит БМП є недосконалими і потребують уточнення.

Найбільш суттєвими є поздовжні до осі мосту тріщини у верхній грані плит у зоні високоміцних шпильок і зовнішніх закладних болтів рейкових скріплень. Відповідно до розрахункової схеми у цих місцях плити значних розтягувальних напружень немає. За високої міцності бетону (С32/40, фактична міцність 51 – 60 МПа) явних причин для утворення цих тріщин як силових не існує. У роботах наукової школи УкрДАЗТ, зокрема О.А. Калініна, В.А. Лютого, доведено, що у багатьох випадках утворення тріщин у конструкціях обумовлюють швидконатікаюча та довготривала повзучість бетону. Але наш критичний аналіз з урахуванням робіт Д.А. Плугіна, Л.В. Трикоз і власні натурні дослідження свідчать про те, що поряд з ними не менший вплив має надлишковий електричний заряд, створюваний струмом витoku з рейкової колії, а також природними електричними полями, зокрема надлишковим негативним зарядом Землі. Вплив надлишкових негативних зарядів на властивості матеріалів мостів підтверджується відомими даними про надмірні коливання Волгоградського мосту, тріщини в опорах Дарницького залізнично-автомобільного мосту тощо.

Виконано критичний аналіз робіт зарубіжних авторів з проблеми тріщиноутворення в плитній частині та опорах мостів і їх запобігання, зокрема, удосконалення складу бетону, догляд за бетоном на ранніх стадіях твердіння. На наш погляд, нових заходів щодо запобігання тріщиноутворення не винайдено, крім ізолювальних матеріалів, які усувають усадкові, але не великі тріщини в плитах. Таким чином, плитне безбаластне мостове полотно у світі так само широко застосовується і в ньому також відмічається тріщиноутворення.

Розділ 2 містить характеристики матеріалів і методів досліджень. Для виготовлення зразків бетону і розчину було застосовано: портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400 ДСТУ Б В.2.7-46, ДСТУ Б В.2.7-112 (виробник – ПАТ «Євроцемент-Україна», м. Балаклія); пісок кварцовий (модуль крупності $M_{кр} = 1,1$) за ДСТУ Б В.2.7-32; щебінь гранітний (найбільша крупність 20 мм); вода питна водопровідна за ДСанПіН 2.2.4-171; добавка-суперпластифікатор нафталінформальдегідного типу Полипласт СП-1 ТУ 5870-002-58042865-03.

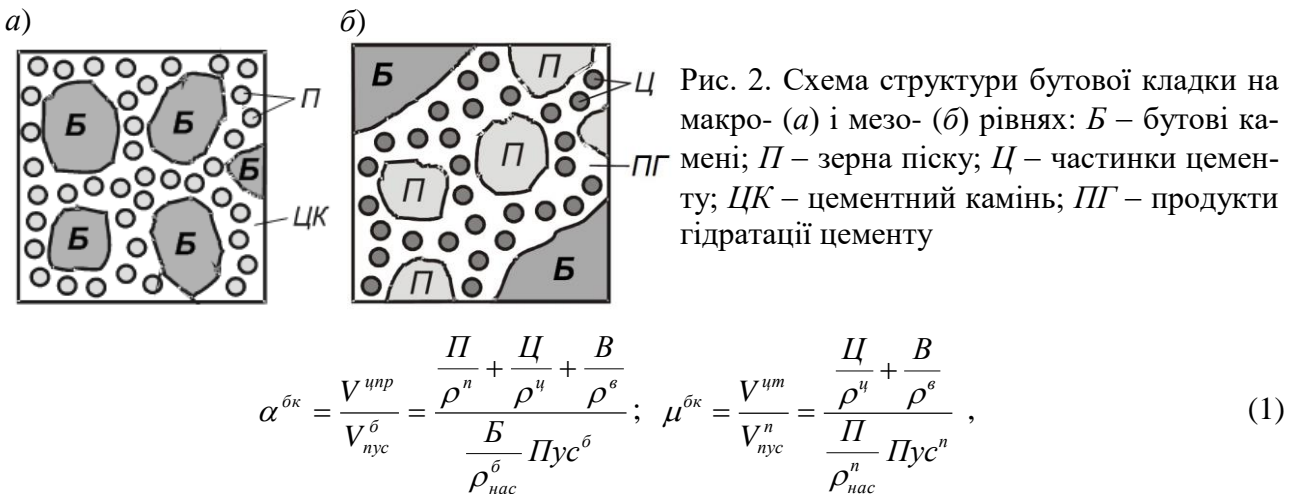
Дослідження впливу механічних навантажень і надлишкових електричних зарядів на тріщиноутворення у плитах БМП та мостових опорах виконано за допомогою методів: натурних обстежень з вимірюваннями електричних потенціалів на рейковій колії і конструкціях; анкетування фахівців; обчислювального експерименту методом скінченних елементів за допомогою програмного комплексу ЛІРА 9.6 (ліцензія № 96065031); натурального експерименту з дослідження напружено-деформованого стану плит БМП. Електричні потенціали на конструкціях визначено за допомогою датчиків – накладного у вигляді полімерної трубки з вкладеною губкою або глибинного у вигляді обгорнутого тканиною сталевого стержня, просочених насиченим розчином мідного купоросу. Експериментально-виробничі дослідження напружено-деформованого стану плит БМП виконано на ДП «Старокостянтинівський завод залізобетонних шпал» за допомогою випробувальної машини з месдозою для контролю величини навантаження, тензометричних датчиків і багатоканальних вимірювальних систем

ИДЦ-1 і MGC+ (НВМ, Німеччина), індикаторів переміщень годинникового типу ИЧ-1.

Для експериментальних досліджень спільного впливу механічного навантаження і надлишкових електричних зарядів на опір (міцність) бетону на згин в умовах, наближених до експлуатаційних, розроблено оригінальну методику, що полягає у визначенні міцності на згин призми із цементного розчину, на які накладено різницю потенціалів між верхньою та нижньою гранями.

Розділ 3 присвячений теоретичному дослідженню тріщиноутворення в плитах БМП і мостових опорах. На БМП впливає постійне навантаження від власної ваги, тимчасове поїзне навантаження, яке передається колісними парами (до 22,5 т на вісь, перспективне – 25 т), вібраційні навантаження від їх коливань. Тривалість проходження поїзда мостом – 1 – 6 хв, інтервал між поїздами – 5 – 15 хв. Особливістю БМП є додаткове статичне навантаження від натягу високоміцних шпильок. У зв'язку з цим слід очікувати найбільших показників повторюваної швидконапіваючої і довготривалої повзучості бетону на деформації в стиснутих зонах, особливо на ділянках між рейкою та високоміцною шпилькою. Найбільший вплив на величину повзучості бетону і бутової кладки мостових опор має активність цементу $R_{ц}$, водоцементне відношення $V/Ц$, вміст цементного тіста. Інші фактори мають другорядне значення, і їх впливом у більшості випадків нехтують. Відповідно до теорії повзучості бетону, розвинутої на кафедрі БМКС УкрДУЗТ, близькість складу бетону плит до оптимального мінімізує повзучість і виключає можливість тріщиноутворення від неї.

Структура бутової кладки мостових опор (рис. 2) може бути охарактеризована коефіцієнтами розсунення буту $\alpha^{\delta_{к}}$ і зерен піску $\mu^{\delta_{к}}$ – відношенням об'єму цементно-піщаного розчину $V^{уп}$ (цементного тіста $V^{цт}$) до об'єму пустот у бутівому камені $V_{нус}^{\delta}$ (піску $V_{нус}^{\delta}$):



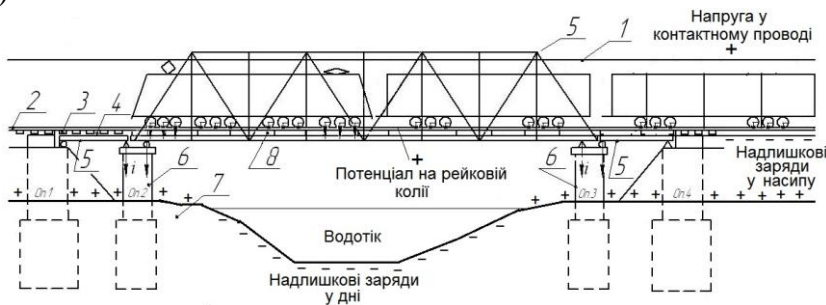
де $Б, П, Ц, В$ – витрата бутового каменю, піску, цементу, води, кг на 1 м^3 бутової кладки, відповідно; $\rho^n, \rho^ц, \rho^в$ – істинна густина піску, цементу, води, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{нас}^{\delta}, \rho_{нас}^n$ – насипна густина бутового каменю і піску, $\text{кг}/\text{м}^3$; $Пус^{\delta}, Пус^n$ – порожнистість бутового каменю та піску.

Аналізуючи склад бутової кладки, який характеризується низькою витратою цементу близько 100 кг на 1 м^3 , отримано $\alpha^{\delta_{к}} = 1,57, \mu^{\delta_{к}} = 0,76 < 1$. Величина $\mu^{\delta_{к}} < 1$ показує, що розчин є пісним, цементне тісто (камінь) не заповнює

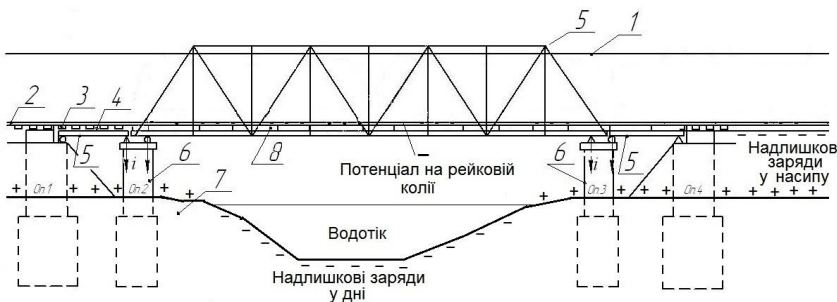
всіх пустот у його структурі. Тому бутова кладка опор має невисокі щільність, водонепроникність, а також деформації повзучості, якими можна знехтувати.

На тріщиноутворення в плитах БМП і мостових опорах впливають надлишкові електричні заряди від струмів витоку та електричних полів антропогенного і природного походження. Струми витоку на електрифікованих постійним струмом ділянках залізниць стікають з рейкової колії через конструкції мосту у вологий ґрунт та/або водотік (рис. 3, а). Протікаючи крізь конструкції із бетону, вони можуть спричиняти виникнення в його капілярах значних електричних потенціалів (надлишкових зарядів) і, відповідно, розтягувальних напружень.

а)



б)



1 – контактний провід; 2 – рейки; 3 – шпали; 4 – баласт; 5 – прогонові споруди; 6 – опори; 7 – ґрунт; 8 – плити БМП

Надлишкові електричні заряди антропогенного походження утворюються за рахунок винесення атмосферними опадами катіонів із ґрунту насипу у водотік і далі по місцевості водотоком (згідно відомій схемі кругообігу води в природі), внаслідок чого верх насипу і дно водотоку набувають негативного надлишкового заряду, а підшва насипу і береги водотоку – позитивного (рис. 3, б). Негативний заряд зверху насипу через рейкову колію передається на конструкції мосту. Можливим також є вплив надлишкових електричних зарядів, які накопичуються на дуже великих територіях внаслідок частих запусків космічними державами ракет-носіїв. Надлишкові електричні заряди природного походження утворюються від природного електричного поля Землі (рис. 3, в). Із ядра (радіус 3500 км, максимальна температура 6000 °С, склад – 85,5% Fe) відбувається термодифузія електронів до підшви земної кори, де їх подальша взаємодія з вільною водою приводить до утворення гідроксильних іонів. Іони OH^- далі дифундують до денної поверхні (радіус Землі 6371 км), накопичуючись і обумовлюючи її негативний надлишковий заряд. Експериментально визначувана напруженість електричного поля біля поверхні Землі в середньому складає

в)

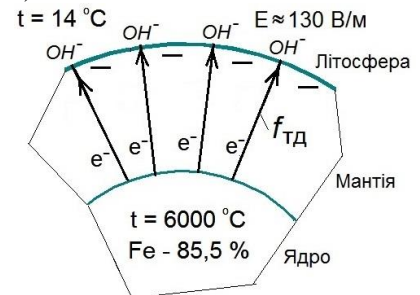


Рис. 3. Виникнення надлишкових електричних зарядів: а, б – у конструкціях мосту від струмів витоку з рейок під час проходження поїздів (а) та внаслідок винесення катіонів із насипу у водотік (б); в – на місцевості (денній поверхні Землі) від природного електричного поля:

близько 130 В/м, проте в різних місцевостях може коливатись від -1000 до $+200$ В/м.

Розвинуто уявлення про механізм утворення тріщин у мостових опорах і плитах БМП під впливом надлишкових електричних зарядів від струмів витоку та електричних полів антропогенного та природного походження. У руслових опорах під час проходження поїздів з тягою постійного струму протилежні заряди – позитивний на рейковій колії і негативний на дні водотоку створюють електричне поле, в якому катіони Ca^{2+} стікають зверху донизу до водотоку, який уносить їх далі (рис. 4, а). В опорі виникає потенціал течії і встановлюється режим стаціонарного потоку катіонів Ca^{2+} , а слідом за ними – гідроксильних іонів OH^- і води. Позитивний надлишковий заряд верхньої частини опори обумовлює стягування частинок гідросилікатного гелю цементного каменю, а за ним – бутової кладки ядра і кам'яного облицювання опори, перешкоджаючи повторюваній швидконатікаючій повзучості та утворенню тріщин від неї. Навпаки, надлишковий негативний заряд нижньої частини опори обумовлює відштовхування частинок гідросилікатного гелю, розтягувальні напруження у цементному камені, бутової кладці та кам'яному облицюванні опори, які сприяють утворенню в ній тріщин. Берегові опори мають позитивний надлишковий заряд у нижній частині та, за відсутності поїздів, негативний у верхній. Відповідно зона виникнення розтягувальних напружень перебуває більший час у верхній частині опори (рис. 4, б).

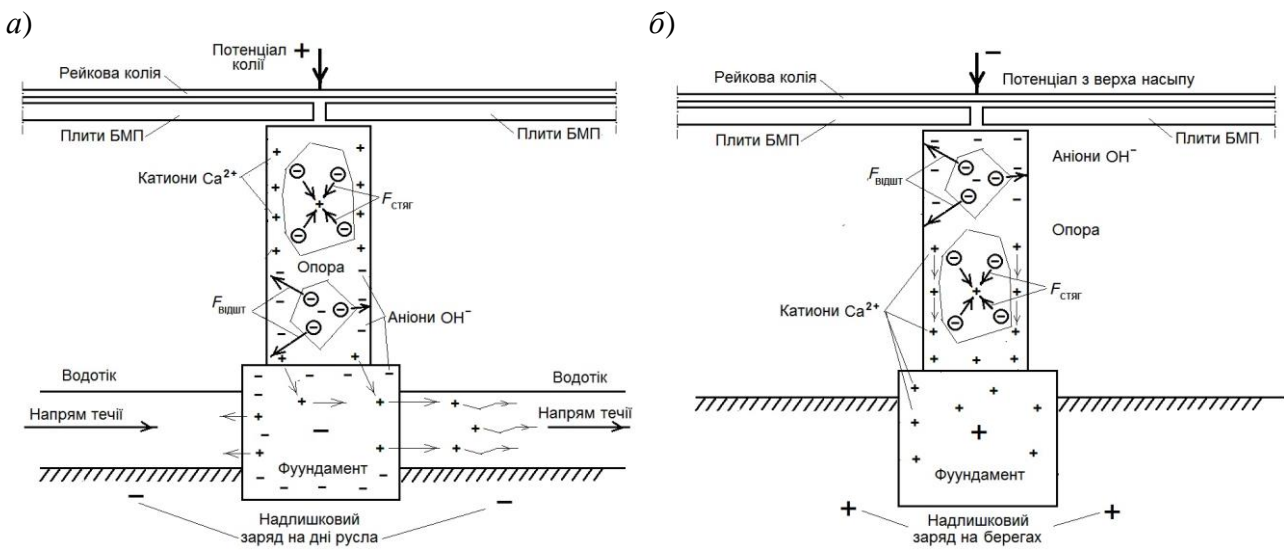


Рис. 4. Схема механізму тріщиноутворення у мостових опорах:

а – руслових під час проходження поїздів; б – берегових за відсутності поїздів

Плити БМП під впливом природного електричного поля поляризуються по вертикалі – у верхній частині виникає надлишковий негативний електричний заряд, а у нижній – позитивний, рівні за абсолютною величиною. У зоні надлишкового негативного заряду відбувається відштовхування частинок гідросилікатного гелю і виникають розтягувальні напруження у бетоні. Під час проходження поїздів у разі значного позитивного потенціалу на рейках негативний надлишковий електричний заряд може обумовити значні розтягувальні напруження і утворення тріщин у нижній грані плити. Напрями тріщин можуть змі-

нюватись залежно від нерівномірності натягу високоміцних шпильок. Надлишкові електричні заряди в зоні біля високоміцних шпильок також сприяють утворенню тріщин у цій зоні. Таким чином, надлишковий негативний заряд, обумовлений позитивним потенціалом рейки і негативним потенціалом землі, призводить до утворення тріщин як у верхній, так і у нижній грані плит БМП, особливо в зоні високоміцних шпильок.

Величини розтягувальних напружень, що виникають внаслідок впливу надлишкових електричних зарядів, дозволила оцінити модель, яка представляє заряджені стінки тріщин обкладками плоского конденсатора (рис. 5). На підставі рівняння плоского конденсатора одержано вираз для тиску, який розклинає стінки тріщини p_e – сухої (діелектрична проникність $\varepsilon = 1,0006$) і обводненої ($\varepsilon = 80$), відповідно:

$$p_e = \frac{1,128 \times 10^{-11} \times U^2 S}{a^4}; \quad p_e = \frac{0,903 \times 10^{-9} \times U^2 S}{a^4}. \quad (2)$$

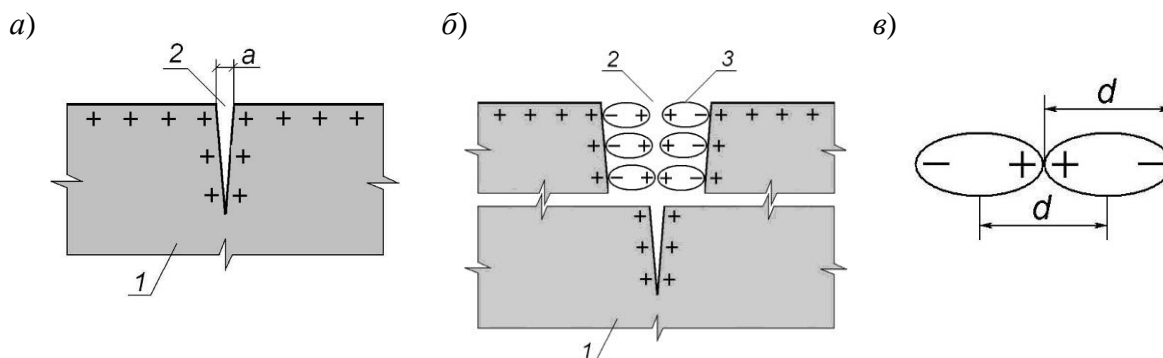


Рис. 5. Схема взаємодії стінок тріщини в плиті БМП у разі наведення на неї електричного потенціалу (надлишкового заряду): *a* – в сухій тріщині; *б* – в обводненій тріщині; *в* – схема диполь-дипольної взаємодії між молекулами води; 1 – плита БМП; 2 – тріщина; 3 – молекули води

Прийнявши площу обкладки конденсатора S рівною площі поверхні наскрізної поздовжньої тріщини в плиті довжиною 1,99 м і товщиною 0,175 м ($S = 0,35 \text{ м}^2$), одержано за формулами (2) відповідні залежності тиску від електростатичного відштовхування p_e , що розклинає стінки тріщини, від ширини розкриття тріщини a . Аналіз графіків цих залежностей показав, що в сухих умовах за потенціалів 10 – 100 В тиск p_e менший за значення міцності бетону на розтяг. Отже, в сухих умовах (рис. 5, *a*) надлишкові електричні заряди на розвиток тріщин у плитах БМП не впливають. В обводнених умовах за потенціалів 10 – 100 В і ширини розкриття тріщин до $0,3 \div 1$ мкм тиск p_e досягає значень, порівнянних з міцністю бетону на розтяг 4 – 5 МПа.

Крім того, надлишковий електричний заряд на поверхні обводнених тріщин спричиняє відповідну орієнтацію молекул води і диполь-дипольну відштовхувальну взаємодію між протилежно спрямованими диполями, яка робить свій внесок у відштовхування стінок тріщин (рис. 5, *в*). Диполь-дипольна взаємодія між протилежно орієнтованими шарами води дорівнює:

$$F_o = \frac{150\mu^2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 d^4}. \quad (3)$$

Виконаний розрахунок сил за виразом (3), а також за рівнянням іон-іонної взаємодії $Ca^{2+}-OH^-$ в одиничному контактi показав, що в умовах впливу надлишкових електричних зарядів обводнення призводить до розриву зв'язків між кристалогідратами портландиту і частинками гідросилікатного гелю.

Бетон плит БМП на відміну від бутової кладки опор з пісним розчином (низькими вмістом цементу і коефіцієнтом розсунення зерен піску $\mu^p < 1$) виготовляють з високими вмістом цементу (понад 400 кг/м³) і коефіцієнтом розсунення зерен піску (1,9 – 2,7). В такому бетоні деформації гідросилікатного гелю від розтягувальних напружень, створюваних надлишковими електричними зарядами від струмів витоку і природних електричних полів, через розсунення блоків кристалогідратів, частинок цементу і зерен піску повністю передаються бетону.

Розділ 4 містить результати натурних та експериментальних досліджень тріщиноутворення в плитах БМП і бетоні. Проведено натурні обстеження експлуатованого БМП на 42 мостах 7 залізниць України та Білорусі. Аналіз результатів цих досліджень надав можливість класифікувати виявлені пошкодження за зовнішніми ознаками, місцем розташування, факторами утворення, впливом на довговічність і безпеку руху поїздів на 14 видів, 13 з яких – тріщини. Тріщини відмічаються як у верхній, так і у нижній грані плит, у зв'язку з чим до номерів пошкоджень додатково присвоєно індекси «в» і «н».

Для виявлення впливу навантаження на тріщиноутворення у плитах БМП проведено обчислювальний експеримент за допомогою методу скінченних елементів. Для розрахунку прийнято більш несприятливий варіант відстані між подовжніми балками 2000 мм, а також значно підвищене навантаження. Встановлено, що у зонах плит, де відзначається більшість видів тріщин, розтягувальні напруження у бетоні практично відсутні. Лише у локальних зонах поблизу високоміцних шпильок вони досягають 13,8 МПа і можуть обумовити утворення зародків тріщин №1 (за розробленою класифікацією). Зроблено висновок, що напруження від поїзного навантаження і натягу високоміцних шпильок не може самостійно спричинити утворення у плитах силових тріщин більшості видів. Лише у локальних зонах поблизу високоміцних шпильок розтягувальні напруження досягають показників опору бетону.

На 18 обстежених мостах було проведено вимірювання електричних потенціалів на плитах БМП та інших конструкціях. Уявлення про величини потенціалів дають результати вимірювань на мосту через р. Сів. Донець на 284 км дільниці Основа – Букине Південної залізниці, електрифікованої постійним струмом (3 кВ). Міст металевий, БМП укладено у 1990 р. Виявлені пошкодження №№ 1 і 7в, явних причин їх утворення не спостерігається. Максимальні величини виміряних потенціалів: рейка – земля $U_{p-з} = +80$ В; рейка – плита БМП $U_{p-п} = +20$ В; рейка – прогонова споруда $U_{p-с} = +25$ В; плита БМП – прогонова споруда $U_{п-с} = +5$ В; прогонова споруда – земля $U_{с-з} = +55$ В. Як бачимо, на рейці і плиті БМП спостерігаються високі потенціали відносно землі $U_{p-з} = +80$ В і $U_{п-з} = +60$ В. Графіки зміни потенціалу у часі мають характерний вигляд (рис. 6), обумовлений рухом поїздів з електричною тягою. На деяких

мостах за відсутності поїздів на конструкціях відмічено негативні величини потенціалу (рис. 6).

Аналіз результатів натурних досліджень не дав можливості виявити системної залежності тріщиноутворення в плитах БМП від виду тягового струму – постійного або перемінного, максимальних величин потенціалів на плитах. Зазначено, що тріщини утворюються або на верхній, або на нижній гранях, у т. ч. краями плити. Це обумовлено накопиченням у плитах надлишкових негативних зарядів природного походження (рис. 3, б). Під час атмосферних опадів верхня грань плит під впливом цих зарядів розширюється за рахунок потовщення подвійних електричних шарів (ПЕШ), плита вигинається і в її верхній грані утворюються тріщини (№№ 2в, 6в, 7в). У разі підвищення температури та зниження вологості повітря верхня грань плити звужується, плита прогинається, тріщини утворюються у її нижній грані (№№ 2н, 6н, 7н). Надлишковий негативний заряд спричиняє відштовхування між частинками гідросилікатного гелю у поверхневих шарах плити, яке передається на її краї під впливом латерального відштовхування між зарядами та призводить до виникнення розтягувальних напружень і утворення тріщин саме у цих місцях (№№ 3в, 3н, 5в, 5н). Існування надлишкового негативного заряду на плитах БМП підтверджується графіками зміни потенціалів, на яких за відсутності поїзда значення потенціалу стає негативним (рис. 6). Отже, у плитах БМП у багатьох випадках тріщини утворюються від надлишкових електричних зарядів, не пов'язаних зі струмами витоку.

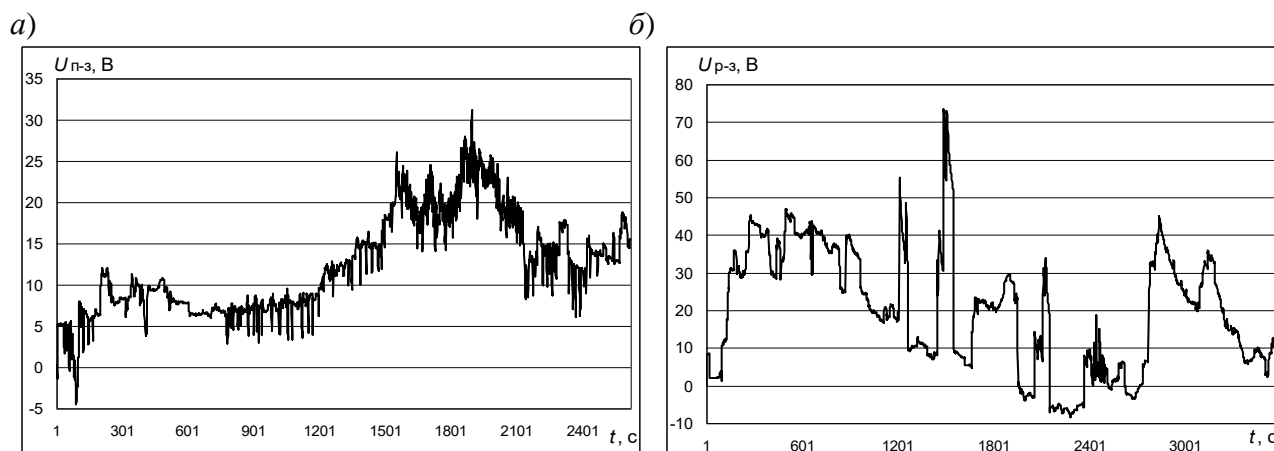


Рис. 6. Зміна у часі t постійного потенціалу: *а* – плита БМП – земля $U_{п-з}$, міст через р. Дніпро на дільниці П'ятихатки – Чаплине Придніпровської залізниці; *б* – рейка – земля $U_{р-з}$, міст через затоку Сиваш (1344 км) Придніпровської залізниці

Виконано лабораторні дослідження спільного впливу механічного навантаження і надлишкових електричних зарядів, еквівалентним виміряним потенціалам і надлишковим зарядам від струмів витоку та електричних полів. Для цього виготовлено серії із 36 однакових зразків-призм розміром $160 \times 40 \times 40$ мм із цементно-піщаного розчину. Досліджено склади: розчину бутової кладки мостових опор міцністю на стиск близько 10 МПа; розчинної частини бетону оптимального складу плит БМП, близького до заводських складів. Зразки випробувано у водонасиченому стані: дослідні – під впливом надлишкового заряду від накладеної між верхньою та нижньою гранями різниці потенціалів 40 В (рис. 7), контрольні – без такого впливу. Для забезпечення поляризації зразка

його починали навантажувати через 2 хвилини після вмикання напруги. Результати дослідження наведені у табл. 1.

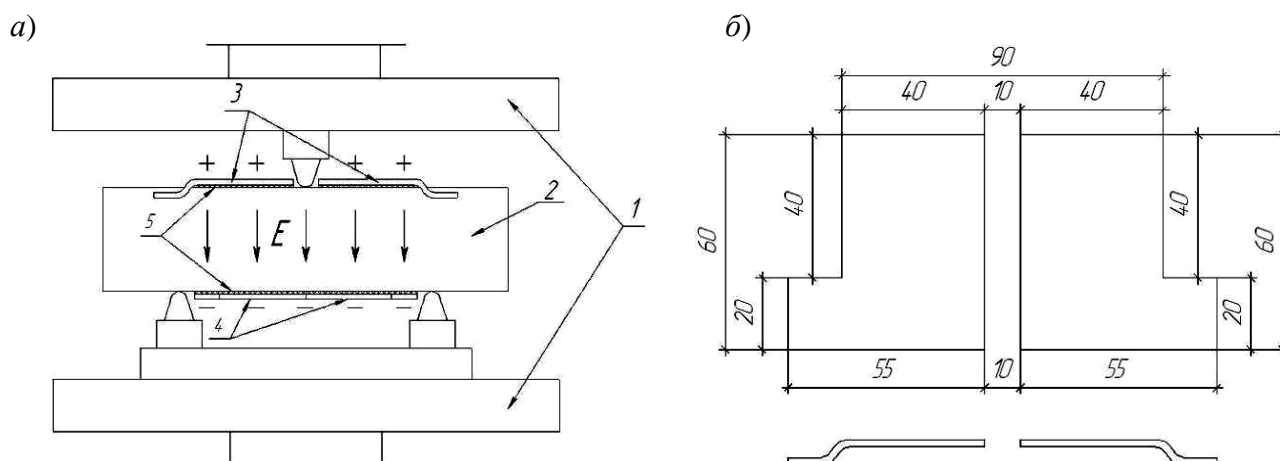


Рис. 7. Дослідження впливу електричного потенціалу (надлишкового заряду) на міцність цементно-піщаного розчину: *a* – схема випробування; *б* – верхній електрод: 1 – плити пресу; 2 – зразок-призма; 3 – верхній електрод (+); 4 – нижній електрод (-); 5 – бавовняна тканина, просочена насиченим розчином мідного купоросу. Електроди виготовлено із сталі Ст3 листової товщиною 2 мм

Таблиця 1

Результати дослідження впливу електричного потенціалу (надлишкового заряду) на міцність розчину бутової кладки (міцність до 10 МПа, серії №№ 1 і 2) і розчинної складової бетону оптимального складу плит БМП (міцність близько 30 МПа, серія № 3)

№ серії (склад)	Показник	Од. вим.	Величина за різниці потенціалів		Зміна величини в результаті впливу поля, %
			0 В	40 В	
1 (10 МПа)	Міцність на згин R_f	МПа	1,76	2,18	+23,9
	Міцність на стиск R_c	«	8,58	9,64	+12,4
	Коефіцієнт варіації міцності на згин ν	%	19,91	11,92	
2 (10 МПа)	Міцність на згин R_f	МПа	1,3	1,46	+12,3
	Міцність на стиск R_c	«	6,03	5,9	-2,2
	Коефіцієнт варіації міцності на згин ν	%	12,13	9,53	
3 (Оптим.)	Міцність на згин R_f	МПа	5,48	4,82	-13,7
	Міцність на стиск R_c	«	31,44	33,29	+5,9
	Коефіцієнт варіації міцності на згин ν	%	16,25	15,5	

Аналіз цих результатів підтвердив, що надлишковий негативний заряд у нижній грані зразка, створений накладеною напругою, для розчину бутової кладки не знижує, а навіть підвищує міцність на згин на 24 %, а для розчинної складової бетону оптимального складу плит БМП знижує міцність на згин на 14 %. Деяке збільшення міцності розчину бутової кладки може бути пояснене перетіканням в розтягнуту зону катіонів кальцію Ca^{2+} . У розчинній складовій бетону оптимального складу низьке водоцементне відношення В/Ц = 0,32 обумовлює незначну товщину ПЕШ, що стримує переміщення протіонів Ca^{2+} і призводить до поляризації гелевих частинок з виникненням величезних (гігантських) односпрямованих паралельних диполів. Відштовхування між ними при-

зводить до виникнення додаткових розтягувальних напружень і зниження міцності на згин. Такий неоднаковий вплив обумовлений переміщенням катіонів Ca^{2+} у розчині меншої міцності та більшим В/Ц у нижню зону під впливом напруження в нижню зону, що призвело до зміцнення гелевої складової цементного каменю і збільшило міцність на розтяг у ній.

Виконані дослідження передбачали одноразове навантаження зразка до його руйнування. В умовах експлуатації бетон конструкцій навантажується багаторазово від проходження поїздів. У бетоні та розчині бутової кладки мостової опори за цих умов відбуватиметься циклічне перетікання катіонів Ca^{2+} з верхньої зони опори у нижню, надводну, і у воду водотоку, що призведе до інтенсивного руйнування опори на рівні води і нижче. У бетоні плити БМП з кожним проходженням поїзда буде відбуватись поступове накопичення надлишкового негативного заряду у верхній зоні плити, гель буде набухати і всмоктувати у себе воду. Від періодичного зволоження й висихання в плиті утворюються тріщини, що відповідає дійсності.

Виконано експериментально-виробничі дослідження напружено-деформованого стану плит БМП на Староконстянтинівському ЗЗБШ за спеціально розробленою методикою. Плити піддавали максимальному навантаженню 38 т на вісь. Результати досліджень наведені у табл. 2, за якою закономірностей зміни напружень у плиті від кількості навантажень не було виявлено. Тріщин у плитах БМП під час випробувань не виявлено. Підтверджено, що, незважаючи на великі розтягувальні напруження, у зоні високоміцних шпильок тріщини не утворювались.

Таблиця 2

Результати виробничих експериментальних досліджень плит БМП

Цикл навантаження	Ширина прокладного шару, мм	Натяг високоміцних шпильок, кН	Навантаження, т	Показання індикатору		Прогин на грані плити, мм		
				1	2	1	2	Сер.
1	100	120	0	400	300	0	0	0
			38	300	200	-1,00	-1,00	-1,00
			0	370	278	-0,30	-0,22	-0,26
2	100	120	0	383	281	-0,17	-0,19	-0,18
			34	314	210	-0,86	-0,90	-0,88
			0	378	279	-0,22	-0,21	-0,22
3	100	120	0	382	284	-0,18	-0,16	-0,17
			38	305	203	-0,95	-0,97	-0,96
			0	381	277	-0,19	-0,23	-0,21
4	200	120	0	378	274	-0,22	-0,26	-0,24
			38	308	197	-0,92	-1,03	-0,98
			0	379	269	-0,21	-0,31	-0,26
5	200	0	0	377	269	-0,23	-0,31	-0,27
			38	304	192	-0,96	-1,08	-1,02
			0	376	267	-0,24	-0,33	-0,29

Розділ 5 присвячений розробленню, експлуатаційним випробуванням та впровадженню способів і технологій підвищення тріщиностійкості плит БМП і мостових опор. Вперше розроблено класифікацію пошкоджень плит БМП з їх

розподілом на категорії за впливом на довговічність, несучу здатність і безпеку руху поїздів та заходами з їх усунення, серед яких вимоги до складу бетону, конструкції та матеріалу прокладного шару, натягу високоміцних шпильок тощо.

Вченими кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд УкрДУЗТ розроблено ряд нових матеріалів, способів і конструктивно-технологічних рішень, у тому числі за участю автора дисертації, для захисту від електрокорозії бетону, залізобетону і кам'яної кладки від струмів витоку з рейкової колії. Зазначені рішення виконують також функції захисту від руйнівного впливу надлишкових негативних зарядів природного походження на тріщиноутворення в плитах БМП і мостових опорах з бутовою кладкою і кам'яним облицюванням. У дисертації виконано детальне експлуатаційне дослідження результатів впливу надлишкових електричних зарядів на плити БМП і мостові опори металевого мосту на 377 км ділянки Основа – Букине Південної залізниці після здійснення заходів із захисту від їх руйнівного впливу. Захист було виконано за допомогою комплексу способів і конструктивно-технологічних рішень: ін'єктування в кладку суперпластифікованої цементно-водної суспензії СПЦВС, армокам'яних швів і поясів, попередньо напружених залізобетонних мініпоясів, сталобетонного поясу-обойми (рис. 8, *а*), нанесення полімеркомпозиційного захисного складу ЗС-3 на шви кладки та підфермові площадки. Виконано також детальне експлуатаційне дослідження результатів впливу надлишкових електричних зарядів на плити БМП металевого мосту через р. Лопань на 3 км ділянці Основа – Харків-Пас. (ст. Новожанове) Південної залізниці після здійснення заходів щодо їх захисту. Захист було виконано за допомогою полімеркомпозиційного прокладного шару під плитами (рис. 8, *б*) і герметизації стиків між ними. Виконані експлуатаційні дослідження показали надійний захист плит БМП і опор від тріщиноутворення за допомогою вказаних заходів протягом 11 – 12 років.

а)



б)



Рис. 8. Сталобетонний пояс мостової опори (*а*) і полімеркомпозиційний прокладний шар БМП (*б*) як заходи із захисту від впливу надлишкових електричних зарядів після 11 – 12 років експлуатації

Результати досліджень впроваджені:

1) у розробленні проектів і проведенні робіт з капітального ремонту водопропускних труб на 111 км ділянці Харків–Куп'янськ, 365 км ділянці Осно-

ва–Букине, 19 км дільниці Харків–Люботин, шляхопроводу на 802 км дільниці Гребінка–Черкаси, опор мосту на 365 км дільниці Основа–Букине Південної залізниці;

2) у галузевих інструктивних і рекомендаційних документах:

– ЦП 0224 [13];

– Рекомендації із захисту від корозії елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях / УкрДАЗТ; А.А. Пługін, А.М. Пługін, С.В. Мірошніченко, О.А. Забіяка та ін. – Харків, 2010. – Затв. ЦП Укрзалізниці 20.12.2010. – 32 с.;

– Рекомендації із захисту від електрокорозії конструкцій шляхопроводів, на яких закріплена контактна мережа / УкрДАЗТ; А.А. Пługін, А.М. Пługін, С.В. Мірошніченко, О.А. Забіяка та ін. – Харків, 2011. – Затв. ЦП Укрзалізниці 18.12.2011. – 29 с.;

– Рекомендації з усунення тріщин у стінах будівель станційних комплексів / УкрДАЗТ; А.А. Пługін, А.М. Пługін, О.А. Калінін, О.А. Забіяка та ін. – Харків, 2012. – Затв. ЦБМЕС Укрзалізниці 03.12.2012. – 70 с.;

– Рекомендації з улаштування полімеркомпозиційного прокладного шару під збірним та збірно-монолітним безбаластним мостовим полотном / УкрДАЗТ; А.А. Пługін, А.М. Пługін, О.А. Калінін, О.А. Забіяка та ін. – Харків, 2013. – Затв. ЦП Укрзалізниці 10.12.2013. – 15 с.;

3) у навчальному процесі УкрДУЗТ, зокрема лекційних курсах і дипломному проектуванні спеціалістів і магістрів будівельних спеціальностей.

У результаті впровадження результатів досліджень було досягнуто економічний ефект, часткова участь автора в якому складає 1102 тис. грн. Основний ефект від впровадження розроблених конструктивно-технологічних рішень захисту плит БМП і мостових опор полягає у збільшенні міжремонтних термінів, а також підвищенні безпеки руху поїздів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що після впровадження на металевих залізничних мостах безбаластного мостового полотна та його успішної експлуатації протягом декількох десятиліть у залізобетонних плитах БМП почали відзначати тріщини, очевидних причин утворення більшості з яких виявлено не було. Тріщини мають масовий характер і є значною проблемою безпечної експлуатації БМП.

2. Критичний аналіз літературних даних, інструктивних документів показав, що тріщини в плитах БМП вважають силовими або усадковими, обумовленими недоліками конструкції плити, деформативними властивостями прокладного шару, неправильним натягом високоміцних шпильок, повзучістю бетону тощо. Проте такі фактори, як особливості структури бетону, обводненість, електричні явища – струми витоку, електричні поля та заряди, фахівцями-мостовиками не враховуються. Отже, наявна експериментально-теоретична база забезпечення тріщиностійкості плит БМП є недостатньо проробленою.

3. Розвинуто теоретичні уявлення щодо тріщиноутворення у плитах БМП і мостових опорах:

– уточнено функціонування металевих залізничних мосту із залізобетонним мостовим полотном і кам'яними або бетонними опорами як єдиного електрич-

ного ланцюга, яким розповсюджуються електричні потенціали та заряди;

- поглиблено уявлення про формування електричних полів і надлишкових зарядів місцевості антропогенного та природного походження навколо мостів через водотоки та на їх конструкціях, зокрема, від вимивання катіонів із ґрунту насипу та берегів і їх винесення водотоком, від природного електричного поля Землі та розподілу в ньому зарядів; розроблено схеми утворення надлишкових зарядів на конструкціях мосту за відсутності або проходження рухомого складу з електричною тягою постійного струму;
- розкрито механізм повзучості бетону та її впливу на тріщиноутворення в плитах БМП, показано, що повзучість є максимальною в зоні високоміцних шпильок, проте не є фактором, здатним самотійно спричинити утворення тріщин;
- розроблено уявлення, відповідні схеми та рівняння, виконано розрахунки щодо впливу структури розчину та бутової кладки опор на тріщиноутворення в них; показано, що у пісному розчині кладки всі види повзучості не проявляються;
- показано, що наявність електричного потенціалу не впливає на розвиток тріщин у сухому бетоні, а у водонасиченому бетоні потенціал понад 10 В обумовлює відштовхування частинок гідросилікатного гелю, розтягувальні напруження в цементному камені, а також тиск від електростатичного відштовхування між стінками мікротріщин через диполь-дипольні взаємодії між орієнтованими потенціалом шарами молекул води у плівках вологи на них, який досягає величин, порівнянних з міцністю бетону на розтяг.

4. Розроблено оригінальні методики та виконано комплексні експериментальні лабораторні, натурні та експлуатаційні дослідження:

- визначено і класифіковано всі види пошкоджень плит БМП; встановлено, що із 11 видів пошкоджень 13 є тріщинами;
- обчислювальним експериментом встановлено напружено-деформований стан плит БМП, показано, що напруження від поїзного навантаження і натягу високоміцних шпильок не може самотійно спричинити утворення силових тріщин у плитах крім локальних зон поблизу шпильок;
- проведено натурні експериментальні дослідження з визначення напружень і деформацій в навантажених за несприятливими схемами плитах БМП; розтягувальних напружень, порівнянних з показниками опору бетону розтягу, і тріщин, у т.ч. у зонах поблизу високоміцних шпильок, в плитах не виявлено;
- визначено величини електричних потенціалів на плитах БМП та інших конструкціях – потенціал плита БМП – земля під час проходження поїздів з електричною тягою постійного струму досягає +60 В, а за відсутності поїздів може змінюватись до негативних величин;
- встановлено, що наявність електричного потенціалу величиною 40 В і відповідних надлишкових електричних зарядів не знижує міцності бетону (і розчину) класу до С8/10 і навіть може обумовити її деяке підвищення та спричиняє зниження міцності на розтяг водонасиченого бетону більш високих класів, зокрема С25/30 – на 10 – 15 %.

6. Розроблено та впроваджено практичні рекомендації із запобігання тріщиноутворення у плитах БМП, опорах залізничних мостів, інших конструкцій штучних споруд залізниць:

- вперше розроблено класифікацію пошкоджень плит БМП з їх розподілом на категорії за впливом на довговічність, несучу здатність і безпеку руху поїздів та заходами з їх запобігання та усунення;
- розроблено заходи із запобігання тріщиноутворення у плитах БМП та опорах залізничних мостів і підвищення їх тріщиностійкості в умовах впливу механічних навантажень та електричних потенціалів і надлишкових зарядів;
- заходи із запобігання тріщиноутворення у конструкціях штучних споруд залізниць впроваджено у проектах і проведенні робіт з їх капітального ремонту;
- розроблено і впроваджено інструктивні документи Укрзалізниці, у т. ч. Рекомендації із забезпечення тріщиностійкості плит БМП (ЦП-0224).

7. Економічний ефект від впровадження результатів досліджень склав 1102 тис. грн. Результати досліджень використано в УкрДУЗТ для підготовки спеціалістів і магістрів спеціальностей «Залізничні споруди і колійне господарство» і «Промислове та цивільне будівництво».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових виданнях України:

1. Плугин Ал.А. Исследование влияния электрического поля на прочность цементного камня / Ал.А. Плугин, А.А. Забияка, В.В. Перестюк, С.Г. Нестеренко, А.А. Плугин // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків, 2012. – Вип.130. – С. 56 – 63. *Особистий внесок:* проведено лабораторні дослідження і виконано аналіз їх результатів.
2. Загора О.Л. Експериментально-теоретичні дослідження прогінної будови в процесі заміни мостового полотна / О.Л. Загора, С.В. Ключник, М.І. Величко, Г.О. Линник, М.П. Дитиненко, Д.І. Івашкевич, О.А. Забіяка // Мости та тунелі: Теорія, дослідження, практика: Зб. наук. праць ДНУЗТ. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 2. – С. 9 – 12. *Особистий внесок:* виконано тензометричні дослідження розподілу напружень у прогоновій споруді та БМП і аналіз їх результатів.
3. Шуба Т. Досвід застосування нових конструкцій безбаластного залізничного полотна у Польщі та оцінка перспектив їх застосування в Україні / Т. Шуба, В. Чистяк, В. Перестюк, О. Єлякіна, О.А. Забіяка, А.А. Плугін // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків, 2011. – Вип. 122. – С. 201 – 221. *Особистий внесок:* виконано аналіз переваг нових конструкцій БМП, їх застосовності на експлуатованих в Україні мостах.
4. Плугін А.А. Аналіз впливу потенціалів від струмів витоку на утворення тріщин в плитах безбаластного мостового полотна на електрифікованих ділянках залізниць / А.А. Плугін, О.А. Забіяка, Г.О. Линник // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків, 2010. – Вип. 115. – С. 75 – 82. *Особистий внесок:* виконано розрахунки впливу електричного потенціалу на сили відштовхування між стінками тріщин.
5. Плугін А.А. Систематизація пошкоджень залізобетонних плит безбаластного полотна залізничних мостів / А.А. Плугін, О.А. Забіяка, С.В. Мірошніченко, Г.О. Линник, А.І. Бабенко // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків, 2009. – Вип. 109. – С. 120 – 131. *Особистий внесок:* виконано натурні об-

стеження мостів і аналіз експлуатаційної документації, розроблено класифікацію пошкоджень.

6. Плугин А.А. Бетоны и растворы для восстановления эксплуатационных свойств транспортных сооружений / А.А. Плугин, А.Н. Плугин, О.А. Калинин, А.В. Романенко, А.А. Забияка // Будівельні конструкції: Міжвідомчий наук.-техн. збірник наук. праць. – К.: ДП НДІБК, 2009. – Вип. 72. – С. 357 – 370. *Особистий внесок*: розроблено вимоги до бетонів і розчинів, призначених для ремонту інженерних споруд залізниць у сучасних умовах.

Міжнародні публікації чи в збірниках, що входять до міжнародних науково-метричних баз

7. Забіяка О.А. Підвищення довговічності безбаластного мостового полотна на залізобетонних плитах: Вплив надлишкових електричних зарядів і механічних напружень на тріщиноутворення // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків, 2015. – Вип. 155. – С. 98 – 103.

8. Плугін А.А. Аналіз напружено-деформованого стану плит безбаластного мостового полотна і прокладного шару під ними / А.А. Плугін, С.В. Мірошніченко, О.В. Лобяк, О.А. Забіяка, Г.О. Линник, Т. Шуба // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків, 2014. – Вип. 148. – Ч.2. – С. 104 – 110. *Особистий внесок*: визначено навантаження і впливи, виконано аналіз розподілу напружень у бетоні плити, визначено місця, де утворення тріщин є можливим.

9. Плугин А.Н. Внутренние напряжения в бетоне, обусловленные электрическими воздействиями на него: экспериментальные исследования / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Ал.А. Плугин, А.А. Конев, А.А. Забияка // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків, 2013. – Вип. 138. – С. 102 – 118. *Особистий внесок*: участь у тривалих лабораторних дослідженнях, аналіз їх результатів щодо умов експлуатації плит БМП.

Публікації апробаційного характеру:

10. Забіяка О.А. Підвищення довговічності безбаластного мостового полотна на залізобетонних плитах / О.А. Забіяка // 5-та Міжнародна науково-технічна конференція з будівельних матеріалів, виробів та споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті»: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – С. 25. *Особистий внесок*: визначено заходи і способи ремонту плит БМП, які найбільш відповідають умовам експлуатації і наявним пошкодженням.

11. Плугін А.А. Аналіз напружено-деформованого стану плит безбаластного мостового полотна і прокладного шару під ними / А.А. Плугін, С.В. Мірошніченко, О.В. Лобяк, О.А. Забіяка, Г.О. Линник, Т. Шуба // Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві і на транспорті: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – С. 58 – 59. *Особистий внесок*: визначено навантаження і впливи, виконано аналіз розподілу напружень у плиті і визначено місця, де утворення тріщин є можливим.

12. Plugin A. Increase of crack-stability of plates of without-ballast bridge bed of railway bridges / A. Plugin, S. Miroshnichenko, A. Zabyaka, G. Linnik // Bridges in the Danube basin. «Theory and practice in bridge engineering»: Proceedings of the

7th International Conference on Bridges across the Danube 2010. – Sofia, Bulgaria, 2010. – P. 307 – 310. *Особистий внесок*: визначено вплив тріщин на довговічність плит БМП, заходи і способи ремонту, які найбільш відповідають наявним пошкодженням.

Додаткові публікації:

13. Плугін А.А. Рекомендації із забезпечення тріщиностійкості плит безбаластного мостового полотна ЦП 0224 / А.А. Плугін, А.М. Плугін, С.В. Мірошніченко, О.А. Калінін, Д.А. Плугін, В.А. Лютий, Г.О. Линник, О.В. Романенко, О.А. Забіяка, І.Г. Корнієнко, О.С. Борзьяк. – К.: Укрзалізниця, 2010. – 42 с. *Особистий внесок*: розроблено класифікацію пошкоджень плит БМП, визначено заходи і способи ремонту і захисту, які найбільш відповідають наявним пошкодженням.

АНОТАЦІЇ

Забіяка О.А. Механізм тріщиноутворення у плитах безбаластного полотна та опорах залізничних мостів і підвищення їх тріщиностійкості. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироби. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2015.

Дисертація присвячена підвищенню тріщиностійкості плит безбаластного полотна та опор металевих залізничних мостів, експлуатованих на електрифікованих постійним струмом ділянках залізниць. Висунуто гіпотезу про підвищення тріщиностійкості плит БМП і мостових опор за рахунок захисту від струмів витоку та електричних полів і нейтралізації надлишкових зарядів. Розвинуто теоретичні уявлення про структуру та деформативність бетону плит БМП і бутової кладки мостових опор, виникнення надлишкових електричних зарядів на конструкціях мостів. Проведено натурні та експлуатаційні дослідження з виявлення факторів тріщиноутворення у плитах БМП та мостових опорах, розроблено класифікацію тріщин та інших пошкоджень. Проведено експериментальні дослідження впливу механічних навантажень, електричних потенціалів і зарядів на міцність бетону і тріщиноутворення в бетоні та плитах БМП. Вперше встановлено вплив надлишкового електричного заряду та потенціалу на міцність бетону і утворення тріщин у конструкціях із нього. Розроблено рекомендації з підвищення тріщиностійкості, які впроваджено на заводі-виробнику плит, а також у проектуванні та проведенні робіт з капітального ремонту штучних споруд залізниць.

Ключові слова: бетон, залізобетонна плита, безбаластне мостове полотно, струми витоку, надлишковий електричний заряд, тріщиностійкість.

Забіяка А.А. Механізм тріщинообразовання в плитах безбалластного полотна и опорах железнодорожных мостов и повышение их трещиностойкости. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – Украинский

государственный университет железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2015.

Диссертация посвящена актуальной теме повышения трещиностойкости плит безбалластного мостового полотна (БМП) и опор металлических железнодорожных мостов, эксплуатируемых на электрифицированных постоянным током участках железных дорог. Выполнен критический анализ литературных данных о трещинообразовании в бетоне и конструкциях из него, об электрических потенциалах и избыточных зарядах, обусловленных токами утечки и электрическими полями. Выдвинута гипотеза о способствовании трещинообразованию в бетоне, железобетоне, бутовой и каменной кладке плит БМП и опор эксплуатируемых металлических железнодорожных мостов избыточных электрических зарядов, обусловленных токами утечки с рельсовых путей и электрическими полями антропогенного и природного происхождения, а также повышении трещиностойкости плит БМП и мостовых опор за счет защиты от токов утечки и электрических полей и нейтрализации избыточных зарядов. Развита теоретические представления о структуре и деформативности бетона плит БМП и бутовой кладки мостовых опор, возникновении избыточных электрических зарядов на конструкциях мостов от токов утечки и электрических полей местности антропогенного (от вымывания катионов из грунта насыпи атмосферными осадками и их выноса водотоком и т.п.) и природного происхождения (от электрического поля Земли и распределения в нем зарядов), их влиянии на трещинообразование. Уточнено функционирование металлического железнодорожного моста с железобетонным мостовым полотном и каменными или бетонными опорами как единой электрической цепи, по которой распространяются электрические потенциалы и заряды. Проведены натурные и эксплуатационные исследования по выявлению факторов, определяющих трещинообразование в плитах БМП и мостовых опорах, впервые разработана классификация трещин и других повреждений в плитах БМП. Разработаны оригинальные методики и проведены экспериментальные исследования влияния механических нагрузок, электрических потенциалов и зарядов на прочность бетона и трещинообразование в плитах БМП. В результате вычислительного эксперимента над конечно-элементной моделью, а также натурных испытаний, проведенных в заводских условиях, установлено, что в плитах БМП механические нагрузки сами по себе не приводят к образованию трещин большинства видов. Не приводит к образованию трещин в плитах БМП сама по себе также и ползучесть бетона. Впервые установлено влияние избыточного электрического заряда и потенциала на прочность бетона и образование трещин в конструкциях из него: наличие электрического потенциала величиной 40 В не влияет на прочность бетона класса до С8/10 или может обеспечить ее некоторое повышение и приводит к снижению прочности на растяжение водонасыщенного бетона более высоких классов, в частности С25/30 – на 10 – 15 %; наличие электрического потенциала не влияет на развитие трещин в сухом бетоне, а в водонасыщенном бетоне потенциал более 10 В обуславливает отталкивание частиц гидросиликатного геля, растягивающие напряжения в цементном камне, а также давление от электростатического отталкивания между стенками микротрещин через диполь-дипольные взаимодействия

между ориентированным потенциалом слоями молекул воды в пленках влаги на них, которое достигает величин, сопоставимых с прочностью бетона на растяжение. По результатам исследований разработаны рекомендации по повышению трещиностойкости плит БМП и мостовых опор, инструктивный документ Укрзалізничниці, которые внедрены на заводе-изготовителе плит, при проектировании и производстве работ по капитальному ремонту искусственных сооружений железных дорог.

Ключевые слова: бетон, железобетонная плита, безбалластное мостовое полотно, токи утечки, избыточный электрический заряд, трещиностойкость.

Zabiyaka O.A. The mechanism of cracking in slabs on a roadbed without ballast and supports of railway bridge and increasing of their crack stability. – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.05 – building materials and products. – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2015.

The thesis is devoted to the theme of crack stability improving of slabs on a roadbed without ballast (RWB) and supports of railway bridges operated on DC electrified railway sections. The hypothesis of crack stability improving of slabs RWB and bridge supports by neutralizing of excess charges and protection from leakage currents and electric fields was put forward. The theoretical notions of structure and deformability of concrete slabs RWB and rubble masonry of bridge supports, the appearance of excess electrical charges on constructions of bridges from leakage currents and electric fields of anthropogenic and natural origin, their influence on crack formation, were developed. Natural and operational research to identify factors of cracking in slabs RWB and bridge supports were conducted. The classification of cracks and other damages in slabs RWB were developed. There were developed an original methods and conducted experimental studies of the effect of mechanical stress, electrical potentials and charges on the strength of concrete and cracking in concrete slabs RWB. For the first time the influence of excess electric charge on the concrete strength and cracking in the construction was established. According to the research, there were developed the recommendations for improving of crack stability of slabs RWB and bridge supports which were introduced at the slab factory, at designing and execution of work by major repair of engineering structures of railways.

Keywords: concrete, reinforced concrete slab on a bridge roadbed without ballast, leakage current, excess electrical charge, crack stability.