

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПИТАНЬ МІЦНОСТІ КАМ'ЯНОЇ КЛАДКИ ПРИ СТИСКОВІ

ANALYTICAL REVIEW OF THE LITERATURE ON THE MASONRY COMPRESSIVE STRENGTH

Пенц М.В., аспірантка, ORCID: [0000-0001-8974-8557](https://orcid.org/0000-0001-8974-8557)
(Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)

Довженко О.О., к.т.н., професор, ORCID: [0000-0002-2266-2588](https://orcid.org/0000-0002-2266-2588)
(Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)

Pents M.V., graduate's student, ORCID: [0000-0001-8974-8557](https://orcid.org/0000-0001-8974-8557)
(National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic")

Dovzhenko O.O., Phd, Professor, ORCID: [0000-0002-2266-2588](https://orcid.org/0000-0002-2266-2588)
(National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic")

Проведено аналіз літературних джерел з питань міцності кам'яної кладки при стискові. Розглянуті форма і розміри дослідних зразків для визначення зазначеної міцносної характеристики, а також розрахункові залежності для її підрахунку. Запланована серія експериментальних досліджень.

Masonry is a traditional building material that is still actively used in modern civil and industrial construction. Determining its strength characteristics, in particular in compression, remains an urgent task, since it is the compressive forces that are the main ones in load-bearing walls, columns and other masonry elements. The strength of masonry is influenced by a large number of factors: stone strength, geometric dimensions, correct shape of the stone, the presence of voids in the stone, mortar strength, deformation characteristics of the hardened mortar, mobility of the mortar mixture, adhesion of the mortar to the stone, filling of joints with mortar, dressing of joints, quality of masonry. One of the main problems is the lack of a single approach to determining the geometric parameters of the samples used in testing. Available recommendations: for prisms, a height of at least 400 mm (from 5 to 6 rows of stone) is recommended; for brick pillars, the recommended length is at least 2 brick lengths, the height is at least 3 rows of masonry, the minimum thickness is one brick, in addition, the height of the test specimen should be within 3 to 15 of its thicknesses and be no less than its height. The purpose of this study is to formulate scientifically based

recommendations regarding the shape and dimensions of standard specimens, which will allow the most reliable assessment of the compressive strength of masonry based on the test results. For this purpose, an analysis of existing studies, methods and regulatory provisions was carried out.

Ключові слова:

Кам'яна кладка, міцність, стиск, цегла, розчин.

Masonry, strength, compression, brick, mortar.

Вступ. Кам'яна кладка є традиційним будівельним матеріалом, який і сьогодні активно використовується в сучасному цивільному та промисловому будівництві. Визначення її міцнісних характеристик, зокрема при стискові, залишається актуальним завданням, оскільки саме стискаючі зусилля є основними у несучих стінах, колонах та інших елементах кладки. Незважаючи на столітній досвід використання, в наукових колах досі точаться дискусії щодо ефективності існуючих методик випробування й розрахунку міцності кладки. Однією із головних проблем є відсутність єдиного підходу до геометричних параметрів зразків, що застосовуються при випробуваннях.

Аналіз останніх досліджень. Методи визначення міцності кам'яної кладки при стискові поділяються на руйнівні та неруйнівні. Руйнівні методи передбачають безпосереднє навантаження зразків до моменту їх руйнування, що дозволяє отримати достовірні значення міцності кладки. Серед основних підходів:

- випробування призм [5 – 18] – метод, при якому зразки у вигляді кладки висотою 3 – 7 рядів піддаються стисканню; перевагою є відносна простота виготовлення та реалізм умов;

- випробування цегляних стовпів і фрагментів стін [19 – 21, 24] – забезпечують моделювання реальних умов експлуатації, особливо корисні для натурних досліджень; проте потребують значних трудових і матеріальних витрат;

- циліндричні керни – використовуються для локального визначення міцності з уже зведених конструкцій, але можуть викривлювати реальну картину через змінені умови зчеплення.

Неруйнівні методи застосовуються тоді, коли недоцільно або неможливо руйнувати конструкцію. Вони дозволяють оцінити міцність на основі непрямих параметрів:

- метод плоских домкратів (Flat-Jack) [22, 23] – визначає напружено-деформований стан кладки в конструкції шляхом локального зняття напружень та наступного навантаження; метод точний, але складний у реалізації та вимагає спеціального обладнання;

- склерометрія (ударне зондування) – швидкий і доступний метод, що базується на визначенні твердості поверхні за допомогою електронного склерометра. Використовується здебільшого для попередньої оцінки, має низьку точність через поверхневу локалізацію;

- ультразвукове прозвучування [25] – визначає пружні властивості матеріалу за швидкістю поширення хвиль. Дає змогу оцінити однорідність кладки, проте не завжди корелює з фактичною міцністю при стисканні.

Відомими є праці Онищика Л.І., які заклали теоретичну основу для проектування кам'яних конструкцій ще в середині ХХ століття. У них запропонована формула, яка враховує марку каменю та розчину, проте базується на емпіричних коефіцієнтах:

$$f_k = Af_b \left[1 - \frac{a}{b + f_m / 2f_b} \right], \quad (1)$$

де f_k – характеристична міцність кладки на стиск; $A = (100 + f_b / 100m + nf_b)$ – значення конструктивного коефіцієнта; f_d – характеристична міцність каменю при стиску; f_m – характеристична міцність розчину; a, b, m, n – значення емпіричних коефіцієнтів, які враховують тип кладки, висоту та марку каменів.

Разом з тим, емпіричні залежності мають свої обмеження. У більшості досліджень відзначено, що розрахункова межа міцності кладки, отримана за формулою Л.І. Онищика, занижена порівняно з фактичними результатами, отриманими експериментально [19, 20, 21, 24] при випробуванні цегляних стовпів здебільшого перерізом 250×250 мм. У деяких випадках ці відмінності сягали 2 – 4,5 рази, що свідчить про необхідність перегляду або доповнення існуючих підходів.

Згідно [3] характеристичне значення міцності кладки на стиск можна підрахувати за рівнянням:

$$f_k = Kf_b^\alpha f_m^\beta, \quad (2)$$

де K, α, β – емпіричні константи, які враховують тип кладки.

Німецький учений Hilsdorf Н. у 1969 році запропонував свою формулу:

$$f_k = \left[\frac{f_{bt} + \alpha f_m}{f_{bt} + \alpha f_b} \right] \frac{f_b}{U}, \quad (3)$$

тут f_{bt}, f_b – міцність елементів кам'яної кладки при одновісному розтягуванні та стисканні відповідно; $U \in (1,1;2,5)$ – коефіцієнт нерівномірності деформування; $\alpha = t_m / 4, 1t_b, t_b, t_m$ – відповідно висота елемента кам'яної кладки та товщина шару розчину.

Формула (3) вважається класичною у теорії розрахунків кам'яних конструкцій у багатьох країнах Європи та в США. Тут коефіцієнтом 4,1 ураховуються поперечні напруження в розчині, які спричинені обмеженнями його деформування. Проте значення напружень, які обчислюються за даною формулою, суттєво залежать від застосованого значення емпіричного коефіцієнта «нерівномірності деформування» U , який змінюється в широких межах.

Серед закордонних авторів значний внесок в дослідження міцності при стискові зробили Francis A.J. [7], Hamid A.A. [13], Ganesan T.P. [8], Wu F. [11] та інші [5 – 6, 9 – 10, 12, 14 – 18]. Вони вивчали вплив товщини швів, типу розчину, геометрії призми, кількості рядів, а також ефекту Пуассона. Автори підкреслюють, що для достовірного визначення міцності важливо враховувати співвідношення h/t (висоти до товщини), об'ємну частку розчину та кількість рядів.

Мета роботи полягає у формуванні науково обґрунтованих рекомендацій щодо форми і розмірів зразків, які дозволять максимально достовірно оцінити міцність кам'яної кладки при стискові.

Результати досліджень. Результати експериментів свідчать про достовірність при визначенні міцності кладки на стиск, котру демонструють призми з висотою від чотирьох до шести рядів каменю, виготовлені з дотриманням правильної перев'язки швів (рис. 1).



Рис. 1. Дослідний зразок призми [14]

Зразки, що не мали перев'язки або були виконані з меншою кількістю рядів, характеризувалися значною варіативністю результатів. Це обумовлено впливом крайових ефектів та нерівномірного розподілу навантаження. У процесі випробування перші тріщини з'являлися у середній частині зразка при досягненні 60 – 90% від величини розрахункового руйнівного навантаження (рис. 2). Здебільшого тріщини були вертикальні (в середній за висотою частині зразка) або похилі (при наближенні до опорної і навантажуваної граней). У зразках з тонким швом вони розвивалися через кілька рядів одночасно, що свідчить про крихкий характер руйнування. У випадку з використанням розчину низької міцності, руйнування починалося з

деформації швів, що в подальшому спричиняло відрив каменю від розчину. Наявність горизонтальних тріщин у цегляних зразках не суттєво знижує несучу здатність, проте суттєво зменшує жорсткість та модуль деформацій.

Окремо було проаналізовано вплив типу перев'язки швів на міцність.

Призми з ложковою перев'язкою мали в середньому на 15% більший опір порівняно зі штабельною. Такий результат обґрунтовується більш рівномірним передаванням напружень між рядами кладки [8].

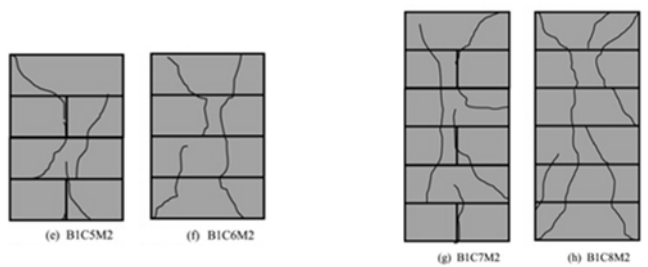


Рис. 2. Схема виникнення тріщин в призмах [12]

Міцність кладки при стисковій визначається багатьма чинниками, серед яких основними є тип і міцність каменю та розчину, співвідношення висоти зразка до його товщини (h/t), тип перев'язки й якість виконання. Оптимальні геометричні параметри для призми: рекомендована висота не менше 400 мм (від 4 до 6 рядів каменю).

На основі виконаного аналізу виготовлена серія дослідних зразків, котра включає: три стовпи із розмірами поперечного перерізу 510×510 , 380×380 , 250×250 мм, висотою 1 м; три пари призми товщиною в півцеглини та висотою в три, п'ять і сім цеглин стандартного розміру, а також фрагмент стіни товщиною в пів цеглини розмірами 440×910 мм. Заплановано випробування стовпів, призми і стінки з метою порівняння отриманих значень опорів елементів цегляної кладки між собою і нормативними формулами для підрахування міцності цегляної кладки при стисковій за характеристиками цегли і розчину.

Висновки. На даний час не існує стандартної форми (стовп, призма, стіна) і розмірів дослідного зразка для визначення міцної характеристики кладки стискові. В Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» заплановано випробування серії дослідних зразків з метою надання рекомендацій щодо форми і розмірів стандартного зразка.

1. Онищик Л.И. Каменные конструкции промышленных и гражданских зданий. – М. – Л.: Госстройиздат, 1939. – 208 с.

Onishchik L.I. Kamennye konstruksii promishlennikh i grazhdanskikh zdaniy. – М. – Л.: Gosstroizdat, 1939. – 208 s.

2. Методи випробування кам'яної кладки: Частина 1. Визначення міцності при стиску (ІЕН 1052- 1:1998, ІДТ): ДСТУ Б EN 1052-1:2011. – К.: Мінрегіон України, 2012. – 19 с.

Metody vyprobuvannia kamianoï kladky: Chastyna 1. Vyznachennia mitsnosti pry stysku (ІЕН 1052- 1:1998, ІДТ): DSTU B EN 1052-1:2011. – К.: Minrehion Ukrainy, 2012.

– 19 s.

3. Кам'яні та армокам'яні конструкції: ДБН В.2.6-162:2010. – К.: Мінрегінобуд України, 2011. – 97 с.

Kamiani ta armokamiani konstruktsii: DBN V.2.6-162:2010. – К.: Minrehinobud Ukrainy, 2011. – 97 s.

4. Eurocode 6. Design of masonry structures. Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. EN 1996-1-1:2005. – Brussels: European Committee for Standardisation, 2005. – 123 s.

5. Kaushik H.B. Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression / H.B. Kaushik, D.C. Rai, S.K. Jain // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2007. – Vol. 19. – № 9. – Pp. 728–739.

6. Drysdale R.G. Behavior of concrete block masonry under axial compression / R.G. Drysdale, A.A. Hamid // ACI Journal Proceedings. – 1979. – Vol. 76. – № 6. – P. 707–722.

7. 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 the 2nd International Brick Masonry Conference. – 1971. – Pp. 31–37.

8. Ganesan T.P. Behavior of concrete hollow-block masonry prisms under axial compression / T.P. Ganesan, K. Ramamurthy // Journal of Structural Engineering. – 1992. – Vol. 118. – № 7. – Pp. 1751–1769.

9. Singh S.B. Bond strength and compressive stress-strain characteristics of brick masonry / Munjal P. // Journal of Building Engineering. – 2017. – Vol. 9. – P. 10–16.

10. Ravula M.B. Experimental investigation of compressive failure in masonry brick assemblages made with soft brick / M.B. Ravula, K.V.L. Subramaniam // Materials and Structures. – 2017. – Vol. 50. – № 19. – Pp. 1–11.

11. Wu F. Strength and stress–strain characteristics of traditional adobe block and masonry / F. Wu, G. Li, H.N. Li, J.Q. Jia // Materials and Structures. – 2013. – Vol. 46. – Pp. 1449–1457.

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

13. Hamid A.A. Direct modeling of concrete block masonry under axial compression / A.A. Hamid, B.E. Abboud, H.G. Harris // Masonry: Research, Application, and Problems. ASTM STP 871 ; Eds. J.C. Grogan, J.T. Conway. – Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1985. – Pp. 151–166.

14. Habib M.A. Compressive stress–strain characteristics of brick masonry used in Bangladesh / M.A. Habib, N. Sharif, K.A. Manjur, M.M. Hoque // Proceedings of the International Conference on Planning, Architecture and Civil Engineering. – Rajshahi: Rajshahi University of Engineering & Technology, 2023. – Pp. 1–8.

15. Mann W. Statistical evaluation of tests on masonry by potential functions/ W. Mann // Proceedings of the Sixth International Brick Masonry Conference. – Rome, Italy, May 1982. – Pp. 86–98.

16. Hendry A.W. Characteristic compressive strength of brickwork walls from collected test results / A.W. Hendry, M.H. Malek // *Masonry International*. – 1986. – Vol. 7. – Pp. 15–24.

17. Gumaste K.S. Strength and elasticity of brick masonry prisms and wallettes under compression / K.S. Gumaste, K.S.N. Rao, B.V.V. Reddy, K.S. Jagadish // *Materials and Structures*. – 2007. – Vol. 40. – № 2. – Pp. 241–253.

18. Lumantarna R. Uniaxial compressive strength and stiffness of field-extracted and laboratory-constructed masonry prisms / R. Lumantarna, D.T. Biggs, J.M. Ingham // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2014. – Vol. 26. – № 4. – Pp. 567–575.

19. Клименко Є.В. Аналіз розрахункового і експериментального методів визначення несучої здатності кам'яних конструкцій / Є.В. Клименко, С.Л. Шаповал, І.І. Гринєва // *Вісник ОДАБА*. – 2014. – №57. – Вип. 57. – 5 с.

Klimenko Є.V. Analiz raschetnogo i eksperimentalnogo metoda opredeleniya nesushchei sposobnosti kamennikh konstrukttsii / Є.V.Klimenko, S.L. Shapoval, I.I. Grineva // *Visnyk ODABA*. – 2014. – No. 57. – Vip. 57. – 5 s.

20. Міщенко Р.А. Міцність цегляної кладки / Р.А. Міщенко // *Коммунальное хозяйство городов*. – К.: Техніка, 2000. – Вип. 23. – С. 34–37.

Mishchenko R.A. Mitsnist tshlianoi kladky / R.A. Mishchenko // *Kommunalnoe khoziaistvo horodov*. – K.: Tekhnika, 2000. – Vyp. 23. – S. 34–37.

21. Клименко Є.В. Зріз кам'яних конструкцій: монографія / Є.В. Клименко, О.С. Чернева. – Одеса: Видавництво «Чорномор'я», 2010. – 173 с.

Klymenko Ye.V. Zriz kamianykh konstrukttsii: monohrafiia / Ye.V. Klymenko, O.S. Chernieva. – Odesa: Vydavnytstvo «Chornomor'ia», 2010. – 173 s.

22. Деркач В. Н. Методы оценки прочности каменной кладки в отечественной и зарубежной практике обследования зданий и сооружений / В. Н. Деркач, Н.М. Жерносок // *Вестник Белорусско-Российского университета*. – № 3(28). – 2010. – С. 135–142.

Derkach V. N. Metodi otsenki prochnosti kamennoi kladky v otechestvennoi i zarubezhnoi praktike obsledovaniya zdaniy i sooruzheniy / V. N. Derkach, N.M. Zhernosek // *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta*. – № 3(28). – 2010. – S. 135–142.

23. Григорчук П.А. Обзор системы Flat-Jack / П. А. Григорчук, П.Б. Лоренцо // *Гражданское строительство*. – 2000. – № 9. – 2000. – С. 39–50.

Hryhorchuk P.A. Ohliad systemy Flat-Jack / P. A. Hryhorchuk, P.B. Lorentso // *Tsyvilna inzheneriia*. – 2000. – № 9. – 2000. – S. 39–50.

24. Усенко Д.В. Міцність цегляної кладки при діагональному розколюванні: дис. д-ра філос.: 192. Полтава, 2022, 168 с.

Usenko D.V. Mitsnist tshlianoi kladky pry diahonalnomu rozkoliuvanni: dys. d-ra filos.: 192. Poltava, 2022, 168 s.

25. Андрух С. Л. Методи визначення фізико-механічних властивостей кладки / С. Л. Андрух, С. А. Галушка // *X Международная научно-практическая конференция "Dynamics of the development of world science"*, (Ванкувер, Канада, 10-12 июня 2020 г.). – Ванкувер, 2020. – С. 225–231.

Andruk S. L. Metody vyznachennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei kladky / S. L. Andruk, S. A. Halushka // *Kh Mezhdunarodnaia nauchno-praktycheskaia konferentsiia "Dynamics of the development of world science"*, (Vankuver, Kanada, 10-12 yunია 2020 h.). – Vankuver, 2020. – S. 225–231.