

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.07

ВПЛИВ ВЛАСТИВОСТЕЙ КЛЕЙОВОГО ШАРУ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН З'ЄДНАННЯ ПРИ КЛЕЙОВОМУ АНКЕРУВАННІ СТАЛЕВИХ СТРИЖНІВ У БЕТОН

Кандидати техн. наук С. М. Золотов, О. М. Пустовойтова, д-р техн. наук Л. В. Трикоз, канд. техн. наук С. М. Камчатна, асп. С. А. Савісько

IMPACT OF THE GLUE LAYER PROPERTIES ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THE GLUE ANCHOR FOR THE STEEL ROD IN CONCRETE

PhD (Tech.) S. Zolotov, PhD (Tech.) O. Pustovoitova, Dr. Sc. (Tech.) L. Trykoz, PhD (Tech.) S. Kamchatna, postgrad. student S. Savisko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.205.2023.288882>



Анотація. У статті розглянуті питання розподілення напружень і переміщень вздовж сталевих анкерів, закріплених в бетоні полімерним зв'язуючим – акриловим компаундом. Встановлено, що максимальні значення дотичних, радіальних і колових напружень, що більш повно характеризують роботу з'єднання, змінюються залежно від міцнісних характеристик клейового шару та його товщини за експоненціальним законом. Отримані результати напружень у будь-якій точці клейового з'єднання дають змогу запропонувати методологію проектування сталевих стрижнів у бетоні, закріплених полімерами.

Ключові слова: анкерне з'єднання, акриловий полімер, напружено-деформований стан, модуль пружності.

Abstract. The article deals with the distribution of stresses and displacements along a steel anchor fixed in concrete with a polymer binder - an acrylic compound. It was established that the maximum values of tangential, radial, and circular stresses, which more fully characterize the operation of the connection, change depending on the strength characteristics of the adhesive layer and its thickness according to the exponential law. The obtained results of stress at any point of the adhesive joint allow us to propose a methodology for the design of steel rods in concrete fixed with polymers. As a result of solving the problem of the stressed-strained state of the anchor connection on acrylic adhesives, equations were obtained for determining stresses and strains at any point.

As a result of the analysis of the obtained dependencies, the following conclusions can be drawn. When calculating the strength of anchor joints on acrylic adhesives, it is necessary to take into account the maximum values of tangential, radial, and circular stresses. In order to calculate the strength of the joint, it is necessary to know the strength limit at uniform separation of the glue from the metal surface, as well as at shear for the glue-metal contact. Tangential and normal stresses in the adhesive cylinder and at the adhesive-concrete interface decrease with an increase in the modulus of elasticity of the acrylic adhesive. But this leads to an increase in normal axial stresses in the part of the anchor embedded in concrete and radial stresses at the glue-anchor and glue-concrete contacts. The elasticity modulus of the glue layer is smaller than the elasticity modulus of concrete and metal. Therefore, the adhesive distributes the stresses that arise from the

application of the pull-out force between the anchor and the concrete massif. This is explained by the fact that the pull-out stresses from the anchor are completely transferred to the adhesive layer and then to the concrete. The main vector of tangential stresses does not depend on the ratios of the elasticity modulus of the materials which form the anchor join. The thickness of the adhesive layer has a slight effect on the stress in the glue-anchor contact, but significantly on the stress in the glue-concrete contact.

Keywords: anchor join, acrylic polymer, stress-strain state, elasticity modulus.

Вступ. Великі обсяги відновлювальних робіт передбачають підвищені вимоги не тільки щодо міцності використаних матеріалів, але й швидкості виконання з'єднань частин конструкцій. Суттєве значення має використання сучасних методів кріплення елементів до бетонних або залізобетонних конструкцій, що зазвичай виконується за допомогою анкерів. Акрилові клейові композиції є одним із тих матеріалів, що дає змогу найбільш швидко і якісно з мінімальними затратами з'єднати бетонні та залізобетонні елементи. До переваг клейового анкерування арматурних стрижнів при ремонті, реконструкції та підсиленні конструкцій можна віднести зниження термінів виконання робіт, можливість встановлення анкерів за різних погодних умов, здатність підсиленних конструкцій сприймати проектне навантаження через 6 ÷ 24 год, екологічну безпеку акрилових клеїв для навколишнього середовища.

Полімери і бетони за своєю природою мають анізотропні властивості, тому їхній розрахунок потребує точніших моделей і розрахункових рівнянь, а також застосування досконаліших математичних методів. Особливість створення сучасних конструкцій із композитних матеріалів полягає у проектуванні властивостей цих матеріалів, для чого слід розробляти нові теорії та методи розрахунку, що дали б змогу оцінювати напружено-деформований стан конструкції заданої геометричної форми та неоднорідної структури. Широке застосування композитних матеріалів як несучих елементів конструкцій багатьох сучасних споруд потребує надійних методів

їхнього розрахунку. В Україні відсутні нормативні документи, що регламентують норми проектування таких з'єднань. Існуючі стандарти надають розрахункові рівняння для розрахунку міцності на висмикування анкерів у бетоні під навантаженням розтягування. Однак ці емпіричні рівняння ґрунтуються на експериментах, що не враховують закономірності руйнування полімерного шару. Отже, дослідження напружено-деформованого стану таких з'єднань дасть змогу краще зрозуміти механізм деформації вклеєного анкера, оцінити вплив різних факторів на їхню ефективність і запропонувати методологію проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У попередньому дослідженні [1] авторами встановлено, що через відсутність нормативної методики з проведення випробувань базальтопластикових анкерних з'єднань ускладнюється оцінювання їхньої несучої здатності при дії поздовжніх і поперечних зусиль. Показано, що використані методики дають змогу з достатньою мірою вірогідності визначити зону пружної роботи анкера при відриві, але, чи розповсюджуються ці висновки на полімерні матеріали, залишилося нез'ясованим. У той же час деякі автори доводять доцільність застосування акрилових клеїв для з'єднання бетонних і залізобетонних елементів, анкерування сталевих стрижнів у бетон при будівництві та реконструкції будівель і споруд різного призначення. На підставі експериментів, виконаних авторами роботи [2], показано переваги використання хімічних анкерів на акрилових композиціях для кріплення технологічного

устаткування. Акрилові клеї за своїми механічними властивостями не поступаються з'єднанням на епоксидних клеях, а за технологічними – перевершують їх. Тому їх також застосовують для приклеювання сталевих пластин до поверхні бетону модифікованими акриловими клеями [3]. Міцність такого безанкерного кріплення залежить від класу бетону, товщини клейового шва та інших конструктивних характеристик кріплення вузла.

Однак переважна більшість методик розрахування залізобетонних елементів і конструкцій, у тому числі і за чинними нормативними документами [4, 5], взаємодію арматури з бетоном ураховують лише опосередковано або ж повністю ігнорують. У роботі [6] розроблено загальну модель зчеплення арматури з бетоном, в основу якої покладено функцію універсального параметра – зусилля зчеплення арматурного стрижня з бетоном уздовж поверхні їхнього контакту. Ці зусилля автор визначає за допомогою середніх напружень зчеплення арматури з бетоном, функція яких є нелінійною відносно нормальних напружень в арматурі. Недоліком такого підходу є неврахування інших напружень, які виникають у бетоні і зоні зчеплення анкера з бетоном, що важливо для прогнозування довготривалої міцності анкерних з'єднань. Для розуміння тертя ковзання в контактах метал-полімер у роботі [7] подана модель для контактної зони однієї нерівності, яка ковзає в канавці після повторних циклів, що дає змогу визначити напругу зсуву пари сталь-полімер у відповідній геометрії. В експериментах із 1000 повторюваних циклів було виявлено, що площа контакту змінюється залежно від навантаження та швидкості ковзання, тоді як напруга зсуву становила 20,5 МПа при нормальному тиску 50÷70 МПа незалежно від швидкості, коли нагрівання тертям все ще незначне.

Порівняння результатів теоретичного аналізу та аналізу методом кінцевих елементів, виконаних у роботі [8], показує,

що точність теорії може бути використана для розроблення попереднього проекту анкерів для з'єднання стрижнів з вуглепластику. У цій статті подано теоретичну модель розподілу напруги пружного зсуву на інтерфейсі армованого вуглецевим волокном полімеру і адгезиву однострижневого та багатострижневого анкера для з'єднання. Механічні характеристики анкера для з'єднання з кількома стрижнями внутрішнього конуса оцінюються в межах різних коефіцієнтів тертя і внутрішніх кутів нахилу. Чисельні результати вказують на те, що прямопараболічний з'єднувальний анкер із внутрішнім конусом має значний вплив на зменшення сили зсуву на кінці навантаження. Напруження в полімері вивчалось і в роботі [9], у якій автори навели рекомендації щодо проектування анкерів з армованого вуглецевим волокном полімеру на основі бази даних 51 дрібно-масштабного випробування. Показано, що анкери з вуглепластику мають бути розроблені так, щоб витримувати повну здатність до розтягування смуг композиту. При цьому розподіл ширини тріщини в елементі може спричинити деформації, що перевищують максимально допустиму ефективну деформацію. Щоб досягти повного використання полімеркомпозитного матеріалу, співвідношення матеріалу анкера до смуги вуглепластику має бути більше 2,0.

Автори роботи [10] досліджували вплив радіальних напружень, спричинених анкерним компонентом в анкерній зоні, на властивості розтягування армованих базальтовим волокном полімерних тяжів і визначили допустимі радіальні напруги для проектування та застосування. Експерименти на розтягування були проведені для визначення міцності на розрив армованих базальтовим волокном полімерних тяжів з різними типами кріплення, включаючи склеювання, тертя і стиснення з захисним шаром для досягнення різних рівнів радіальних

напружень. Поздовжня міцність на стиск, поперечна міцність на стиск і міцність на зсув у площині самих армованих базальтовим волокном полімерних тяжів були також виміряні для теоретичного прогнозування. Результати показали, що середні значення граничної міцності армованих базальтовим волокном полімерних тяжів, закріплених тертям і стисненням з різними радіальними напруженнями, на 5, 12 і 15 % нижчі, ніж у зразків, скріплених анкером. Авторами рекомендовано граничні значення радіального напруження в анкерній зоні 50 МПа, щоб гарантувати відсутність зниження міцності, і 130 МПа, щоб уникнути руйнування при стисненні. Ці дані можуть бути покладені в основу розроблення ефективного анкерного кріплення для застосування попереднього напруження армованого базальтовим волокном полімерного тяжа.

Для клейових анкерних систем загальна характеристика усадки матеріалу дуже важлива для остаточного зчеплення між клеєм і стінкою отвору. Реакція затвердіння термореактивних смол пов'язана з хімічною усадкою, що накладається на теплове розширення в результаті екзотермічної ентальпії. Остаточні властивості матеріалу полімеру визначаються цим критичним процесом. У роботі [11] подано підхід до вимірювання на місці тривимірної усадки і теплового розширення для двох анкерних систем на полімерній основі (епоксидна смола з наповнювачем і вінілефір). Вінілефірна система показала вищу усадку, але набагато більш швидко реакцію порівняно з досліджуваною епоксидною смолою. Як показано в роботі [12], для зниження усадкових деформацій найбільш придатним наповнювачем є кварцовий пісок крупністю 0,14 мм у кількості 150 масових частин маси акрилового полімеру. Усадкові деформації у п'ять разів менше, ніж у ненаповненій композиції, і на 10 % менше, ніж при наповненні портландцементом.

Однак відсутність нормативних документів для проектування анкерних клейових з'єднань і недостатність даних про поведінку саме акрилових полімерів для анкерування робить дослідження напруженого стану з'єднання при клейовому анкеруванні сталевих стрижнів у бетон актуальною темою.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою вирішення завдання про напружено-деформований стан анкерного з'єднання на акрилових зв'язуючих є визначення напружень і деформацій в будь-якій точці. Для досягнення мети поставлено окремі завдання дослідження: обґрунтувати метод розрахування клейового анкерного з'єднання на основі розв'язання осесиметричної задачі теорії пружності для багат шарових ізотропних циліндричних тіл; проаналізувати вплив модуля пружності клею і товщини акрилового шару на напруження і переміщення у клеї й бетоні відповідно в контактних зонах між полімером і сталевим анкером, а також між полімером і бетоном; встановити якісні і кількісні закономірності розподілу компонент їхніх напружено-деформованих станів.

Основна частина дослідження

Обґрунтування методу розрахування акрилового анкерного з'єднання. Для такої задачі анкерного з'єднання характерними є деформації, симетричні відносно деякої осі. Осесиметричний розподіл деформацій і напружень виникає в тілах обертання, навантажених осесиметричним способом, а саме в циліндрах круглого перерізу. У таких задачах зручніше застосовувати циліндричну систему координат (r, φ, z) . Через осесиметричний розподіл деформацій і напружень переміщення, деформації і напруження не будуть залежати від кута φ .

При заданому рівні експлуатаційного навантаження бетон, сталевий анкер і акриловий полімер можна вважати пружними тілами, що відповідають закону Гука. Тому напружено-деформований стан

анкерного з'єднання опишемо залежностями теорії пружності для деформації ізотропного напівпростору, на границі якого діє розподілене по коловій області навантаження, що задовольняє умови осьової симетрії. Для випадку осесиметричної деформації тіла, що складається з трьох циліндрів – сталевий анкер, акриловий клей, бетон навколо – система рівнянь теорії пружності зводиться до рівняння рівноваги в переміщеннях (рівняння Ляме)

$$\nabla^2 \nabla^2 F(r, z) = 0, \quad (1)$$

де $F(r, z)$ – функція напружень Лява.

Оператор ∇^2 дорівнює

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

Компоненти тензора радіальних σ_r , колових σ_θ , нормальних осьових σ_z , дотичних τ_{rz} напружень і вектора переміщень $u(r, z), w(r, z)$ через функцію $F(r, z)$ можна виразити такими формулами:

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left(\vartheta \nabla^2 F - \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} \right), \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial}{\partial z} \left(\vartheta \nabla^2 F - \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} \right), \quad (4)$$

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left((2 - \mu) \nabla^2 F - \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left((1 - \mu) \nabla^2 F - \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \right), \quad (6)$$

$$u = - \frac{1 + \mu}{E} \frac{\partial^2 F}{\partial r \partial z}, \quad (7)$$

$$w = \frac{1}{2G_1} \left(2(1 - \mu) \nabla^2 F - \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

де $G_1 = E/2(1 + \nu)$ – модуль зсуву;

E – модуль пружності;

μ – коефіцієнт Пуассона.

Розв'язок цієї осесиметричної задачі теорії пружності при граничних умовах, що відповідають висмикуванню анкера з двошарового середовища, було отримано в роботі [13] як вирази дотичних τ_{rz} , нормальних осьових σ_z , радіальних σ_r і колових σ_θ напружень, осьових w і радіальних u переміщень. На підставі розрахунків за формулами (4)÷(16), отриманих у роботі [13], встановлено характер розподілу напружень і переміщень, що виникають у контактній зоні між полімером і сталевим анкером, а також контактній зоні між полімером і бетоном у забитій частині анкера при впливі зусилля при висмикуванні $P_{\text{висм}} = \frac{\pi d_s^2}{4} \sigma_{z_0}^s$, де d_s – діаметр анкера, $\sigma_{z_0}^s$ – напруження на завантаженому кінці анкера, МПа.

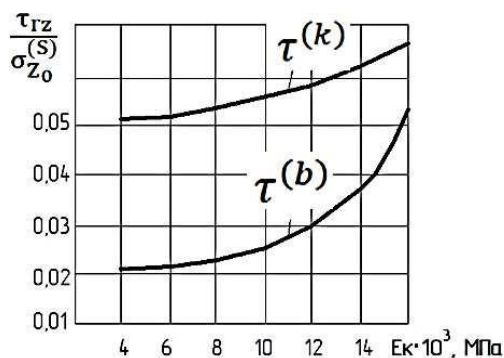
Вплив фізико-механічних властивостей і товщини полімерного шару на напружений стан анкерного з'єднання встановлювали шляхом розрахункового багатофакторного експерименту. При цьому значення модуля пружності полімерного шару приймалися згідно з попередніми дослідженнями авторів впливу кількості наповнювача акрилового компаунду на його модуль пружності.

Розрахунок для модуля пружності полімерного компаунду. Розрахунки виконані для величин модуля пружності акрилового полімеру з наповнювачем $3,8 \cdot 10^3$; $5,1 \cdot 10^3$; $6,1 \cdot 10^3$; $7,3 \cdot 10^3$; $9,5 \cdot 10^3$; $13,3 \cdot 10^3$ МПа. Для порівняння отриманих залежностей з результатами інших дослідників решту вихідних даних було прийнято за роботою [13]: діаметр сталевих анкера $d_s = 2$ см, глибина закладення анкера $l_{\text{анк}} = 20$ см, модуль пружності $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu_s = 0,25$, товщина полімерного шару 1 см, модуль пружності бетону класу С12/15 $E_b = 2,3 \cdot 10^4$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu_b = 0,16$.

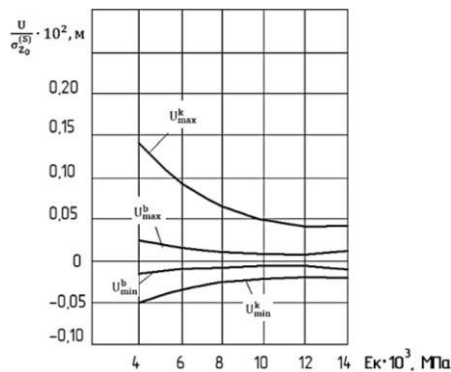
За результатами розрахунків побудовано графіки залежностей максимумів нормальних осевих напружень у сталевій частині анкера σ_z^s , бетони σ_z^b і полімері σ_z^k , дотичних τ_{rz} , радіальних $\sigma_r^{k(b)}$ і колових $\sigma_\theta^{k(b)}$ напружень відповідно в контактній зоні між наповненим полімером

і сталевим анкером і контактній зоні між наповненим полімером і бетоном, а також переміщень у полімері й бетоні W і u на тих самих контактних зонах (рис. 1). Для наочного порівняння величин зусиль отримані результати надано у відносних величинах τ_{rz}/σ_z^s , σ_r/σ_z^s , σ_θ/σ_z^s .

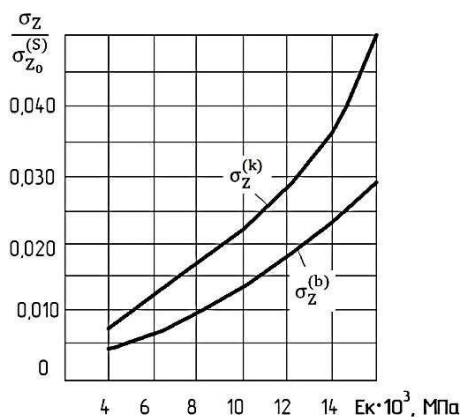
а



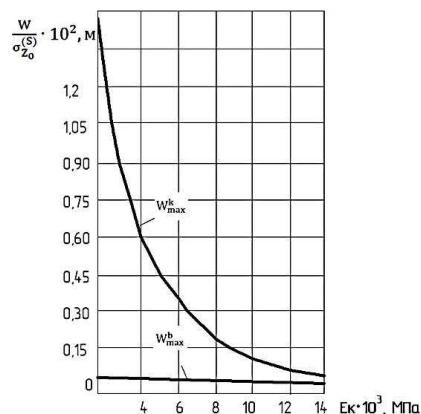
з



б



д



в

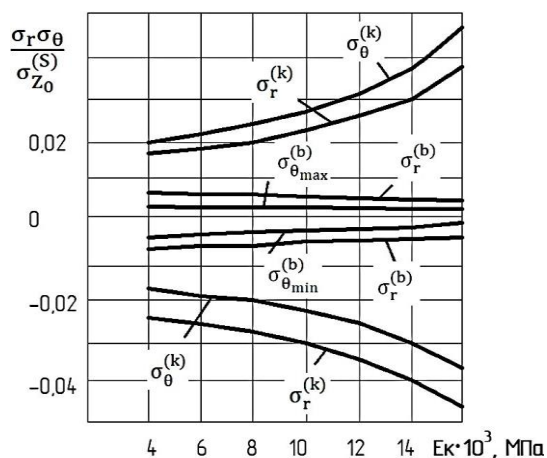


Рис. 1. Залежність максимумів напружень і переміщень від модуля пружності акрилового компаунду в контактній зоні між наповненим полімером і сталевим анкером (к) і контактній зоні між наповненим полімером і бетоном (б): а – дотичні напруження; б – нормальні осеві напруження; в – нормальні колові напруження; з – радіальні переміщення; д – осеві переміщення

Як свідчать дані рис. 1, збільшення модуля пружності акрилових компаундів в анкерних з'єднаннях призводить до підвищення міцності клейового анкерування (рис. 1, а-в) і зменшення переміщень з'єднання (рис. 1, г, д). При збільшенні модуля пружності акрилової композиції з наповненням зменшуються дотичні й нормальні напруження в полімерному циліндрі і контактній зоні між полімером і бетоном. Збільшення нормальних осьових напружень у частині анкера, розташованій у бетоні, і радіальних напружень на поверхнях розділу полімер-сталь і полімер-бетон свідчить про загальне збільшення жорсткості анкерного з'єднання за допомогою наповнених акрилових композицій.

На відміну від суцільного циліндра, колові напруження в тришаровому циліндрі значно перевищують радіальні і досягають свого максимуму в зовнішньому шарі бетону на поверхні контакту, де приблизно в чотири рази більші за радіальні. У внутрішньому полімерному шарі колові і радіальні напруження значно менші, ніж у бетонному шарі. Збільшення модуля пружності E_k акрилової композиції з наповнювачем перерозподіляє напруження, що виникають між сталевим анкером і бетонною обоймою. Це пояснює значне зменшення відносних величин осьових W і радіальних u переміщень при дії сили, що висмикує анкер із з'єднання при навантаженні.

Розрахунок для товщини клейового шару. Для тих самих вихідних даних побудовано графіки залежностей максимумів вказаних напружень і переміщень від товщини полімерного шару (рис. 2).

Як свідчать дані рис. 2, зміна товщини полімерного клею значно змінює напружено-деформований стан анкерного з'єднання. При зменшенні товщини клейового шару напруження в з'єднанні в контактній зоні полімер-сталь збільшуються відносно мало, а в контактній

зоні полімер-бетон значно зростають. Переважно це призводить до збільшення дотичних $\tau_{rz}^{(b)}$ і радіальних $\sigma_r^{(b)}$ напружень у бетоні, що зі зменшенням товщини полімерного шару досягають значень дотичних і радіальних напружень у полімері на границі розділу полімер-сталь. У зв'язку з недостатньою міцністю бетону на зріз і розтяг таке збільшення дотичних і нормальних радіальних напружень у бетоні на контакті полімер-бетон найбільш небезпечне.

Висновки. У результаті розв'язання тривимірної задачі теорії пружності для суцільного циліндра скінченної довжини під дією заданого на бічній поверхні та торцях силового навантаження були отримані рівняння для визначення напружень і деформацій анкерного з'єднання на акрилових клеях у будь-якій точці.

Максимальні значення дотичних, радіальних і колових напружень, що характеризують роботу анкерних з'єднань на акрилових клеях, змінюються як при зміні модуля пружності, так і з товщиною клейового шару. Дотичні й нормальні напруження в полімерному циліндрі і контактній зоні на поверхні розділу полімер-бетон зменшуються зі збільшенням модуля пружності акрилового клею. Але це призводить до збільшення нормальних осьових напружень у частині анкера, розташованій у бетоні, і радіальних у контактних зонах на поверхнях розділу полімер-сталь і полімер-бетон. Товщина клейового шару впливає незначно на напруження в контактній зоні полімер-метал, але значною мірою на напруження в контактній зоні полімер-бетон. Встановлено, що осьові напруження розтягу спадають при віддаленні від бічної поверхні полімеру, а радіальні і колові напруження мають значення набагато менші від осьових. У зоні закінчення дії дотичних навантажень на бічній поверхні спостерігаємо максимуми осьових напружень, що зростають із зменшенням

товщини полімерного шару і швидко спадають при віддаленні від бічної поверхні. Указані залежності границь міцності при рівномірному відриві

полімеру від поверхні металу, а також при зсуві на контактній зоні полімер-сталь будуть покладені в основу для розроблення методів розрахування подібних з'єднань.

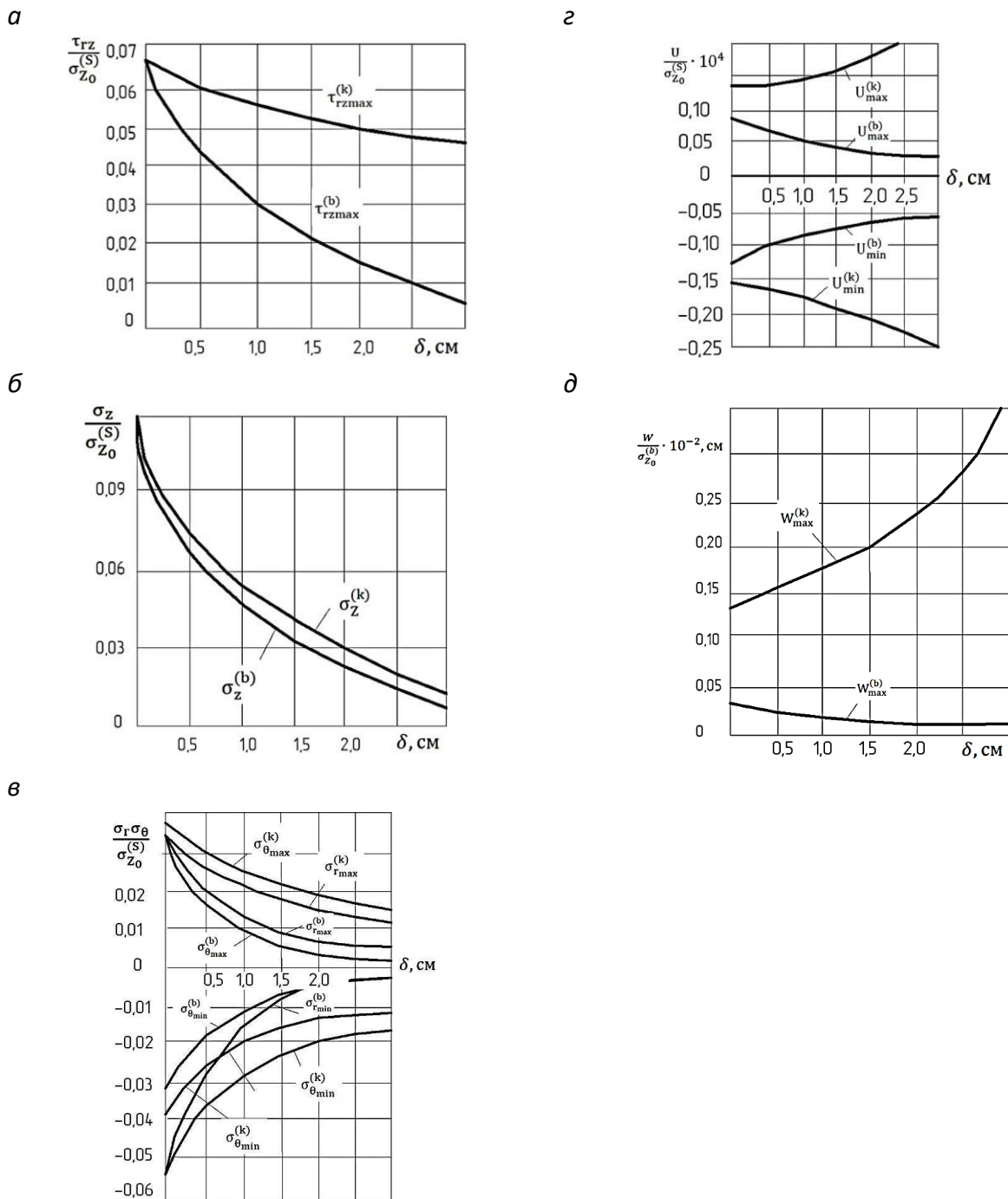


Рис. 2. Залежність максимумів напружень і переміщень від товщини клейового шару акрилового полімеру δ в контактній зоні між наповненим полімером і сталевим анкером і контактній зоні між наповненим полімером і бетоном (*b*): *a* – дотичні напруження; *б* – нормальні осьові напруження; *в* – нормальні колові напруження; *г* – радіальні переміщення; *д* – осьові переміщення

Список використаних джерел

1. Міцність і деформативність сталевих та базальтопластикових анкерних з'єднань / С. В. Золотов, О. М. Пустовойтова, Г. М. Литвинова та ін. *Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст». Серія: Технічні науки та архітектура*. Харків: ХНУМГ, 2017. Вип. 137. С. 104-108.
2. Переваги використання хімічних анкерів на акрилових композиціях для кріплення технологічного устаткування / Н. М. Золотова, В. О. Склярів, О. Ю. Супрун, Д. М. Вихров. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 183. С. 87-95. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.183.2019.169785>.
3. Фирсов П. М. Экспериментальные исследования кратковременной прочности сталеклевого безанкерного соединения на акриловых модифицированных композициях. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 167. С. 4-17.
4. ДСТУ Б В.2.6-7-95 (ГОСТ 8829-94). Конструкції будинків і споруд. Вироби будівельні бетонні та залізобетонні збірні. Методи випробувань навантаженням. Правила оцінки міцності, жорсткості та тріщиностійкості. Чинний від 01.04.96. Київ: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1997. 22 с.
5. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Чинний від 01.06.11. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.
6. Ромашко-Майструк О. В. Моделювання зчеплення арматури з бетоном в залізобетонних елементах. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. Вип. 190. С. 35-41. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.213925>.
7. Pei X.-Q., Lin L., Schlarb A.K., Bennowitz R. Contact Area and Shear Stress in Repeated Single-Asperity Sliding of Steel on Polymer. *Tribology Letters*. 2019. Vol. 67. Is. 1. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11249-019-1146-y>.
8. Feng P., Zhang P., Meng X., Ye L. Mechanical Analysis of Stress Distribution in a Carbon Fiber-Reinforced Polymer Rod Bonding Anchor. *Polymers*. 2014. Vol. 6. Is. 4. P. 1129–1143. URL: <https://doi.org/10.3390/polym6041129>.
9. Shekarchi W. A., Pudleiner D. K., Alotaibi N. K., Ghannoum W. M., Jirsa J. O. Carbon Fiber-Reinforced Polymer Spike Anchor Design Recommendations. *Structural Journal*. 2020. Vol. 117. Is. 6. P. 171-182. URL: <https://doi.org/10.14359/51728065>.
10. Shi J., Wang X., Wu Z., Zhu Z. Effects of radial stress at anchor zone on tensile properties of basalt fiber-reinforced polymer tendons. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2015. Vol. 34. Is. 23. P. 1937–1949. URL: <http://dx.doi.org/10.1177/0731684415606857>.
11. Singer G., Sinn G., Lichtenegger H.C., Veigel S., Zecchini M., Wan-Wendner R. Evaluation of in-situ shrinkage and expansion properties of polymer composite materials for adhesive anchor systems by a novel approach based on digital image correlation. *Polymer Testing*. 2019. Vol. 79. P. 106035. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106035>.
12. Трикоз Л. В., Камчатна С. М., Пустовойтова О. М. Вплив виду та кількості наповнювача на деформативні властивості акрилового композиційного матеріалу для ремонту бетонних конструкцій. *Вісник ОДАБА. Зб. наук. праць*. 2019. Вип. 74. С. 122-128. URL: <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2019-74-122-128>.

13. Анкерні болти: конструкція, розрахунок, проектування, технологія, влаштування: навч. посіб. / Л. М. Шутенко, М. С. Золотов, В. О. Склярів, Н. М. Золотова; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. Харків: ХНАМГ, 2010. 204 с.

Золотов Сергій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: (057) 707-31-10.

E-mail: bk@kname.edu.ua. ORCID 0000-0002-3649-1871.

Пустовойтова Оксана Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: (057) 707-31-10.

E-mail: oksana_pustov@ukr.net. ORCID 0000-0003-4078-4834.

Трикоз Людмила Вікторівна, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-68.

E-mail: lvtrikoz@ukr.net. ORCID 0000-0002-8531-7546.

Камчатна Світлана Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики та фізики, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-70.

E-mail: kamchatnayasn@gmail.com. ORCID 0000-0001-5711-4146.

Савісько Сергій Анатолійович, аспірант, кафедра будівельних конструкцій, Навчально-науковий інститут будівельної та цивільної інженерії, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: (057) 707-31-10. E-mail: bk@kname.edu.ua.

Zolotov Sergii, PhD, Associate Professor, Building Construction Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy. Tel.: (057) 707-31-10. E-mail: bk@kname.edu.ua.

Pustovoitova Oksana, PhD, Associate Professor, Building Construction Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy. Tel.: (057) 707-31-10. E-mail: oksana_pustov@ukr.net.

Trykoz Liudmyla, DSc, professor, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net.

Kamchatna Svitlana, PhD, associate professor, Department of Higher Mathematics and Physics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-70. E-mail: kamchatnayasn@gmail.com.

Savisko Serhii, postgraduated student, Building Construction Department, Academic and Research Institute of Civil Engineering and Utility Systems, O. M. Beketov National University of Urban Economy. Tel.: (057) 707-31-10.

E-mail: bk@kname.edu.ua.

Статтю прийнято 18.08.2023 р.