

МІЦНІСТЬ З'ЄДНАНЬ ПРИ РОБОТІ НА ЗРІЗ ЗА УМОВИ ПРИКЛЕЮВАННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ ДО СТАЛІ АКРИЛОВИМИ КОМПОЗИТАМИ

Горб О. Г., Лапенко О. І., Шевченко О. В.

ВСТУП

В останні роки все активніше ведуться дослідження по застосуванню полімерних матеріалів¹ для забезпечення сумісної роботи складових частин композитних конструкцій при їх виготовленні, підсиленні та відновленні². Це викликано тим, що цементно-піщані розчини внаслідок їх недостатньої адгезії до металевої чи бетонної поверхні, низької механічної міцності та хімічної стійкості не можуть бути використані самостійно без додаткових анкерних засобів та закладних деталей, для забезпечення необхідної сумісної роботи з'єднаних поверхонь, міцності та тріщиностійкості виготовлюваних, відновлюваних та підсилюваних будівельних конструкцій. Особливо гостро ця проблема постає при підсиленні та реконструкції існуючих будівель, коли виникає необхідність збільшення несучої здатності стиснутих і згинальних елементів³. Цього можна досягти шляхом використання полімеррозчинів для збільшення поперечного перерізу за допомогою нарощування чи влаштування обойми або клеїв, які дають можливість, наприклад, встановлення додаткового зовнішнього армування

¹ Review on adhesive joints and their application in hybrid composite structures. 2019. Journal of Adhesion Science and Technology 33(14):1-24 DOI:10.1080/01694243.2018.1543528

² Horb O., Davidenko Y., Skurupiy O., Mytrofanov P. (2020). Application of Bonding Concrete to Reinforcement Using Adhesives in Steel Concrete Composite Structure. Proceedings of the 2020 session of the 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering (Paris, France, August 26-28, 2020). PP. 2 – 9. https://phdsymp2020.sciencesconf.org/data/pages/Proceedings_phdsymp_2021.pdf

³ Lapenko, O., Baranetska, D., Makarov, V., Baranetskyi, A., 2020. Designing of Structural Construction and Orthotropic Slabs from Steel Reinforced Concrete. MSF 1006, 173–178. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1006.173>

Серед полімерів найпоширенішим в сучасному будівництві є акриловий клей⁴. Він складається з полімерного в'язучого і наповнювача. Як полімерне в'язуче застосовується акрилова пластмаса АСТ-Т, що являє собою компаунд холодного твердіння типу порошок-рідина⁵. Порошкоподібний компонент АСТ-Т – високомолекулярна речовина, що являє собою суспензійний полімер на основі метилакрилату. Рідкоподібний компонент (затверджувач) акрилових самотвердіючих пластмас АСТ-Т – метиловий ефір метакрилової кислоти.

Затвердіння акрилової пластмаси здійснюється мимовільно при нормальній температурі за рахунок полімеризації, заснованої на реакції окислювально-відновних систем⁶. Як наповнювач може використовуватися кварцовий пісок із крупністю зерен від 0,16 до 0,63 мм. Пісок повинен бути сухим, без сторонніх домішок і включень.

Наповнюваність акрилового клею залежить від складу суміші та крупності зерен піску. Так, зі збільшення кількості затверджувача з 60 до 200 мас-частин на 100 мас-частин полімеру, наповнюваність кварцовим піском із крупністю зерен 0,16 мм збільшується з 160 до 700 мас-частин.

Однією з найважливіших технологічних характеристик клею є його життєздатність, тобто проміжок часу, протягом якого його можна застосовувати для виготовлення конструкцій⁷. Вона залежить від його складу і температури середовища. Акрилова пластмаса АСТ-Т полімеризується без виділення побічних речовин, що позитивно позначається на якості клейового шва і міцності матеріалу.

Таким чином можна стверджувати, що акриловий клей володіє високими технологічними та когезійними властивостями. Він

⁴ Zolotov S., Firsov P., Muhamad H. (2020). Evaluation of Stress-Deformed Condition Level of Glued Materials for the Without Anchor Steel-Concrete Joint. In Lecture Notes in Civil Engineering (Vol. 47, pp. 95–102). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_12.

⁵ The Effect of Surface Treatment on the Behavior of Toughened Acrylic Adhesive/GRP(epoxy) Composite Joints. 2010. Journal of Adhesion Science and Technology. 24(11-12):1903–1916 DOI:10.1163/016942410X507641

⁶ R.D. Adams and W.C. Wake. Structural adhesive joints in engineering, Elsevier Applied Science, London and New York, 1984, 309 pp. <https://doi.org/10.1002/pol.1985.130231111>

⁷ R. Hunter, A. Vizán, J. Peréz, J. Möller, J. Leyrer, L.F.M. da Silva. Effect of the structural reinforcement of composite adherends on the mechanical strength of adhesive joints. Materials Science & Engineering Technology. 2017. Vol. 48, № 6. P. 546-555. doi.org/10.1002/mawe.201600565

простий і надійний у приготуванні, має низьку в'язкість, яка не залежить від температури навколишнього середовища, що дозволяє його використання на відкритому повітрі в будь-яку пору року.

1. Технологія проведення лабораторних досліджень

При підсиленні, ремонті та з'єднанні будівельних конструкцій полімерними композитами⁸ останні повинні відповідати наступним загальним вимогам:

- адгезійна та когезійна міцність полімеррозчину має бути не нижче міцності бетону елементів, що підсилюються або з'єднуються;
- коефіцієнт лінійного розширення полімерної композиції повинен бути близьким до коефіцієнту лінійного розширення бетону;
- підсилена, відновлена конструкція або її з'єднання повинні бути стійкими до впливу експлуатаційного середовища і в цих умовах забезпечувати необхідну довговічність;
- технологічна життєздатність полімеррозчину повинна відповідати виробничим вимогам та мати можливість до її регулювання в залежності від умов виробництва;
- використовувані в полімерній композиції складові повинні мати мінімальну токсичність, а в затверділому стані полімеррозчин повинен бути абсолютно нешкідливим.

Завдяки своїм беззаперечним позитивним властивостям полімерні композиції⁹ широко використовуються для забезпечення сумісної роботи складових частин будівельних конструкцій при зведенні мостів, гідротехнічному, цивільному і промислового будівництва для виготовлення, ремонту, підсилення, реконструкції і відновлення несучої здатності бетонних і сталезалізобетонних елементів¹⁰.

Наші дослідження міцності з'єднань при роботі на зріз за умови приклеюванні бетонної суміші до сталі присвячені розробці методики проведення експериментальних випробувань, конструюванню дослідних зразків та технології їх виготовлення, визначенню фізико-механічних властивостей прийнятих матеріалів та обробці результатів

⁸ P. K. Mallick. Optimization of Structural Adhesive Joints. Structural Adhesive Joints: Design, Analysis and Testing. 2020. P. 79-96. DOI:10.1002/9781119737322.ch3

⁹ Abolfazl Tutunchi, Rahman Kamali, Abbas Kianvash. Adhesive strength of steel-epoxy composite joints bonded with structural acrylic adhesives filled with silica nanoparticles. Journal of Adhesion Science and Technology. 2015. Vol. 29(3). DOI:10.1080/01694243.2014.981469

¹⁰ Sina Ebnesajjad and Arthur H. Landrock. Adhesives Technology Handbook. Third Edition. 2015. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-18392-4>

досліджень. Під час складання програми досліджень враховано, що несуча здатність елементів залежить від геометричних розмірів (геометричних характеристик металевої частини та бетонних елементів), наявності та типу клейового з'єднання, фізико-механічних властивостей матеріалів – сталі й бетону.

Метою проведення експериментальних випробувань було дослідження:

- несучої здатності клейових з'єднань при роботі на розтяг та на зріз;
- сумісної роботи двох складових зразків конструкцій;
- впливу типу клейового з'єднання на роботу та несучу здатність дослідних зразків;
- характеру руйнування дослідних зразків;
- отримання задовільної скінчено-елементної моделі дослідних зразків.

Для досягнення кожного з пунктів поставленої мети були запроєктовані стиснуті сталезалізобетонні елементи із використанням різних геометричних характеристик та акрилових клеїв різного складу, в яких клейове з'єднання працює на зріз та стандартні бетонні призми $100 \times 100 \times 400$ мм і кубики $100 \times 100 \times 100$ мм для визначення характеристик міцності й деформативності бетону.

Зразки поділялись відповідно до прийнятих геометричних характеристик та складу прийнятої бетонної суміші, призначення яких відповідає вимогам для окремого вивчення різних факторів, від котрих може залежати ступінь впливу повздовжньої й поперечної сили на міцність і деформативність досліджуваних конструкцій. Зразки в свою чергу відрізнялися один від одного наявністю та типом клейового з'єднання. Отже, вивчаючими факторами були геометричні характеристики, клас бетону за міцністю та наявністю клейового з'єднання чи склад використаного акрилового клею, тобто всі відмінності між зразками, які певним чином можуть впливати на значення несучої здатності.

Стиснуті зразки (рис. 1.1, 1.2) являють собою бетонні куби та призми, які під час твердіння з двох боків приклеюються до відрізків швелерів проектної довжини. Куби мають розмір $100 \times 100 \times 100$ мм; призми – $100 \times 100 \times 200$, $100 \times 100 \times 400$ мм. Відрізки прокатного сталевго швелера №10 довжиною 100, 200, 400 мм розміщуються з двох протилежних граней бетонних елементів. Особливістю виготовлення зразків є умови їх бетонування в горизонтальному положенні з використанням в якості незнімної опалубки відрізків швелера.

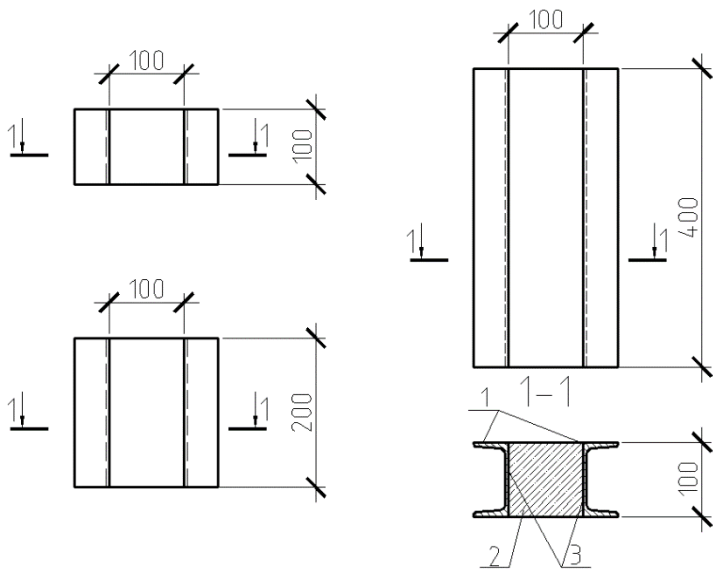


Рис. 1. Конструкція дослідних зразків, що працюють на стиск:
1 – сталевий прокатний швелер №10; 2 – бетонна призма;
3 – з’єднання на основі акрилового клею

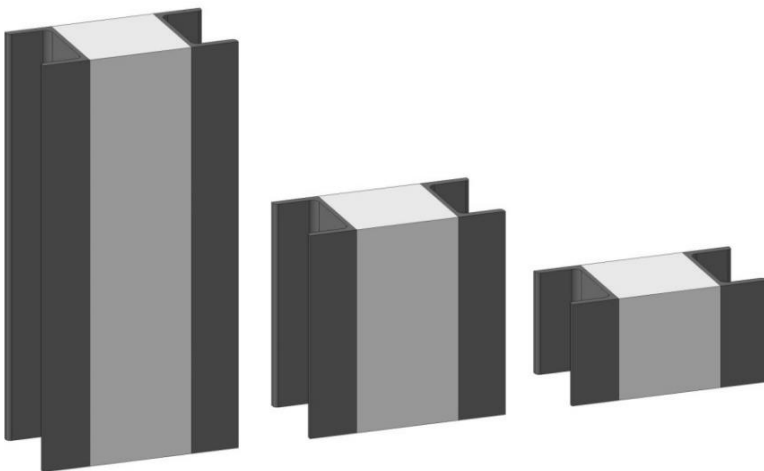


Рис. 2. Графічні моделі дослідних зразків при випробуванні
клеювого з’єднання на зріз

Відрізняються серії стиснутих зразків один від одного геометричними характеристиками, тобто в серії С-1 куб має висоту 100 мм, в серії С-2 призма – 200 мм, в серії С-3 – 400 мм. Зразки однієї серії відрізняються наявністю клейового з'єднання та складом клею, що використаний в наявному з'єднанні.

Після виготовлення сталевих частин дослідних конструкцій і монтажу опалубки, відповідні зразки заповнювалися бетонною сумішшю запланованого складу (табл. 1).

Таблиця 1

**Склад прийнятих бетонів для виготовлення зразків
(ДСТУ Б В.2.7-96-2000)**

Номер складу	Витрати матеріалів, кг/м ³ бетону				В/Ц
	Цемент	Пісок	Щебень	Вода	
1	300	865	1080	155	0,52
2	420	770	1080	155	0,37
3	570	680	1080	155	0,27



Рис. 3. Зразки на стадії виготовлення

Після встановлення опалубки укладався відповідний бетон з послідовним ущільненням на вібраційному столі. Для визначення фізико-механічних властивостей кожного складу бетону, одночасно з відповідними основними зразками виготовлялись три комплекти стандартних бетонних кубиків (100×100×100 мм) та призм (100×100×400 мм). Після виготовлення зразки зберігались у лабораторних умовах при температурі +15-18°С з відносною вологістю 70-75 % до набору проектної міцності бетону (рис. 3, 4).

Для влаштування клейового з'єднання використовується двохкомпонентний (полімерне в'язуче, наповнювач) акриловий клей, хімічний склад якого розроблений у Харківській національній

академії міського господарства. Найоптимальнішим складом клею для проведення будівельних робіт є: 100 мас-частин полімеру, 100 мас-частин затверджувача, 150 – 300 мас-частин наповнювача в залежності від крупності кварцового піску.



Рис. 4. Зразки на стадії підготовки до випробувань

Таблиця 2

Склад прийнятих акрилових клеїв

Номер складу	Витрати матеріалів, мас-частини		
	Полімерне в'язуче – акрилова пластмаса АСТ-Г		Наповнювач
	Полімер	Затверджувач	
1	100	100	-
2	100	100	200

У даному випадку використані два різних склади акрилового клею. Першим складом передбачено клей без наповнювача, а в іншому використано 200 мас-частин наповнювача у вигляді кварцового піску із крупністю зерен 0,315 мм (табл. 2).

Дослідження виконувались на дію короткочасних навантажень в лабораторних умовах на універсальному пресі УДМ-50 (рис. 5).

Під час проведення експериментальних досліджень відмічались характерні особливості деформування, а також визначено особливості руйнування.



Рис. 5. Випробування дослідних зразків: стиск

Згідно прийнятої програми експериментальних досліджень було випробувано три серії дослідних зразків на стиск, в яких завдяки обраній схемі прикладання навантаження клейові з'єднання працювали на зріз. Також визначено характер руйнування конструкцій та вплив різних факторів на їх несучу здатність (табл. 3).

Особливістю виготовлення зразків, яка могла вплинути на їх міцність, була можливість не дотримання вертикальної осі, що призвело б до появи додаткових внутрішніх зусиль. Цього вдалося уникнути завдяки обраній схемі бетонування в горизонтальному стані, що також дало змогу отримати бетон рівноміцний по всій висоті зразка.

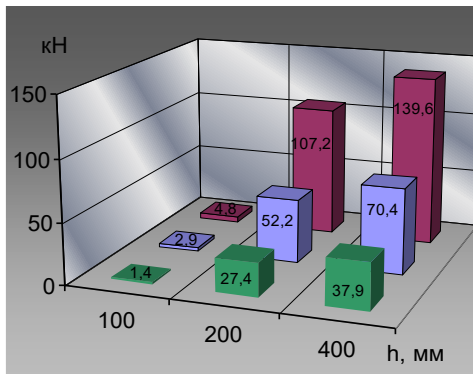
2. Результати експериментальних випробувань

Результатом випробувань стали значення несучої здатності дослідних зразків та клейового з'єднання при роботі на зріз. Використовуючи значення міцності бетонних кубів та призм та залежність визначили несучу здатність використаного бетону на зріз, яка наближено в 2 рази більша ніж на розтяг. Оскільки як і при випробуванні на розтяг точність вимірів несучої здатності зразків на стиск склала 0,1 кН, то міцність клейового з'єднання визначалась із точністю 0,01 МПа.

Таблиця 3

**Несуча здатність дослідних елементів, що працюють на зріз
для другого складу бетону**

Серія	Несуча здатність			Розбіжність, %
	дослідних зразків, кН	бетону на зріз, МПа	клејове з'єднання, МПа	
С-БК-100	1,4	5,5	0,14	-
С-К1-100	27,4		2,74	50
С-К2-100	37,9		3,79	31
С-БК-200	2,9		0,15	-
С-К1-200	52,2		2,61	53
С-К2-200	70,4		3,52	36
С-БК-400	4,8		0,12	-
С-К1-400	107,2		2,68	51
С-К2-400	139,6	3,49	37	



**Рис. 6. Залежність несучої здатності дослідних зразків,
що працюють на зріз, від складу акрилового клею
та геометричних розмірів**

Отримані результати (рис. 6) говорять про можливість влаштування запропонованого типу клейових з'єднань і у випадку їх роботи на зріз. Цей вид роботи є найбільш поширеним у несучих конструкціях (стійки, балки, плити). Як видно із таблиці наведеної вище, несуча здатність елементів стійок прямопропорційна площі контакту сталі з бетоном, тому ми можемо говорити про лінійну залежність міцності від геометричних розмірів зразка. Тобто в скільки разів зростає площа контакту, в скільки ж приблизно разів

підвищується несуча здатність елемента . Це дає змогу говорити про середнє значення несучої здатності клейового та безклейового з'єднань сталі з бетоном обраного.

Значення несучої здатності клейового з'єднання визначалося шляхом розподілу зрізуючого зусилля по площі грані, яка зруйнувалася. Як і у випадку досліджень клейового шва на розтяг більш міцним виявилось з'єднання утворене акриловим клеєм другого складу (з наповнювачем). Пояснення цього явища з фізико-хімічної точки зору наведено вище. Тобто міцність з'єднання у порівнянні з клеєм без наповнювача зросла в 1,34 разів і склала 3,6 МПа (рис. 7). Це є доволі суттєвим враховуючи те, що при введенні наповнювача не лише покращуються адгезійні властивості сполуки, а й збільшується її робочий об'єм, що дає економію у порівнянні з вартістю кварцового піску більш коштовних полімеру та затверджувача.

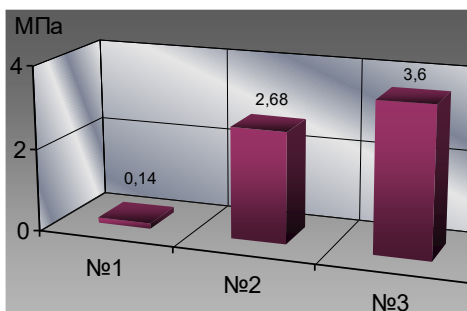


Рис. 7. Залежність несучої здатності клейових з'єднань дослідних зразків, що працюють на зріз, від складу акрилового клею

Щодо значної розбіжності отриманих практично результатів у порівнянні з отриманою емпіричним шляхом міцністю бетону на зріз, до якої має наближатися значення несучої здатності клейового з'єднання, то це пояснюється значним припущенням теоретичного значення, яке може варіюватися в межах $\pm 25\%$. Отже отримана розбіжність у приблизно 35% є задовільною у нашому випадку, якщо врахувати, що конструкції руйнувались по менш міцній грані (рис. 8) та мали клейове з'єднання з невеликою кількістю (до 10% поверхні) браку («раковини») (рис 9), вплив яких на числове значення міцності не було враховано.



Рис. 8. Дослідні зразки після випробування на стиск



Рис. 9. Поверхня контакту сталі та бетону після руйнування

Руйнування стійок лише по одній грані можна пояснити також наявністю незначного випадкового ексцентриситету прикладання навантаження під час випробувань, якого в більшості випадків не вдається уникнути. Але попри ці фактори загальна тенденція зміни міцності несучої здатності клейового з'єднання з урахуванням запланованих чинників лишається чіткою і незмінною.

3. Комп'ютерне моделювання перерізів досліджуваних елементів

Заключним етапом дослідження є чисельне моделювання обраного перерізу за допомогою програмного модуля «Конструктор перерізів» ПК «ЛІРА-САПР»¹¹, вибір якого обумовлений наступними можливостями:

¹¹ Barabash, Maria & Pysarevskyi, Bogdan & Bashynskyi, Yaroslav. (2020). Material Damping in Dynamic Analysis of Structures (With LIRA-SAPR Program). Civil and Environmental Engineering. 16. 10.2478/cee-2020-0007

- задавання фізико-механічних характеристик матеріалів, що входять до перерізу, з метою визначення напружень, які нелінійно залежать від деформацій;
 - обчислення жорсткісних характеристик перерізу і його складових частин;
 - задавання законів нелінійного деформування смугового і профільного прокату;
 - відображення НДС у вигляді мозаїк, ізополів і епюр напружень.
- У роботі оцінка НДС виконана ліцензійним програмним забезпеченням, у якому використовуються ненормативні одиниці виміру напружень (т/м^2), тому на виведених в автоматичному режимі графіках та при порівнянні результатів розрахунків використано програмні одиниці виміру¹².

При моделюванні враховується фізична нелінійність роботи двох матеріалів – бетону та сталі шляхом введення розрахункових деформаційних параметрів діаграм деформування згідно діючих норм.

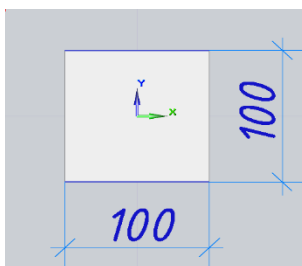
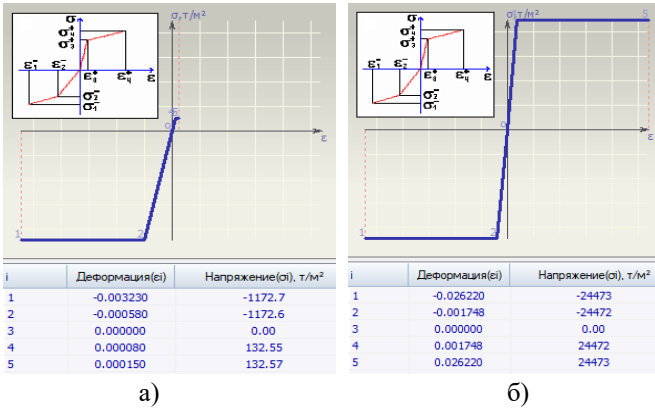


Рис. 10. Змодельований тип перерізу

У «Конструкторі перерізів» розрахунковий переріз триангулюється на елементарні площинки трикутної форми, розмір і матеріал яких може задавати користувач. Визначення внутрішніх зусиль у перерізі виконується за допомогою чисельного інтегрування напружень по площі елементарних площинок. Використання апарату чисельних методів наближеного вирішення системи нелінійних рівнянь рівноваги між внутрішніми та зовнішніми зусиллями, що діють на переріз у програмному модулі дозволяє отримати розподіл нормальних напружень, поздовжніх деформацій, зусиль в елементах перерізу (рис. 11).

¹² Gorodetsky, O. & Barabash, Maria & Filonenko, Y. (2019). Numerical Methods for Determining Stiffness Properties of a Bar Cross-Section. Cybernetics and Systems Analysis. 55. 1-7. 10.1007/s10559-019-00138-3

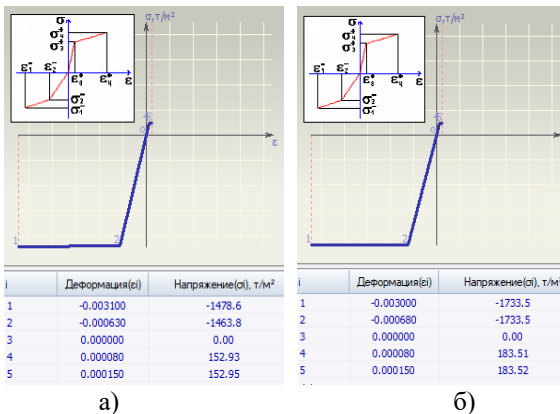


**Рис. 11. Діаграми деформування матеріалів:
а) бетон класу С16/20; б) арматура**

Діаграми деформування матеріалів задаються білінійними (по типу діаграм Прандтля) шляхом введення вручну нормативних параметрів.

В рамках дослідження впливу класів бетону на несучу здатність перерізу першого типу окрім класу бетону С16/20 пропонується розглянути класи С20/25 і С25/30, як найбільш розповсюджені у будівельному виробництві. Параметри діаграм деформування представлені на рис. 12.

Робота бетону на розтяг також враховується.



**Рис. 12. Діаграми деформування бетонів:
а) класу С20/25; б) класу С25/30**

В якості основної характерної комбінації навантажень прийнятий позацентровий розтяг із великими ексцентриситетами (переріз стиснуто– розтягнутий). Цей вид НДС є також характерним для чистого згину і позацентрового стиску із великими ексцентриситетами. Ексцентриситет e_0 приймаємо таким, що дорівнює $2 \cdot h$, де h – висота перерізу, 100 мм.

Поступово збільшуючи значення поздовжнього зусилля N і згинального моменту M , доводимо зразки до руйнування. При цьому значення ексцентриситету e_0 не змінюється.

У результаті отримуємо значення нормальних напружень (рис. 13), відносних деформацій (рис. 14), розподілені уздовж висоти перерізу.

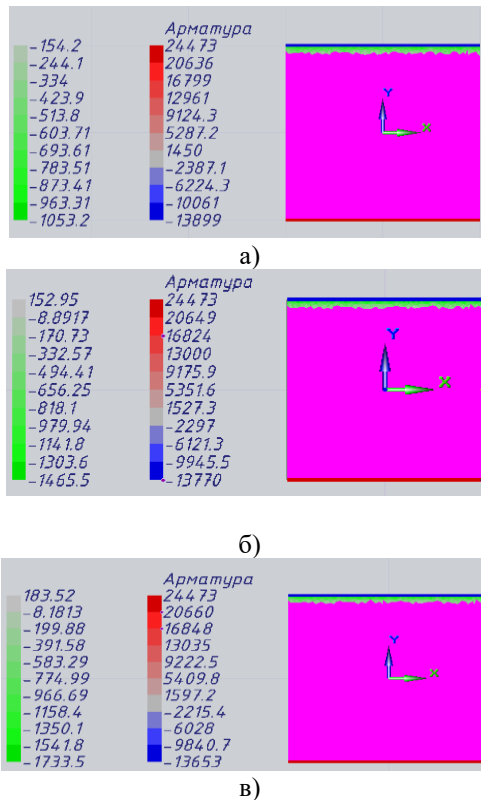
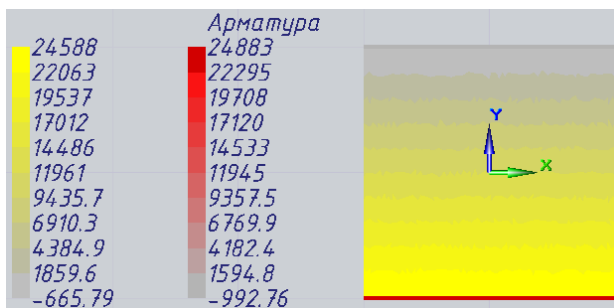
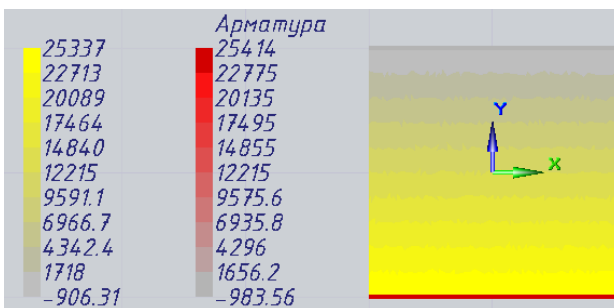


Рис. 13. Нормальні напруження перед руйнуванням перерізів із бетону класів: а) С16/20; б) С20/25; в) С25/30

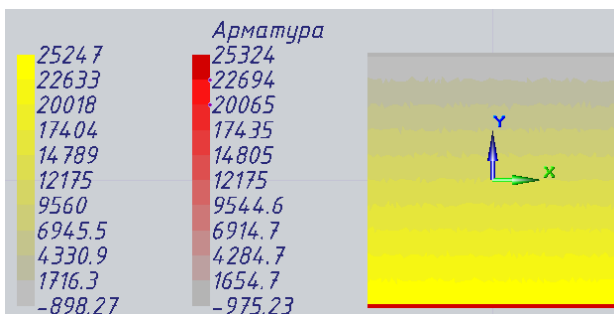
У результаті розрахунку виявилось, що всі досліджувані перерізи мають однакове значення несучої здатності, а саме $M_{ult} = 0,7833 \text{ тм}$, $N_{ult} = 3,9165 \text{ т}$.



а)



б)



в)

Рис. 14. Відносні поздовжні деформації перед руйнуванням перерізів із бетону класів: А) С16/20; б) С20/25; в) С25/30

Переріз у граничному стані перед руйнуванням при такому НДС має значну висоту розтягнутої зони, відповідно – значну площу виключеного з роботи (зруйнованого) розтягнутого бетону, а рівновага в ньому майже повністю забезпечується зовнішнім армуванням (рис. 2.6). Саме тому клас бетону практично не впливає на несучу здатність перерізу. Руйнування перерізу наступає при вичерпанні несучої здатності розтягнутої арматури.

Графіки розподілу нормальних напружень по висоті перерізу (рис. 15) свідчать про те, що бетон майже не приймає участі в сумісній роботі із сталевую арматурою, навіть при урахуванні різниці в модулях деформацій сталі і бетону. Рівновага між внутрішніми та зовнішніми зусиллями майже повністю забезпечується сталевую арматурою.

Аналізуючи графіки розподілу відносних деформацій по висоті перерізу (рис. 16), можна виділити наступне:

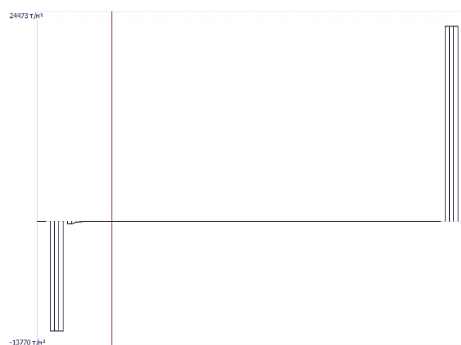
- найбільші поздовжні деформації стиску, які виникають у найбільш віддаленій від центру ваги точці перерізу, сталевій арматурі розрізняються незначно, в межах 1,8% – від -0,000975 (клас бетону С25/30) до -0,000993 (клас бетону С16/20).

- найбільші деформації розтягу, також виникають по грані сталевій арматурі близькі до граничних $\varepsilon_{au}=0,026$ розрізняються незначно, в межах 2,1% – від 0,0248 (клас бетону С16/20) до 0,0253 (клас бетону С25/30).

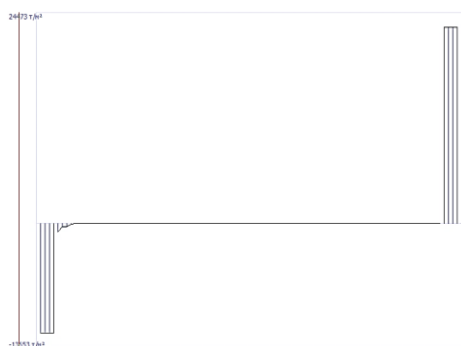
Для модулів деформацій матеріалів E_m сталевій арматури характерним є те, що їх значення значно відрізняються один від одного – модуль деформацій верхньої арматури в 14,48 разів більше, ніж нижньої. Це пояснюється різними стадіями роботи цих арматурних елементів – якщо нижній працює у пластичній стадії і є близьким до руйнування, то верхній працює у межах пружної стадії роботи.



а)

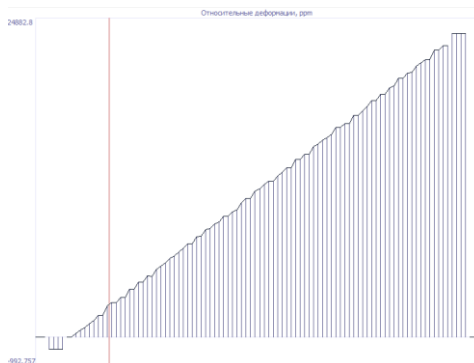


б)

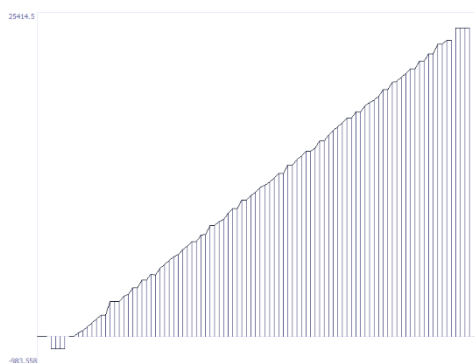


в)

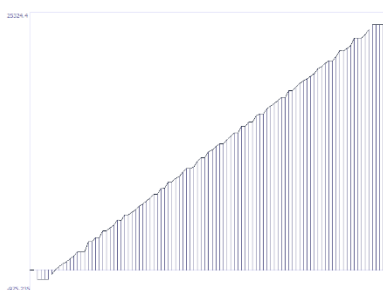
Рис. 15. Епюри нормальних напружень перед руйнуванням перерізів із бетону класів: А) С16/20; б) С20/25; в) С25/30



а)



б)



в)

Рис. 16. Епюри відносних поздовжніх деформацій перед руйнуванням перерізів із бетону класів: а) C16/20; б) C20/25; в) C25/30

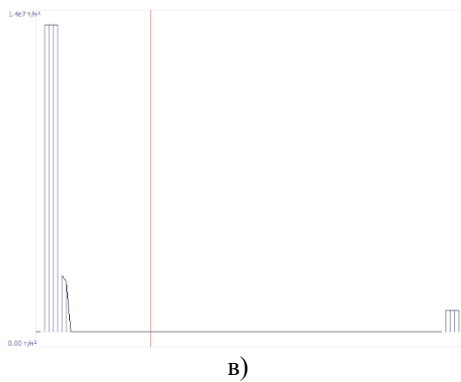
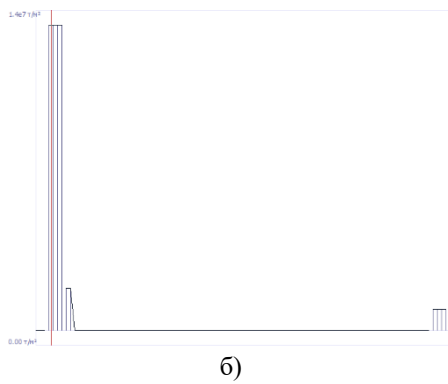
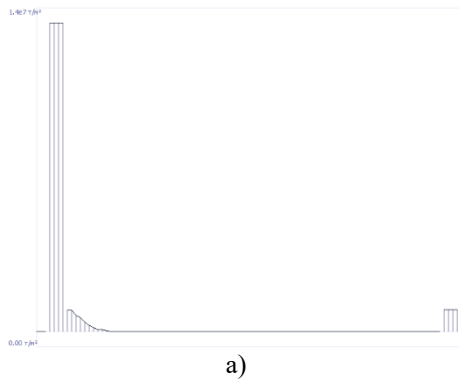


Рис. 17. Епюри модулів деформацій перед руйнуванням перерізів із бетону класів: а) С16/20; б) С20/25; в) С25/30

Значення модулів деформацій (рис. 17) розтягнутих арматурних елементів для різних класів бетону, як і поздовжні деформації, мало відрізняються один від одного – до 2,1% – від $9,63 \cdot 10^5$ МПа до $9,75 \cdot 10^5$ МПа.

Таким чином, для обраної комбінації зовнішніх навантажень M_{ed} і N_{ed} , що викликає НДС позацентрового розтягу із великими ексцентриситетами збільшення класу бетону не впливає на несучу здатність обраного перерізу за умови рівномірного прикладання навантаження. Через те, що бетон у граничній стадії роботи (безпосередньо перед руйнуванням) працює переважно на розтяг, він не вносить значного ефекту у збільшення моменту внутрішньої пари сил. Ситуацію також ускладнює наявність сталеві арматури у стиснутій зоні бетону, що зменшує і без того невелику висоту стиснутої зони.

Використання такого типу перерізу більш доцільне для переважно стиснутих елементів (позацентровий стиск із малими ексцентриситетами), в яких бетон може більш суттєво вплинути на несучу здатність перерізу.

Відносно велике значення максимальних поздовжніх деформацій стиску бетону пояснюється особливістю прийнятих діаграм деформування матеріалів, а саме наявністю прямої ділянки, що характеризує пластичну роботу перерізу. Після того, як бетон починає працювати пластично – напруження у ньому практично не зростають і ітераційний алгоритм процесу пошуку рішення системи рівнянь рівноваги в залежності від характеру триангуляції перерізу може знайти рівновагу у будь-якій точці прямої ділянки діаграми деформування бетону.

Аналогічний характер роботи проявляється у перерізах при розрахунку їх на позацентровий стиск/розтяг із великими ексцентриситетами. Ексцентриситет e_0 приймаємо таким, що дорівнює $2 \cdot h$, де h – висота перерізу, 100 мм.

ВИСНОВКИ

Розроблена програма досліджень та застосовані технічні засоби дають змогу здобути потрібні експериментальні дані для визначення несучої здатності швів з'єднання за допомогою акрилового клею із заданою точністю та виявити характер руйнування дослідних зразків.

Використання бетонів та клеїв різних складів, варіативності геометричних розмірів, дозволяють вивчити вплив цих факторів на несучу здатність і деформативність досліджуваних елементів.

Застосовані схеми прикладення навантажень задовольняють потребу в дослідженні обраних видів впливу на площу контакту сталь-бетон, виключаючи можливість появи незапланованих внутрішніх зусиль.

Обрані для виготовлення експериментальних зразків матеріали (сталь, бетон, акриловий клей) мають фізико-механічні властивості, що характерні для матеріалів, які широко використовуються у практиці будівництва.

Дослідження клейових з'єднань з урахуванням прийнятих складів клею та бетону, геометричних розмірів дало можливість простежити підвищення несучої здатності елементів із застосуванням міцнішого бетону та акрилового клею з наповнювачем до 30% по кожному фактору відповідно.

Під час завантаження в конструкціях із клейовими з'єднаннями сталі та бетону, шляхом приклеювання свіжоукладеної бетонної суміші з допомогою акрилового клею з наповнювачем, забезпечується їх сумісна робота до моменту руйнування.

Чисельне моделювання обраного перерізу за допомогою програмного модуля «Конструктор перерізів» ПК «ЛПРА -САПР» дає можливість достовірно оцінити роботу компонентів конструкції з урахування зміни значної кількості параметрів.

АНОТАЦІЯ

Проведено дослідження нового способу забезпечення сумісної роботи сталі та бетону у будівельних конструкціях, суть якого полягає у приклеювання бетонної суміші до металевої частини. Для влаштування клейового з'єднання було обрано багатокомпонентний акриловий полімер. Визначалася несуча здатність клейового шва та вплив на неї складу акрилового композиту, класу бетону та площі контакту між компонентами. Виготовлення та випробування дослідних зразків проводилися у лабораторних умовах. Елементи випробовувалися на стиск при умові роботи клейового з'єднання на зріз. Обрана методика експериментальних досліджень дозволила у повній мірі вирішити поставлені задачі, а саме визначення несучої здатності елементів і клейових швів, характер руйнування та недоліки запропонованого методу забезпечення сумісної роботи сталі та бетону. Проведено скінченоелементне моделювання досліджуваного перерізу за допомогою «Конструктора перерізів» ПК «ЛПРА-САПР».

ЖИТЕПАТҮПА

1. Review on adhesive joints and their application in hybrid composite structures. 2019. Journal of Adhesion Science and Technology 33(14):1-24 DOI:10.1080/01694243.2018.1543528

2. Horb O., Davidenko Y., Skurupiy O., Mytrofanov P. (2020). Application of Bonding Concrete to Reinforcement Using Adhesives in Steel Concrete Composite Structure. Proceedings of the 2020 session of the 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering (Paris, France, August 26-28, 2020). Pp. 2 – 9. https://phdsymp2020.sciencesconf.org/data/pages/Proceedings_phdsymp_2021.pdf

3. Lapenko, O., Baranetska, D., Makarov, V., Baranetskyi, A., 2020. Designing of Structural Construction and Orthotropic Slabs from Steel Reinforced Concrete. MSF 1006, 173–178. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1006.173>

4. Zolotov S., Firsov P., Muhamad H. (2020). Evaluation of Stress-Deformed Condition Level of Glued Materials for the Without Anchor Steel-Concrete Joint. In Lecture Notes in Civil Engineering (Vol. 47, pp. 95–102). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_12

5. The Effect of Surface Treatment on the Behavior of Toughened Acrylic Adhesive/GRP(epoxy) Composite Joints. 2010. Journal of Adhesion Science and Technology. 24(11-12):1903–1916 DOI:10.1163/016942410X507641

6. R.D. Adams and W.C. Wake. Structural adhesive joints in engineering, Elsevier Applied Science, London and New York, 1984, 309 pp. <https://doi.org/10.1002/pol.1985.130231111>

7. R. Hunter, A. Vizán, J. Pérez, J. Möller, J. Leyrer, L.F.M. da Silva. Effect of the structural reinforcement of composite adherends on the mechanical strength of adhesive joints. Materials Science & Engineering Technology. 2017. Vol. 48, № 6. P. 546-555. doi.org/10.1002/mawe.201600565

8. P. K. Mallick. Optimization of Structural Adhesive Joints. Structural Adhesive Joints: Design, Analysis and Testing. 2020. P. 79-96. DOI:10.1002/9781119737322.ch3

9. Abolfazl Tutunchi, Rahman Kamali. Abbas Kianvash. Adhesive strength of steel–epoxy composite joints bonded with structural acrylic adhesives filled with silica nanoparticles. Journal of Adhesion Science and Technology. 2015. Vol. 29(3). DOI:10.1080/01694243.2014.981469

10. Sina Ebnesajjad and Arthur H. Landrock. Adhesives Technology Handbook. Third Edition. 2015. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-18392-4>

11. Barabash, Maria & Pysarevskyi, Bogdan & Bashynskyi, Yaroslav. (2020). Material Damping in Dynamic Analysis of Structures (With LIRA-SAPR Program). Civil and Environmental Engineering. 16. 10.2478/cee-2020-0007

12. Gorodetsky, O. & Barabash, Maria & Filonenko, Y. (2019). Numerical Methods for Determining Stiffness Properties of a Bar Cross-Section. Cybernetics and Systems Analysis. 55. 1-7. 10.1007/s10559-019-00138-3

Information about the authors:

Horb Oleksandr Hryhorovych,

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Computer Technologies of Construction
and Airport Reconstruction Department

National Aviation University

1, Liubomyra Huzara ave., Kyiv, 03058, Ukraine

Lapenko Oleksandr Ivanovych,

Doctor of Technical Sciences,

Professor at the Computer Technologies of Construction and Airport
Reconstruction Department

National Aviation University

1, Liubomyra Huzara ave., Kyiv, 03058, Ukraine

Shevchenko Oleksandra Volodymyrivna,

Doctor of Philosophy,

Associate Professor at the Computer Technologies of Construction
and Airport Reconstruction Department

National Aviation University

1, Liubomyra Huzara ave., Kyiv, 03058, Ukraine