

УДК 624.04:539.3

Н.В.Середа¹, О.О.Чупринін¹, В.Ю. Щербов²¹Харківський національний університет міського господарства імені О.М.Бекетова, Україна²ТОВ «Фелікс 2016», Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НА МІЦНІСТЬ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАЛЬ-БЕТОН НА АКРИЛОВИХ КЛЕЯХ

У статті розглянуто мету та завдання досліджень міцності сталевоклеєвих з'єднань сталь-бетон на акрилових клеях, показана їх актуальність. Описана методика проведення розрахунків, що дозволяє визначити напруження і переміщення на контактах сталь-клей і клей-бетон. Наведено рекомендації щодо раціонального впровадження в практику будівництва безанкерного способу кріплення що дозволяє зменшити матеріаломісткість та трудомісткість робіт.

Ключові слова: напружено-деформований стан, міцність, пружність, осесиметрична задача, багатоплоскова система, акрилові клеї, з'єднання сталь-бетон.

Постановка проблеми

В даний час при виробництві будівельних робіт, а також при реконструкції будівель і споруд кріплення сталевими болтами і анкерами будівельних вузлів, інженерних комунікацій, технологічного обладнання є не економічним через високу вартість металу, трудомісткості підготовчих робіт, зниження міцності з'єднання внаслідок корозії і інше. Більш ефективним є спосіб поверхневого приклеювання з використанням з'єднання сталь-бетон. Для визначення можливості застосування поверхневого приклеювання досліджена міцність сталевоклеєвих з'єднань, а також проаналізовані діючі на вузол кріплення навантаження.

У практиці будівництва набув поширення безанкерний спосіб кріплення технологічного обладнання (рис. 1), інженерних комунікацій і конструкцій [1-2]. Кріплення за цим способом здійснюється шляхом приклеювання до поверхні бетону кріпильних вузлів і опорних частин обладнання або конструкцій, а також інженерних комунікацій. З цією метою широко використовуються акрилові клеї. Численні експериментальні дослідження міцності зазначеного з'єднання, а також його впровадження в практику будівельного виробництва свідчать про зниження термінів будівництва будівель та споруд, зменшення матеріаломісткості та трудомісткості робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Більшість теорій деформування і руйнування клейових з'єднань сталь-бетон на першому етапі, до появи мікроруйнування, розглядають, як правило, тільки пружні деформації. Моделі, засновані на теоріях пластичності, не можуть описати багато особливостей деформування клейових з'єднань. Тут не-

обхідно використання більш загальних методів механіки [8-10].

Несуча здатність з'єднання сталь-бетон визначається міцністю бетону, конструктивними особливостями кріплення вузла, а так же величиною концентрації напруження на контакті клей-бетон [3,7].

Під дією осесиметричного навантаження кругла пластина прогинається, і її серединна поверхня викривляється, утворюючи поверхню прогину. В даному випадку має місце виникнення осесиметричних напружень.

Існують спільні шляхи вирішення осесиметричної задачі, засновані на рівняннях, які описують деформацію пружного середовища під навантаженням.

Це дає можливість дослідження напруження і переміщень в елементах конструкції клейового з'єднання пластини будь-якої геометрії.

Основні труднощі представляє розв'язання прямої задачі, а саме визначення напружень, деформацій і переміщень тіла по заданим об'ємним навантаженням, а також силовим або кінематическим впливів, прикладеним до його поверхонь. Виходячи з цього, тут вирішується осесиметрична задача теорії пружності для тришарових тіл.

Формулювання мети статті

В роботі запропоновано спосіб застосування безанкерного кріплення в будівництві, проведені теоретичні дослідження напружено-деформованого стану з'єднання сталь-бетон на акрилових клеях. Виконані дослідження авторів [4-6] показали, що в елементах безанкерного кріплення в разі впливу на вузол розрахункового зусилля виникають напруження, що не перевищують межі пружності. Тому була розглянута осесиметрична задача теорії пруж-

ності для багатшарової системи, пов'язаної між собою умовами безперервності напружень і переміщень, при осесиметричному довільному навантаженні.

Викладення основного матеріалу

Для вирішенні осесиметричної задачі теорії пружності багатшарової системи встановлено, що кожен шар характеризується трьома параметрами: товщиною h_i , модулем пружності E_i і коефіцієнтом Пуассона μ_i . Останній підстильний шар не обмежений у вертикальному і радіальному напрямках (рис.2).

Щоб вирішити поставлену задачу, необхідно підібрати функції напружень і визначити граничні умови названого з'єднання.

На поверхні багатшарової системи задані нормальні напруження, розподілені симетрично з будь-якого закону. Дотичні напруження на поверхні системи дорівнюють нулю. Прийнята умова для дотичних напружень не має принципового значення і задана відповідно до граничних умов, що представляють практичний інтерес (випадок вертикального навантаження).

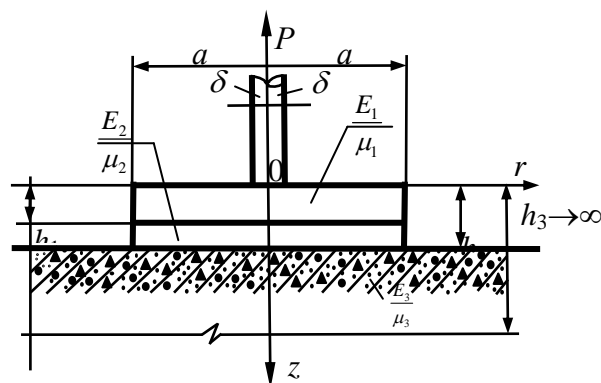


Рис. 2. Розрахункова схема клейового з'єднання

Компоненти тензора напружень і переміщень в циліндричній системі координат позначимо в такий спосіб: σ_z – нормальні напруження на площадці, перпендикулярній до осі z ; σ_r – нормальні напруження на площадці, перпендикулярній до осі r ; σ_θ – нормальні напруження на площадці, перпендикулярній до осі θ ; τ_{rz} – дотичні напруження; w – зміщення вздовж осі z ; u – зміщення вздовж осі r .

В умовах осесиметричної задачі компоненти тензора напружень і зміщення виражаються через функції напружень в такий спосіб:

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

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

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

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

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

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

У виразах (1)-(6) ∇^2 – гармонійний оператор в системі циліндричних координат. Він дорівнює

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

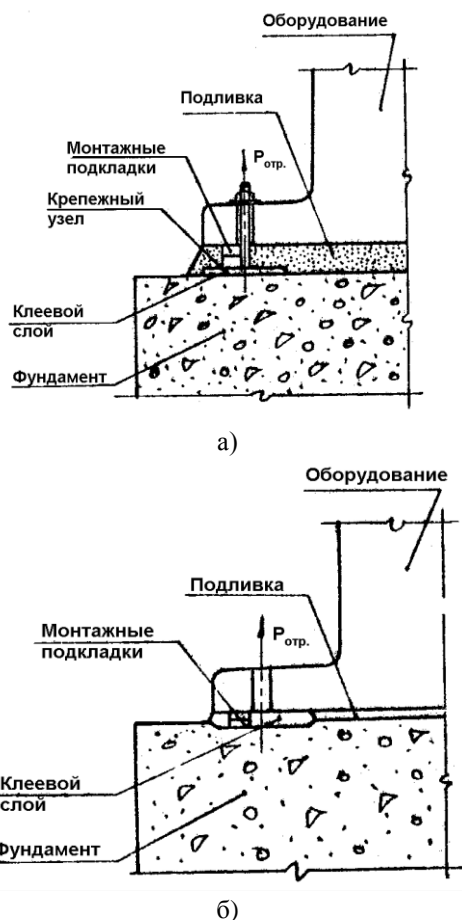


Рис.1. Кріплення обладнання шляхом приклеювання кріпильного вузла (а) і опорної частини обладнання (б) до поверхні бетону фундаменту

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

$$\nabla^2 \Phi = 0, \text{ де } \nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) - \text{бігармонічний}$$

оператор в системі циліндричних координат. Для побудови рішення даної задачі скористаємося рівнянням (7) в межах i -го шару:

$$\Phi_i^0 = (A_i \cdot e^{-kz} + B_i \cdot e^{-kz} + D_i \cdot z \cdot e^{-kz} + C_i \cdot z \cdot e^{-kz}) \cdot J_0(k \cdot z), \quad (8)$$

де k – довільне дійсне число; A_i, B_i, C_i, D_i – невідомі функції; $J_0(k \cdot z)$ – функція Бесселя нульового порядку першого роду. Користуючись виразом (8), отримуємо нове рішення рівняння (7). В межах i -го шару воно матиме вигляд

$$\Phi_i^0 = \int_0^r (A_i \cdot e^{-kz} + B_i \cdot e^{-kz} + D_i \cdot z \cdot e^{-kz} + C_i \cdot z \cdot e^{-kz}) \cdot J_0(k \cdot z) dk. \quad (9)$$

Щодо функцій A_i, B_i, C_i і D_i припускаємо, що вони задовольняють умовам, які забезпечують рівномірну збіжність невластних інтегралів (9) у всій області вимірювання параметрів. Тоді функції напружень для кожного шару прийнятої нами системи матимуть вигляд: для 1-го шар

$$\Phi_1 = \int_0^r (A_1 e^{-kz} + B_1 e^{-kz} + C_1 z e^{-kz} + D_1 z e^{-kz}) \cdot J_0(kz) dk; \quad (10)$$

для 2-го шару ($i = 2$)

$$\Phi_2 = \int_0^r (A_2 e^{-kz} + B_2 e^{-kz} + C_2 z e^{-kz} + D_2 z e^{-kz}) \cdot J_0(kz) dk; \quad (11)$$

для 3-го шару ($i = 3$)

$$B_3 = C_3 = 0 \quad (12)$$

$$\Phi_3 = \int_0^r (A_3 e^{-kz} + B_3 e^{-kz} + C_3 z e^{-kz} + D_3 z e^{-kz}) \cdot J_0(kz) dk. \quad (13)$$

Для визначення A_i, B_i, C_i і D_i дотримуємося граничних умов на поверхні і умов сполучення між шарами. Для цієї мети представимо функцію розподілу нормального навантаження по поверхні 1-го шару

$$\left| \sigma_{z_1} \right|_{z=0} = f(r) \quad (14)$$

за допомогою інтеграла Фур'є-Бесселя.

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

$$f(r) = \int_0^a J_0(kr) k dR \cdot \int_0^\delta f(r) J_0(kr) t dt \quad (15)$$

Виразом (13) можна надати інший вид, якщо позначити

$$k \int_0^\delta f(r) J_0(kr) t dt = \varphi(k), \quad (16)$$

$$f(r) = \int_0^a J_0(kr) \cdot \varphi(k) dk. \quad (17)$$

Компоненти виразів σ_{z_1} і τ_{rz_1} для 1-го шару визначимо відповідно до виразень (1), (4) і (9):

$$\sigma_{z_1} = \int_0^r k^2 J_0(kr) \{ (1 - 2\mu_1) + D_1 + k(A_1 + D_1 z) + e^{kz} [(1 - 2\mu_1)C_1 - k(B_1 + C_1 z)] \} dk; \quad (18)$$

$$\tau_{rz_1} = - \int_0^r k^2 J_0(kr) \{ e^{-kz} [2\mu_1 D_1 - k(A_1 + D_1 z)] - e^{-kz} [2\mu_1 D_1 - k(B_1 + C_1 z)] \} dk. \quad (19)$$

Компоненти напружень на поверхні 1-го шару повинні задовольняти граничним умовам задачі:

$$\left| \sigma_{z_1} \right|_{z=0} = f(r); \quad \left| \tau_{rz_1} \right|_{z=0} = 0,$$

або в розгорнутому вигляді на підставі виразів (14) - (16)

$$f(r) = \int_0^\infty k^2 J_0(kr) [(1 - 2\mu_1)D_1 + kA_1 + (1 - 2\mu_1)C_1 - kB_1] dk = \int_0^\infty J_0(kr) \cdot \varphi(k) dk; \quad (20)$$

$$\int_0^\infty k^2 J_1(kr) (2\mu_1 D_1 - kA_1 - 2\mu_1 C_1 - kB_1) dk = 0. \quad (21)$$

Співвідношення виразів (20) і (21) повинні виконуватися при будь-якому значенні r тому

$$(1 - 2\mu_1)D_1 + kA_1 + (1 - 2\mu_1)C_1 - kB_1 = \frac{\varphi(k)}{k^2} \quad (22)$$

$$2\mu_1 D_1 - kA_1 - 2\mu_1 C_1 - kB_1 = 0. \quad (23)$$

Відповідно до прийнятої задачі, на контактах шарів системи граничні умови, з урахуванням вимоги безперервності компонентів напружень σ_{z_1} , τ_{rz_1} і переміщень u_i , w_i на контактах шарів, матимуть вигляд:

на контакті 1-го і 2-го шарів

$$\left| \sigma_{z_1} \right|_{z=h_1} = \left| \sigma_{z_2} \right|_{z=h_1}; \quad (24)$$

$$\left| \tau_{rz_1} \right|_{z=h_1} = \left| \tau_{rz_2} \right|_{z=h_1}; \quad (25)$$

$$\left| w_1 \right|_{z=h_1} = \left| w_2 \right|_{z=h_1}; \quad (26)$$

$$\left| u_1 \right|_{z=h_1} = \left| u_2 \right|_{z=h_1}, \quad (27)$$

на контакті 2-го і 3-го шарів

$$\left| \sigma_{z_2} \right|_{z=h_2} = \left| \sigma_{z_3} \right|_{z=h_2}; \quad (28)$$

$$\left| \tau_{rz_2} \right|_{z=h_2} = \left| \tau_{rz_3} \right|_{z=h_2}; \quad (29)$$

$$\left| w_2 \right|_{z=h_2} = \left| w_3 \right|_{z=h_2}; \quad (30)$$

$$\left| u_2 \right|_{z=h_2} = \left| u_3 \right|_{z=h_2}. \quad (31)$$

На підставі виразів (1), (4), (5), (10), (11) і (12) з урахуванням граничних умов (24) - (31) і визначення функцій A_i , B_i , C_i і D_i знаходимо компоненти напружень і переміщень. Визначивши зазначені компоненти можна досліджувати напружено-деформований стан клейового з'єднання сталь-бетон з урахуванням зазначених вище факторів.

Висновки

Запропоновані теоретичні дослідження дозволяють аналізувати напружено-деформований стан клейових з'єднань сталь-бетон будівельних конструкцій, в результаті яких з урахуванням функцій напружень отримані вирази для визначення напружень і переміщень на контактах сталь-клей і клей-бетон.

За допомогою цих виразів можна виконати розрахунковий експеримент за визначенням напружень и переміщень як на контактах, так і в тілах клейового шару, бетону і металу, що дає можливість проводити достовірну оцінку міцності, жорсткості і довговічності залізобетонних конструкцій.

Література

1. Золотов, С.М. *Иновационные материалы на основе акриловых полимеров для восстановления и ремонта конструкций объектов строительства и транспорта* [Текст] / С.М. Золотов // *Иновационные технологии диагностики, ремонта и восстановления объектов строительства и транспорта: Сб. науч. тр. - Вып. 30. - Днепропетровск: ПГАСА, 2004. - С. 192-196.*
2. Shutenko, L., Zolotov, M., Zolotov, S. (2006) Compositions on the basis of acrylic polymers for repairing cement-concrete pavements and reinforced concrete bridge structures. *Proceedings of the 1st Polish Road Congress*, 443-450.
3. Шутенко, Л.Н. *Прочность и напряженно-деформированное состояние соединения сталь-бетон на акриловых клеях* [Текст] / Л.Н. Шутенко, М.С. Золотов, В.Ю. Щербов // *Материалы II международной научно-технической конференции «Строительство, реконструкция и восстановление зданий городского хозяйства»*. - Харьков: ХНАГХ, 2007. - С. 109-113.
4. Щербов, В.Ю. *Расчет и зависимость напряженно-деформированного состояния соединения сталь-бетон на акриловых клеях от ряда факторов* [Текст] / В.Ю. Щербов // *Материалы VIII международной научно-технической интернет-конференции «Применение пластмасс в строительстве и городском хозяйстве»*. - Харьков: ХНАГХ, 2008. - С. 63-65.
5. Шутенко, Л.Н. *Определение напряжений и перемещений на контактах клеевого соединения сталь-бетон* [Текст] / Л.Н. Шутенко, М.С. Золотов, В.Ю. Щербов // *Материалы к 46-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов МОК'46. - Одесса, ОГАСА, 2007. - С. 211-212.*
6. Золотова, Н.М. *Влияние технологических факторов и вида нагружения на прочность соединения бетонных элементов акриловыми клеями* [Текст] / Н.М. Золотова, А.О. Гарбуз, В.А. Скляр // *Збірник праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво №4 (1) -2013, стор. 114-122.*
7. Чупрынин, А.А. *Ползучесть и долговечность железобетонных элементов конструкций* [Текст] / А.А. Чупрынин, Н.В. Серета // *Коммунальное хозяйство м. Серія: Технічні науки та архітектура. - Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. - №135. - С. 2-6.*
8. Чупрынин, О.О. *Повзучість та довговічність залізобетонних циліндричних панелей* [Текст] / О.О. Чупрынин, Н.В. Серета // *Коммунальное хозяйство м. Серія: Технічні науки та архітектура. - Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. - №139. - С. 183-187.*
9. Shpachuk, V.P. (2016) Effect of mutually amplifying action two coordinate shock loading in problems of dynamics of knots of machines. *Scientific Bulletin of National Mining University. Scientific and technical journal*, 6 (156), 89-94.
10. Shpachuk, V., Dudko, V., Kostenko, I. (2016) Ergonomic aspects of test objects of the spatial structure on the vibration reliability. *Municipal economy of cities*, 130, 2-7.

References

1. Zolotov, S.M. (2004) Innovative materials based on acrylic polymers for restoration and repair of constructions of construction and transport facilities. *Innovative technologies for*

diagnostics, repair and restoration of construction and transportation facilities: *Sat. sci. tr.*, 30, 192-196.

2. Shutenko, L., Zolotov, M., Zolotov, S. (2006) Compositions on the basis of acrylic polymers for repairing cement-concrete pavements and reinforced concrete bridge structures. *Proceedings of the 1st Polish Road Congress*, 443-450.

3. Shutenko, LN, Zolotov, MS, Shcherbov, V.Yu. (2007) Strength and stress-strain state of the steel-concrete compound on acrylic adhesives. *Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference "Construction, Reconstruction and Restoration of Urban Economy"*, 109-113.

4. Scherbov, V.Yu. (2008) Calculation and dependence of the stress-strain state of the steel-concrete compound on acrylic adhesives on a number of factors. *Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Internet Conference "Application of Plastics in Construction and Urban Management"*, 63-65.

5. Shutenko, LN, Zolotov, MS, Shcherbov, V.Yu. (2007) Determination of stresses and displacements at the contacts of the glue joint steel-concrete. *Materials to the 46th international seminar on modeling and optimization of composites MOK'46*, 211-212.

6. Zolotova, NM, Garbuz, AO, Sklyarov, V.A. (2013) Influence of technological factors and the type of loading on the strength of the jointing of concrete elements with acrylic adhesives. *Collection of works of Poltava National Technical University named after. Y. Kondratyuk Sir Sectoral engineering, construction, 4(1)*, 114-122.

7. Chuprinin, AA, Sereda, NV. (2017) Creep and durability of reinforced concrete structural elements. *Municipal economy of cities. Series: Technical Sciences and Architecture*, 135, 2 – 6.

8. Chuprinin, O., Sereda, N.V. (2017) Creep and durability of reinforced concrete cylindrical panels. *Municipal economy of*

cities, Series: Technical Sciences and Architecture, 139, 183-187.

9. Shpachuk, V.P. (2016) Effect of mutually amplifying action two coordinate shock loading in problems of dynamics of knots of machines. *Scientific Bulletin of National Mining University. Scientific and technical journal*, 6 (156), 89-94.

10. Shpachuk, V., Dudko, V., Kostenko, I. (2016) Ergonomic aspects of test objects of the spatial structure on the vibration reliability. *Municipal economy of cities*, 130, 2-7.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П.Шпачук, Харківський національний університет міського господарства імені О.М.Бекетова, Україна

Автор СЕРЕДА Наталія Василівна
кандидат технічних наук, доцент
Харківський національний університет міського господарства імені О.М.Бекетова
E-mail - Natalisereda3@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9727-5531>

Автор ЧУПРІНІН Олександр Олександрович
кандидат технічних наук, доцент
Харківський національний університет міського господарства імені О.М.Бекетова
E-mail - sasha/chup@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8757-559X>

Автор ЩЕРБОВ Владислав Юрійович
ТОВ «Фенікс 2016»
E-mail - vlad5731848@gmail.com

RESEARCH ON STRENGTH OF STRESS-STRAIN STATE STEEL-CONCRETE ON ACRYLIC GLUES.

N.V. Sereda¹, O.O.Chuprinin¹, V.Yu.Scherbov²

¹O. M. Beketov National University named after, Kharkiv, Ukraine

²LLC Felix, Ukraine

In the article the purpose and tasks of studies of strength of steel-concrete steel-concrete compounds on acrylic adhesives are considered, their relevance is shown.

In practice, the construction of a non-concrete method of fastening of technological equipment, engineering communications and structures has become widespread. Fastening in this way is carried out by gluing to the surface of the concrete fastening units and supporting parts of equipment or structures, as well as engineering communications. To this end, widely used acrylic adhesives. Experimental studies of the strength of this connection, as well as its implementation in the practice of construction production, indicate a decline in the construction of buildings and structures, reducing the material intensity and the complexity of work.

Most theories of deformation and destruction of glue compounds steel-concrete in the first stage, before the appearance of micro-destruction, are considered, as a rule, only elastic deformation. Models based on theories of plasticity, can not describe many features of deformation of glue compounds.

The bearing ability of the connection of steel-concrete is determined by the strength of the concrete, the structural features of the mounting of the site, as well as the magnitude of the stress concentration on the contact adhesive-concrete. The method of conducting calculations is described, which allows to determine the stresses and movement of contacts on steel-glue and glue-concrete.

Recommendations on rational introduction into the practice of building of a non-concrete method of fastening are given. This allows us to reduce the material capacity and the laboriousness of the works.

Keywords: stress-deformed state, strength, elasticity, asymmetric problem, multilayer system, acrylic adhesives, compound steel-concrete