

УДК 624.012.2:539.4

ДО ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ КАМ'ЯНОЇ КЛАДКИ ПРИ СТИСНЕННІ

TO THE MASONRY STRENGTH DETERMINATION UNDER COMPRESSION

Погрібний В.В., к.т.н., с.н.с., ORCID0000-0001-7531-2912, Довженко О.О., к.т.н., проф., ORCID 0000-0002-2266-2588, Усенко Д.В. аспірант, ORCID0000-0001-7133-0638 (Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)

Pohribnyi V.V., candidate of technical sciences, senior researcher, ORCID 0000-0001-7531-2912, Dovzhenko O.O., candidate of technical sciences, professor, ORCID 0000-0002-2266-2588, Usenko D.V., PhD student, ORCID0000-0001-7133-0638 (National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”)

Описані результати експериментальних досліджень. Проаналізовано характер руйнування дослідних зразків, котрі використовуються для визначення міцності кладки на стиск. Отримані рішення задач міцності для характерних випадків руйнування варіаційним методом у теорії пластичності.

Experimental samples of various shapes and sizes, which are proposed to determine the compressive strength of masonry, are considered. The nature of its destruction and the value of the ultimate load are analyzed. The results of our own experimental studies of brick pillars are described. Materials of studies of masonry plates, prisms and piers under axial compression are presented. The given dimensions, their ratio and the shape of the samples that are recommended by various researchers for testing in order to establish the compressive strength of masonry as its main characteristic. It certifies that there are no uniform requirements for the test procedure. The following cases of destruction of masonry under compression have been identified: shear along an inclined plane; double-sided crushing-splitting (tearing-off cracks in the middle of the height of the element, the formation of seal wedges under the load areas, the indentation of wedges into the body of the element). The influence on the strength of adding 15% Ceresite to the cement-sand mortar was established. Strength problems are solved for the described cases of failure. As a theoretical basis, the variational method of the theory of plasticity, developed at the Department of Building Structures at the National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», was used. Plastic strain is

considered to be localized in thin layers on the failure surface, which is characteristic of the ultimate state of concrete under the shear. Neighboring regions are assumed to be completely rigid. Kinematic failure schemes are presented for these cases. Formulas are provided for determining the value of the ultimate load at a minimum power of plastic strain on the shearsurface. The need for further research has been established in order to make a reasonable choice of the shape and dimensions of the basic prototype to determine the compressive strength of masonry.

Ключові слова:Кладка, стиск, випробування, міцність, зріз, відрив.
Masonry, compression, testing, strength, shear, tearing-off.

Вступ. Будівництво з використанням кам'яних конструкцій – одна із найбільш розповсюджених будівельних практик через наявність притаманних їй позитивних властивостей, зокрема низьких експлуатаційних витрат, високого ступеня вогнезахисту, достатньої тепло - та звукоізоляції, високої довговічності. Кам'яні конструкції мають давню історію, однак поглиблене вивчення їх поведінки відбувається лише останнім часом, і безперечно потребує продовження. В більшості випадків при проектуванні кам'яних конструкцій використовуються емпіричні залежності. Перспективним, із нашої точки зору, являється розроблення методики розрахунку кам'яної кладки, котра базується на загальній теоретичній основі. Одним із першочергових питань є визначення міцності кладки при стискові.

Стан питання та задачі дослідження. Для визначення міцності кам'яної кладки при стискові в Україні використовуються результати випробування стовпів із різними розмірами квадратного поперечного перерізу, за кордоном випробовують призми з прямокутним перерізом. Однак єдиних вимог до їх розмірів не існує. IS: 1905 [1] рекомендує приймати відношення висоти до товщини зразка (h/t) від 2 до 5 та мінімальну висоту 400 мм. Стандарт ASTM E447 [2] вважає, що мінімальна висота зразка має складати п'ятнадцять дюймів. Досліди [3] свідчать, що при висоті призм 5 – 6 цеглин, торцеві пластини не впливають на характер руйнування зразків. За результатами випробування призм [4 – 9], запропоновано більше 15 залежностей для визначення міцності кладки, котрі враховують різний ступінь впливу міцності каменя та розчину, його об'єму в кладці.

В Україні міцність кладки при стискові підраховується за формулою Л.І. Оніщика, або за залежностями, котрі являють собою добуток степеневих функцій міцності каменя і розчина. Отримані результати не завжди співпадають з даними випробувань стовпчиків.

Мета роботи та методи дослідження. Аналіз характеру руйнування цегляних елементів при центральному стисненні та визначення граничного

навантаження. Для досягнення поставленої мети використовуються експериментальні методи та варіаційний метод у теорії пластичності.

Результати дослідження. Для виготовлення дослідних зразків використовувалася повнотіла цегла пластичного формування розмірами $250 \times 120 \times 65$ мм Полтавського заводу ВАТ «Керамік». Її випробування на стиск проводилося у робочому залі лабораторії кафедри будівництва та цивільної інженерії Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» на зразках із двох цілих цеглин на пресі ПГ–125 (рис. 1, а), на згин – на механічному пресі Р–5 (рис. 1, б). Розчин виготовлявся із цементу ШПЦ–400 Краматорського заводу та піску з модулем крупності – 1,4 Кротенківського кар'єру Полтавського району Полтавської області. Випробування кубів з довжиною ребра 70,7 мм проводилося на пресі ПГ–50 (рис. 1, в). Використовувалися два види розчину: цементно-піщаний без та із додаванням 15% Церезіту.

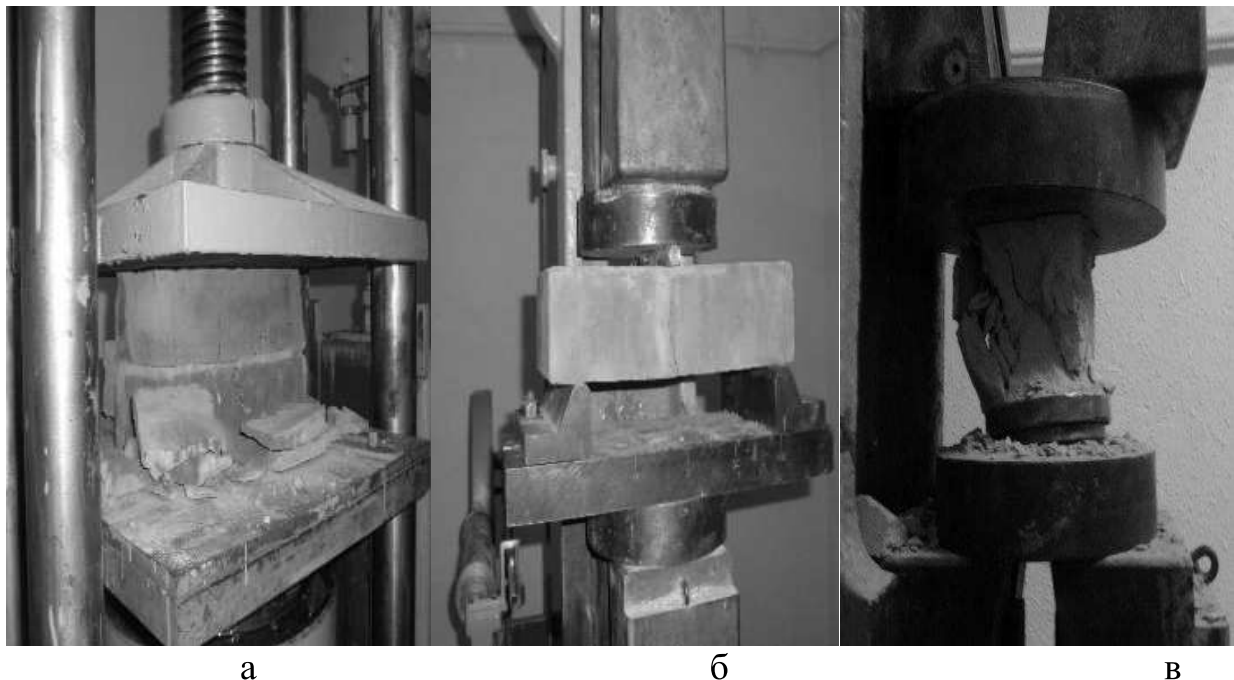


Рис. 1. Випробування цегли на стиск (а) та згин (б), розчину на стиск (в)

Міцність цегляної кладки на стиск була підрахована за формулою Л.І. Оніщика із використанням результатів, отриманих при випробуванні цегли та розчину.

Зразки-стовпчики розмірами поперечного перерізу 250×250 мм та 380×380 мм і висотою 750 мм викладалися дворядною кладкою. Випробування дослідних зразків здійснювалося на пресі ПГ–500 в лабораторії кафедри будівельних конструкцій (рис. 2).

Характеристики цегляних стовпчиків та результати їх випробування представлені в табл. 1.

Як видно із табл. 1 формула Л.І. Оніщика недооцінює міцність кладки порівняно із експериментальними даними в межах 30 – 40%; використання

«цезеритного» розчину підвищує міцність зразків порівняно із застосуванням цементно-піщаного розчину на 20%.



Рис. 2. Випробування цегляних стовпчиків на стиск

Таблиця 1

Характеристики дослідних зразків

№ з/п	Шифр зразка	Середня міцність цегли, МПа	Середня міцність розчину, МПа	Руйнівне навантаження, кун	Міцність кладки настиск, МПа	Середня міцність кладки настиск, МПа	Міцність кладки настиск з аформулою Оніщика, МПа
1	С-250	8,62	3,65	134	2,14	2,5	1,74
2	С-380			416	2,88		
3	СЦ-250		4,45	158	2,53	3,0	1,83
4	СЦ-380			504	3,49		

В процесі випробування першими утворюються вертикальні тріщини в середній за висотою частині зразків при навантаженні 0,6 від руйнівного, котрі перетинають як камінь, так і розчин. Зі збільшенням навантаження спостерігається їх розвиток, утворення і розповсюдження нових тріщин. Руйнування відбувається після появи похилих тріщин у цеглинах верхніх та нижніх рядів з подальшим роздробленням каменів і відділенням окремих стовпів, обмежених вертикальними тріщинами, що утворилися раніше. Характер руйнування представлений на рис. 3.

У більшості випадків руйнування крихких матеріалів при стисковій дії відбувається від зсуву. Зсувні тріщини розповсюджуються практично миттєво та процес носить лавиноподібний характер. Коли зсувна тріщина

перетинає весь зразок, обидві його частини починають ковзати одна відносно іншої.

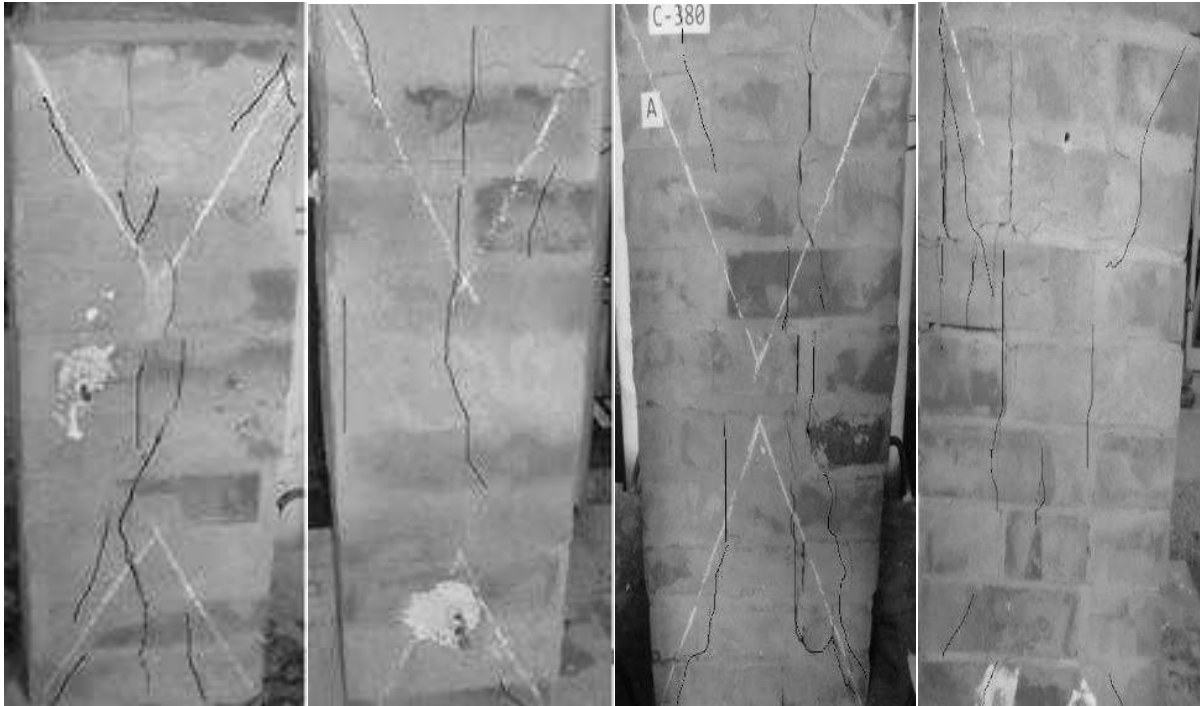
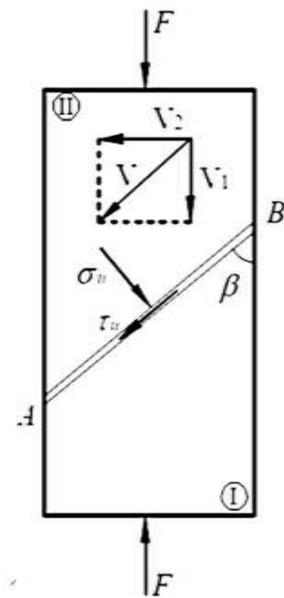


Рис. 3. Характер руйнування дослідних зразків

На рис. 4, а представлений характер руйнування цегляних простінків при стисковій у вигляді зсуву за похилою площиною.



а

б

Рис. 4. Характер руйнування цегляних простінків від зрізу за похилою площиною (а) та кінематично можлива схема (б)

Авторами на основі теорії пластичності розв'язана задача міцності цегляної призми при руйнуванні від зрізу в умовах плоского напруженого стану. Кінематична схема, котра лежить в основі розрахунку, представлена на рис. 4, б. В стадії руйнування призма розділяється на два диски, розмежовані поверхнею руйнування АВ з кутом нахилу β до вертикалі; диск II рухається

відносно I зі швидкістю V .

Формула для визначення граничного навантаження має вигляд

$$F = m \left[2B \sqrt{(k - \operatorname{tg} \beta) + 0,25(k \operatorname{tg} \beta + 1)} - (k - \operatorname{tg} \beta) \right] A / \operatorname{tg} \beta, (1)$$

тут $m = f_d - f_t$; $B^2 = \left(1 + \chi / (1 - \chi)^2\right) / 3$; $\chi = f_t / f_d$; $k = V_2 / V_1$ – співвідношення швидкостей руху жорстких дисків на кінематичній схемі; A – площа поперечного перерізу.

На рис. 5 представлені етапи випробування цегляних стовпів із керамічних каменів: утворення першої тріщини в середній за висотою зоні елемента, розділення стоппа вертикальними тріщинами, утворення «клина» під штампом преса, вдавлювання «клина» в тіло стовпчика [10].



Рис. 5. Характер руйнування цегляних стовпчиків від двостороннього розколювання

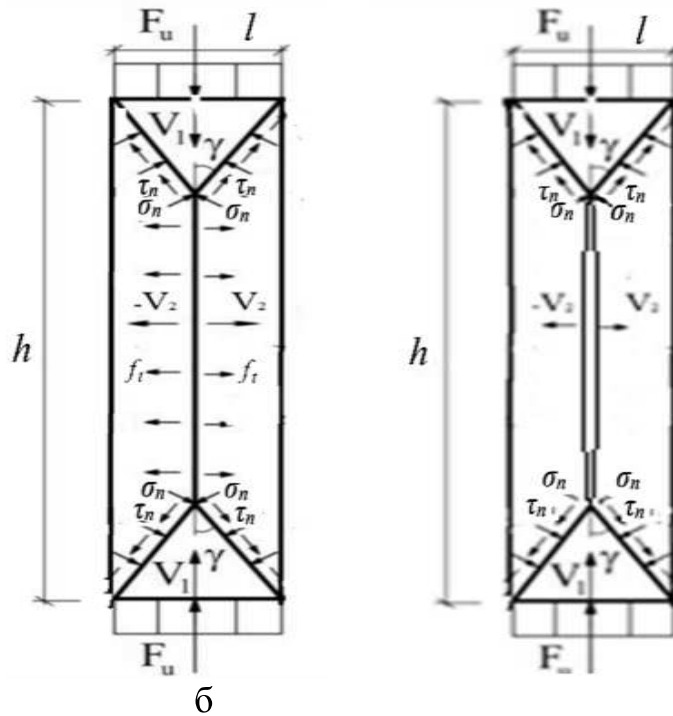
Кінематична схема руйнування для даного випадку представляє собою чотири диски: два клини, які рухаються по вертикалі назустріч один до одного, та два диски, виділені зсувними поверхнями клинів та площиною відриву, котра з'єднує їх вершини; ці диски віддаляються один від одного в горизонтальному напрямку (рис. 6, а).

Формула для визначення граничного навантаження має вигляд

$$\frac{F_u}{mA} = \left[2B \sqrt{(k - \operatorname{tg} \gamma)^2 + 0,25(k \operatorname{tg} \gamma + 1)^2} - (k - \operatorname{tg} \gamma) \right] / \operatorname{tg} \gamma + \frac{f_t k (\operatorname{atg} \gamma - 1)}{\operatorname{tg} \gamma m}, (2)$$

де $\alpha = \frac{h}{2l}$, h – висота стовбчика, l – сторона квадратного поперечного перерізу.

У разі використання передумови про стадійність утворення тріщин схему рис. 6, а можна трансформувати в рис. 6, б. При цьому формула (2) перетвориться в (1).



а б
Рис. 6. Кінематично можлива схема руйнування цегляного стовпчика при стисненні шляхом двостороннього розколювання (а), зрізу за площинами клину (б)

Картина тріщоутворення при випробуванні призм, отримана в [11], представлена на рис. 7. Спочатку в середині зразка за висотою утворювалися вертикальні тріщини, потім біля навантажувальних пристроїв з'являлися похилі тріщини, викликані рівнодійною розривної сили і сил тертя між пластинами випробувальної машини та зразком. В більш коротких призмах у дослідях переважали похилі тріщини, так як область розривних зусиль тут має невелику висоту.

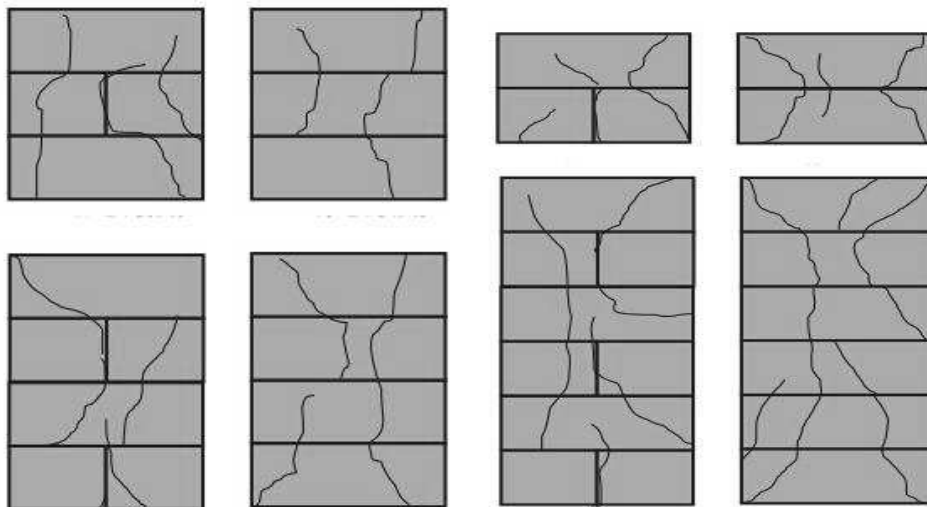


Рис. 7. Характер руйнування цегляних призм при випробуванні на стиск

Представлений на рис. 7 характер руйнування призм підтверджує кінематично можливі схеми руйнування рис. 6.

У якості пропозицій пропонується на основі аналізу експериментальних даних запропонувати форму та розміри стандартних зразків для визначення міцності цегляної кладки при стискові.

Висновки. В процесі випробування цегляних стовпчиків підтверджено вплив на міцність додавання до цементно-піщаного розчину 15% Церезіту. Міцність збільшилася до 20%. Експериментальна міцність стовпчиків на стиск виявилася більшою на 30 – 40%, порівняно із підрахованою за формулою Л.І. Оніщика, що пов'язано з відмінністю напруженого стану в стиснутій зоні від плоского. Варіаційним методом у теорії пластичності отримані рішення задач міцності призми при зсувові за однією площиною та за гранями клину ущільнення. На тепер відсутні вимоги щодо розмірів і форми зразків для визначення міцності кладки при стиску, що потребує подальших досліджень.

1. IS:, 1905 Indian Standard Code of Practice for Structural Use of Unreinforced Masonry, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, 1987.

2. ASTM E447-97, Test Methods for Compressive Strength of Laboratory Constructed Masonry Prisms, American Society for Testing and Materials Pennsylvania, USA, 2017.

3. Francis A.J. The effect of joint thickness and other factors on compressive strength of brickwork/ A.J. Francis, C.B. Horman, L.E. Jerrems// Proceedings of 2nd International Brick Masonry Conference, Stoke-on-Trent, 2017. – P. 31–37.

4. Ganesan T.P. Behavior of concrete hollow-block masonry prisms under axial compression/T.P. Ganesan, K. Ramamurthy// J. Struct. Eng. – 1992. – Vol. 118 (7). – P. 1751–1769.

5. Singh S.B. Bond strength and compressive stress-strain characteristics of brick masonry/ S.B. Singh, P. Munjal// J. Build. Eng. – 2017. – Vol. 9. – P. 10–16.

6. Ravula M.B. Experimental investigation of compressive failure in masonry brick assemblages made with soft brick/ M.B. Ravula, K.V.L. Subramaniam// Mater. Struct. – 2017. – Vol. 50 (19). – P. 1–11.

7. Wu F. Strength and stress-strain characteristics of traditional adobe block and masonry/ F. Wu, G. Li, H.N. Li, J.Q. Jia// Mater. Struct. – 2013. – Vol. 46. – P. 1449–1457.

8. Lumantarna R. Uniaxial compressive strength and stiffness of field-extracted and laboratory-constructed masonry prisms/ R. Lumantarna, D.T. Biggs, J.M. Ingham// Mater. Civ. Eng. – 2014. – Vol. 26 (4). – P. 567–575.

9. Christy C.F. Experimental study on axial compressive strength and elastic modulus of the clay and fly ash brick masonry/ C.F. Christy, D. Tensing, R. Shanthi// J. Civ. Eng. Constr. Technol. – 2013. – Vol. 4 (4). – P. 134–144.

10. Соколов Б.С. Результаты исследований каменных и армокаменных кладок/ Б.С.Соколов, А.Б.Антаков // Вестник МГСУ. – 2014. – № 3. – С. 99–106.

Sokolov B.S. Rezultaty yssledovaniy kamennykh yarmo kamennykh kladok/ B.S.Sokolov, A.B. Antakov // Vestnyk MHSU. – 2014. – № 3. – S. 99-106.

11. Thaickavil N. N. Behavior and strength assessment of masonry prisms// N. N. Thaickavil, J. Thomas// Case Studies in Construction Materials. – 2018. – Vol. 8. – P. 23–38.