

АНОТАЦІЯ

Хаммуд М.Т. Напружено-деформований стан та раціоналізація параметрів залізобетонних колон із сітчастим армуванням. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – будівництво та цивільна інженерія (19 – Архітектура та будівництво) – Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, 2021 р.

Дисертація присвячена аналізу напружено-деформованого стану залізобетонних колон в сітчастих об'єктах та раціоналізації їх конструктивних параметрів.

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

В першому розділі відзначено, що на поточний момент актуальним залишається завдання вдосконалення залізобетонних конструкцій, які є основою капітального будівництва в більшості розвинених країн світу, а також зазначається, що підвищення ефективності капіталовкладень в будівництві можливо досягти шляхом розробки нових або вдосконалення відомих конструктивних рішень. Зокрема прагнення створити економічні за витратою матеріалів елементи залізобетонних конструкцій, що працюють на стиск, призвело до використання різних способів непрямого армування, які знайшли застосування в будівництві автомобільних і залізничних мостів, а також багатоповерхових будівель, оскільки колони і опори даних об'єктів відчують високий рівень навантаження, в тому числі знакозмінного.

У зв'язку із вищенаведеним, **в першому розділі** проаналізовано найбільш поширені конструктивні рішення непрямого армування залізобетонних колон, зокрема такі, як застосування зварних сіток, спіралей,

металевих труб. Позначені основні переваги і недоліки даних конструктивів з урахуванням особливостей їх роботи під навантаженням та експлуатаційної надійності. Відзначається, що використання зварних сіток та спіралей пов'язано з підвищеними витратами праці та часу зведення, а застосування труобетону породжує необхідність додаткового захисту конструктиву від механічних пошкоджень, вогню та корозії. Перспективним в цьому напрямку є використання обойм з просічно-витяжного листа, які відрізняються меншою власною вагою, а отже й екологічною позитивністю. Виконаний аналіз відомих теоретичних і експериментальних результатів підтверджує той факт, що зазначені конструкції представляють значний інтерес для сучасної будівельної галузі та, враховуючи їх якісне і кількісне наповнення, дозволив сформулювати основні задачі представленої роботи.

В другому розділі запропонована нова конструкція бетонної стійки в просічній обоймі, додатково підкріплена арматурними шпангоутами. Стійка може мати порожнину із заданою геометрією, заповнену вкладишем-пустотоутворювачем для додаткової економії бетону. Використовуючи ідеологію прямого проектування, поставлена і вирішена задача пошуку зазначеної вище стійки з наперед заданими позитивними властивостями. Вважаючи, що на всьому діапазоні навантаження виконується умова спільності радіальних деформацій ядра і кільцевої обойми, на підставі рішення задачі по типу задачі Ляме, отримані формули для визначення радіальних деформацій як полого, так і суцільного циліндрів. Прийнявши справедливість того, що розміри чарунок обойми малі в порівнянні з її радіусом і висотою стійки, сітчаста обойма наближено замінена суцільною ортотропною оболонкою. Дана обставина, а також введення в задачу триортogonalної системи координат, зумовили в кінцевому підсумку отримання формули для деформацій і переміщень оболонки, на основі чого далі були визначені невідомі контактні напруження.

В основі раціоналізації конструктиву покладено метод біонічної оптимізації, запропонований професором Шмуклером В.С., який фундований

енергетичними критеріями, представленими в роботах професора Василькова Г.В., про мінімізацію потенційної енергії (ПЕД) системи і вимоги ізоенергетичності її стану. Ізоенергетичність стану конструкції визначена формою вкладиша, що має експоненціальну зміну площі перетину по висоті. Оскільки потенційна енергія і її щільність є функціями головних напружень, а вони, в свою чергу, можуть бути виражені через геометричні параметри стійки, то змінюючи ці параметри можна досягти заданого рівня контактних напружень, визначеного з умов мінімуму ПЕД. При цьому використання параметра Лоде-Надаї напруженого стану дозволило визначити тип руйнування елемента. Додатково вирішені задачі статичної та динамічної стійкості колони в просічній обоймі.

На основі представленого алгоритму, в розділі також наведені результати чисельного аналізу на прикладі розгляду суцільного і полого циліндрів без обойми та укладених в сітчасту обойму. Отримані поля головних напружень та потенційної енергії для 24 різних варіантів конструктиву з врахуванням обтиснення та без нього. Представлена залежність потенційної енергії суцільної колони від кроку і діаметру шпангоутів, в якій екстремальні точки відповідають мінімальним значенням ПЕД і задають раціональні параметри сітчастої обойми.

Третій розділ присвячений експериментальній верифікації раціоналізованого конструктивного рішення залізобетонної колони. Підготовлено та проведено цикл натурних випробувань трьох серій експериментальних зразків загальною кількістю 18 штук. Кожна серія представлена шістьма чисто бетонними зразками (БС), шістьма бетонними зразками в сітчастій оболонці (БС-П) та шістьма бетонними зразками в сітці зі шпангоутами (БС-ПШ) висотою 1000мм та діаметром 450мм.

Виготовлення дослідних зразків виконано в разовій картонній опалубці в умовах будівельного майданчика. Руйнівні випробування проведені за трьома схемами з кроком навантаження 490кН. В розділі описані процедури

випробування за кожною схемою, особливості системи вимірювання та результати випробування.

Зокрема, отриманий характер руйнування та руйнівні зусилля при ступінчастому навантаженні зразків за допомогою губок пресу показує, що руйнівне зусилля для зразків серії БС-П на 20-28% більше, ніж у чисто бетонних зразків серії БС, а у зразків БС-ПШ – на 28-39%. Отримано, що вже на нижніх рівнях навантаження для всіх зразків характерна поява волосяних тріщин в захисному шарі бетону, однак для зразків в сітці цей процес починається при більших навантаженнях, ніж для чисто бетонних.

Для випробувань за ступінчастою та малоцикловою схемами прикладання навантаження через сталевий оголовник відзначена відсутність волосяних тріщин практично на всьому діапазоні навантаження. Утворення тріщин встановлено при навантаженні близькому до руйнівного і супроводжується швидким поширенням тріщин від основи вздовж зразка з одночасним їх розкриттям. Для зразків БС-П і БС-ПШ відзначено як руйнування сітки, так і шпангоутів, що свідчить про включення їх в роботу. Рівень руйнівних зусиль нижче, ніж для першої схеми, що, ймовірно, є наслідком як використання власне оголовників при передачі навантаження, так і циклічності її прикладання при малоциклових випробуваннях. Збільшення руйнівного зусилля склало 5 і 23% для зразків в сітці і для зразків зі шпангоутами відповідно у порівнянні з чисто бетонними зразками.

За результатами досліджень відзначається, що процес повного руйнування біелементу відбувається ступенями до того остаточного моменту, коли руйнується сітка і / або шпангоут. Таким чином, можна зробити висновок, що в реальних конструкціях найкращого ефекту обойми можна досягти, якщо конструктивно передавати навантаження на всю площу перетину колони виключно на бетон, не зачіпаючи сітчасту обойму.

З огляду на перманентну складність та дороговизну практично будь-яких натурних експериментальних досліджень, а також з метою підвищення рівня коректності розрахункової моделі, в **четвертому розділі** наведені

результати скінченно-елементного аналізу напружено-деформованого стану конструктиву в новій програмній системі «LS-DYNA». Її принциповою відмінністю від відомих систем є можливість отримання картини руйнування конструкції, зокрема й у форматі анімації.

Побудовані скінченно-елементні моделі трьох зразків, аналогічних за конструктивом до тих, що розглянуті в експерименті. Випробування проведено за двома схемами ступінчатої передачі навантаження – через пластини пресу та сталевий оголовник. Отримані поля розподілу нормальних напружень, пластичних деформацій та характеру руйнування кожного зразка при двох схемах навантаження ступінчатого навантаження.

Аналізуючи результати розрахунків, отримано, що характер руйнування всіх зразків полягає в розширенні бетонної стійки в середній частині. Це розширення супроводжується появою поздовжніх тріщин, які втім, не поширюються далі вглибину за межі просічної обійми для зразків серій БС-П та БС-ПШ. Крім того, розподіл пластичних деформацій всередині зразків із сітками та шпангоутами є більш рівномірним, а процес руйнування – повільніший. Встановлено також, що руйнівне зусилля при передачі навантаження через оголовник майже в 1.5 рази менше, ніж при передачі навантаження на весь зразок губками пресу. Дана інформація, як і характер руйнування зразків, повністю корелюють з результатами експериментальних досліджень. Це свідчить про високий ступінь коректності побудованої скінченно-елементної моделі. При цьому похибка визначення руйнівних зусиль становить 10-20%, що в більшій мірі пов'язане з якістю виготовлення дослідних зразків.

П'ятий розділ присвячений впровадженню результатів дисертаційного дослідження. Наведені рекомендації щодо зведення пропонованих залізобетонних колон як для об'єктів нового будівництва, так і для реконструкції. Впровадження результатів здійснено через варіантне проектування колон паркінгу в житловому комплексі «Павлівський квартал» в м. Харкові, колон водонапірної башти в м. Сарафанд (Ліван), а також при

будівництві колон вхідної групи в житловому комплексі «Резиденція» в м. Харкові. Інтегрально можна узагальнити отриманий економічний ефект до наступних показників: зменшення власної ваги конструктиву і як наслідку матеріаломісткості на 20-50%; прискорення темпів будівництва на 10%, що загалом дозволяє досягти зменшення вартості зведення таких конструкцій на 5-30% у порівнянні із залізобетонними колонами.

Ключові слова: просічно-витяжна обойма, шпангоут, потенційна енергія деформацій, контактні напруження, параметр Лоде-Надаї.

ABSTRACT

Hammoud M.T. Stress-strain state and rationalization of the parameters of reinforced concrete columns with mesh reinforcement. - On the rights of the manuscript.

The thesis for the degree of the philosophy doctor, specialty 192 – construction and civil engineering (19 - Architecture and construction). – O.M. Bektov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the analysis of the stress - strain state of reinforced concrete columns in mesh holders and rationalization of their structural parameters.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the purpose and objectives of the study, presents the scientific hypothesis, novelty and practical significance of the results. Information about personal contribution of the applicant, approbation of the main results of the dissertation, number of publications, structure and volume of work is given.

In Section One it is noted that at present the task of improving reinforced concrete structures, which are the basis of capital construction in most developed countries, remains relevant, and that increasing the efficiency of investment in construction can be achieved by developing new or improving known design solutions. In particular, the desire to create cost-effective elements of reinforced concrete structures operating on compression, led to the use of various methods of indirect reinforcement, which are used in the construction of road and railway

bridges and high-rise buildings, as columns and supports of these objects are high load level, including alternating.

In connection with the above, the first section analyzes the most common design solutions for indirect reinforcement of reinforced concrete columns, in particular, such as the use of welded mesh, spirals, metal pipes. The main advantages and disadvantages of these designs, taking into account the peculiarities of their work under load and operational reliability. It is noted that the use of welded mesh and spirals is associated with increased labor costs and construction time, and the use of tubular concrete creates the need for additional protection of the structure from mechanical damage, fire and corrosion. Promising in this direction is the use of clamps made of expanded metal sheet, which have less weight and, consequently, environmental positivity. The analysis of known theoretical and experimental results confirms the fact that these structures are of great interest for the modern construction industry and, given their qualitative and quantitative content, allowed to formulate the main objectives of the presented work.

In Section Two the new design of a concrete rack in an mesh holder additionally supported by reinforcing frames, is offered. The rack can have a cavity with a given geometry, filled with a polystyrene insert for additional savings of concrete. Using the ideology of direct design, the task of finding the above rack with predetermined positive properties is set and solved. Assuming that the condition of common radial deformations of the core and the annular holder is fulfilled over the entire load range, the formulas for determining the radial deformations of both hollow and solid cylinders are obtained on the basis of solving the problem by the type of the Lamé problem. Assuming that the size of the cells of the mesh is small compared to the radius and height of the rack, the mesh holder is approximately replaced by a solid orthotropic shell. This circumstance, as well as the introduction into the problem of a triorthogonal coordinate system, ultimately led to a formula for deformations and displacements

of the shell, on the basis of which the unknown contact stresses were further determined.

The rationalization of the construct is based on the bionic optimization method, proposed by Professor Shmukler V.S., founded on the energy criteria presented in the works of Professor Vasilkov G.V. on minimization of strain energy of the system and requirements of isoenergeticity of its state. The isoenergetic state of the structure is determined by the shape of the insert, which has an exponential change in cross-sectional area in height. Since the strain energy and its density are functions of the main stresses, and they, in turn, can be expressed through the geometric parameters of the rack, changing these parameters can achieve a given level of contact stresses, which is determined from the minimum of strain energy. In this case, the use of the Lode-Nadai parameter of the stress state allows to determine the type of destruction of the element. Additionally, the problems of static and dynamic stability of the column in the mesh holder are solved.

Based on the presented algorithm, the section also presents the results of numerical analysis on the example of a continuous and hollow cylinder without a holder and enclosed in a mesh holder. The fields of main stresses and strain energy for 24 different variants of the design with and without compression are obtained. The dependence of the strain energy of a solid column on the step and diameter of the frames is presented, in which the extreme points correspond to the minimum values of strain energy and set the rational parameters of the mesh holder.

Section Three is devoted to the experimental verification of a rationalized structural solution of a reinforced concrete column. A series of field studies of three batches of experimental samples with a total number of 18 pieces was prepared and conducted. Each batch is represented by six pure concrete samples (BS), six concrete samples in a mesh shell (BS-P) and six concrete samples in a grid with frames (BS-PSH) with a height of 1000 mm and a diameter of 450 mm.

Production of prototypes was performed in disposable cardboard formwork in the construction site. The destructive tests were carried out according to three

schemes with a load step of 490kN. The section describes the test procedures for each scheme, the features of the measurement system and the test results.

In particular, the obtained failure nature and destructive forces at step loading of samples by means of sponges of a press showed that destructive forces for samples of the BS-P series is 20-28% more, than for pure concrete samples of the BS series, and for BS-PSH samples - is 28 -39% more, respectively. It is obtained that lower levels of loading for all samples are characterized by the appearance of hair cracks in the protective layer of concrete, but for samples in the mesh, this process begins at higher loads than for pure concrete.

For tests according to the step and low-cycle scheme of applying the load through the steel plates, the absence of hair cracks was noted in almost the entire load range. The formation of cracks is established at a load close to destructive one and is accompanied by the rapid spread of cracks from the base along the sample with their simultaneous opening. For samples BS-P and BS-PSH noted both the destruction of the mesh and frames, which indicates their inclusion in the work. The level of destructive forces is lower than for the first scheme, which is probably a consequence of both the use of the actual plates for transferring the load, and the cyclic nature of its application in low-cycle tests. The increase in destructive force was 5 and 23% higher for samples in the mesh and for samples with frames, respectively, compared with pure concrete samples.

According to the results of research, it can be concluded that the process of complete destruction of the element occurs in stages until the final moment when the mesh and / or frame is destroyed. Thus, it can be concluded that in real constructions the best effect of the holder can be achieved if structurally transfer the load to the entire cross-sectional area of the column exclusively on concrete, without affecting the mesh holder.

Given the permanent complexity and cost of almost any full-scale experimental studies, as well as to increase the correctness of the calculation model, **the Section Four** presents the results of finite element analysis of the stress-strain state of the structure in the new sLS-DYNA" software. Its

fundamental difference from known systems is the ability to obtain a picture of the destruction of the structure, including in the format of animation.

Finite-element models of three samples similar in design to those considered in the experiment are constructed. The tests were performed according to two schemes of step load transfer - through the press plates and additional steel plates. The fields of distribution of normal stresses, plastic deformations and the failure nature of each sample under two load schemes are obtained.

Analyzing the results of calculations, it was found that the nature of the destruction of all samples is to expand the concrete rack in the middle part. This expansion is accompanied by the appearance of longitudinal cracks, which, in addition, do not extend further into the depth beyond the mesh holder for samples of BS-P and BS-PSH series. In addition, the distribution of plastic deformations inside the samples with mesh and frames is more uniform, and the destruction process is slower. It was also found that the destructive force when transferring the load through the steel plate is almost 1.5 times less than when transferring the load to the entire sample with a press sponge. This information, as well as the nature of the destruction of the samples, fully correlate with the results of experimental studies. This indicates a high degree of correctness of the constructed finite-element model. The error in determining the destructive forces is 10-20%, which is largely due to the quality of the prototypes.

The Section Five is devoted to the implementation of the results of the dissertation research. Recommendations for the construction of the proposed reinforced concrete columns for both new construction and reconstruction are given. The results were implemented through variant design of columns of parking in the “Pavlovsky Kvartal” residential complex in Kharkiv, columns of water tower in Sarafand (Lebanon), as well as construction of entrance group columns in the “Residence” residential complex (Kharkiv). Integrally it is possible to generalize the obtained economic effect in the following indicators: reduction of the dead weight of the construct and, as a consequence, of material consumption by 20-50%; acceleration of the pace of construction by 10%, which in general allows to

achieve a reduction in the cost of erection of such structures by 5-30% in comparison with usual reinforced concrete columns.

Keywords: mesh holder, frame, strain energy, contact stresses, Lode-Nadai parameter.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Хаммуд М.Т. Сучасні конструктивні рішення сталезалізобетонних колон із непрямым армуванням. *Науковий вісник будівництва, т. 102. №4. 2020. С. 127-133.*

Статті у міжнародних виданнях та збірниках наукових праць, що включені до міжнародних наукометричних баз:

2. Хаммуд М.Т., Петрова О.О. Визначення характеру руйнування та несучої здатності залізобетонних колон в сітчастих обоймах. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Вип. 195. С.25-34. 2021. (Видання включене до МНБД Index Copernicus). Особистий внесок:* виконано роботи з планування експериментальних натурних досліджень, статистичну обробку та аналіз отриманих результатів.

3. Хаммуд М.Т., Пчолкін Р.М. Експериментальне дослідження коротких сталобетонних колон на статичні впливи. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Вип. 194. 2020. С. 24-33. (Видання включене до МНБД Index Copernicus). Особистий внесок:* виконано підготовку експериментальної серії зразків до натурних статичних випробувань, встановлено міцність бетону виготовлених зразків та стандартних кубів.

4. V.Shmukler, O.Petrova, M.Hammoud. Rationalization of the parameters of the cylindrical bridge support (theoretical basis). *MATEC Web of Conferences 230, 02031 (2018). 9p. (Видання включене до МНБД Scopus). Особистий внесок:* отримано вираз для визначення виникаючих контактних напружень між бетонним ядром та сітчастою обоймою.

5. O.Petrova, O.Lugchenko, M.Hammud, and A.Nazhem. To the rationalization of the constructive solutions of the bridge supports. *MATEC Web of Conferences 116, 02025 (2017)*. 8p. (Видання включене до МНБД Scopus, Web of Science). *Особистий внесок*: виконано аналіз залежності ψ від коефіцієнту α при сталому діаметрі колони та кроці шпангоутів.

Публікації апробаційного характеру:

6. Хаммуд М.Т., Петрова О.О. Планування експериментальних досліджень коротких бетонних стійок у просічній обоймі *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Тренди та тенденції розвитку будівельної галузі»*. Харків: ХНУМГ, 2020. С. 46-48. *Особистий внесок*: розроблена програма експериментальних натурних досліджень та підготовка дослідних зразків до натурних випробувань.

7. V.Shmukler, O.Petrova, P.Reznik, M.Hammoud, M.Sosnowska. Improvement of the structural parameters of the reinforced concrete support in a mesh cage. *AIP Conference Proceedings 2077, 020048 (2019)*. 9p. (Видання включене до МНБД Scopus, Web of Science). *Особистий внесок*: виконано аналіз результатів чисельного дослідження полого та суцільного циліндрів в сітчастій обоймі, на основі чого побудовано гіперплощину, екстремальні точки якої задають раціональні параметри конструктиву.

8. H.Mohammad, V.Shmukler, P.Reznik and O.Petrova. On the criterion of the limit state for concrete. *Proc. of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*. 2018. P. 593-599. *Особистий внесок*: виконано аналіз залежності параметру Лоде-Надаї від класу бетону конструктиву та показано підхід до визначення характеру руйнування конструктиву в залежності від його (параметра Лоде-Надаї) значення.

9. Шмуклер В.С., Петрова О.О., Хаммуд М.Т. Раціоналізація параметрів циліндричної мостової опори (теоретичні основи). *Матеріали 7-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»*: тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 160-161. *Особистий внесок*:

запропоновано конструктивне рішення бетонної стійки в просічній обоймі, підкріпленій арматурними шпангоутами.

10. Хаммуд М.Т., Петрова Е.А. К рационализации конструктивных решений опор мостов. Матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»: тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2017. С. 146-147. *Особистий внесок*: виконано аналіз виникаючих напружень в пропонованій колоні з просічною обоймою за енергетичним критерієм у порівнянні із підходом, відображеним в Eurocode 2.

Додаткові публікації та патенти:

11. Шмуклер В.С., Петрова О.О., Хаммуд М.Т. Рационалізація параметрів циліндричної мостової опори (теоретичні основи). Будівельні конструкції. Теорія і практика: збірник наукових праць. Київ: КНУБА. Вип. 3. 2018. С. 3-16. *Особистий внесок*: знайдено рішення завдання динамічної стійкості пропонованої залізобетонної колони в просічній обоймі.