

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Фірсов Павло Михайлович



УДК 621.792.05:691.588:621.792.4

**КОРОТКОЧАСНА МІЦНІСТЬ ТА НАПРУЖЕНО-  
ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН КЛЕЙОВИХ СТАЛЕБЕТОННИХ  
З'ЄДНАНЬ НА АКРИЛОВИХ МОДИФІКОВАНИХ КЛЕЯХ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті міського господарства імені О.М. Бекетова Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, доцент  
**Золотов Сергій Михайлович,**  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О.М. Бекетова,  
доцент кафедри будівельних конструкцій.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Лапенко Олександр Іванович,**  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри  
комп'ютерних технологій будівництва;

кандидат технічних наук,  
**Горб Олександр Григорович,**  
Полтавський національний технічний  
університет імені Юрія Кондратюка,  
старший викладач кафедри будівельної  
і теоретичної механіки.

Захист дисертації відбудеться 20 грудня 2018 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

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

Автореферат розісланий 15 листопада 2018 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент



О.В. Лобяк

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність роботи.** В наш час основними видами кріплень виробничого устаткування та технологічних комунікацій до бетонних і залізобетонних конструкцій виступають анкерні з'єднання. Існують певні типи бетонних/залізобетонних конструкцій, де улаштування анкерних кріплень категорично не рекомендується. Це стосується монолітних залізобетонних перекриттів та покриттів будівель і споруд. Проблема розробки безанкерних з'єднань стала особливо актуальною для технічного персоналу мобільних операторів зв'язку при монтажі інженерних приладів. Для належного функціонування мережі мобільного та Інтернет-покриття елементи технологічного устаткування (базові станції, трубовійки, антени) монтується на покрівлю багатопверхових будівель. При відмові на проведення анкерувальних робіт в залізобетонному покритті будівлі, проектується кріплення за допомогою розвантажувальних рам, розпірок, відтяжок і кронштейнів, що призводить до суттєвого підвищення загальної трудомісткості монтажних робіт та до додаткової витрати металу. У багатьох випадках виникає необхідність у проектуванні спеціальних фундаментів або парапетів для кріплення розвантажувальних рам. Ці конструкції передають суттєве додаткове навантаження на покриття, на яке воно не було заздалегідь розраховано.

Безанкерні клейові сталобетонні з'єднання є одним з перспективних напрямків в сучасному новому будівництві, реконструкції, капітальному ремонті будівель і споруд та кріпленні виробничого устаткування. Кріплення за цим методом здійснюється за допомогою склеювання кріпильних вузлів або безпосередньо опорних частин устаткування з бетонною поверхнею різноманітних конструкцій. Використання клеїв для вказаних цілей дозволяє значно скоротити терміни будівництва та реконструкції будівель і споруд, зменшити трудовитрати і матеріаломісткість робіт. Тому робота з розроблення безанкерних клейових сталобетонних з'єднань є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова згідно із координаційним планом Міністерства освіти і науки України, завдання 21 "Створення нових технологій, методів організації та механізації будівельних процесів, що забезпечують ефективність будівництва та модернізацію будівель і споруд" (№ ДР 0111U006207).

**Мета дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає в комплексному дослідженні напружено-деформованого стану та міцності клейових безанкерних з'єднань сталі з бетоном при короткочасному довільному навантаженні, в якому всебічно розглядається питання несучої здатності кріплення сталь-клей-бетон на акрилових модифікованих композиціях при дії на кріпильний вузол різних видів руйнуючих зусиль, а також вплив різних конструктивних і технологічних параметрів.

**Наукова гіпотеза.** Робочою гіпотезою передбачено використання в будівельній галузі безанкерного клейового кріплення конструктивних

елементів на заміну анкерним з'єднанням. Даний метод монтажу кріпильних вузлів має ряд певних потенційних переваг, які полягають в тому, що для їх установки не потрібні значні трудовитрати для улаштування з'єднань, розбирання бетону, буріння свердловин, улаштування хомутів тощо, чим досягається істотна економія матеріальних ресурсів.

#### **Завдання дослідження:**

- за допомогою чисельних експериментальних випробувань комплексно дослідити короткочасну міцність безанкерних клейових з'єднань сталі з бетоном на акрилових модифікованих клеях при впливі центрально-докладених та позацентрово-докладених зусиль відриву, зусиль зсуву, сумісної дії зусиль відриву та зсуву, сумісної дії згинального моменту та зусиль зсуву, сумісної дії крутного моменту та зусиль зсуву;

- експериментально дослідити вплив різних конструктивних і технологічних параметрів (геометрія кріплення, висота клейового шва, клас бетону, підготовка бетонної поверхні до склеювання тощо) на міцність безанкерного клейового сталобетонного з'єднання;

- перевірити міцність безанкерного клейового сталобетонного з'єднання на витривалість при багаторазово повторюваних динамічних навантаженнях;

- математично змодельювати процес деформування безанкерного клейового сталобетонного з'єднання при дії різних видів руйнуючих зусиль;

- розробити конструктивні вузли кріплення виробничого устаткування та технологічних комунікацій, а також відповідний метод інженерного розрахунку даних з'єднань при дії різних видів руйнуючих зусиль.

**Об'єкт дослідження** – несуча здатність та граничний стан клейових вузлів кріплення опорних частин виробничого устаткування, що з'єднані з бетонною основою акриловими композиціями без застосування анкерування, при впливі різних видів навантажень.

**Предмет дослідження** – короткочасна міцність та напружено-деформований стан безанкерних клейових сталобетонних з'єднань на акрилових модифікованих клеях в залежності від дії різного виду руйнуючих зусиль і конструктивних особливостей опорних вузлів кріплення.

**Методи дослідження** - експериментальні методи оцінки напружено-деформованого стану та несучої здатності клейових сталобетонних з'єднань; методи теоретичної і будівельної механіки для дослідження напружено-деформованого стану клейових безанкерних з'єднань сталі з бетоном при короткочасному довільному навантаженні; методи математичної статистики при підготовці та проведенні експериментальних досліджень; метод скінченних елементів для чисельної реалізації та верифікації результатів випробувань; порівняння та аналіз результатів дослідження.

**Достовірність і обґрунтованість одержаних результатів.** Достовірність наведених в дисертаційній роботі положень, висновків, рекомендацій, теоретичних розрахунків і експериментальних даних підтверджується повторенням і узгодженістю результатів багатопланового експерименту, проведеного в однакових умовах, стандартними і оригінальними методами

фізико-механічних випробувань, а також застосуванням комплексу методів математичного аналізу.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

*Вперше встановлено (розроблено):*

- математичну модель напружено-деформованого стану безанкерного клейового з'єднання для трьох шарів (сталеві пластина, клейового шва та бетонної основи) при осесиметричному довільному навантаженні;
- експериментальну залежність міцності клейового сталобетонного з'єднання від дії різних видів руйнуючих зусиль, конструктивних особливостей кріплення, фізико-механічних властивостей бетону і технологічних параметрів;
- безаварійне конструктивне застосування безанкерного клейового кріплення виробничого устаткування та технологічних комунікацій, як на горизонтальних, так і на вертикальних поверхнях бетонних та залізобетонних будівельних конструкцій;
- метод інженерного розрахунку безанкерних клейових кріплень сталі з бетоном, при дії різних видів руйнуючих зусиль.

*Набуло подальшого розвитку:*

- уявлення про особливості сумісної роботи конструктивних з'єднань сталь-клей-бетон під впливом різних видів навантажень;
- методики з розрахунку несучої здатності та оцінки напружено-деформованого стану клейових сталобетонних з'єднань.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у застосуванні безанкерного клейового кріплення при монтажі виробничого устаткування та технологічних комунікацій за рахунок встановлення короточасної та втомної міцності клейового сталобетонного з'єднання на акрилових модифікованих клеях. Результати роботи дозволяють виконувати інженерний розрахунок даного типу кріплень і конструювання клейового з'єднання сталі з бетоном при дії на нього різних видів навантажень.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені на базі промислових підприємств м. Харкова (БК “Укрпромбуд”, ТОВ “Будцентр Витязь”, ТОВ “Будівельник”), де, згідно запропонованих інженерних розрахунків, проведено безанкерне клейове кріплення різного промислового обладнання та переоснащення силових електроліній. При реалізації вказаних дослідно-промислових впроваджень досягнутий і розрахований економічний ефект (в середньому 75 грн/м<sup>2</sup>, без урахування ринкової вартості витратних матеріалів) від застосування розробленого кріплення, в порівнянні з анкеруванням, за рахунок економії матеріальних ресурсів, зниження термінів виробництва, а також спрощення виконання будівельних робіт.

Результати дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі ХНУМГ ім. О.М. Бекетова при підготовці бакалаврів за спеціальністю 192 “Будівництво та цивільна інженерія” у складі нормативних дисциплін (цикл дисциплін професійної підготовки).

**Особистий внесок здобувача.** Огляд літератури та існуючих конструкцій кріплень за тематикою дослідження, більшість лабораторних механічних

випробувань та наступні розрахунки, статистична обробка їх результатів і отримання експериментальних залежностей, натурні дослідження, розроблення скінченно-елементних моделей в середовищі ПК “ЛІРА 10” (ліцензія № 1/1095) та ПК “ANSYS Academic Student”, впровадження результатів досліджень на промислові підприємства та формулювання висновків виконані автором особисто. Особистий внесок автора в спільні публікації відображено в переліку опублікованих робіт.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні результати дисертаційного дослідження доповідались на VI Міжнародній науково-технічній Інтернет-конференції “Будівництво, реконструкція і відновлення будівель міського господарства” (Харків, ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 25 листопада-25 грудня 2014 р.); форумі молодих вчених “Young researchers in the global world: vistas and challenges” (Харків, ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 25-26 травня 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Perspective trends in scientific research” (Словацька Республіка, Братислава, Academic Society of Michal Baludyansky, 17-22 жовтня 2015 р.); VII Міжнародній науковій конференції “Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд” (Харків, ХНУБА, 20-21 жовтня 2015 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій” (Тернопіль, ТНТУ ім. Івана Пулюя, 25-26 листопада 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Build Master Class” (Київ, КНУБА, 16-18 листопада 2016 р.); VI Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті” (Харків, УкрДУЗТ, 19-21 квітня 2017 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції “Актуальні проблеми інженерної механіки” (Одеса, ОДАБА, 16-19 травня 2017 р.); III Міжнародній науково-технічній конференції “Ефективні технології в будівництві” (Київ, КНУБА, 28-29 березня 2018 р.); звітних науково-практичних конференціях ЛНАУ (Харків, ЛНАУ, 8-9 листопада 2016 р., 21-23 лютого 2017 р., 20-23 лютого 2018 р.).

**Публікації.** Основні положення і наукові результати дисертаційної роботи опубліковано у 21 науковій праці, з них 5 статей у фахових виданнях, рекомендованих МОН України, в тому числі – 2 у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; патентів на винахід – 1; патентів на корисну модель – 2; праць апробаційного характеру – 12; додаткова публікація – 1.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із анотацій, вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота викладена на 266 сторінках і містить 198 сторінок основного тексту, 33 таблиці, 102 рисунки, 159 найменувань літератури, 9 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання дослідження, представлено наукову гіпотезу, новизну і практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію основних результатів дисертації, кількість публікацій, структуру та обсяг роботи.

**У першому розділі** виконано критичний аналіз найбільш значущих робіт у галузі теоретичних і експериментальних досліджень з розробки, підсилення, реконструкції та відновлення бетонних і залізобетонних конструкцій за допомогою застосування різноманітних клейових полімерних розчинів.

В роботах О.І. Лапенка, А.І. Машкової, П.С. Білокурова наведені численні експериментальні дослідження випробувань раціональних згинальних конструкцій (балочні системи) зі сталевих елементів із заповненими бетоном порожнинами за допомогою склеювання. Доведено, що прикріплений за допомогою склеювання бетон в боковій порожнині згинальних елементів працює сумісно з металом на всіх етапах навантаження. У наукових публікаціях Л.І. Стороженка, О.Г. Горба, Т.Ю. Качана, Г.І. Гришка приведені відомості про експериментальні випробування залізобетонних балок підсилені приклеюючою листового та профільного зовнішнього армування акриловими та епоксидними компаундами. Незважаючи на значну кількість робіт вказаних та інших авторів теоретичних уявлень про використання склеювання для улаштування кріплень виробничого устаткування з бетонними і залізобетонними конструкціями, без застосування анкерування, опубліковано мало.

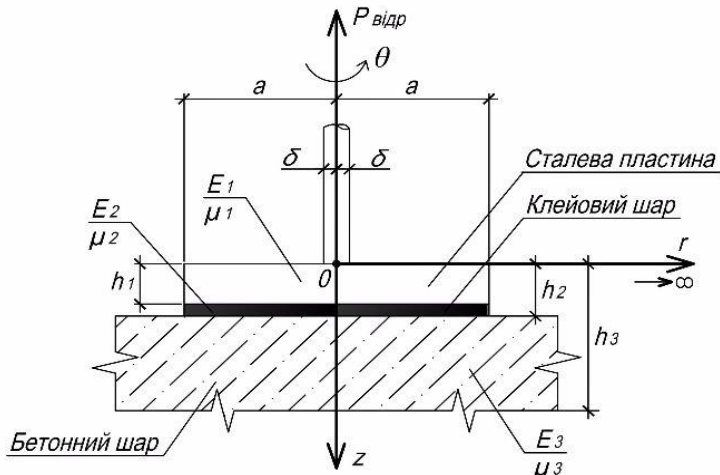
Дисертаційна робота розвиває наукову школу М.С. Золотова. Представниками школи - С.М. Золотовим, В.О. Склярівим, О.Ю. Супруном, А.О. Гарбуз, Б.Ю. Пагі, В.В. Душиним, Н.М. Золотовою, О.М. Пустовойтовою, Н.О. Псурцевою досліджено адгезійні та когезійні властивості акрилових клеїв промислового виробництва при клейовому (хімічному) анкеруванні фундаментних болтів, анкеруванні арматурних стрижнів в бетоні, з'єднанні старого бетону з новим тощо. Показано, що застосування акрилових композицій дає можливість створювати міцні конструкційні з'єднання, а також клейові кріплення бетонних та залізобетонних елементів з високим ступенем надійності. Викладене дозволяє припустити, що застосування акрилових клеїв для з'єднання сталі з бетоном вимагає спеціального вивчення міцності і напружено-деформованого стану при різних видах впливу навантажень.

Висунуто робочу гіпотезу, що в будівельній галузі, в якості альтернативи анкеруванню, має місце безанкерний метод клейового кріплення промислового обладнання, інженерних ліній та комунікацій. Дослідження дії силових навантажень на кріпильні вузли технологічного обладнання та інженерних ліній обумовило основні показники міцності і деформативності клейових сталобетонних з'єднань. Визначено, що безанкерні кріплення сприймають зусилля відриву (розтягу), зусилля зсуву (зрізу), сумісну дію зусиль відриву та зсуву, сумісну дію згинального моменту та зусиль зсуву, сумісну дію крутного моменту та зусиль зсуву, а також дію центрально-докладених та позацентрово-докладених зусиль.

**У другому розділі** наведено теоретичне обґрунтування та методика досліджень міцності клейових сталобетонних з'єднань при впливі різних видів навантажень. Розроблена постановка осесиметричної плоскої задачі теорії пружності в циліндричній системі координат з урахуванням тришарової моделі, шари якої пов'язані між собою умовами безперервності напружень та

деформацій при осесиметричному довільному навантаженні. Кожен шар характеризується трьома параметрами: висотою  $h_i$ , модулем пружності  $E_i$  та коефіцієнтом Пуассона  $\mu_i$  (рис. 1).

а)



б)

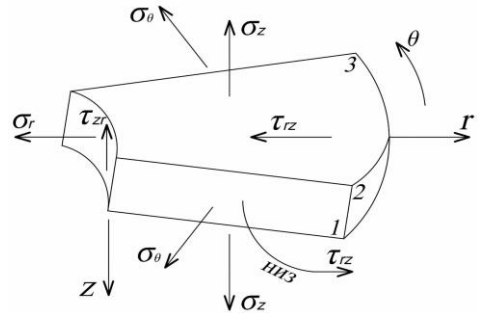


Рис. 1. Постановка осесиметричної плоскої задачі теорії пружності для з'єднання сталь-клей-бетон: а – розрахункова модель клейового сталебетонного з'єднання; б – координатні напруження на майданчиках клейового шару

Обраний необхідний метод рішення даної осесиметричної задачі, який полягає у визначенні компонентів тензора напружень і вектора переміщення через функцію напружень  $\Phi$  (функцію Ері) з урахуванням прийнятих граничних умов. В умовах плоскої осесиметричної задачі компоненти тензора напружень і вектора переміщення виражаються через функцію напружень у наступний спосіб:

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (2 - \mu) \nabla^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right]; \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \nabla^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} \right]; \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \nabla^2 \Phi - \frac{1}{r} \times \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right]; \quad (3)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (1 - \mu) \nabla^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right]; \quad (4)$$

$$w = \frac{1 + \mu}{E} \left[ (1 - 2\mu) \nabla^2 \Phi + \frac{1}{r} \times \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} \right]; \quad (5)$$

$$u = -\frac{1 + \mu}{E} \times \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r \times \partial z}. \quad (6)$$

У формулах (1)-(6)  $\nabla^2$  – це гармонічний оператор в системі циліндричних координат (оператор Лапласа), який виражається наступним чином:

$$\nabla^2 = \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right). \quad (7)$$



Функції напружень  $\Phi(z, r)$  задовольняють диференціальному рівнянню:

$$\nabla^4 \Phi = 0, \quad (8)$$

де:  $\nabla^4 = \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)^2$  - бігармонічний оператор в системі циліндричних координат. Далі використано наступне рішення рівняння (8) в межах  $i$ -го шару:

$$\Phi_i^0 = (A_i e^{-kz} + B_i e^{kz} + D_i z e^{-kz} + C_i z e^{kz}) \times J_0(kz), \quad (9)$$

де:  $A_i, B_i, C_i, D_i$  - невідомі коефіцієнти;  $k$  - довільне дійсне число;  $J_0(kz)$  - функції Бесселя нульового порядку першого роду.

Функція розподілу нормального навантаження по поверхні першого шару представлена за допомогою інтеграла Фур'є-Бесселя:

$$\left. \sigma_{z_1} \right|_{z=0} = f(r). \quad (10)$$

При відомих умовах, що накладаються на функції  $f(r)$ , які безумовно виконуються для всіх практично можливих видів навантаження, справедливий вираз:

$$f(r) = \int_0^a J_0(kr) k dR \times \int_0^\delta f(t) J_0(kt) t dt. \quad (11)$$

Для вирішення задачі на контактах сполучення шарів системи прийняті граничні умови з урахуванням вимог безперервності компонентів напружень  $\sigma_{zi}, \tau_{rzi}$  і переміщень  $u_i, w_i$  на границях розділу шарів. Виходячи з прийнятих граничних умов визначені напруження та переміщення на контактах клей-сталь і клей-бетон.

На базі наукових досліджень Г.В. Василькова та В.С. Шмуклера виконана чисельна оцінка рівня напружено-деформованого стану клейового матеріалу під безанкерне з'єднання сталі з бетоном. Проведено натурні лабораторні випробування зразків адгезиву під впливом зовнішніх навантажень (розтяг, стиск, зсув) та побудовано відповідні діаграми  $\sigma$ - $\varepsilon$ . Лінійні головні деформації  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  розраховані згідно з діаграмами деформування клейового матеріалу. Кожна з частин щільності потенційної енергії деформації визначена за пропонуванням В.С. Шмуклером методом розрахунку:

$$e_{nc} = \frac{9}{2} K \times \varepsilon_0^2 + \int_0^{\varepsilon_{nc}} \sigma_c d\varepsilon_c = 71,42; \quad (12)$$

$$e_{nt} = \frac{9}{2} K \times \varepsilon_0^2 + \int_0^{\varepsilon_{nt}} \sigma_t d\varepsilon_t = 122,02; \quad (13)$$

$$e_{nsh} = \int_0^{\varepsilon_{nsh}} \tau d\gamma = 16,50; \quad (14)$$

$$K = \frac{E_0}{3 \times (1 - 2 \times \nu)} = \frac{4,26}{3 \times (1 - 2 \times 0,4)} = 7,1 \text{ ГПа}; \quad (15)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{3} I_1(T_\varepsilon) = \frac{1}{3} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = \frac{1}{3} (0,042 + 0,040) = 0,027, \quad (16)$$

де:  $K$  – об’ємний модуль деформації;  $I_1(T_\varepsilon)$  – перший інваріант тензора деформацій;  $E_0$  – початковий модуль деформації першого роду матеріалу.

До характеристик виду напружено-деформованого стану відносяться параметри Надаї-Лоде відповідно для напружень та деформацій:

$$\chi_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}; \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 - \text{головні нормальні напруження};$$

$$\chi_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}; \varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3 - \text{головні лінійні деформації}.$$
(17)

Отже, критерій, який визначає експлуатаційний стан раціоналізованого елемента у локальній зоні, точці, кінцевому елементі, має наступний вигляд:

$$e_n = 0,5\chi_\varepsilon^2[(\chi_\varepsilon + 1)e_{nc} - (\chi_\varepsilon - 1)e_{nt}] + (1 - \chi_\varepsilon^2)e_{nsh}.$$
(18)

Виходячи з розрахунку, нормована щільність потенційної енергії деформації дорівнює  $e_n = 63,26 \times 10^3$  МПа. Це свідчить про те, що пропонувані акрилові композиції під безанкерне кріплення сталі з бетоном мають суттєвий запас конструктивної міцності (за напруженням - в 6 раз; за енергією деформації – в 36 раз).

Розроблено методику проведення експериментальних досліджень з визначення показників короточасної міцності клейових сталобетонних з’єднань при дії центрально-докладених зусиль (рис. 2, а, в), а також при дії різних видів позацентрово-докладених зусиль (рис. 2, б, г).

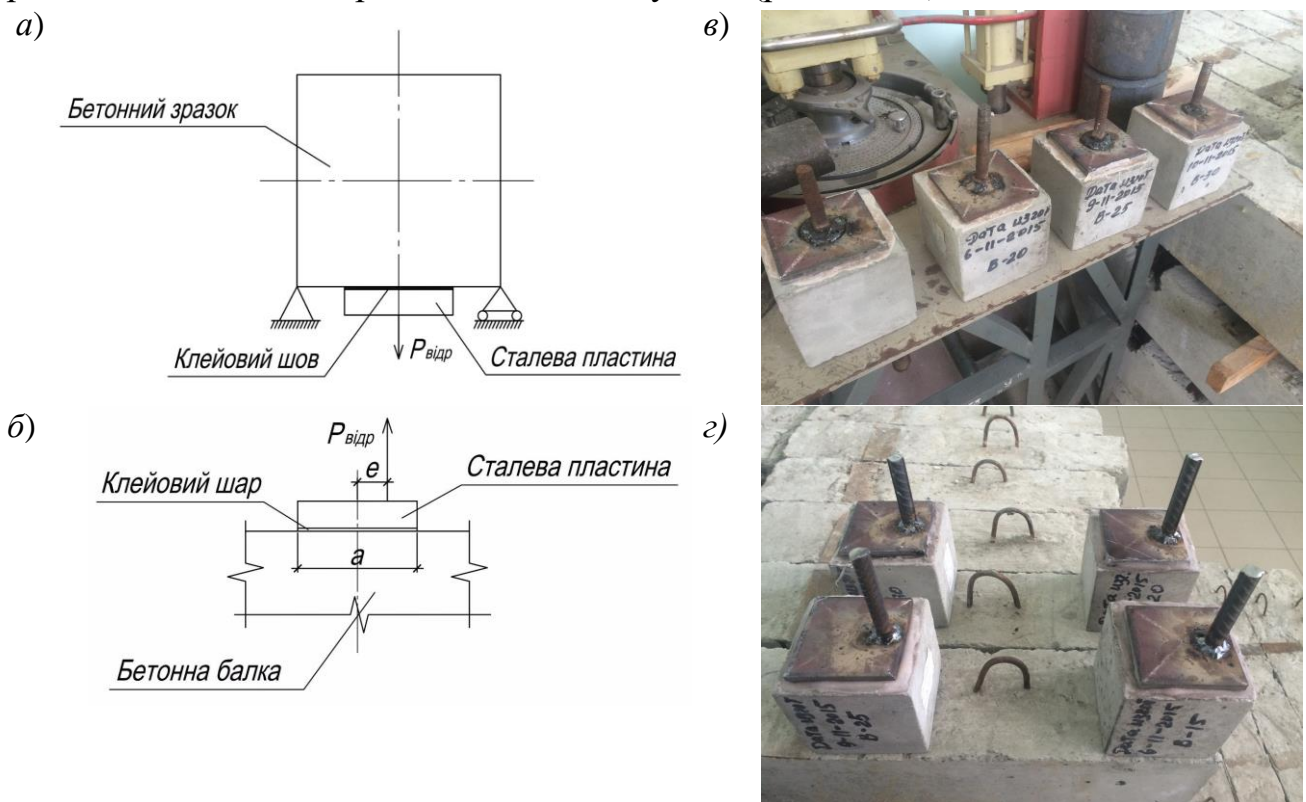


Рис. 2. Методика досліджень клейових сталобетонних з’єднань: а – схема випробування клейових з’єднань на дію центрально-докладених зусиль відриву; б – схема випробування клейових з’єднань на дію позацентрово-докладених зусиль відриву; в, г - партії відповідних випробувальних зразків

Разом з експериментальними випробуваннями зразків досліджувався вплив конструктивних характеристик і технологічних параметрів на міцність клейового з'єднання сталі з бетоном, а саме:

- вплив жорсткості сталевих пластин,  $\Delta = \delta_{пл} / a$  (в зразках з'єднань використовувались сталеві пластини товщиною  $\delta_{пл} = 5, 8, 10, 12, 15, 18, 20$  мм при постійних розмірах в плані  $a \times a = 80 \times 80$  мм);

- вплив класу бетону (зразки з'єднань виготовлялись у вигляді бетонних кубів класу С8/10, С12/15, С16/20, С20/25 і С25/30 розміром  $a \times a \times a = 150 \times 150$  мм зі сталевими пластинами  $a \times a = 80 \times 80$  мм і товщиною  $\delta_{пл} = 8$  мм);

- вплив відстані кріплення сталевих елементу від грані будівельної конструкції (застосовувались пластини та бетонні вироби різного розміру);

- вплив розмірів, геометричної конфігурації та масштабних параметрів сталевих пластин (для зразків з'єднань використовувались сталеві елементи кріплення квадратної та круглої форм, різної площі та товщини);

- вплив висоти клейового шва ( $\delta_{кл} = 2, 4, 8, 12, 16$  мм);

- вплив способів очищення бетонної поверхні конструкцій під склеювання (очищення бетонної поверхні конструкцій під склеювання здійснювалось механічним, термічним і хімічним способами);

- вплив сторони бетонування (склеювання проводилось на протилежних сторонах бетонних виробів, які представляють низ і верх бетонування).

У третьому розділі наведено результати чисельних експериментальних досліджень міцності клейових сталобетонних з'єднань при впливі різних видів навантажень. Випробування експериментальних зразків проводились на розривних машинах МР-100 та МР-500 в лабораторії будівельних конструкцій ХНУМГ імені О.М. Бекетова (рис. 3, а). Руйнування клейових з'єднань, незалежно від вихідних характеристик і геометрії кріплення, відбувалося по бетону (рис. 3, б).

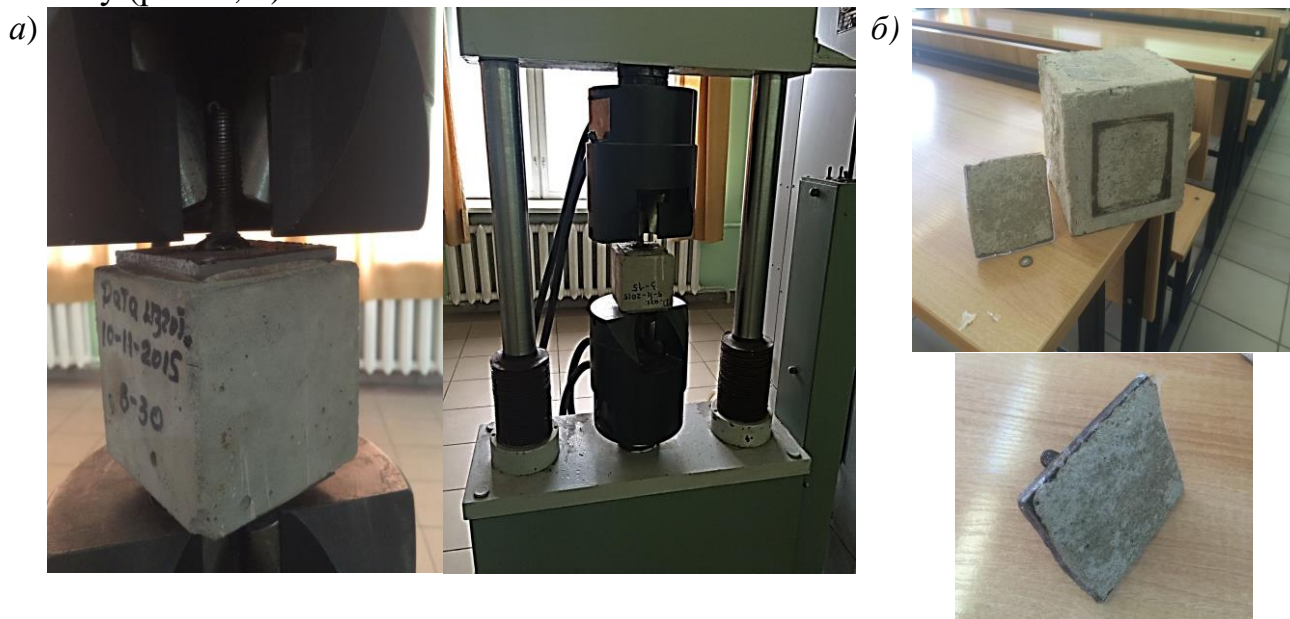


Рис. 3. Дослідження міцності клейових сталобетонних з'єднань:  
 а – лабораторні випробування експериментальних зразків; б – характер когезійного руйнування клейових безанкерних з'єднань сталі з бетоном

В процесі даних випробувань визначалися руйнуючі зусилля, характер руйнування зразків, а також розрахунковий опір клейового сталобетонного з'єднання. Це дозволило провести подальший розрахунок міцності з'єднання за першим граничним станом. Для цього необхідно було мати відомості про статистичні показники великої вибірки зразків: асиметрія, ексцес, середньоквадратичне відхилення, варіація, тип розподілу тощо. Для отримання достовірних статистичних показників кількість зразків досліджуваної вибірки визначалась в залежності від прийнятої вірогідності отримання результатів:

$$n = \frac{(A^2 \times t^2)}{p^2} = \frac{(10^2 \times 4^2)}{5^2} = 64 \text{ зразки}, \quad (19)$$

де:  $A$  – показник мінливості (при з'єднанні будівельних конструкцій клеями показник мінливості  $A = 10\%$ );  $t$  – показник достовірності;  $p$  – показник точності (достовірна вірогідність результату прийнята 0,9999, тоді показник вірогідності дорівнює  $t = 4$ , а показник точності  $p = 5\%$ ).

Статистична обробка результатів експерименту виконана із застосуванням методу сум. Спочатку розраховувались: показник асиметрії ( $A = -0,05$ ), показник ексцесу ( $E = -0,33$ ) та їх помилки ( $m_A = \pm 0,3$ ;  $m_E = \pm 0,6$ ).

Варіаційний ряд ознаки представлений графічно у вигляді кривої розподілу. Розмах варіювання  $R = 0,71$ . Далі обчислювались: середнє арифметичне значення ( $M = 3,38$  МПа), вибіркова дисперсія ( $D_s = 0,026$ ), середньоквадратичне відхилення ( $\sigma_B = \pm 0,16$ ), коефіцієнт варіації ( $v\% = \pm 4,7$ ), середнє абсолютне відхилення ( $S = \pm 0,067$ ), середня помилка арифметичного значення ( $\sigma_M = \pm 0,019$ ) та показник точності ( $\zeta = \pm 0,05$ ). Для побудови кривої нормального розподілу (рис. 4) визначені вихідні величини ординат ( $y = h \times H$ ) та абсцис ( $x = M \pm d\sigma$ ).

а)

$\pm d$ в долях від $\sigma$ :	Значення абсцис		$h$	Значення ординат, $y$
	$x_1$	$x_2$		
0,0	3,38	3,38	1,000	15,075
0,5	3,30	3,46	0,883	13,310
1,0	3,22	3,54	0,607	9,150
1,5	3,14	3,62	0,325	4,900
2,0	3,06	3,70	0,135	2,035
2,5	2,98	3,78	0,044	0,660
3,0	2,90	3,86	0,011	0,165

б)

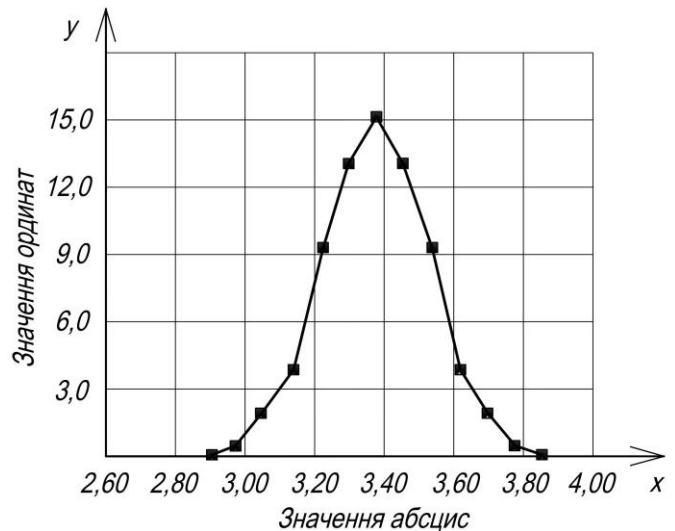


Рис. 4. Результати статистичної обробки результатів досліджуваної вибірки:

- а - розрахункові дані для побудови кривої нормального розподілу;  
б - графік розподілу значень міцності з'єднання сталь-клей-бетон

Мінімальне значення несучої здатності в досліджуваній вибірці:

$$R_{\min} = M - 3\sigma = 3,38 - 3 \times 0,16 = 3,31 \text{ МПа}. \quad (20)$$

Розрахунковий опір клейового з'єднання дорівнює:

$$R_p = R_{\min} \times k_{одн} = 3,31 \times 0,86 = 2,85 \text{ МПа}, \quad (21)$$

де:  $k_o$  – коефіцієнт однорідності, який знаходиться за формулою:

$$k_{одн} = 1 - 3\nu = 1 - 3 \times 0,047 = 0,86. \quad (22)$$

Результати проведених експериментів по визначенню впливу конструктивних характеристик на міцність клейового з'єднання сталі з бетоном статистично оброблені та представлені у вигляді графіків (рис. 5).

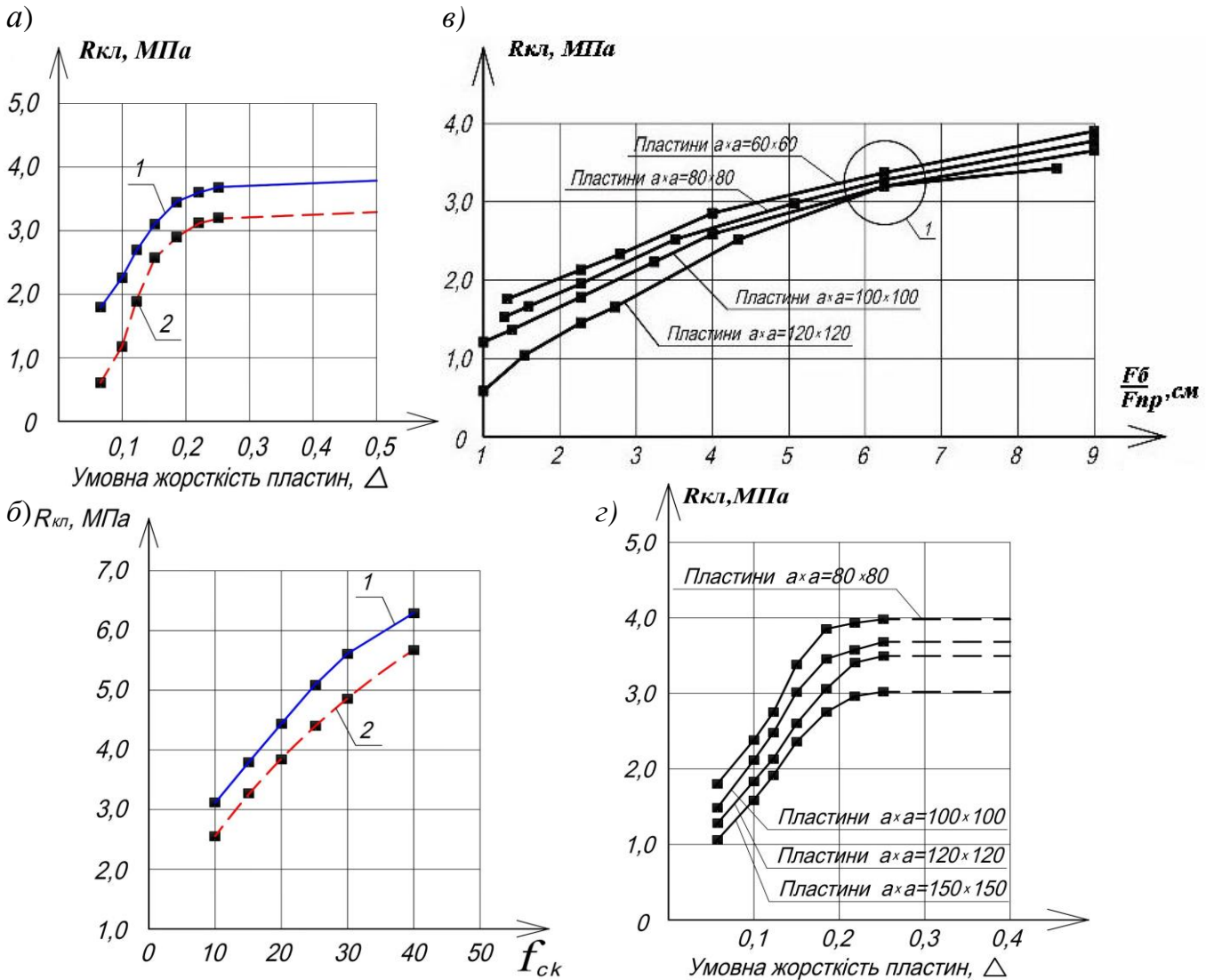


Рис. 5. Графіки експериментальних залежностей міцності клейового сталобетонного з'єднання: *a* – від умовної жорсткості сталевих пластин; *б* – від міцності (класу) бетону на стиск; *в* - від відстані кріплення сталевих пластин від грані будівельної конструкції; *з* – від площі опорних сталевих пластин та їх умовної жорсткості; 1 - з використанням пропонованих акрилових композицій; 2 - з використанням акрилової пластмаси АСТ-Т

Зроблено висновки, що на міцність клейового кріплення, на границі бетон-сталь, при дії центрально-докладених зусиль відриву істотний вплив мають:

- умовна жорсткість сталевих опорних пластин,  $\Delta$  (міцність клейового з'єднання зменшується в три рази при зменшенні значень  $\Delta$  від 0,225 до 0,06);

- фізико-механічні властивості бетону (зі збільшенням міцності бетонів в межах їх класів від С8/10 до С32/40 міцність кріплення збільшується в 2 рази, при цьому зростає і коефіцієнт однорідності з'єднання);

- віддалення сталевих елементів кріплення від грані будівельної конструкції, від 0 до 2,5 її розміру в плані, призводить до збільшення міцності з'єднання в 2-3 рази;

- збільшення площі пластин з 64 см<sup>2</sup> до 225 см<sup>2</sup> призводить до зменшення міцнісних показників клейового кріплення практично в 2 рази.

Доведено, що висота клейового шва не має істотного впливу на міцність клейового сталобетонного з'єднання. Міцність з'єднання (середнє значення при всіх величинах  $\delta_{кл}$  коливається в діапазоні 3,18-3,22 МПа) та коефіцієнт однорідності майже не змінюються зі збільшенням висоти клейового шару.

Визначено, що суттєвий вплив на міцність з'єднань сталь-клей-бетон мають способи попереднього очищення бетонної поверхні під склеювання, при цьому найбільш високі міцнісні показники досягаються при якісному механічному очищенні бетонної поверхні конструкції з використанням абразивного диску (рис. 7). У цьому випадку відбувається цілковите видалення поверхневого шару без кардинального порушення самої цілісності бетону, про що свідчать високі показники міцності і однорідності даних з'єднань.

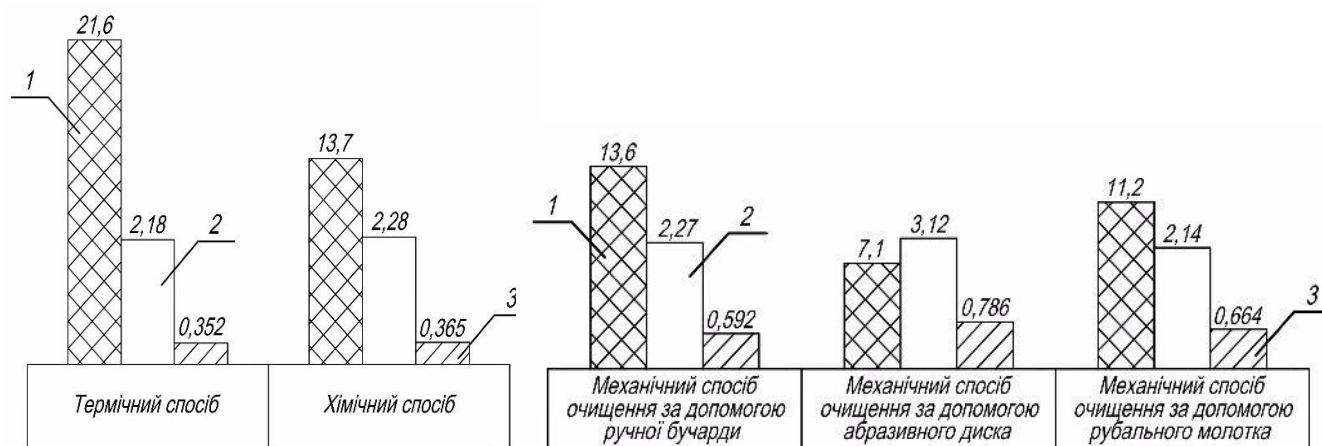


Рис. 7. Діаграма зміни показників міцності, коефіцієнтів варіації і однорідності клейових з'єднань в залежності від способу очищення бетонної поверхні конструкції: 1 – коефіцієнт варіації, %; 2 – середнє значення міцності, МПа; 3 – коефіцієнт однорідності

Експериментально доведено, що на міцність клейових сталобетонних з'єднань суттєвий вплив має сторона бетонування конструкції, до якої приклеюється сталевий кріпильний вузол, при цьому міцність з'єднання збільшується на 55-60 % у разі приклеювання на низ бетонування, ніж у випадку приклеювання на верх бетонування.

За результатами випробувань зразків клейових сталобетонних з'єднань на дію різних видів позацентрово-докладених зусиль, зроблено висновки, що на міцність клейового кріпильного вузла, на границі бетон-сталь, істотний вплив має вид докладеного навантаження, а саме:

- міцність при дії позацентрово-докладених зусиль зменшується практично в 2,7 рази при підвищенні величини ексцентриситету докладання зусилля відриву в границях від  $e = 0$  до  $e = 0,4a$ ;

- при сумісній дії зусиль відриву та зсуву показники міцності клейового кріплення збільшуються майже в 2 рази зі збільшенням кута докладання зусилля відриву;

- при сумісній дії згинального моменту та зусиль зсуву міцність клейового з'єднання зменшується зі збільшенням величини ексцентриситету докладання зусилля в межах від  $e = 0$  до  $e = a$  майже в 11 раз;

- при сумісній дії крутного моменту та зусиль зсуву міцність клейового з'єднання зменшується майже в 7 раз зі збільшенням величини плеча докладання зусилля з  $l = 0$  до  $l = 3a$ .

В процесі склеювання сталі з бетоном на вертикальних поверхнях залізобетонних конструкцій, розроблено графіки деформативності клейового шва з'єднання при дії короткочасних навантажень. Визначено, що повзучість клейового шару має загасаючий характер і стабілізується протягом 12 годин.

Досліджено витривалість клейових сталобетонних з'єднань при багаторазово повторюваних навантаженнях. При проведенні дослідження втомна міцність клейового сталобетонного з'єднання приймалась ідентичною до міцності бетону при розрахунках на витривалість при багаторазово повторюваних навантаженнях. Розроблено методику проведення експерименту при різних значеннях коефіцієнту  $\varepsilon_b$ , який залежить від асиметрії циклу повторюваних напружень в бетоні  $\rho_b = \sigma_{b,min} / \sigma_{b,max}$ :

$$\sigma_z = k_{одн} \times \varepsilon_b \times R_{кл}, \quad (23)$$

де:  $\sigma_z$  – границя витривалості експериментальних зразків клейового з'єднання;  $\varepsilon_b$  – коефіцієнт для визначення розрахункового опору бетону при розрахунку на витривалість, який дорівнює 1,025; 1,10 та 1,175 відповідно при поточних значеннях  $\rho_b = 0,15$ ; 0,30 та 0,45;  $k_{одн}$  – коефіцієнт однорідності клейового з'єднання за даними випробувань на статичну міцність;  $R_{кл}$  – границя міцності зразків клейового з'єднання при центрально-докладеному зусиллі відриву.

Дослідження зразків клейового з'єднання проводилось при 1000 циклів навантаження в хвилину. Обрана частота навантажень прийнята з урахуванням динамічних характеристик виробничого обладнання, яке рекомендується до закріплення за допомогою поверхневої приклейки. Величини максимальних навантажень циклу  $\sigma_{b,max}$  дорівнювали 16,67 кН, 18,14 кН та 19,61 кН відповідно при  $\rho_b$  рівному 0,15; 0,30 та 0,45. Величини мінімальних навантажень циклу  $\sigma_{b,min}$  відповідно дорівнювали 2,54 кН, 5,39 кН та 8,82 кН. Після  $2 \times 10^6$  циклів навантаження руйнування зразків клейового з'єднання не відбулося. Після випробувань клейових зразків на витривалість, при всіх прийнятих значеннях циклу напружень  $\rho_b$ , вони були зруйновані статичним навантаженням з метою визначення границі міцності (табл. 1). Одночасно визначався вплив висоти клейового шва на витривалість досліджуваних з'єднань ( $\delta_{кл} = 2, 6, 10$  мм). Можливий на практиці розкид величин висоти клейового шва практично не позначається на границі витривалості даних кріплень.

Результати випробувань клейових зразків на витривалість при багаторазово повторюваних навантаженнях

Статичні показники	Статична міцність клейового з'єднання, МПа	Залишкова міцність клейового з'єднання, МПа, після $2 \times 10^6$ циклів навантаження при значеннях $\rho_b$		
		$\rho_b = 0,15$	$\rho_b = 0,30$	$\rho_b = 0,45$
При висоті клейового шва $\delta_{кл} = 2$ мм				
Середнє значення	3,07	2,89	2,93	2,95
Зниження міцності	-	На 5,9 %	На 4,6 %	На 3,9 %
При висоті клейового шва $\delta_{кл} = 6$ мм				
Середнє значення	3,04	2,82	2,87	2,89
Зниження міцності	-	На 7,2 %	На 5,6 %	На 4,9 %
При висоті клейового шва $\delta_{кл} = 10$ мм				
Середнє значення	3,03	2,78	2,82	2,86
Зниження міцності	-	На 8,2 %	На 6,9 %	На 5,6 %

У четвертому розділі, з метою верифікації отриманих результатів експериментальних досліджень, проведено чисельне моделювання експерименту у спеціалізованих ПК “ЛІРА 10” та “ANSYS Academic Student”. Аналіз напружено-деформованого стану з'єднання проведено методом скінченних елементів з урахуванням фізичної нелінійності деформування матеріалів з'єднання. Застосовано покроково-ітераційний метод лінеаризації, тобто загальне навантаження в 26000 Н було розбито на 20 кроків (поступове додавання по 5 % від загального навантаження).

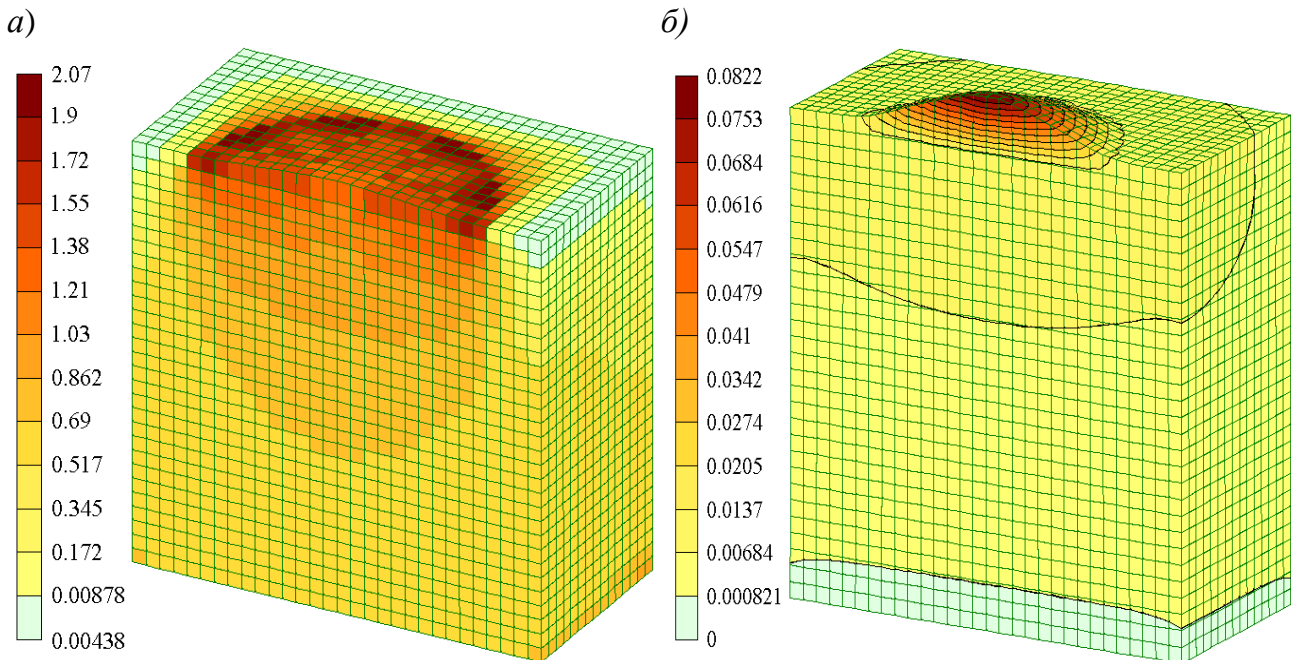


Рис. 8. Напружено-деформований стан бетонного шару при дії зусиль центрально-докладеного відриву (95 % від загального навантаження 26000 Н): а - головні напруження  $\sigma_I$  в бетоні, МПа; б – розподіл переміщень в бетоні, мм



Виходячи з отриманих результатів (ізополів напружень, розподілу переміщень та деформаційних схем), моделювання дії зусиль відриву свідчить про те, що остаточне руйнування з'єднання (система стала геометрично змінюваною) відбувається на 20 кроці, тобто на 95 % від докладеного загального навантаження (рис. 8). Характер розподілу головних напружень і щільності енергії деформації не змінювався при впливі кожного з розглянутих навантажень (відрив, зсув, згин).

Оцінка міцності з'єднання проводилась згідно четвертої теорії міцності (теорія енергії формозмінення), тобто еквівалентні напруження визначались за  $\sigma_{th}$  Мізеса-Хенкі (рис 9).

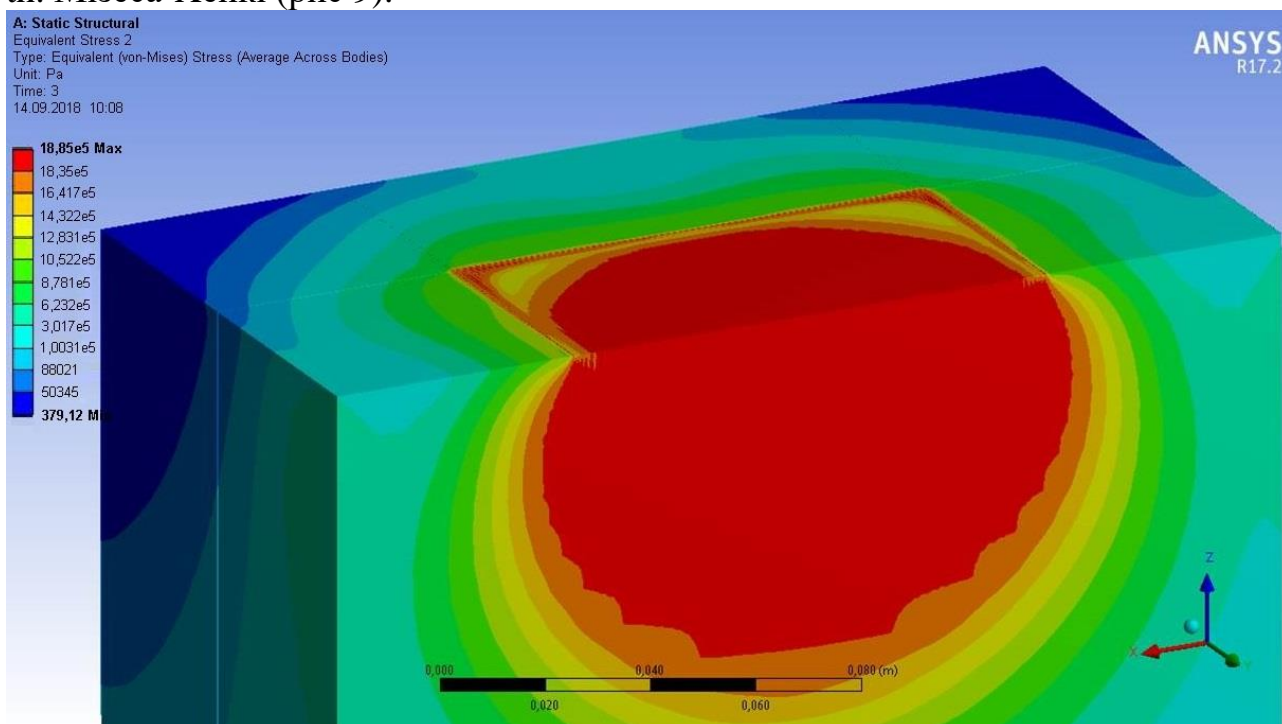


Рис. 9. Еквівалентні напруження в бетоні в момент дії зусиль відриву 25200 Н

Проведені статичні розрахунки та чисельне моделювання дали результати, які відповідають характеру руйнування дослідних зразків під час експериментальних досліджень. Результати чисельного моделювання з урахуванням фізичної нелінійності деформації співпадають з проведеним статичним розрахунком на 90-95 % (в залежності від виду навантаження) та підтверджують висновки про надійну роботу клейового безанкерного з'єднання сталі з бетоном при впливі різних видів навантажень. Розроблена модель дозволяє виконувати розрахунок і аналіз напружено-деформованого стану клейових сталебетонних з'єднань з будь-якою вихідною геометрією кріплення та характеристиками матеріалів з'єднання.

**У п'ятому розділі**, на підставі проведених чисельних експериментальних досліджень, приведено рекомендації щодо проектування конструкцій кріплення та з розрахунку клейових сталебетонних з'єднань. Складено основні розрахункові схеми виробничого устаткування та технологічних ліній,

улаштованих методом поверхневої приклейки опорних вузлів, а також зусиль, які впливають на вказані кріплення (рис. 10).

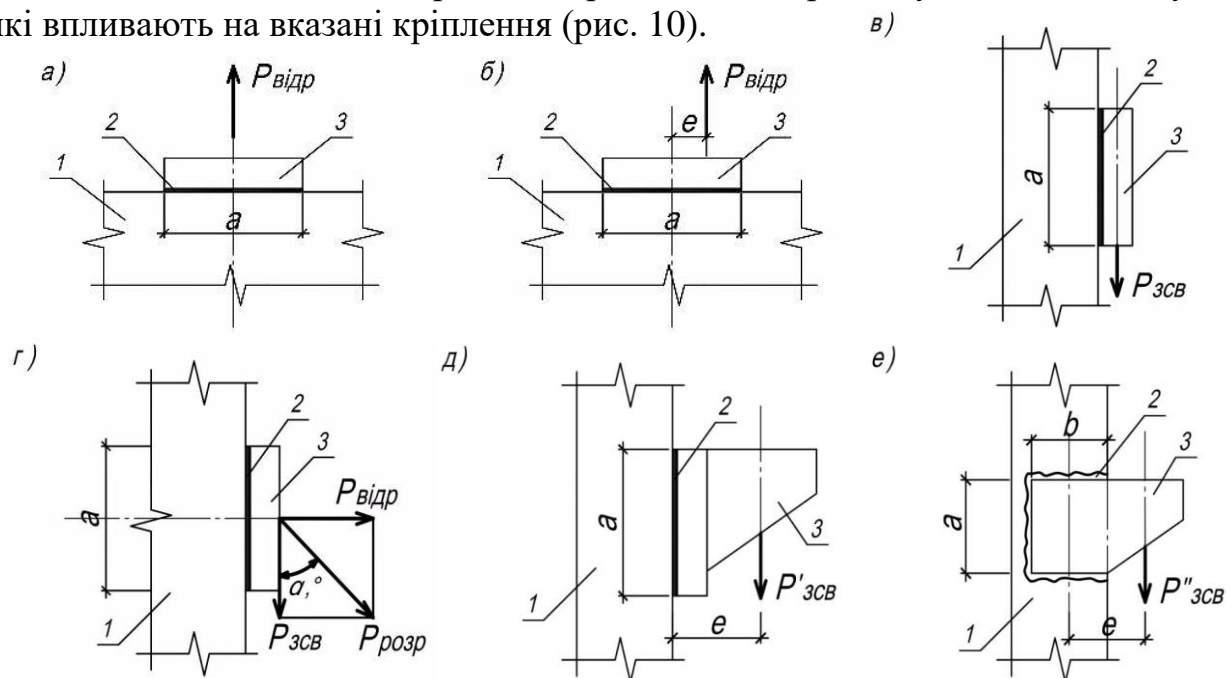


Рис. 10. Розрахункові схеми клейових сталобетонних безанкерних з'єднань:

*a* - при впливі центрально-докладеного зусилля відриву; *б* - при впливі позацентрального зусилля відриву; *в* - при впливі зусиль зсуву; *г* - при сумісному впливі зусиль відриву та зсуву; *д* - при сумісному впливі згинального моменту та сил зсуву; *е* - при сумісному впливі крутного моменту та сил зсуву;  
 1 – бетонна конструкція; 2 – клейовий шов; 3 – сталевий кріпильний вузол

Розроблено метод інженерного розрахунку безанкерних клейових сталобетонних з'єднань.

*a*) Розрахунок клейового з'єднання сталі з бетоном на дію центрально-докладених зусиль відриву (рис. 10, *a*) здійснюється за формулою:

$$P_{\text{відр}} \leq R_{\text{відр}}^{\text{кл}} \times F_{\text{кл}}, \quad (24)$$

де:  $P_{\text{відр}}$  – розрахункове зусилля центрально-докладеного відриву, яке прикладається до центру вузла кріплення, або загальної площі приклейки;  $F_{\text{кл}}$  – площа приклейки вузла кріплення;  $R_{\text{відр}}^{\text{кл}}$  – опір безанкерного клейового кріплення при центрально-докладеному зусиллі відриву, що визначається за розрахунком:

$$R_{\text{відр}}^{\text{кл}} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 \times f_{ctd}, \quad (25)$$

де:  $f_{ctd}$  – розрахункове значення міцності бетону на розтяг згідно ДБН В.2.6-98:2009, МПа;  $k_1$  – коефіцієнт впливу умовної жорсткості опорної пластини вузла кріплення (відношення товщини сталевий пластини до розміру її більшої сторони) на міцність клейового кріплення;  $k_2$  – коефіцієнт впливу масштабного параметру площі приклейки;  $k_3$  – коефіцієнт відстані кріплення сталевий елементу з'єднання від обрізу будівельної конструкції, який характеризується показником відношення  $F_{\text{б}} / F_{\text{нр}}$  ( $F_{\text{б}}$  – загальна площа бетонного виробу, до якого приклеюється сталевий елемент з'єднання;  $F_{\text{нр}}$  – площа зони склеювання), визначається за формулою:

$$k_3 = \sqrt[3]{\frac{F_6}{F_{np}}} \leq 2,5; \quad (26)$$

$k_4$  – коефіцієнт впливу сторони бетонування конструкції на міцність клейового сталобетонного з'єднання ( $k_4 = 1,0$  – у випадку приклейки на бетонну поверхню конструкції, яка представляє верх бетонування,  $k_4 = 1,3$  – у випадку приклейки на бетонну поверхню, яка представляє низ бетонування);  $k_5$  – коефіцієнт терміну служби клейового з'єднання.

б) Розрахунок клейового з'єднання сталі з бетоном на дію позацентрово-докладених зусиль відриву (рис. 10, б):

$$P_{н.відр} \leq P_{відр} \times k_6, \quad (27)$$

де:  $P_{н.відр}$  – розрахункове зусилля, яке прикладається позацентрово (із певним ексцентриситетом) до вузла кріплення;  $P_{відр}$  – розрахункове зусилля центрально-докладеного відриву (24);  $k_6$  – коефіцієнт впливу позацентрального докладання сили на міцність клейового сталобетонного з'єднання.

в) Розрахунок клейового з'єднання сталі з бетоном на зсув (рис. 10, в):

$$P_{зсв} \leq R_{зсв}^{кл} \times F_{кл}, \quad (28)$$

де:  $P_{зсв}$  – розрахункове зусилля зсуву, яке докладається до центральної осі вузла кріплення;  $R_{зсв}^{кл}$  – розрахунковий опір клейового сталобетонного з'єднання зсуву:

$$R_{зсв}^{кл} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 \times 2f_{сд}. \quad (29)$$

г) Розрахунок клейового з'єднання сталі з бетоном на сумісну дію зусиль відриву та зсуву (рис. 10, г):

$$\left\{ \begin{array}{l} P \times \cos \alpha \leq P_{відр} \\ P \times \sin \alpha \leq P_{зсв} \end{array} \right\}, \quad (30)$$

де:  $P$  – розрахункове зусилля, яке докладається під кутом  $\alpha^\circ$  до центральної осі вузла кріплення;  $P_{відр}$  – розрахункове зусилля центрально-докладеного відриву (24);  $P_{зсв}$  – розрахункове зусилля зсуву (28).

д) Розрахунок клейового з'єднання сталі з бетоном на сумісну дію згинального моменту та зусиль зсуву (рис. 10, д):

$$P'_{зсв} \leq k_7 \times P_{зсв}, \quad (31)$$

де:  $P'_{зсв}$  – розрахункове зусилля зсуву, яке докладається із ексцентриситетом до вузла кріплення;  $P_{зсв}$  – розрахункове зусилля зсуву (28);  $k_7$  – коефіцієнт впливу позацентрального докладання зусиль зсуву на міцність клейового сталобетонного з'єднання.

е) Розрахунок клейового з'єднання сталі з бетоном на сумісну дію крутного моменту та зусиль зсуву (рис. 10, е):

$$P''_{зсв} \leq k_8 \times P_{зсв}, \quad (32)$$

де:  $P''_{зсв}$  – розрахункове зусилля кручення, яке докладається до вузла кріплення;  $P_{зсв}$  – розрахункове зусилля зсуву (28);  $k_8$  – коефіцієнт величини плеча докладання крутного зусиль до вузла кріплення.

При розрахунку клейового сталобетонного з'єднання на витривалість розрахунковий опір  $R_z$  визначається за формулою:

$$R_z = R_{\text{відр}}^{\text{кл}} \times \varepsilon_b, \quad (33)$$

де:  $R_{\text{відр}}^{\text{кл}}$  – розрахунковий опір клейового кріплення при центрально-докладеному зусиллі відриву (25);  $\varepsilon_b$  – коефіцієнт, який залежить від асиметрії циклу повторюваних напружень в бетоні  $\rho_b$  згідно табл. 3.9 ДБН В.2.3-14:2006.

Розрахована ситуативна задача, в рамках якої техніко-економічні показники безанкерного клейового методу кріплення зіставлені зі стандартним та хімічним анкеруванням (табл. 2).

Таблиця 2

Зведена відомість техніко-економічних показників різних способів кріплення

Найменування показників	Стандартне анкерування	Хімічне анкерування з використанням капсул “Hilti”	Безанкерне з’єднання на акрилових модифікованих клеях
Загальна трудомісткість робіт	2,62 люд.-год.	2,93 люд.-год.	0,12 люд.-год.
Ринкова вартість основних витратних матеріалів при улаштуванні кріплення	2490,26 грн	<u>5054,21 грн</u> 4052,47 грн	1003,37 грн

Застосування розробленого методу кріплення, в порівнянні зі стандартним та хімічним анкеруванням, дозволяє істотно знизити трудомісткість, а також загальну вартість будівельно-монтажних робіт (в середньому на 65-70 %).

Результати дисертаційного дослідження були впроваджені на базі промислових підприємств в м. Харків (рис. 11).

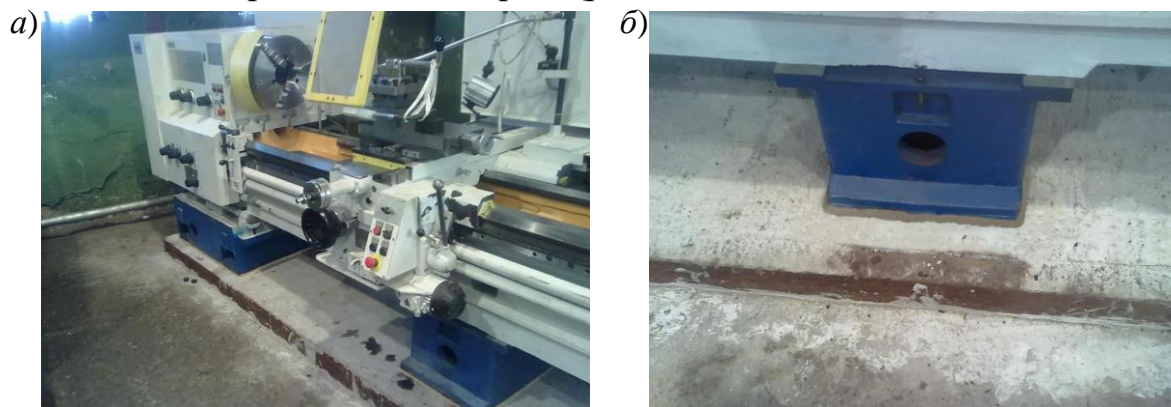


Рис. 11. Результати дослідно-наукових впроваджень: *а* – загальний вигляд фуговально-рейсмусного верстату на базі ТОВ “Будцентр Витязь”; *б* - вузол клейового кріплення виробничого устаткування

В результаті реалізації дослідно-наукових впроваджень, досягнутий і розрахований економічний ефект при застосуванні розробленого методу кріплення, в порівнянні з анкеруванням, за рахунок економії матеріальних ресурсів, зниження термінів виробництва, а також суттєвого спрощення виконання будівельно-монтажних робіт. Результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес ХНУМГ ім. О.М. Бекетова при підготовці бакалаврів спеціальності 192 “Будівництво та цивільна інженерія” у складі нормативних дисциплін (цикл дисциплін професійної підготовки).

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовані постановка, використання і метод рішення осесиметричної задачі теорії пружності в циліндричній системі координат для трьох шарів (сталеві пластина, клейового шва та бетонного масиву), які пов'язані між собою умовами безперервності напружень та деформацій при осесиметричному довільному навантаженні, для визначення напружено-деформованого стану клейових сталобетонних з'єднань.

2. Встановлено, що незалежно від виду руйнуючих зусиль (навантажень), геометричних характеристик клейового з'єднання (розміри в плані та товщина сталевих пластин, висота клейового шва, відстань кріплення сталевих елементів від обрізу бетонної конструкції), фізико-механічних властивостей бетону та технологічних параметрів руйнування клейових сталобетонних з'єднань на акрилових модифікованих композиціях відбувається когезійно (по бетону).

3. Визначено, що на короткочасну міцність клейових сталобетонних з'єднань на акрилових модифікованих клеях, на границі сталі з бетоном, суттєвий вплив мають: вид докладених навантажень, умовна жорсткість ( $\Delta_{min} = 0,06 - \sigma_{0миц} = 1,83$  МПа;  $\Delta_{max} = 0,225 - \sigma_{0миц} = 3,57$  МПа) та геометрія сталевих опорних пластин (від  $F_{nl} = 64$  см<sup>2</sup> – 2,32 МПа до  $F_{nl} = 225$  см<sup>2</sup> – 1,62 МПа), клас бетону (від С8/10 –  $R_{кл,сер} = 3,07$  МПа до С32/40 –  $R_{кл,сер} = 6,23$  МПа), віддалення зони склеювання від грані будівельної конструкції (відношення  $F_{\delta} / F_{np} = 1 - R_{кл} = 1,62$  МПа;  $F_{\delta} / F_{np} \geq 6 - R_{кл} = 3,91$  МПа), способи очищення бетонної поверхні під склеювання (очищення абразивним диском  $R_{кл,сер} = 3,07$  МПа) та сторона бетонування, до якої приклеюється сталевий вузол кріплення (при  $F_{nl} = 64$  см<sup>2</sup> низ бетонування  $R_{кл,сер} = 3,87$  МПа; верх бетонування  $R_{кл,сер} = 2,36$  МПа).

4. Експериментально доведено, що при багаторазово повторюваних навантаженнях границя витривалості клейових з'єднань сталі з бетоном визначається границею витривалості бетону та не залежить від коефіцієнту асиметрії циклу повторюваних напружень  $\varepsilon_b$ . Руйнування зразків клейового з'єднання після  $2 \times 10^6$  циклів навантаження не відбувається. Залишкова міцність з'єднання нижче ніж міцність зразків, які були зруйновані статичним короткочасним навантаженням перед початком випробувань (при  $\delta_{кл} = 2$  мм середнє зниження міцності при  $\rho_b = 0,15 - 5,9$  %; при  $\rho_b = 0,30 - 4,6$  %; при  $\rho_b = 0,45 - 3,9$  %).

5. Розроблено метод інженерного розрахунку безанкерних клейових сталобетонних кріплень при впливі різних видів навантажень ( $P_{відр}$ ,  $P_{н.відр}$ ,  $P_{зсв}$ ), в якому враховано особливості геометричних характеристик і технологічних параметрів клейових з'єднань сталі з бетоном.

6. Результати експериментальних випробувань верифіковані за допомогою чисельного моделювання в спеціалізованих програмних комплексах “ЛІРА 10” та “ANSYS”. Отримано задовільне зіставлення експериментальних результатів і розрахунків за допомогою МСЕ (на 90-95 % в залежності від виду докладеного навантаження) з урахуванням фізичної нелінійності деформування, що підтверджує висновки про надійну роботу з'єднань сталь-клей-бетон при впливі різних видів навантажень.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях України:*

1. Золотов М.С. Влияние конструктивных факторов крепежного узла на прочность клеевого соединения безанкерного крепления / М.С. Золотов, П.М. Фирсов // Зб. наук. праць “Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди”. - Рівне: НУВГП, 2015. - Вип. 30. - С. 127-134.

*(Особистий внесок - виконання експериментальних досліджень: розроблення, виготовлення та випробування зразків кріпильних вузлів, виконання замірів, аналіз результатів).*

2. Золотов С.М. Адгезионная прочность безанкерного соединения сталь-бетон на модифицированных акриловых клеях при равномерном и неравномерном отрыве / С.М. Золотов, П.М. Фирсов // Зб. наук. праць “Науковий вісник будівництва”. - Харків: ХНУБА, 2015. - Вип. № 4 (82). - С. 102-106.

*(Особистий внесок - виконання експериментальних досліджень: розроблення, виготовлення та випробування зразків кріпильних вузлів, виконання замірів, аналіз результатів експерименту).*

3. Золотов С.М. Витривалість модифікованих клейових з'єднань при багаторазово повторюваних динамічних навантаженнях / С.М. Золотов, П.М. Фирсов // Зб. наук. праць “Науковий вісник будівництва”. - Харків: ХНУБА, 2018. - Вип. № 1 (91). - С. 185-192.

*(Особистий внесок – розробка методики з випробування клейових з'єднань на багаторазово повторювані динамічні навантаження, аналіз результатів експериментальних досліджень).*

### *Статті у міжнародних виданнях та збірниках наукових праць, що включені*

#### *до міжнародних наукометричних баз:*

4. Золотов С.М. Реологические исследования и определение адсорбции модифицированных наполнителей метилметакрилата / С.М. Золотов, П.М. Фирсов, К.А. Клищенко // Зб. наук. праць УкрДУЗТ. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 161. - С. 157-169.

*(Особистий внесок - проведення досліджень з визначення технологічних властивостей наповнювачів метилметакрилату і підбору оптимального модифікованого складу акрилових композицій).*

5. Фирсов П.М. Экспериментальные исследования кратковременной прочности стале-клеевого безанкерного соединения на акриловых модифицированных композициях / П.М. Фирсов // Зб. наук. праць УкрДУЗТ. – Харків: УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 167. - С. 4-17.

#### *Публікації апробаційного характеру:*

6. Фирсов П.М. Расчетная модель клеевого соединения сталь-бетон / П.М. Фирсов // Матеріали IV Міжнар. наук.-техн. Інтернет-конф. “Будівництво, реконструкція і відновлення будівель міського господарства”, (25 листопада-25 грудня 2014 г., Харків). – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2014. – С. 56-61.

7. Firsov P.M. Analysis of various constructive factors influencing the strength of glued steel-concrete joints without anchors / P.M. Firsov // Forum for young researchers “Young researchers in the

global world: vistas and challenges”, (25-26 of May 2015, Kharkiv). – Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 2015. – P. 156-159.

8. Золотов С.М. Адгезионная прочность клеевых соединений на акриловых модифицированных клеях / С.М. Золотов, П.М. Фирсов // Materials of Int. scient. and pract. conf. “Perspective trends in scientific research”, (17-22 of October 2015, Bratislava, Slovak Republic). – Bratislava, Slovak Republic: Academic Society of Michal Baludansky, 2015. – Vol. 2 – P. 150-151.

*(Особистий внесок - виконання експериментальних досліджень: розроблення та виготовлення зразків критичних вузлів, виконання замірів, аналіз результатів).*

9. Золотов С.М. Исследование напряженно-деформированного состояния соединения сталь-бетон на акриловых клеях / С.М. Золотов, П.М. Фирсов // Матеріали VII Міжнар. наук. конф. “Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд”, (20-21 жовтня 2015 р., Харків). – Харків: ХНУБА, 2015. – С. 109-111.

*(Особистий внесок - виконання натурних досліджень).*

10. Фирсов П.М. Прочность и деформативность акриловых модифицированных композиций / П.М. Фирсов // Матеріали IV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій”, (25-26 листопада 2015 р., Тернопіль). – Тернопіль: ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2015. – С. 79-80.

11. Фирсов П.М. Взаимосвязь адгезионной и когезионной прочности со структурой акрилового клея / П.М. Фирсов // Зб. тез доповідей наук.-практ. конф., присвяченої 95-річному ювілею ЛНАУ, (8-9 листопада 2016 р., Харків). – Харків: ЛНАУ, 2016. – С. 55-57.

12. Firsov Pavlo. Strength and deformation of acrylic modified glues / Pavlo Firsov // Proceedings of Int. scient. and pract. conf. “Build Master Class”, (16-18 of November 2016, Kyiv). – Kyiv: Kyiv National University of Construction and Architecture, 2016. - P. 126-127.

13. Фирсов П.М. Составы улучшенных модифицированных акриловых композиций / П.М. Фирсов // Зб. тез доповідей звітної наук.-практ. конф. ЛНАУ, (21-23 лютого 2017 р., Харків). – Харків: ЛНАУ, 2017. – С. 76-77.

14. Фирсов П.М. Проектирование безанкерного клеевого сталебетонного соединения на акриловых модифицированных композициях / П.М. Фирсов // Тези доповідей VI Міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті”, (19-21 квітня 2017 р., Харків). – Харків: УкрДУЗТ, 2017. - С. 170-171.

15. Фирсов П.М. Влияние способов подготовки поверхности бетона к склеиванию на акриловых улучшенных композициях / П.М. Фирсов // Тези доповідей IV Міжнар. наук.-практ. конф. “Актуальні проблеми інженерної механіки”, (16-19 травня 2017 р., Одеса). – Одеса: ОДАБА, 2017. – С. 160-162.

16. Золотов С.М. Визначення характеристик міцності сталеклеєвих з'єднань при багаторазових навантаженнях / С.М. Золотов, П.М. Фирсов, Хамзе Мухамад // Матеріали III Міжнар. наук.-техн. конф. “Ефективні технології в будівництві”, (28-29 березня 2018 р., Київ). – Київ: КНУБА, 2018. – С. 89-91.

*(Особистий внесок – розробка методик з випробування клейових з'єднань на багаторазово повторювані динамічні навантаження, аналіз результатів експериментальних досліджень).*

17. Фирсов П.М. Визначення характеристик міцності клейового шва вертикального сталебетонного з'єднання при дії зусиль зсуву та відриву / П.М. Фирсов // Зб. матеріалів звітної наук.-практ. конф. ЛНАУ, (20-23 лютого 2018 р., Харків). – Харків: ЛНАУ, 2018 – С. 79-82.

***Публікації, що додатково відображають матеріали дисертації:***

18. Золотов С.М. Анализ прочностных характеристик сталеклеевых соединений на модифицированных акриловых клеях / С.М. Золотов, П.М. Фірсов // Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky. - Kosice, Slovak Republic: Academic Society of Michal Baludansky, 2015. - Vol. 3. – P. 143-147.

*(Особистий внесок - виконання експериментальних досліджень: розроблення та виготовлення зразків кріпильних вузлів, виконання замірів, аналіз результатів).*

***Патенти:***

19. Патент на корисну модель № 109770. Україна. МПК С08L 33/12 (2006.01). Акрилова композиція / С.М. Золотов, П.М. Фірсов, В.К. Жданюк, П.А. Білим; власник ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. - № u 2016 01208; Заявл. 12.02.2016; Опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17. – 6 с.

*(Особистий внесок - патентний пошук, проведення досліджень, формулювання висновків).*

20. Патент на корисну модель № 120256. Україна. МПК(2017.01) С08L 33/12 (2006.01), С09J 4/00, С08K 5/17 (2006.01), С04В 15/06 (2006.01). Акрилова композиція / С.М. Золотов, П.М. Фірсов, В.К. Жданюк, П.А. Білим; власник ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. - № u 2017 04402; Заявл. 03.05.2017; Опубл. 25.10.2017, Бюл. № 20. – 6 с.

*(Особистий внесок - патентний пошук, розробка складу, проведення досліджень).*

21. Патент України на винахід № 117314. Україна. МПК С08L 33/12 (2006.01), С04В 24/24 (2006.01), С04В 111/72 (2006.01). Акрилова композиція / С.М. Золотов, П.М. Фірсов, В.К. Жданюк, П.А. Білим; власник ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. - № а 2017 04337; Заявл. 03.05.2017; Опубл. 10.07.2018, Бюл. № 13. - 6 с.

*(Особистий внесок - патентний пошук, розробка складу, проведення досліджень).*

**АНОТАЦІЯ**

**Фірсов П.М. Короткочасна міцність та напружено-деформований стан клейових сталебетонних з'єднань на акрилових модифікованих клеях. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 - будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2018.

Дисертація присвячена улаштуванню клейових з'єднань сталі з бетоном, без застосування анкерування, шляхом склеювання вузлів кріплення та опорних частин виробничого устаткування з бетонними поверхнями конструкцій. Розроблено методику дослідження міцності клейових сталебетонних з'єднань при впливі різних видів навантажень. Визначено, що на короткочасну міцність клейових сталебетонних з'єднань на акрилових модифікованих клеях суттєвий вплив має вид докладених навантажень, геометрія та умовна жорсткість сталевих опорних пластин, клас бетону, віддалення зони склеювання від грані будівельної конструкції та окремі технологічні параметри, при цьому руйнування клейових кріплень відбувається по бетону. Доведено, що при багаторазово повторюваних навантаженнях границя витривалості клейових з'єднань сталі з бетоном визначається границею витривалості бетону та не залежить від коефіцієнту асиметрії циклу повторюваних напружень. Розроблено метод інженерного розрахунку безанкерних клейових сталебетонних конструкцій, а також приведено рекомендації щодо проектування досліджуваних кріплень.



Результати досліджень впроваджено на базі промислових підприємств м. Харкова, а також в навчальний процес ХНУМГ ім. О.М. Бекетова.

*Ключові слова:* клейове сталобетонне з'єднання, напружено-деформований стан, склеювання, короточасна міцність, навантаження, акрилові модифіковані композиції, несуча здатність, відрив.

## АННОТАЦИЯ

**Фирсов П.М. Кратковременная прочность и напряженно-деформированное состояние клеевых сталобетонных соединений на акриловых модифицированных клеях. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена устройству клеевых соединений стали с бетоном, без применения анкеровки, путем склеивания узлов крепления и опорных частей производственного оборудования с бетонными поверхностями конструкций.

Во **введении** представлена общая характеристика работы, приведены актуальность, связь с научными темами, сформулированы цель и задачи исследований, описаны практическая значимость и научная новизна.

В **первом разделе** приводится обзор научных работ в области исследований по разработке, усилению, реконструкции бетонных и железобетонных конструкций с помощью применения различных клеевых полимерных растворов. Проведен анализ существующих конструкций крепления производственного оборудования и коммуникаций к бетонным конструкциям. Определены основные показатели прочности и деформативности безанкерных клеевых сталобетонных соединений.

Во **втором разделе** приведено теоретическое обоснование и методика исследований прочности клеевых сталобетонных соединений при воздействии различных видов нагрузок. Разработана постановка и решение осесимметричной плоской задачи теории упругости в цилиндрической системе координат с учетом трехслойной модели, слои которой связаны между собой условиями непрерывности напряжений и деформаций при осесимметричной произвольной нагрузке. На базе принципов энергетической рационализации предложена энергетическая оценка критерия напряженно-деформированного состояния клеевого материала под безанкерное соединение стали с бетоном.

В **третьем разделе** приведены результаты многочисленных экспериментальных исследований прочности клеевых сталобетонных соединений при воздействии различных видов нагрузок. Определено, что на кратковременную прочность клеевых сталобетонных соединений на акриловых модифицированных клеях существенное влияние имеет вид прилагаемых нагрузок, геометрия и условная жесткость стальных опорных пластин, класс бетона, отдаление зоны склеивания от грани строительной конструкции и отдельные технологические параметры, при этом разрушение клеевых креплений происходит по бетону. Доказано, что при многократно повторяющихся нагрузках предел выносливости клеевых соединений стали с бетоном определяется границей выносливости бетона и не зависит от коэффициента асимметрии цикла повторяющихся напряжений.

**В четвертом разделе** результаты экспериментальных исследований верифицированы с помощью численного моделирования в ПК “ЛИРА” и ПК “ANSYS”. Анализ напряженно-деформированного состояния соединения проведен методом конечных элементов с учетом физической нелинейности деформирования. Применен шагово-итерационный метод линеаризации. Получено удовлетворительное сопоставление экспериментальных результатов и расчетов с помощью МКЭ, что позволяет сделать вывод о надежной работе клеевого безанкерного соединения стали с бетоном при воздействии различных видов нагрузок (отрыв, сдвиг, изгиб).

**В пятом разделе** разработан метод инженерного расчета безанкерных клеевых сталебетонных конструкций, а также приведены рекомендации по проектированию исследуемых креплений. Сформулированы выводы, что применение безанкерного метода крепления, в сравнении со стандартной и химической анкерровкой, позволяет существенно снизить трудоемкость, а также общую стоимость строительно-монтажных работ (в среднем на 65-70 %). Основные результаты диссертационной работы внедрены на базе промышленных предприятий в г. Харьков, а также в учебный процесс ХНУГХ им. А.Н. Бекетова.

*Ключевые слова:* клеевое сталебетонное соединение, напряженно-деформированное состояние, склеивание, кратковременная прочность, нагрузка, акриловые модифицированные композиции, несущая способность, отрыв.

## ABSTRACT

**Firsov P.M. Short-term strength and stress-deformed condition of glued steel-concrete joints on acrylic modified adhesives. – On the rights of a Manuscript.**

The dissertation for the scientific degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.23.01 - building structures, buildings and constructions. – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to the arrangement of glued steel-concrete joints, without anchoring, by the gluing technological equipment and communications fastening units or bearing parts to the concrete structures surfaces. The method of glued steel-concrete joints strength research, under the influence of different loads types, is developed. It has been determined that a significant impact on the glued steel-concrete joints short-term strength on acrylic modified adhesives have applied loads, geometry and conditional stiffness of steel bearing plates, concrete class, removal of steel bearing elements from the construction structure edging and certain technological parameters, with the destruction of adhesive joints occurs on concrete. It has been proved that, with repeated dynamic loads, the glued steel-concrete joints endurance limit is determined by the concrete endurance boundary and does not depend on the repetitive stresses asymmetry cycle coefficient. The method of without-anchor glued steel-concrete structures engineering calculation has been developed, as well as recommendations for the arrangement technology of these fastenings on acrylic modified compositions. The thesis main provisions are introduced on a number of industrial enterprises, with appropriately calculated economic effect, and into the educational process of O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

*Keywords:* glued steel-concrete joint, stress-deformed condition, gluing, short-term strength, loading, acrylic modified compositions, bearing capacity, separation.

Підписано до друку 13.11.2018 р. Формат 60х90/16.  
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.  
Друк – цифровий. Ум. друк. аркушів. 0,9  
Наклад 100 прим. Зам. № 507350

Надруковано у ФЛ-П Черняк Л. О.  
61002, м. Харків, вул. Багалія, 16  
Свідоцтво № 2480000000079553, від 16.05.2007 р.