

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Лютий Віталій Анатолійович

УДК 691.075: 541.18



**ПОВТОРЮВАНА ШВИДКОНАТІКАЮЧА ПОВЗУЧІСТЬ БУТОВОЇ  
КЛАДКИ МОСТОВИХ ОПОР ПІД МЕХАНОЕЛЕКТРИЧНОЮ ДІЄЮ**

Спеціальність **05.23.05** – будівельні матеріали і вироби

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків- 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту Міністерства транспорту і зв'язку України на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій і споруд.

Науковий керівник: доктор хімічних наук, професор

**Плугін Аркадій Миколайович,**

Українська державна академія залізничного транспорту, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій і споруд.

**Офіційні опоненти:**

- доктор технічних наук, професор **Чернявський Вячеслав Леонідович,** Харківський державний технічний університет будівництва і архітектури, завідувач кафедри фізико-хімічної механіки і технології будівельних матеріалів і виробів;
- кандидат технічних наук, доцент **Толмачов Сергій Миколайович,** Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів.

**Провідна організація: -**

Донбаська національна академія будівництва і архітектури, кафедра технології будівельних матеріалів, виробів і автомобільних доріг Міністерства освіти і науки України, м. Макіївка.

Захист дисертації відбудеться 12 квітня 2007 року о 13.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Української державної академії залізничного транспорту (Україна, 61050, м. Харків, пл. Фейербаха 7).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту (Україна, 61050, м. Харків, пл. Фейербаха 7).

Автореферат розісланий " \_\_\_\_ " березня 2007 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради, к.т.н., доцент

Г.Л.Ватуля

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**ПОВТОРЮВАНА ШВИДКОНАТІКАЮЧА ПОВЗУЧИСТЬ БУТОВОЇ  
КЛАДКИ МОСТОВИХ ОПОР ПІД МЕХАНЕЛЕКТРИЧНОЮ ДІЄЮ**

Лютий Віталій Анатолійович

Відповідальний за випуск  
Козеняшев І.А.

---

Підписано до друку \_\_\_\_\_ 2007 р.  
Формат паперу 60x84. Папір писальний.  
Умовн. - друк. арк. 1.0. Обл. - вид арк. 1.25.  
Замовлення № \_\_\_\_\_. Тираж 100.

---

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК № 112 від 06.07.2000 р.  
Друкарня УкрДАЗТу,  
61050, Харків – 50, пл. Фейєрбаха 7

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** На залізницях експлуатується велика кількість мостів, побудованих в кінці XIX і на початку XX століття, з бутобетонними або з бутового каменя опорами з кам'яним облицюванням. Передбачалося, що вони матимуть великі запаси міцності та дозволять збільшувати осьові навантаження і швидкості руху потягів.

Проте несуча здатність багатьох з цих опор почала різко погіршуватися через непередбачені пошкодження, серед яких найпоширенішими виявилися тріщини. На відміну від більшості існуючих думок причинами їх появи, на наш погляд, є довготривала повзучість бетону, особливо повторювана швидконатікаюча повзучість від динамічного навантаження поїздів, фільтрація води через тіло опори і струми витоку на електрифікованих постійним струмом ділянках залізничних ліній.

Проте дослідження механізмів вказаних явищ, процесів і дій і їх впливу на довговічність масивних опор практично не проводилося.

У зв'язку з цим тема дисертації, що присвячена проведенню досліджень повторюваної швидконатікаючої повзучості від динамічного навантаження поїздів, фільтрації води крізь тіло опори і струмів витоку на електрифікованих постійним струмом ділянках залізничних ліній, а також розробці нових матеріалів, виробів і технологій з метою забезпечення високої несучої здатності і продовження експлуатаційного періоду бутобетонних або з бутової кладки з кам'яним облицюванням мостових опор є актуальною і значущою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі "Будівельні матеріали, конструкції і споруди" Української державної академії залізничного транспорту відповідно до планів науково-дослідних робіт академії, які проводяться у рамках галузевих програм з наукових напрямків Міністерства транспорту та зв'язку України, а також в рамках планів НДДКР Укрзалізниці з тем:

1. "Розробка і упровадження методики розрахунку складів бетону, що забезпечують довговічність, водонепроникність, тріщиностійкість спецалізобетону".

2. "Розробка нетрадиційних способів ремонту бетонних і кам'яних опор залізничних мостів з відновленням їх несучої здатності і довговічності".

3. "Підвищення довговічності конструкцій мостів і їх захист від корозії".

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є запобігання руйнування і збільшення строка служби мостових опор, що руйнуються, на основі розвитку уявлень про деформації довготривалої і повторюваної швидконатікаючої повзучості бутобетону і бутової кладки, про струми витоку в опорі, виявлення механізму їх руйнуючої дії на опорі і розробки нових матеріалів і способів ремонту мостових опор.

**Наукова гіпотеза** досліджень полягає в наступному: основними причинами появи тріщин і руйнування мостових опор є довготривала і повторювана швидконатікаюча повзучість бутової кладки або бутобетону, а також дія струмів витоку крізь опору у водоймище (землю); ліквідація тріщин і запобігання

руйнування опори можливі за рахунок влаштування армокам'яних швів і поясів, обтискування опори попередньо напруженими струнопакетами, а також улаштування екрануючих конструкцій в рівні води типу "бетон в сталевій обоймі".

Для досягнення даної мети з урахуванням *наукової гіпотези* в роботі були поставлені такі основні **завдання наукових досліджень**:

- провести аналіз літературних джерел щодо причин, що викликають руйнування мостових опор, по існуючих теоріях деформацій бетону, у тому числі при періодичному навантаженні, про вплив на руйнування бетону струмів витоку на мостах, розташованих на електрифікованих постійним струмом ділянках залізниць;

- розвинути уявлення про довготривалу і повторювану швидконатікаючу повзучість цементного каменю в бетоні і про механізм її впливу на тріщиноутворення в мостових опорах з кам'яним облицюванням;

- розробити нові вироби і технології їх виготовлення: армокам'яний шов і пояс, а також попередньо напружений залізобетонний міні-пояс;

- розробити нові способи визначення оптимальних складів бутової кладки, бутобетону, дрібнозернистого бетону і чеканочного розчину з низькими деформативністю і водопроникністю;

- провести фізико-механічні і фізико-хімічні дослідження структури і властивостей цементно-водних композицій, розчинів і бетонів;

- провести виробничо-експлуатаційні випробування і впровадити розроблені нові матеріали, вироби і технології.

**Об'єкт дослідження** – бутобетон, кам'яна кладка, дрібнозернистий бетон, розчини, епоксичементний склад для мостових опор.

**Предмет дослідження** – структура, властивості, механізми процесів тріщиноутворення і руйнування мостових опор і подальше запобігання цьому.

**Методи дослідження.** В роботі використані стандартні методи дослідження фізико-механічних властивостей цементного каменя, розчину і бетону. Для визначення фазового складу і структури продуктів гідратації цементу – методи фізико-хімічного аналізу (рентгенографічний, інфрачервоної спектроскопії, термографічного і електронно-мікроскопічного). Для дослідження деформацій при довготривалому навантаженні під дією періодичного навантаження - спеціальні методики і установки, розроблені на кафедрі «Будівельні матеріали, конструкції і споруди» УкрДАЗТ.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- встановлено причини тріщиноутворення і руйнування бутобетонних чи з кам'яної кладки з кам'яним облицюванням опор - дія довготривалої і повторюваної швидконатікаючої повзучості бутової кладки або бутобетону в ядрі опори, а також струмів витоку крізь матеріал опори у водне середовище;

- описано механізми і побудовано математичні моделі горизонтального тиску на кам'яне облицювання від вертикального навантаження, встановлено взаємозв'язок цього тиску з довготривалою повзучістю бутобетону і бутової кладки, визначено величини коефіцієнта бічного тиску  $\gamma_b$ , який безперервно зростає під час експлуатації до  $\gamma_b = 1$ ;

- описано механізми і запропоновано математичні моделі: повторюваної швидконатікаючої повзучості цементного каменю і бетону, а також струмів витоку через опору та викликаних ними електроосмотичного перенесення (ЕОП) в капілярах цементного каменю і розтягуючих напружень, що викликає тріщиноутворення і руйнування мостових опор;

- запропоновано та досліджено нові способи усунення деформацій швидконатікаючої повзучості за допомогою струнопакетів з високоміцної дротяної арматури;

- розширено уявлення про багаторівневу структуру і структурні характеристики (у тому числі оптимальні) бутової кладки і бутобетону і розроблено на цій основі нові способи визначення оптимальних складів бутової кладки, бутобетону, дрібнозернистого бетону і чеканочного розчину з низькими деформативністю і водопроникністю.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у: використанні розроблених матеріалів, виробів і технологій для ремонту мостових опор залізничного моста, що руйнується, через р. Сіверський Донець на Південній залізниці з мінімальними трудовими і матеріальними витратами, виключення цих опор із числа аварійних і встановленні нормальних швидкостей руху потягів.

#### **Особистий внесок здобувача.**

Усі положення і результати, які виносяться на захист, отримані автором самостійно, а також в спільних теоретичних і практичних роботах.

Автором особисто розроблені: уявлення про повторювану швидконатікаючу повзучість бутобетону або бутової кладки в мостових опорах від дії проходячих по мосту поїздів і її вплив на тріщиноутворення кам'яного облицювання мостових опор; уявлення про створення струмами витоку електроосмотичного переносу (ЕОП) в мостових опорах і його руйнуючу дію на бутову кладку і бутобетон опори; гіпотези про запобігання виникненню тріщин в мостових опорах за допомогою армокам'яних швів і попередньо напружених залізобетонних міні-поясів; нові способи розрахунку оптимальних по деформативності складів бутобетону і бутової кладки, розчину для чеканки швів, дрібнозернистого бетону і епоксичементної композиції; виконано аналіз і обробка результатів експериментальних досліджень.

У співавторстві виконано такі теоретичні і експериментальні дослідження: розроблено відповідні схеми і математичні вирази виникнення блукаючих струмів в опорах, а також довготривалої і швидконатікаючої повзучості цементного каменю; проведено фізико-механічні і фізико-хімічні дослідження; розроблено і виготовлено пристрій УІМ для вимірювання деформацій довготривалої і повторюваної швидконатікаючої повзучості; виконано дослідження стану опор; розробка і виготовлення пристроїв, технологій і впровадження результатів досліджень на опорах.

Участь автора в сумісних публікаціях відображена в переліку опублікованих робіт.

**Апробація результатів дисертації.** Основні матеріали і результати наукових досліджень дисертаційної роботи доповідалися на: українському міжгалузевому науково-практичному семінарі «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення», – 27-28 червня 2006 р.; науково-технічній конференції “Математические модели процессов в строительстве”,

Науково-технічній конференції (залізобетонні конструкції і матеріали). – Луганськ, 9-11 червня 2004 р.; VIII науково-технічній конференції «Actualne problemy naukovo-badawcze bodownictwa», Ольштин, Польща, 2006 р.; 62÷66 науково-технічних конференціях кафедр академії і фахівців залізничного транспорту в 2002÷2006 рр.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 12 робіт у виданнях, рекомендованих ВАК України.

**Структура і об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, основних висновків, списку літератури з 156 найменувань на 14 сторінках; містить 176 сторінок основного тексту, 112 рисунків, 9 таблиць, 2 додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання досліджень, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів. Відображено основні наукові положення і результати досліджень, які виносяться на захист. Наведено відомості про структуру дисертації, публікації і апробацію роботи.

**У першому розділі** виконано аналітичний огляд літературних даних про технічний стан експлуатованих мостових опор, виявлено і узагальнено причини їх пошкодження, критично проаналізовано матеріали і технології, що використовуються для ремонту і посилення мостових опор. Розглянуто моделі структури бутобетону та кам'яної кладки і деформації в них, які виникають від навантаження, що періодично повторюється.

В умовах експлуатації мостові опори зазнають напружено-деформований стан, який для даного типу опор в основному визначається напруженнями і деформативністю кам'яної кладки або бутобетону ядра при короткочасному навантаженні (початковий стан) і зміною їх деформативності при довготривалій дії навантаження в процесі експлуатації. Одним з проявів деформаційних властивостей бетону при тривалій дії навантаження є повзучість бетону при його стиску.

Розробка математичних моделей в дослідженнях напружено-деформованого стану, як правило, ґрунтується на феноменологічному підході. Є і спроби використання фізичних моделей і природи явищ, що відбуваються в навантаженому бетоні. Згідно з однією з них при первинному прикладанні тривалого навантаження на початковій ділянці деформування відбувається швидке наростання деформацій, пов'язане з мікроруйнуваннями в структурі бетону і яке приводить до створення більш тісного контакту між зернами крупного заповнювача і розчином. Подальше наростання деформацій повзучості обумовлюється процесом перерозподілу напружень між складовими бетону. Зняття стискаючого навантаження приводить до виникнення пластичних деформацій зворотного знака, джерелом яких є намагання зерен крупного заповнювача пружно відновити свої розміри і форму. Можливість прояву цих деформацій обумовлена мікроруйнуваннями, що відбулися при первинному навантаженні бетону стискаючим навантаженням. Подальший процес деформації бетону в період

«відпочинку» пов'язаний з повзучістю складової розчину під дією розтягуючих напружень, що виникають у зв'язку з перешкодою з боку розчину пружному відновленню розмірів зерен крупного заповнювача.

При повторній дії стискаючого навантаження паралельно з процесом повзучості відбувається розвиток пластичних деформацій, пов'язаних з руйнуваннями в структурі бетону, що відбулися при первинному навантаженні. Ці деформації за величиною значно менші за ті, які виявилися при первинному навантаженні бетону.

Розглядаються також деформації бетону як двокомпонентного середовища, яке складається з розчину, що зазнає під навантаженням пружні деформації, деформації повзучості і пластичні деформації, і крупного заповнювача, здатного деформуватися тільки пружно. При тривало діючих навантаженнях, що прикладаються з перервами, деформації, що розвиваються в часі, можуть визначатися як сума деформацій повзучості і деформацій пружної післядії; при цьому деформації повзучості не залежать від деформацій післядії, обумовлених розвантаженнями, що мали місце раніше.

Розглянуті уявлення про деформації повзучості при повторних навантаженнях засновано на теорії повзучості за рахунок крихкого руйнування і розвитку мікротріщин. Проте процес довільного закриття (хай і часткового) цих тріщин при скиданні напружень нам представляється малореальним, оскільки розірвані хімічні зв'язки, як відомо, не відновлюються, тим більше на кінцях тріщин. Явища зворотної часткової деформації повзучості можна пояснити, на наш погляд, за допомогою моделей повзучості цементного каменю, розчину і бетону, заснованих на колоїдно-хімічній природі цементного каменю і теорії електрогетерогенних контактів в ньому.

Аналіз показав, що застосовані матеріали і сам ремонт опор недостатньо довговічні в умовах обводнення, технології трудомісткі, вимагають застосування важкої техніки, важко здійснювані на водоймищах і водотоках, як правило пов'язані із зупинкою руху поїздів. Це приводить до необхідності подальшої розробки теорії міцності і руйнування бутової кладки і бутобетону, а також розчину в швах кам'яного облицювання, підвищення їх довговічності, розробки нових ефективних матеріалів і технологій.

**У другому розділі дані** характеристики основних вихідних матеріалів, приведені стандартні, вдосконалені і нові методики досліджень.

У досліджуваних цементно-водних системах (ЦВС) використовували матеріали: портландцемент ВАТ «Балцем» марки ПЦ500; пісок дрібний кварцовий, модуль крупності  $M_k = 1,2$ ; щебінь гранітний з максимальною крупністю зерен 20 мм, вода питна водопровідна. Додатки СП: Дофен, марка Б, Україна; SL і SL-A, Україна; С-3, Росія. Допоміжні матеріали: смола епоксидіанова, марка ЕД-20; отверджувач УП-583; кам'яновугільна смола; розчинник 647.

В експериментальних дослідженнях використовувалися стандартні і розроблені в дисертації спеціальні методики вимірювань. Для дослідження деформацій повторюваної швидконатікаючої повзучості була вдосконалена установка важільного типу із змінними вагами УРС. Визначення міцності закладення арматурних стержнів в кам'яних і бетонних матеріалах проводилося за зусиллям виривання металевого стержня з пропилів, виконаних в тілі бетону або



граніту і заповнених епоксидцементним компаундом з мінеральною ватою. Для визначення величини натягнення лабораторних струнопакетів двома способами - електротермічним і механічним - виконано тарування тензометричних датчиків у випробувальній машині МУП-50 з використанням приладу вимірювач деформації цифровий (ВДЦ). Тарування динамометричного ключа проводилося з використанням тарованих тензометричних датчиків і приладу ВДЦ.

Крім того, в дослідженнях використовувалися методи фізико-хімічного аналізу: рентгенофазовий (дифрактометр ДРОН-3); інфрачервоної спектроскопії (спектрометр "Термониколет - 360"); термографічний аналіз (дериватограф ім. Курнакова); електронно-мікроскопічний (мікроскоп ЭМ5) методом платино-вугільних реплік з додатковим збільшенням одержаних електронно-мікроскопічних фотознімків за допомогою сканера і ПЕОМ.

**У третьому розділі** виконано розвиток уявлень про повторювану швидконатікаючу повзучість і струми витoku і їх вплив на руйнування опор.

Для аналізу можливості виникнення тріщин в опорі за механізмом крихкого руйнування виконано розрахунок горизонтальних пружних відносних деформацій в опорі від вертикальних навантажень. Як показали розрахунки, напруження стискання від вертикальних навантажень в опорі значно менші за відповідні середні величини міцності бутової кладки  $q = 0,45 \text{ МПа} < 20 \text{ МПа}$ , а відносні деформації розтягування при коефіцієнті бічних деформацій  $\mu = 0,2 \varepsilon = 4,5 \cdot 10^{-6}$  значно менші за граничні деформації бетону  $\varepsilon_{\text{ГРАН}} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ . Це свідчить про значний запас міцності опори в початковому стані. Навантаження на опору і пружні деформації, отже, не можуть бути причиною виникнення тріщин (за механізмом крихкого руйнування) в опорах даного типу.

В умовах експлуатації опор довготривала повзучість виявляється протягом багатьох десятиріч. При цьому дотримується співвідношення  $tn \gg \tau_p$ , і бетон проявляє властивості текучості, що розвивається надто поволі, як і в багатьох інших твердих тілах. Аналогічним чином поводить себе бутова кладка і бутобетон в ядрі опори. При цьому вони передають горизонтальний тиск  $p_r$  від вертикального навантаження  $q$  на кам'яне облицювання. Отже, коефіцієнт бічного тиску  $\gamma_b$  безперервно зростатиме протягом довгого часу, наприкінці наближаючись до  $\gamma_b = 1$ , як для водонасичених ґрунтів.

Розрахунок, виконаний з урахуванням цього, показав, що найвірогіднішою причиною (головним фактором) виникнення вертикальних тріщин в кам'яному облицюванні масивних опор є довготривала повзучість бутової кладки або бутобетону ядра від вертикального тиску рухомого складу, що викликає бічний тиск на облицювання, що збільшується і досягає граничної величини протягом довгого часу. Тривалість дії кожного циклу навантаження від рухомого складу складає 1-6 хв, що відповідає тривалості швидконатікаючої повзучості (ШНП). При знятті навантаження деформації ШНП зникають не повністю. Тому при повторних проходженнях поїздів накопичуватимуться залишкові деформації ШНП, що прискорює досягнення граничної деформації довготривалої повзучості  $\varepsilon_{\text{ДП}}^{\text{ГРАН}}$ . Циклічно повторювану ШНП при проходженні поїздів по мосту ми назвали повторюваною ШНП.

Викладене дозволило нам висловити припущення про можливість усунення деформацій повторюваної ШНП за рахунок застосування попереднього обтиснення опори горизонтальним арматурним струнопакетом. Величина зусилля стискування повинна бути рівною горизонтальному розривному зусиллю стіни облицювання по товщині і ширині опори від дії динамічного навантаження (рухомого складу)  $N_D^T$  і  $N_D^{III}$ :

$$N_D^T = \frac{q \cdot b \cdot l}{2}, \quad N_D^{III} = \frac{q \cdot a \cdot l}{2} \quad (1)$$

$$N_D^T = \frac{23,5 \cdot 17,49 \cdot 1}{2} = 206 \text{ тс} \quad N_D^{III} = \frac{23,5 \cdot 2,56 \cdot 1}{2} = 30 \text{ тс}$$

При виході поїзда за межі моста і зникненні динамічного навантаження обтиснення опори горизонтальними струнопакетами з таким або більшим зусиллям забезпечить усунення залишкової деформації в кожному циклі і поверне опору в початковий стан. В роботі запропоновано спосіб підсилення опори по її товщині за допомогою попереднього напруження на 30 тс і влаштування армокам'яних епоксидцементних швів або поясів міцністю на розрив не менше 176 тс, які забезпечують міцність швів в кам'яному облицюванні при розтягуванні.

Теоретичні дослідження механізмів деформації цементного каменю при стисканні показали, що найбільший вплив на руйнування досліджуваної опори можуть справити сумарні залишкові деформації повторюваної швидконатікаючої повзучості  $\varepsilon_{ШП}$ ,  $\varepsilon_{ШП}^{ГРАН}$  (що виявляються протягом декількох хвилин) і довготривалої повзучості  $\varepsilon_{ДП}$ ,  $\varepsilon_{ДП}^{ГРАН}$  (після 150 діб деформування).

Колоїдно-хімічні уявлення дозволили розкрити механізми цих видів повзучості (П). Напруження  $\sigma_{СТ}$ , що виникає в прошарках між частками цементу, приводить до видавлювання води з прошарків між частками гелю в гелеві, глобулярні і капілярні пори, при цьому відстань між шарами протиіонів у ПЕШ зменшується. Із зменшенням відстані між шарами протиіонів з'являються і збільшуються відштовхуючі електростатична  $П_{ЭС}$  і структурна  $П_{СТР}$  складові розклинювального тиску, що протидіють стисненню ПЕШ. При цьому на стадіях пружного стискання і швидконатікаючої повзучості відбувається зменшення товщини шару води гелю і відносної деформації обводненого гелю (за рахунок стиснення ПЕШ часток гелю).

Фізична сутність електростатичної і структурної складових розклинювального тиску витікає з рівнянь

$$П_{ЭС.ВИХ} = \frac{\varepsilon \psi_0^Г \cdot q}{2 \delta_{Ш.СТ}^{ВГ}}, \quad (2)$$

$$П_{СТР.ВИХ} = \frac{2(U_{Г}^{OH^-}) \cdot q}{2z^{OH^-} e \delta_{Ш.СТ}^{ВГ}} + \frac{2(U_{Г}^{Ca^{2+}}) \cdot q}{z^{Ca^{2+}} e \delta_{Ш.СТ}^{ВГ}} = \frac{q}{e \delta_{Ш.СТ}^{ВГ}} \left[ \frac{U_{Г}^{OH^-}}{z^{OH^-}} + \frac{2U_{Г}^{Ca^{2+}}}{z^{Ca^{2+}}} \right], \quad (3)$$

де  $\psi_0^Г$  - електроповерхневий потенціал часток гелю, який дорівнює  $\psi_0^Г = -0,37 \text{ В}$  (для низькоосновних гідросилікатів кальцію);  $q$  – щільність поверхневого заряду часток гідросилікатного гелю,  $\text{Кл/м}^2$ ;  $\delta_{Ш.ВИХ}^{ВГ}$  – товщина стиснутого прошарку води між частками гелю;  $U_{Г}^{OH^-}$ ,  $U_{Г}^{Ca^{2+}}$  - енергія гідратації потенціалвизначальних іонів  $OH^-$  и протиіонів  $Ca^{2+}$  подвійних електричних шарів ПЕШ гелевих часток;  $z^{OH^-}$  -

валентності потенціалвизначальних іонів ( $z^{OH^-} = 1$ ) і протиіонів  $Ca^{2+}$  ( $z^{Ca^{2+}} = 2$ ) в ПЕШ гелевих часток;  $e$  – заряд електрона, який дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл [88].

Як бачимо, чим більше стиснуті ПЕШ часток гелю і, відповідно, менше величина  $\delta_{Ш.СТ}^{BG}$ , тим більші величини електростатичної і структурної складових розклинювального тиску  $P_{ЕС.ВИХ}$ ,  $P_{СТР.ВИХ}$ .

Початкова товщина шару води на частках гелю  $\delta_{Ш.ВИХ}^{BG}$  може бути визначена шляхом ділення об'єму води в цементному камені, окрім хімічно зв'язаної, на площу поверхні гідросилікатного гелю за виразом:

$$\delta_{Ш.СТ}^{BG} = \frac{\left[ \frac{C}{C} \frac{B}{C} - C\alpha^u 0,227 \right]}{C\alpha^u \gamma^r s^r} = \frac{\left[ \frac{B}{C} - \alpha^u 0,227 \right]}{\alpha^u \gamma^r s^r}, \quad (4)$$

де  $\alpha^u$  – ступінь гідратації цементу; 0,227 – частка хімічно зв'язаної води від кількості прогідратованого цементу;  $\gamma^r$  – вагова частка гелю в продуктах гідратації цементу;  $s^r$  – питома поверхня гелю,  $см^2/г$ .

Товщина стиснутого шару води менше, ніж вихідного і визначається рівнянням, яке впливає з рівності напруження від навантаження  $\sigma_{СТ}$  і розклинювального тиску  $P_{СТР.ВИХ}$

$$\delta_{Ш.СТ}^{BG} = \frac{q\psi \left[ \frac{\varepsilon}{2 \cdot \varepsilon_1} + \frac{U_{\Gamma}^{OH^-}}{e\psi z^{OH^-}} + \frac{2U_{\Gamma}^{Ca^{2+}}}{e\psi z^{Ca^{2+}}} \right]}{P_{СТР.ВИХ} + \sigma_{СТ}} \quad (5)$$

На стадії звичайної повзучості після заповнення гелевих і капілярних пор водою відбувається руйнування глобул гелю і заповнення частками гелю гелевих пор. При цьому вода з пор видавлюється шляхом її фільтрації, що приводить до зменшення її об'єму в гелі і, відповідно, товщини прошарку новоутворень між цементними частками.

Різниця деформацій  $\delta_{Ш.ВИХ}^{BG}$  и  $\delta_{Ш.СТ}^{BG}$  визначає деформацію швидконатікаючої повзучості за один цикл навантаження. При переміщенні води у бік розтягуючих напружень концентрація електроліту в стиснутій зоні збільшиться, а в розтягнутій – зменшиться. При знятті навантаження величина  $\sigma_{СТ}$  стає рівною 0, і під впливом  $P_{СТР.ВИХ}$  подвійні електричні шари почнуть відновлюватися. Проте при цьому процес відновлення буде достатньо тривалим, оскільки він лімітується швидкістю зворотної дифузії витиснених з ПЕШ протиіонів. За цей час зміняться рівноважні електроповерхневі потенціали  $\psi_{EP}$  продуктів гідратації цементу (в стислій зоні  $\psi_{EP}$  кристалогідратів зросте, а в розтягнутій – зменшиться), що викличе, відповідно, їх часткове розчинення із встановленням нових рівноважних розмірів. У зв'язку з цим після зняття стискуючого навантаження повне повернення протиіонів в раніше стиснуту зону не відбудеться, що і є причиною залишкової деформації за кожний цикл навантаження. Отже, при повторюваному навантаженні зміна деформації цементного каменю прийме вид кривої 1 на рис. 1.

У випадку мостової опори повторюваним навантаженням служать навантаження від поїздів з інтервалом проходження  $15 \div 35$  хвилин. За цей час в бутобетоні або бутувій кладці опори встигнуть виявитися лише пружні деформації  $\varepsilon_v$  і деформації швидконатікаючої повзучості  $\varepsilon_{ШП}$ .

Як показали наші експерименти і розрахунки, величини умовно пружних відносних деформацій і відносних деформацій швидконатікаючої повзучості за один цикл складають близько  $\varepsilon_{шп} = 0,0025$ . Після зняття навантаження, згідно викладеному механізму, повинна залишатися залишкова деформація як її частина. При повторенні циклів накопичуватиметься сумарна залишкова деформація, прискорюючи досягнення граничної деформації довготривалої повзучості  $\varepsilon_{дп}^{ГРАН}$  (крива 2), а з урахуванням вібрації від колісних пар на опорі, ймовірно, виросте і абсолютна величина  $\varepsilon_{дп}^{ГРАН}$ . Результуюча крива деформацій при цьому буде мати вид кривої 4 на рис. 1.

У зв'язку з викладеним, ефективним способом запобігання тріщинам в опорах, як вже відмічалось, є влаштування попередньо напружених залізобетонних міні-поясів. У цьому випадку залежність деформацій від часу буде мати вигляд, кривої 3, рис. 1, де за рахунок використання поясів виключається прояв залишкових деформацій повторюваної швидконатікаючої повзучості  $\Delta\varepsilon_{шп}$ .

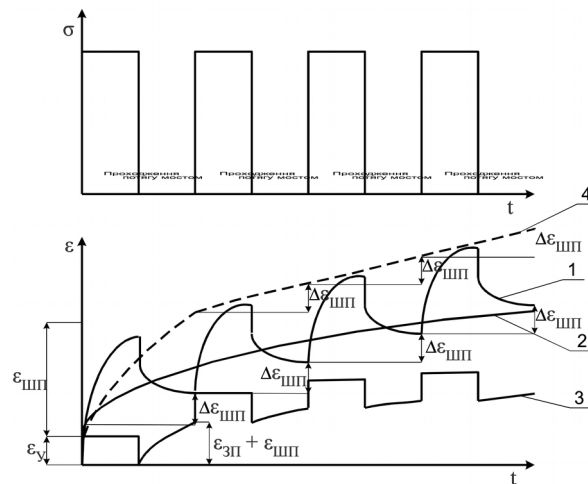


Рис. 1. Зміна деформацій цементного каменю від повторюваного навантаження

На опорах мостів, що знаходяться на електрифікованих постійним струмом ділянках колії, на напружено-деформований стан будової кладки або бутобетону ядра можуть впливати також струми витоку з контактного дроту через електролокомотив і рейки в землю.

Пройдення струму через опору в період проходження електропоїзда по мосту здійснюється за рахунок перенесення гідратованих протиіонів  $Ca^{2+}$  капілярами цементного каменю розчину, стінки яких покриті негативно зарядженими частками і глобулами гідросилікатів кальцію, у воду (або ґрунт). Це приводить до виникнення негативного потенціалу в капілярах опори за рахунок відтоку протиіонів  $Ca^{2+}$  з неї, виникнення позитивного потенціалу в оточуючій опорі воді (ґрунті), рис. 2, і виникнення електричного протиполя в ланцюзі опора – вода, тобто відбувається поляризація розчину в бутобетоні або будовій кладці і швах облицювання, по аналогії з мембранним потенціалом в колоїдній хімії. При виході поїзда за межі моста і зникненні зовнішнього поля протиполе прагне зникнути протягом часу приблизно 100 с, яке визначається швидкістю дифузії протиіонів у зворотному напрямі.

Проте за час існування дефіциту протиіонів  $Ca^{2+}$  в цементному камені розчину відбувається розчинення кристалогідратних продуктів гідратації цементу з переходом у воду катіонів  $Ca^{2+}$  та аніонів  $OH^-$  і рівноважна концентрація іонів  $Ca^{2+}$  частково відновлюється, у зв'язку з чим повного дифузійного повернення протиіонів не відбувається. Винесення частини протиіонів  $Ca^{2+}$ , що не повертаються, означає протікання корозії вилуговування за один цикл проходження електропоїзда по мосту. З кожним новим циклом процес вилуговування наростає.

Така корозія підтримується лише за умови відведення розчинених продуктів гідратації за межі опори. Таке відведення відбувається за рахунок дифузії продуктів розчинення у вигляді гідратованих іонів із зони їх підвищеної концентрації у вологий ґрунт або у водоймище, за рахунок змивання водотоком, а з поверхні опори - за рахунок змивання дощовою або талою водою. Винесення води з цементного каменю разом з протиіонами  $Ca^{2+}$  компенсується осмотичними потоками води від поверхні опори всередину її пор і капілярів.

Реальність викладеного механізму підтверджується появою значних висолів і руйнуванням швів облицювання опор на багатьох електрифікованих ділянках залізничної колії.

Визначимо тривалість вилуговування цементного каменю в будівній кладці опори, або довговічність опори. Як відзначалося, струм витоку через опору в землю ( водоймище, водотік), що виникає при проходженні електропоїзда по мосту, реалізується у вигляді потоку протиіонів (електроміграція) в ПЕШ капілярів цементного каменю будівної кладки або бутобетону ядра і розчину швів облицювання від верху опори до поверхні води ( водоймища). Протиіони захоплюють воду в капілярах, виникає відоме електрокінетичне явище – електроосмотичне перенесення ЕОП, рис. 2.

Електричне поле, що виникає між поверхнею опори і землею (водою) напруженістю  $U_{оп-з}/h_{оп}$ , впливає на позитивно заряджені протиіони ПЕШ негативно заряджених поверхонь капілярів з силою  $F_{ЕОП}$  за рівнянням

$$F_{ЕОП} = E \cdot Q = \frac{U_{оп-з}}{h_{оп}} \cdot q \cdot S_{КАП}^{ПОВ}, \quad (6)$$

з якого після ряду перетворень витікає рівняння тиску, що викликає ЕОП

$$P_{ЕОП} = \frac{U_{оп-з} R^K \varepsilon \varepsilon_0 \psi_{ЕП}^P}{2d_1} \cdot \frac{1}{\pi (R^K)^2} = \frac{U_{оп-з} \varepsilon \varepsilon_0 \psi_{ЕП}^P}{2\pi \cdot d_1 \cdot R^K}, \quad (7)$$

де  $Q$  і  $q$  – заряд і щільність заряду поверхні капіляра в цементному камені бетону опори, Кл і Кл/м<sup>2</sup>;  $S_{КАП}^{ПОВ}$  - площа поверхні капіляра, м<sup>2</sup>;  $d_1 = r_{Ca^{2+}} + r_{OH^-} = 1 + 1,53 = 2,53$  Å =  $2,53 \cdot 10^{-10}$  м (відповідно, радіуси потенціалвизначальних іонів  $Ca^{2+}$  и протиіонів  $OH^-$ );  $R^K = 0,44 \cdot R^{ГЛ}$ .

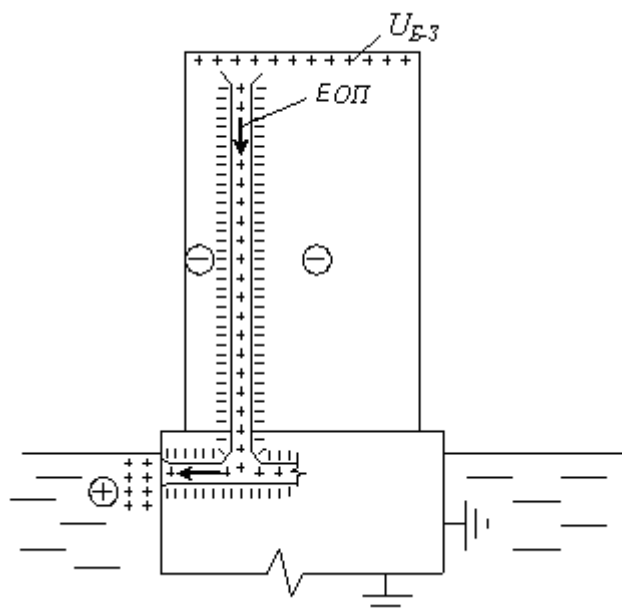


Рис. 2. Схема електроосмотичного перенесення протиіонів ПЕШ в капілярі цементного каменю бутової кладки, бутобетону або розчину в швах під впливом ЕОП

Підставляючи вказані величини в (7), а також  $R^{П} = 2,5 \cdot 10^{-10}$  (250 Å),  $|U_{ОП-3}| = 18$  В (виміряна на опорі максимальна величина) і  $\psi_{ЭП}^P = -0,37$  В (для часток гідросилікатного гелю), отримаємо величину внутрішнього тиску в цементному камені  $P_{ЕОП} = 3,37$  МПа. З урахуванням об'ємної частки гелю в цементному камені, визначеної розрахунком, розтягуючий тиск в гелі цементного каменю складе близько  $P_{ЕОП} = 0,47 \cdot 3,37 = 1,6$  МПа, що співвідноситься з міцністю бутового каменю або бутобетону на розтягування ( $\approx 2$  МПа) і може викликати виникнення тріщин в опорі.

Електроосмотичному перенесенню перешкоджає тертя води об стінки капіляра

$$F_{ТЕР} = \eta 2\pi R^K h_{ОП} \cdot \frac{V_{ЕОП}}{\delta_{ЗВ}} \quad (8)$$

При рівності  $F_{ЕОП}$  и  $F_{ТЕР}$  встановлюється стаціонарний потік, з рівняння якого виведено рівняння для швидкості електроосмотичного перенесення в капілярі

$$V_{ЕОП} = \frac{U_{ОП-3} \cdot R^K \varepsilon \varepsilon_0 \psi_{ЭП}^Г \cdot \delta_{ЗВ}}{2d_1 \cdot \eta 2\pi R^K h_{ОП}} = \frac{U_{ОП-3} \varepsilon \varepsilon_0 \psi_{ЭП}^Г \cdot \delta_{ЗВ}}{4\pi \cdot d_1 \cdot \eta \cdot h_{ОП}}, \quad (9)$$

де  $\delta_{ЗВ}$  - товщина шару води, зв'язаної поверхнею капіляра, в якому швидкість збільшується від 0 до максимальної в капілярі.

Виражаючи граничну кількість вапна, при вилуговуванні якої настає руйнування цементного каменю в бутобетоні або бутовому камені як  $M_{ВИЛ}^{ГРАН} = S \cdot \delta^{ВИЛ} \cdot Ц \cdot \gamma_{ВАП} \cdot \gamma_{ГРАН}$ , і враховуючи  $|U_{ОП-3}| = 18$  В,  $h_{ОП} = 6$  м, з (9) виведено рівняння для кількості води, яка повинна пройти з електроосмотичним перенесенням для розчинення граничної кількості вапна

$$V_{ЭОП}^{ВИЛ} = \frac{M_{ЛУГ}^{ГРАН}}{c_{ЛУГ}} = \frac{S \cdot \delta^{ВИЛ} \cdot Ц \cdot \gamma_{ЛУГ} \cdot \gamma_{ГРАН}}{c_{ЛУГ}}, \quad (10)$$

де  $\gamma_{ВАП}$  - частка СаО в цементному клінкері;  $\gamma_{ГРАН}$  – частка вапна, яка відповідає граничній (за руйнуванням) його кількості;  $\delta^{ВИЛ}$  – глибина зони вилуговування (руйнування).

Тривалість часу, протягом якого бутобетон або бутовий камінь вилуговуватиметься на глибину  $\delta^{ВИЛ}$

$$t_{ЕОП}^{ВИЛ} = \frac{V_{ЕП}^{ВИЛ}}{QE_{ЕОП}} = \frac{S \cdot \delta^{ВИЛ} \cdot Ц \cdot \gamma_{ВАП} \cdot \gamma_{ГРАН}}{c_{ВАП} \cdot S_{ПОР} \cdot V_{ЕОП}}, \quad (11)$$

де  $c_{ВАП}$  – розчинність вапна (1,3 г/л);  $S_{ПОР}$  – площа поперечного перерізу пор, м<sup>2</sup>.

Визначаючи  $S_{ПОР}$  через об'єм вапна, який вилуговується з цього об'єму

$$S_{ПОР} = \left[ \frac{V \cdot Ц \cdot \gamma_{ВАП} \cdot \gamma_{ГРАН}}{2 \cdot \rho^Ц} \right]^{0,67} \left[ \frac{\frac{КЗ}{М^3}}{\frac{КЗ}{М^3}} \right] = \frac{М^2}{М^3}, \quad (12)$$

і підставляючи  $V_B = S \cdot \delta^{ВИЛ} = 1 \cdot \delta^{ВИЛ}$  м<sup>3</sup> (при  $S = 1$  м<sup>2</sup>);  $Ц = 400$  кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{ВАП} = 0,65$ ;  $\gamma_{ГРАН} = 0,22$ ;  $c_{СаО} = 1,3$  г/л = 1,3 кг/м<sup>3</sup>;  $R^K = 0,44 \cdot R^{КГ} = 0,44 \cdot 2500 = 1100$  Å =  $0,11 \cdot 10^{-6}$  м (за середніми розмірами часток кристалогідратів портландиту, що розчиняється при вилуговуванні), то з урахуванням частоти проходження поїздів і глибини вилуговування  $\delta^{ВИЛ} = 0,5$  м (товщина в рівні води) довговічність складе  $T_{ЕОП}^{ВИЛ} = 23$  роки, що відповідає реальному терміну.

Розвинуто уявлення про структуру бутобетону і бутової кладки. Структура бутобетону, що складається з бутового каменя і звичайного бетону, є п'ятирівневою. В ній макрорівень представлений двома підрівнями – звичайний макрорівень, що визначається розмірами зерен щебеню і характеризується коефіцієнтом розсунення зерен щебеню  $\alpha$ , і верхній макрорівень, що визначається розмірами бутового каменя і характеризується коефіцієнтом розсунення зерен бутового каміння  $\alpha^{БК}$ ,  $\alpha^{ББ}$ .

Відповідні характеристики оптимальної структури для бутової кладки і бутобетону на макрорівні позначимо  $\alpha_{ОПТ}^{БК}$ ,  $\alpha_{ОПТ}^{ББ}$ , на мезорівні - як для звичайного бетону  $\mu_{ОПТ}$ , а на мікрорівні - оптимальним (В/Ц)<sub>ОПТ</sub>.

Оптимальний коефіцієнт розсунення бутового каменя в бутовій кладці представлений виразом

$$\alpha_{ОПТ}^{БК} = 2,1 \left[ 1 + \frac{\delta_P}{d^Б} \right]^3 - 1,1, \quad (13)$$

де  $\delta_P$  – середня товщина шару розчину на бутовому камені.

Для бутобетону коефіцієнт розсунення бутового каменя представлений виразом

$$\alpha_{ОПТ}^{ББ} = 2,1 \left[ 1 + \frac{d^{Ш}}{d^Б} \right]^3 - 1,1. \quad (14)$$

З урахуванням цих коефіцієнтів, а також відомих оптимальних коефіцієнтів розсунення зерен щебеню  $\alpha_{ОПТ}$  і піску  $\mu_{ОПТ}$ , розроблено способи визначення оптимального складу бутобетону, дрібнозернистого бетону для попередньо напружених залізобетонних міні-поясів, а також розчину для чеканки швів в

кам'яному облицюванні опори.

Сутність оптимізації складів бутобетону і бутової кладки полягає в забезпеченні на макро- і мезорівнях оптимальних значень коефіцієнтів розсунення бутового каменя  $\alpha_{\text{опт}}^{\text{ББ}}$ , зерен щебеню  $\alpha_{\text{опт}}$  і зерен піску  $\mu_{\text{опт}}$ , а на мікрорівні – оптимального водоцементного відношення  $(\text{В/Ц})_{\text{опт}}$ .

Розрахунок оптимальних складів дрібнозернистого бетону виконують в такому порядку:

$$\mu_{\text{опт}} = 2,1 \cdot \left[ 1 + \frac{d_{\text{ц}}}{d_{\text{п}}} \right]^3 - 1,1 \quad (15)$$

$$\Pi = \frac{1000}{\frac{\mu_{\text{опт}}}{\gamma_{\text{п}}} \Pi_{\text{ус}}^{\text{п}} + \frac{1}{\rho_{\text{п}}}} \quad (16)$$

$$\text{Ц} = \frac{1000 - \frac{\Pi}{\rho^{\text{п}}} - \Pi \cdot W^{\text{п}}}{\left[ \frac{\text{В}}{\text{Ц}} \right]_{\text{опт}} + \frac{1}{\rho^{\text{ц}}} \left[ 1 + \frac{\text{ПВА}}{\text{Ц}} \cdot \frac{\rho^{\text{ц}}}{\rho^{\text{ПВА}}} + \left[ \frac{\text{СП}}{\text{Ц}} \right]_{\text{опт}} \cdot \frac{\rho^{\text{ц}}}{\rho^{\text{СП}}} \right]} \quad (17)$$

$$\text{В} = \text{Ц} \cdot \left[ \frac{\text{В}}{\text{Ц}} \right]_{\text{опт}} + \Pi \cdot W^{\text{п}}; \text{ПВА} = \text{Ц} \cdot \frac{\text{ПВА}}{\text{Ц}}; \text{СП} = \text{Ц} \cdot \left[ \frac{\text{СП}}{\text{Ц}} \right]_{\text{опт}} \quad (18)$$

Розрахунок оптимального епоксидцементного складу для вклеювання сталевих арматурних стержнів в кам'яні блоки ґрунтується на тому, що при певній концентрації наповнювача спостерігається фібрилярна структура епоксидної смоли між частками наповнювача, що сприяє збільшенню міцності і густини полімеркомпозитів. Виходячи з цього, представлено оптимальний коефіцієнт розсунення часток цементу епоксидною смолою

$$(\lambda_{\text{ЕД}}^{\text{ц}})_{\text{опт}} = 2,1 \cdot \left[ 1 + \frac{\delta}{d_{50}^{\text{ц}}} \right]^3 - 1,1, \quad (19)$$

З урахуванням викладеного визначено, що оптимальне співвідношення  $\left[ \frac{\text{ЕД} + \text{ОТВ}}{\text{Ц}} \right]_{\text{опт}} = 1,05$ .

За цими даними визначено склад епоксидцементної композиції: Ц = 100 м.ч., ЕД-20 = 75 м.ч., затверджувач УП-583 = 25 м.ч., розчинник – до отримання необхідної в'язкості.

**У четвертому розділі** приведено результати експериментальних досліджень, направлених на перевірку основних теоретичних положень і складів для ремонту опори, визначених за допомогою розроблених способів.

Для експериментальної перевірки реальності деформацій повторюваної швидконатікаючої повзучості цементного каменю з нього були виготовлені зразки-призми 10×10×40 см з В/Ц = 0,4 природного твердіння, на яких за допомогою пристрою УРС визначали відносні деформації швидконатікаючої повзучості  $\varepsilon$  (рис. 3, рис. 4).



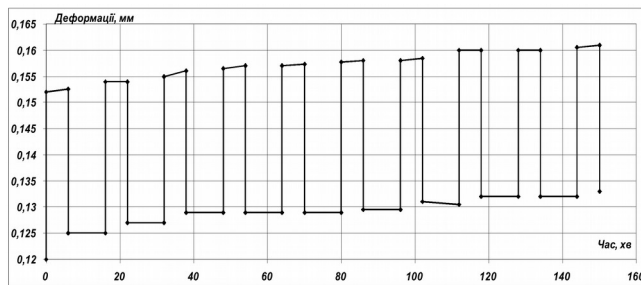


Рис. 3. Деформації повторюваної швидконатікаючої повзучості при стисканні зразків цементного каменю за 10 циклів навантаження

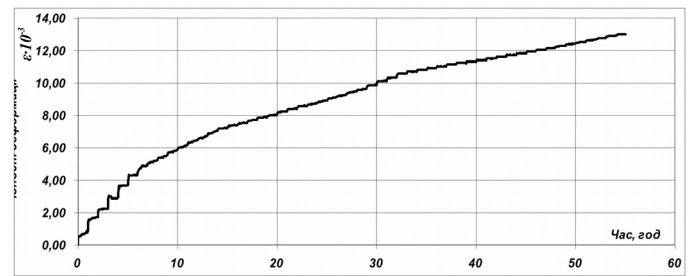


Рис. 4. Деформації повторюваної швидконатікаючої повзучості при стисканні зразків цементного каменю при багаторазовому періодичному навантаженні

Показано, що за 35 годин (приблизно 120 циклів повторюваного навантаження)  $\varepsilon \approx 0,011$ , що більше ніж у два рази перевищує відносну деформацію довготривалої повзучості  $\varepsilon_{ДП} = 0,0053$ .

Це підтверджує уявлення про механізм повторюваної швидконатікаючої повзучості цементного каменю і бутової кладки (бутобетону) і її визначальний вплив на тріщиноутворення в даних опорах.

Експериментальна перевірка впливу різниці температур в опорі на виникнення тріщин була виконана шляхом вимірювання температури на поверхні і всередині (на глибині 1,5 м) опори в різні місяці року. За результатами вимірювань визначено середні по місяцях температури і різниці температур зовні і всередині опори для верхньої і нижньої її частин. Максимальна різниця температур спостерігалася в грудні місяці ( $-10,5$  °C). Відповідна розрахункова відносна температурна деформація розтягування в кам'яному облицюванні не перевищує величину, що на порядок менше граничної деформації розтягування для бетону -  $\varepsilon_{ГРАН} = (10 \div 15) \cdot 10^{-5}$  і розчину. Це свідчить про дуже малу ймовірність виникнення тріщин в кам'яному облицюванні за рахунок різниці температур зовні і всередині нього.

Для перевірки гіпотези про вплив струмів витоку на процес корозійного руйнування бетону за спеціально розробленою методикою було виміряно електричні потенціали на конструкціях металевої ферми  $U_{Ф-З}$  по відношенню до землі, на рейках  $U_{Р-Ф}$  по відношенню до ферми, на опорі по відношенню до землі  $U_{ОП-З}$  і інших конструкціях моста. За даними вимірювань потенціали виникають лише під час проходження електропоїздів по мосту.

Потенціал на рейках  $U_{Р-Ф}$  завжди позитивний. Його максимум досягає 23 В. Потенціал на опорі – негативний і його максимум  $|U_{ОП-З}|$  досягає  $-18$  В, що підтверджує правильність припущення про істотний вплив струмів витоку в опорі на виникнення тріщин в них.

Для оцінки можливості корозійного руйнування досліджуваної опори за приблизно 100 років її експлуатації була визначена безнапірна водопроникність зразків розчину, добутих з глибини опори 1,5 м і з швів кам'яного облицювання з глибини 18 см.

За результатами вимірювань безнапірна водопроникність розчину  $W_P = 3 \cdot 10^{-5} \frac{CM}{C}$ , а водопроникність бутової кладки  $W_{КЛ} = 4,9 \cdot 10^{-4} \frac{CM}{C}$ . Як бачимо,

водопроникність самої бутової кладки в 16 разів більше її розчину, що свідчить про наявність в бутовій кладці тріщин.

За цими даними була визначена тривалість вилуговування всього СаО з розчину бутової кладки, яка становить  $\Delta\tau = 22000$  років.

Тривалість вилуговування всього вапна з розчину швів кам'яного облицювання  $\Delta\tau = 159$  років, а небезпечної кількості вапна (22 %)  $\Delta\tau = 35$  років.

Як бачимо, повне руйнування опори за рахунок вилуговування всього вапна з розчину бутової кладки і швів кам'яного облицювання практично не могло відбуватися.

Обстеження підтвердило це, показавши, що повне вилуговування розчину на всю глибину облицювання (залишився один пісок) відбувалося в швах кам'яного облицювання лише в зоні тріщин, а в глибині бутової кладки (судячи з добутих зразків) спостерігається лише сильна карбонізація розчину (білого кольору) - також в зоні тріщин.

Розрахункова тривалість вилуговування в тріщинах швів кам'яного облицювання в цьому випадку складає  $\Delta\tau = 4,5$  роки, а тривалість вилуговування небезпечної кількості вапна  $\Delta\tau = 1$  рік (22 %), що відповідає реальності.

Отже, першопричиною руйнування опор з бутовою кладкою і кам'яним облицюванням є утворення в опорі тріщин (як у кам'яному облицюванні, так і в глибині опори) і вилуговування розчину в них з карбонізацією розчину в глибині бутобетону і в швах облицювання.

Для додаткової перевірки цього висновку виконано фізико-хімічні дослідження методами термографії (ТГ), інфрачервоної спектроскопії (ІЧС), рентгенографії (РГ) і електронної мікроскопії (ЕМС).

Усі чотири методи (ДТА, ІЧС, РГ і ЕМС) показали, що в цементному камені розчину на глибині бутової кладки близько 1,5 м міститься невелика кількість портландиту, кальциту як результат карбонізації портландиту і високодисперсна гідросилікатна фаза. Крім того, є ділянки з сильним вилуговуванням і карбонізацією, які прилягають до глибоких (зона до 1 см) тріщин в опорі, що обумовлено проходженням вуглекислого газу тріщинами в опорі.

Експериментальна перевірка дрібнозернистого бетону оптимального складу, що використовується для виготовлення попередньо напружених міні-поясів, виконана на зразках  $4 \times 4 \times 16$  см за залежностями їх міцності від коефіцієнтів розсунення зерен піску  $\mu$  (при постійному В/Ц = 0,36) і від В/Ц (при постійному  $\mu_{опт} = 2,7$ ).

В результаті виявлено, що залежність міцності при стисканні від  $\mu$  при постійному В/Ц має два екстремуми - при  $\mu = 2,7$  і  $\mu = 1,6$ . Більший за величиною екстремум є оптимальним ( $\mu_{опт} = 2,7$ ).

На відміну від відомої залежності міцності при стисканні і вигині цементного каменю від В/Ц, де виявляється один оптимум міцності при В/Ц = 0,23, для зразків дрібнозернистого бетону виявляються два екстремуми - при В/Ц = 0,3 і В/Ц = 0,4, рис.5.

Зміщення першого екстремума, очевидно, пов'язано з водопоглинанням  $W^II$  піску. З урахуванням цього оптимальними є  $(В/Ц)_{ст} = 0,22$  и  $В/Ц = (В/Ц)_{ст} + W^II/Ц = 0,3$ .

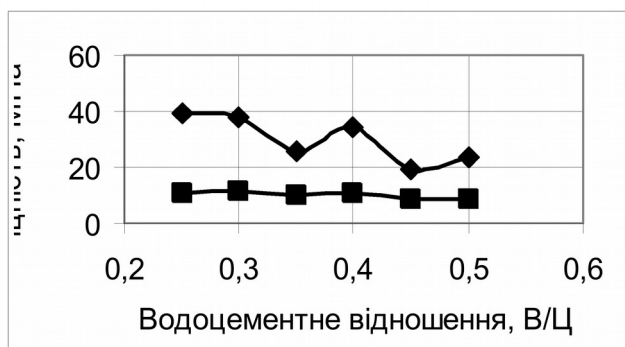


Рис. 5. Залежність міцності при стисканні (верхня крива) і вигину (нижня крива) від В/Ц дрібнозернистого бетону складу П+Ц+В на 28 добу твердіння у воді

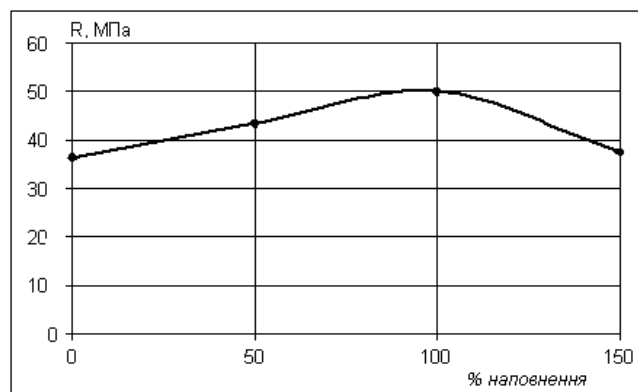


Рис. 6. Змінення міцності епоксидцементної композиції від ступеня її наповнення

Перевірка правильності уявлень про оптимальну структуру епоксидцементної композиції, що використовується для закріплення арматури попередньо напружених міні-поясів, здійснювалася за міцністю і на висмикування арматурних стержнів з бетонних зразків, рис. 6. Отримана залежність має екстремальний характер з оптимумом при кількості наповнювача 100%, що близько до розрахункового оптимального складу і підтверджує правильність уявлень про оптимальну структуру композиції.

**У п'ятому розділі** на основі проведених експериментальних досліджень розроблено технологію влаштування армокам'яних швів і поясів, виготовлення попередньо напружених залізобетонних міні-поясів з використанням високоміцної дротяної арматури класа Вр-1400-1 діаметром 3 мм, а також герметизації опори за допомогою розроблених матеріалів оптимальних складів. Для запобігання подальшому розвитку тріщин необхідно влаштовувати армокам'яний пояс, що перекидає всі горизонтальні шви в ряду кам'яного облицювання.

Для улаштування попередньо напружених залізобетонних міні-поясів розроблено спеціальний пристрій для натягнення струнопакета (натяжний пристрій). Натягнення струнопакета виконується за допомогою механічного нарізного з'єднання, також розробленого в процесі проведення дисертаційних досліджень.

Для усунення руйнуючої дії струмів витоку на бутову кладку і кам'яне облицювання опори запропоновано захищати підводну частину опори екраном типу "бетон в сталевій обоймі". Сутність такого захисту полягає в тому, що продукти корозії цементного каменю в бутовій кладці і бутобетоні ядра, а також в швах підводної частини опори не зможуть бути винесеними через непроникну сталеву обойму у водоймище. Це усуне і струми витоку через опору, які протікають через електроліт капілярів цементного каменю, що є провідником II роду.

**У шостому розділі** приведено дані експлуатаційних випробувань і впровадження результатів досліджень. Впровадження проводилося протягом 2000-2006 р.р. за узгодженням з Укрзалізницею і Південною залізницею на чотирьох опорах залізничного моста через р. Сіверський Донець на 284-му кілометрі електрифікованої постійним струмом ділянки Зміїв-Занки Південної залізниці.

Результати досліджень впроваджені також: при капітальному ремонті фундаменту під одну з вказаних опор; у комплексі ремонтних робіт попередньо напруженої залізобетонної прогонової споруди залізничного моста поблизу м. Суми, а також залізничного моста поблизу м. Гребінка Південної залізниці; при розробці нормативної документації - галузевої методики по ремонту мостових опор; при розробці рекомендацій Міжнародної організації співробітництва залізниць ОСЗ; при проведенні навчального процесу в УкрДАЗТ.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу і розрахунків сформульована гіпотеза про причини виникнення тріщин і руйнування бутової кладки кам'яного облицювання мостових опор в результаті деформацій довготривалої і швидконатікаючої повзучості під впливом механоелектричних дій при постійному і повторюваному навантаженні від поїздів, що проходять по мосту, а також струмів витоку через опору на електрифікованих ділянках залізниць.

2. Розвинуто теоретичні уявлення і розроблено відповідні фізико-математичні моделі, що описують:

- механізм горизонтального тиску на кам'яне облицювання опори від вертикального навантаження та коефіцієнт бічного тиску  $\gamma_b$ , що безперервно зростає під час дії аж до  $\gamma_b = 1$ ;

- механізм повторюваної швидконатікаючої повзучості і залишкових деформацій від неї для цементного каменю в бутовій кладці, які обумовлені витискуванням під впливом навантаження рідкої фази з прошарків між частками гідросилікатного гелю, стисненням подвійних електричних шарів і виникненням відштовхуючих електростатичної і структурної складових розклинювального тиску між цими частками;

- механізм виникнення електроосмотичного перенесення і розтягуючого напруження в капілярах цементного каменю бутової кладки, при якому відбувається розчинення кристалогідратних утворень цементу, їх дифузійне перенесення до поверхні опори і стікання в результаті обмивання природними водами.

3. Запропоновано розглядати структуру бутової кладки, як п'ятирівневу, в якій макрорівень представлений двома підрівнями – нижнім, який визначається розмірами зерен крупного заповнювача і характеризується коефіцієнтом розсунення зерен, і верхнім підрівнем, який визначається розмірами бутового каменя. Вперше представлені і визначені величини характеристик ефективної структури для бутової кладки і бутобетону на верхньому підрівні у вигляді оптимального коефіцієнта розсунення бутового каменя.

4. Розроблено способи розрахунку і визначено оптимальні склади бутової кладки і бутобетону, дрібнозернистого бетону для попередньо напружених залізобетонних міні-поясів, цементно-піщаного розчину для чеканки швів в кам'яному облицюванні опори, а також епоксичементної композиції для фіксації сталевих арматурних стержнів в кам'яних блоках.

Сутність оптимізації складів бутобетону і бутової кладки полягає в забезпеченні оптимальних значень структурних характеристик на різних рівнях -

коефіцієнтів розсунення бутового каменя  $\alpha_{OPT}^{BB}$  і зерен піску  $\mu_{OPT}$ , які визначаються за розмірами бутового каменя і зерен піску, оптимального водоцементного відношення  $(В/Ц)_{OPT}$ , оптимальної кількості добавки-суперпластифікатора  $(СП)_{OPT}$ , які визначаються експериментально, і оптимального співвідношення епоксидної смоли до наповнювача, яке визначається за розмірами часток наповнювача, при яких досягаються максимальні міцність, водонепроникність і тріщиностійкість складів.

5. Визначено експериментально величини залишкових деформацій повторюваної швидконатікаючої повзучості цементного каменя ( $\epsilon_{ШП} = 0,0025$  за один цикл), різниці температур всередині і зовні опори (до 12 °С), величини електричних потенціалів на поверхні опори (близько 18 В), безнапірної водопроникності зразків розчину з бутової кладки і швів кам'яного облицювання ( $W_p = 3 \cdot 10^{-5} \frac{CM}{C}$ ,  $W_{кл} = 4,9 \cdot 10^{-4} \frac{CM}{C}$ ), а також виконано їх фізико-хімічні дослідження (рентгенографічні, інфрачервоно-спектроскопічні, термографічні і електронно-мікроскопічні). Дослідження підтвердили, що основними чинниками виникнення тріщин і руйнування опори є довготривала і швидконатікаюча повзучість, а також електроосмотичне перенесення ЕОП в тріщинах опори від струмів витоку.

6. Виконано експериментальну перевірку міцності дрібнозернистого бетону оптимального складу ( $R_{ст} = 42,3$  МПа), а також полімеркомпозиційного складу для закладення арматурних стержнів ( $R = 50$  МПа), яка підтвердила правильність методики визначення оптимальних структурних характеристик і складів цих матеріалів.

7. Розроблено конструкцію армокам'яного шва і пояса для підсилення сильно пошкоджених опор з тріщинами, виготовлено дослідний зразок пристрою для натягнення струнопакетів у попередньо напружених міні-поясах.

8. Надано пропозиції по захисту мостової опори від руйнуючої дії струмів витоку за допомогою екрана типу "бетон в сталевій обоймі".

9. Результати досліджень пройшли виробничі випробування і впроваджені в 2000-2006 р.р. на чотирьох опорах залізничного мосту через р. Северській Донец на 284-му км електрифікованої постійним струмом ділянки Зміїв-Занки Південної залізниці; при капітальному ремонті фундаменту під одну з вказаних опор; в комплексі ремонтних робіт попередньо напруженої залізобетонної прогонової споруди залізничних мостів поблизу м. Суми і м. Гребінка Південної залізниці. Створено і затверджено Мінтрансом України відомчі нормативно-інструктивні документи. Матеріали дисертації використовуються в навчальному процесі при підготовці спеціалістів і магістрів за фахом 7.092101 «Промислове і цивільне будівництво» та 7.100502 «Залізничні споруди та колійне господарство».

#### **Основні результати дисертації викладені в роботах:**

1. Лютий В.А. Вплив пульсуючого навантаження на проміжні опори залізничних мостів / Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: Зб. наук. Праць // Харків: УкрДАЗТ, 2006.- Вип. 77.- С. 138 -145.
2. Повышение долговечности массивных бутобетонных опор с каменной облицовкой / С.В. Мирошниченко, В.А. Лютый // Автомобільні дороги і дорожнє

- будівництво. – Київ: Київоргбуд, 2006. Вип. 73. – С. 225-228. (Особистий внесок здобувача – брав участь у впровадженні та складанні розділу про захист опори за допомогою екрана типу “бетон в сталевій обоймі”).
3. Підсилення попередньо напружених прогонових споруд за допомогою клеє-анкерних струнопакетів / А.М.Плугін, С.В.Мірошніченко, В.А.Лютий // Зб.наук. праць. - Харків: УкрДАЗТ, 2004. - Вип. 63. - С. 156-163. (Особистий внесок здобувача – виготовлення пристрою для натягнення струнопакетів).
  4. Физико-математические модели долговременной ползучести и безнапорной водопроницаемости цементного камня и бетона / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко, С.Н.Кудренко, А.В.Никитинский, В.А.Лютый // Зб. наук. праць. Серія «Технічні науки».- Луганськ: ЛНАУ, 2004.- №40(52). - С.145-154. (Особистий внесок здобувача – виконав аналіз літературних даних про взаємозв'язок повзучості з В/Ц).
  5. Нова технологія ремонту кам'яних опор з силовими тріщинами / А.М. Плугін, С.В.Мірошніченко, О.А.Калінін, А.А.Плугін, В.К.Бабенко, А.В.Никитинський, В.А.Лютий // Питання підвищення надійності залізничної колії та інженерних споруд: Зб. наук. праць. - Харків: ХарДАЗТ, 2001.- Вип.48.- С. 4-10. (Особистий внесок здобувача – експериментальні дослідження, пов'язані із закладенням арматурних стержнів в кам'яні блоки).
  6. Електрокоррозия железобетонных мостов и других искусственных сооружений / А.Н. Плугин, А.А.Скорик, А.А.Плугин, С.В.Мирошниченко, О.А.Калинин, И.В.Подтележникова, О.С.Герасименко, В.А.Лютый // Залізничний транспорт України. - 2004.- №1.- С. 11-13. (Особистий внесок здобувача – аналіз процесів протікання струмів витіку через мостову опору).
  7. Долговременная ползучесть бетона и напряженно-деформированное состояние железобетонных изделий и конструкций / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, С.Н.Кудренко, О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко, Л.В.Трикоз, А.В.Никитинский, В.А.Лютый // Зб.наук. праць.- Харків: ХарДАЗТ, 2004. - Вип. 63. - С. 5-47. (Особистий внесок здобувача – результати експериментів по визначенню деформацій зразків при короткочасному навантаженні).
  8. Экспериментальное определение потенциалов в конструкциях железнодорожных мостов на электрифицированных участках пути / А.Н. Плугин, Д.А. Плугин, В.А. Лютый, И.В. Подтележникова, О.С. Борзяк, А.А. Плугин // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Київ: Київоргбуд, 2006. - Вип. 73. – С. 253-257. (Особистий внесок здобувача – виконання вимірювань електропотенціала на опорі).
  9. Проектирование долговечности конструкций и сооружений из бетона на основе физико-химических моделей / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.С.Борзяк О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко, Д.А. Плугин, В.А.Лютий, А.В.Никитинський // Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa. - Ольштин, Польша, 2006.- С. 143-152. (Особистий внесок здобувача – виконання розрахунків, пов'язаних з довговічністю опор).
  10. Спосіб визначення складу важкого бетону з мінеральним наповнювачем. / А.М.Плугін, О.А.Калінін, С.В.Мірошніченко, А.А.Плугін, Арт.М.Плугін, С.М.Кудренко, І.В.Подтележникова, О.С.Герасименко, В.А.Лютий,

А.В.Никитинський.- Патент UA 71122.- Опубл.15.06.2006.- Бюл.№6. (Особистий внесок здобувача – брав участь у виконанні експериментів).

11. Суперпластифікована цементно-водяна суспензія СПЦВС для цементації гірських порід і будівельних конструкцій: Заявка №20031210920. Україна. МПК 7 C04B28/12 / А.М.Плугін, Арт.М.Плугін, О.А.Калінін, С.В.Мірошніченко, А.А.Плугін, Д.В.Шумик, Д.А.Плугін, А.В.Никитинський, В.А.Лютий, М.Д.Костюк.- Опубл.15.11.2004.- Бюл.№11. (Особистий внесок здобувача – запропонування оцінювати в'язкість цементно-водних складів з невисоким В/Ц за величиною, зворотною розпливу конуса).
12. Спосіб визначення складу високоміцного, тріщиностійкого і водонепроникного бетону / А.М. Плугін, О.А.Калінін, С.В.Мірошніченко, А.А.Плугін, С.М.Кудренко, В.А. Лютий, А.В.Никитинський, І.В.Подтележнікова, Г.О.Линник, М.Д.Костюк, В.О.Яковлев. - Патент UA 62613. Опубл.15.12.2003. - Бюл.№12. (Особистий внесок здобувача – виконання експериментів з вивчення залежності міцності цементнопіщаних розчинів від  $\mu$  та В/Ц).

## АНОТАЦІЯ

**Лютий В.А. Повторювана швидконатікаюча повзучість бутової кладки мостових опор під механоелектричною дією.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали і вироби. – Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2007.

Дисертація присвячена дослідженню повторюваної швидконатікаючої повзучості і струмів витоку на електрифікованих постійним струмом ділянках залізничних ліній, а також розробці нових матеріалів, виробів і технологій з метою подовження довговічності бутобетонних або з бутової кладки з кам'яним облицюванням мостових опор.

Показано, що повторювана швидконатікаюча повзучість бутобетону або бутової кладки опори, а також електроосмотичний потік ЕОП які виникають при проходженні по мосту електропоїздів викликають появу тріщин в опорі і інтенсивне вилуговування цементу в зонах, прилеглих до тріщин.

Розроблено способи розрахунку і визначено оптимальні склади бутової кладки і бутобетону, дрібнозернистого бетону, розчину для чеканки швів в кам'яному облицюванні опори, а також епоксичементної композиції, розроблено армокам'яний шов і пояс, попередньо напружений залізобетонний міні-пояс для підсилення сильно пошкоджених опор з тріщинами, пропозиції по захисту мостової опори екраном типу “бетон в сталевій обоймі”.

Результати досліджень пройшли виробничі випробування і впроваджені при капітальних ремонтах залізничних мостів Південної залізниці, при розробці нормативної документації і проведенні навчального процесу в УкрДАЗТ.

**Ключові слова:** Опора, бутобетон, довготривала, повторювана, швидконатікаюча, повзучість, струм витоку, міцність, пояс, струнопакет.

## АННОТАЦІЯ

**Лютый В.А. Повторяющаяся быстронатекающая ползучесть бутовой кладки мостовых опор при механоэлектрических воздействиях.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2007.

Диссертация посвящена исследованию повторяющейся быстронатекающей ползучести от динамической нагрузки поездов, фильтрации воды через тело опоры и токов утечки на электрифицированных постоянным током участках железнодорожных линий, а также разработке новых материалов, изделий и технологий с целью обеспечения высокой несущей способности и продления долговечности бутобетонных или из бутовой кладки с каменной облицовкой мостовых опор.

Показано, что вертикальная нагрузка (пролетного строения и подвижного состава) приводит к возникновению долговременной, а также повторяющейся натекающей ползучести бутобетона или бутовой кладки, которые оказывают горизонтальное давление на каменную облицовку, вызывая возникновение трещин в ней. Возникающие при прохождении по мосту электропоездов токи утечки приводят к возникновению электроосмотического потока ЭОП, что в свою очередь приводит к интенсивному растворению кристаллогидратных продуктов гидратации цемента в зонах, прилегающих к трещинам.

Развиты представления о структуре бутовой кладки, являющейся пятиуровневой, в которой макроуровень представлен двумя подуровнями – обычный макроуровень, определяемый размерами зерен щебня и характеризуемый коэффициентом раздвижки зерен щебня  $\alpha$ , и верхний макроуровень, определяемый размерами бутового камня.

Впервые представлены структурные характеристики для бутовой кладки и бутобетона на макроуровне - коэффициент раздвижки бутового камня в бутовой кладке и бутобетоне.

Разработаны способы расчета и определены оптимальные составы бутовой кладки и бутобетона, мелкозернистого бетона для преднапряженных железобетонных мини-поясов, раствора для чеканки швов в каменной облицовке опоры, а также эпоксидцементного состава для вклеивания стальных арматурных стержней в каменные блоки.

Наряду с известными структурными характеристиками (коэффициент раздвижки зерен песка  $\mu_{опт}$ , оптимальное водоцементное отношение  $(В/Ц)_{опт}$ , оптимальное количество добавки-суперпластификатора  $(СП)_{опт}$ ) обоснованы новые – оптимальные коэффициенты раздвижки бутобетона  $\alpha_{опт}^{ББ}$  и бутового камня  $\alpha_{опт}^{БР}$ , и оптимальное соотношение эпоксидной смолы к наполнителю

$$\left[ \frac{ЭД + ОТВ}{Ц} \right]_{опт}$$

Выполнены экспериментальные исследования величин остаточных деформаций повторяющейся быстронатекающей ползучести цементного камня, разности температур внутри и снаружи опоры, величин электрических потенциалов на опоре одного из железнодорожных мостов Южной железной



дороги, максимальная величина которых достигла 18 В, безнапорной водопроницаемости образцов раствора из бутовой кладки, извлеченных с глубины опоры 1,5 м, и раствора швов каменной облицовки.

Проведены физико-химические исследования (рентгенографические РГ, инфракрасно-спектроскопические ИКС, термографические ТГ и электронно-микроскопические ЭМС) цементного камня из раствора бутовой кладки на глубине до 1,5 м и из швов каменной облицовки, которые подтвердили, что раствор в бутовой кладке подвержен значительному выщелачиванию, карбонизации и разрушению лишь на участках, прилегающим к трещинам, в том числе глубоким.

Выполнена экспериментальная проверка прочности мелкозернистого бетона для преднапряженного железобетонного мини-пояса, а также эпоксицементной композиции для заделки арматурных стержней.

Разработаны армокаменный шов и пояс, преднапряженный железобетонный мини-пояс для усиления сильно поврежденных опор с трещинами, натяжное устройство для натяжения струнопакетов в предварительно напряженных мини-поясах, предложения по защите мостовой опоры от разрушающего действия токов утечки с помощью экрана типа "бетон в стальной обойме".

Результаты исследований прошли производственные испытания и внедрены при капитальных ремонтах четырех опор железнодорожного моста через р. Северский Донец, фундамента под одну из указанных опор, преднапряженного железобетонного пролетного строения железнодорожного моста вблизи г. Сумы, а также железнодорожного моста вблизи г. Гребенка Южной ж.д., при разработке нормативной документации и проведении учебного процесса в УкрГАЗТ.

**Ключевые слова:** Опора, бутобетон, долговременная, повторяющаяся, быстронатекающая, ползучесть, ток утечки, прочность, пояс, струнопакет.

## ABSTRACT

**Lutiy V.A. Repeating quickflow creep of rubble laying of bridge support at mechano-electrical influences.**

The dissertation on reseption of a scientific degree of Cand. Tech. Sci. on a speciality 05.23.05 – buildsng materials and products. – Ukrainian state academy of a railway transport, Kharkov, 2007.

Dissertation is devoted to research of repeating quickflow creep and currents of loss on the electrified by a direct current areas of railway lines, and also development of new materials, products and technologies with the purpose of extension of durability of rubble concrete or from the rubble laying with stonefasing of bridge bearing.

It is shown, that arising up at passing on the bridge of electric trains repeating quickflow creep of rubble concrete or from the rubble laying of bearing, and also the electro-osmotic flux EOF causes emergence of cracks in it and intensive leaching of cement in areas adjoining to the cracks.

The methods of calculation are developed and determined optimal compositions of the rubble laying and rubble concrete, fine-grained concrete, mortar for the coinage of stonefasing of bearing, and also epoxycement composition, an reinforced stone stitch and belt is developed, prestressed reinforced concrete mini- belts for strengthening of the strongly damaged bearings with cracks, suggestions on defence of bridge bearing by the

screen of type concrete in steel ring.

The results of researches passed the production tests and are introduced at rebuilding of railway bridges of the South railway, at development of normative document and conducting of educational process.

**Keywords:** Bearing, rubble concrete, long-time, repeating, quickflow, creep, current of loss, durability, belt, stringpaket.