







Received: 26.08.2024
Revised: 17.10.2024
Accepted: 25.10.2024
DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.130-137

DETERMINATION OF THE ELASTIC CONSTANTS OF BRICKS ON INDUSTRIAL SAMPLES IN FOUR-POINT BENDING TESTS

A. Yu. Fedorov^a * and E. B. Galkina^b

*Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
1 Akademika Koroleva St., Perm, 614013, Russia*

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0001-8239-3386>  fedorov@icmm.ru;
^{b)}  <https://orcid.org/0000-0001-6413-7872>  galkina.e@icmm.ru

*Corresponding author. Email: fedorov@icmm.ru
Address for correspondence: ul. Akad. Koroleva, 1, Perm, 614013, Russia
Tel.: +7 (342) 237-8330; fax: +7 (342) 237-8487

The paper considers a variant of determining the mechanical characteristics, namely elastic moduli and Poisson's ratios, of building bricks in four-point bending tests of industrial samples and measurement of strains by fiber-optic sensors. An example of determining the elastic constants of one of the brick grades in tension and compression is given, with analyzing the maximum errors in the determination of the elastic moduli and Poisson's ratios, which may occur in the method under consideration.

Keywords: modulus of elasticity, Poisson's ratio, four-point bending, building materials, fiber-optic strain sensors

Acknowledgment

The study was made in the framework of the government task, registration number of the theme 124020700047-3.

References

1. GOST P 57349–2016/EN 772-1:2011. (In Russian).
2. GOST 8462–85. (In Russian).
3. Segura, J., Pelà, L., and Roca, P. Monotonic and cyclic testing of clay brick and lime mortar masonry in compression. *Construction and Building Materials*, 2018, 193, 453–466. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.198.
4. Chatterjee, P., Ghosh, A., and Bhanja, S. Compressive stress–strain behavior of masonry prisms made of low elastic modulus burnt clay bricks. *Journal of Building Engineering*, 2023, 78, 107561. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107561.
5. Cabané, A., Pelà, L., and Roca, P. Effect of cross section aspect ratio and bearing surfaces treatment on the compressive strength of solid fired clay brick specimens. *Construction and Building Materials*, 2023, 383, 131397. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131397.
6. EN 1015–11:2019. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2019.
7. Grazzini, R., Misseri, G., and Rovero, L. A bi-modulus material model for bending test on NHL3.5 lime mortar. *Materials*, 2023, 16 (2), 486. DOI: 10.3390/ma16020486.
8. Chang, C.-W., Hsu, F.-L., Chang, F.-C., and Huang, Y.-S. Measuring elastic constants of wood through static bending using a strain gauge. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2022, 80 (3), 611–620. DOI: 10.1007/s00107-021-01771-6.



9. Matveenکو, V., Serovaev, G., Fedorov, A., Galkina, E., and Zaitsev, A. Determination of elastic moduli and Poisson's ratios of bi-modulus materials based on the results of four-point bending test. *Materials and Structures*, 2024, 57 (4), 96. DOI: 10.1617/s11527-024-02373-3.



Подана в журнал: 26.08.2024

УДК 539.3

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.130-137

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ПОСТОЯННЫХ ДЛЯ КИРПИЧЕЙ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБРАЗЦАХ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ЧЕТЫРЕХТОЧЕЧНЫЙ ИЗГИБ

А. Ю. Федоров^{а, *}, Е. Б. Галкина^б

*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013, Россия*

^{а)} <https://orcid.org/0000-0001-8239-3386> fedorov@icmm.ru;

^{б)} <https://orcid.org/0000-0001-6413-7872> galkina.e@icmm.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: fedorov@icmm.ru

Адрес для переписки: ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013, Россия

Тел., +7 (342) 237-83-30; факс: +7 (342) 237-84-87

В работе рассмотрен вариант определения механических характеристик – модулей упругости и коэффициентов Пуассона – строительных кирпичей при испытаниях промышленных образцов на четырехточечный изгиб и измерении деформаций волоконно-оптическими датчиками. Приводится пример определения упругих постоянных одной из марок кирпича при растяжении и сжатии с анализом максимальных погрешностей определения модулей упругости и коэффициентов Пуассона, которые могут иметь место в рассматриваемом методе.

Ключевые слова: модуль упругости, коэффициент Пуассона, четырехточечный изгиб, строительные материалы, оптоволоконные датчики деформации

1. Введение

Кирпич является одним из наиболее распространенных элементов строительных конструкций. Упругие постоянные кирпичей необходимы для численного моделирования и различных инженерных оценок конструкций на основе кирпичной кладки. В подавляющем большинстве исследований для кирпичей приводятся результаты, связанные с их поведением при сжатии. Реализация этой задачи проводится на основе стандартов и рекомендаций, оформленных в различных странах, в том числе в Российской Федерации [1, 2]. Примером исследовательских работ, посвященных различным аспектам, связанным с испытаниями кирпича на сжатие, являются статьи [3–5]. Несмотря на то, что механические характеристики при сжатии, по-видимому, являются основными параметрами, учитываемыми в нормах проектирования сооружений на основе кирпичей, для получения при моделировании инженерных объектов более достоверной картины о напряженно-деформированном состоянии также необходима информация о свойствах строительных кирпичей при растяжении.

Определение механических и прочностных характеристик при растяжении для многих материалов, в том числе строительных кирпичей, является более сложной задачей, чем определение свойств при сжатии, так как возникают трудности, связанные с изготовлением и испытанием образцов при одноосном растяжении. Для реализации в образцах растяжения альтернативой одноосному растяжению является трехточечный изгиб [6]. При испытаниях на трехточечный изгиб наличие сосредоточенной нагрузки от нагружающей опоры вызывает определенные проблемы, связанные с вычислением модулей упругости на основе соотношений, полученных по классической теории балки. Вместе с тем простота реализации трехточечного изгиба способствовала его широкому применению [7]. При четырехточечном изгибе

этот недостаток проявляется менее ярко [8], но при этом должны быть достаточно большие размеры образцов, при которых распределение деформации будет соответствовать балочным теориям.

Если наряду с оценкой модулей упругости кирпича при сжатии имеются отдельные работы, в которых приводятся результаты определения модулей упругости при растяжении, то практически отсутствуют результаты исследований, связанных с определением второй упругой постоянной – коэффициента Пуассона. В настоящей работе приводятся результаты определения для кирпичей модулей упругости и коэффициентов Пуассона при сжатии и растяжении на основе использования и развития методики определения упругих постоянных разномодульных материалов, представленной в работе [9], с использованием результатов моделирования, которые обосновывают использование промышленных образцов кирпича в качестве образцов для определения упругих постоянных.

2. Экспериментальная методика определения упругих постоянных для кирпичей при растяжении и сжатии

Для определения модулей упругости и коэффициентов Пуассона кирпичей при сжатии и растяжении предлагается вариант четырехточечного изгиба образца (рис. 1) с измерением продольных и поперечных деформаций в зоне растяжения и сжатия волоконно-оптическими датчиками деформаций [9].

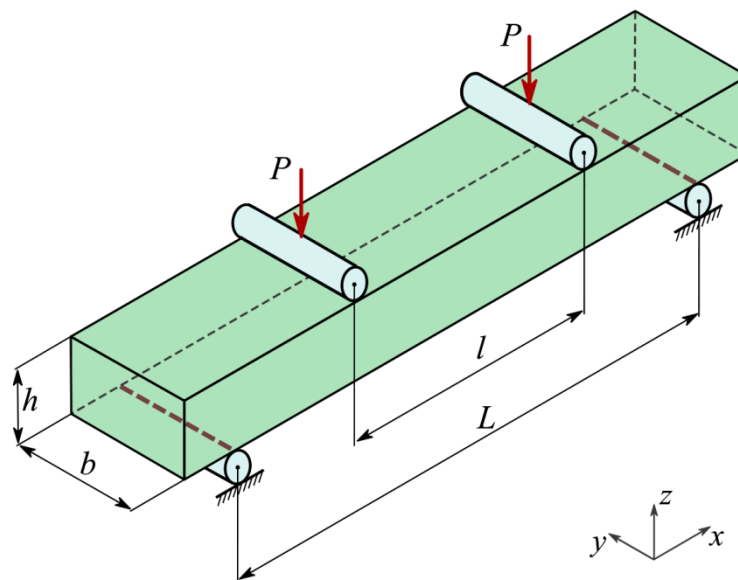


Рис. 1. Схема эксперимента на четырехточечный изгиб

Схема четырехточечного изгиба обеспечивает в одном эксперименте получение зон однородного растяжения и сжатия, а измерение в этих зонах продольной и поперечной деформаций дает возможность определения коэффициентов Пуассона в зоне растяжения $\nu^+ = -\varepsilon_y^+ / \varepsilon_x^+$ и зоне сжатия $\nu^- = -\varepsilon_y^- / \varepsilon_x^-$. Для вычисления модулей упругости при растяжении E^+ и сжатии E^- на основе результатов измерения деформаций ε_x^+ и ε_x^- используются следующие допущения: напряженно-деформированное состояние в зоне измерения деформаций соответствует одноосному напряженно-деформированному состоянию; распределение продольных деформаций по толщине образца в зоне их измерения соответствует гипотезам Бернулли – Эйлера. Проверку выполнения этих условий при заданных размерах L, l, b, h предлагается проводить на основе численного моделирования схемы четырехточечного



изгиба в рамках трехмерной модели теории упругости. Для численного моделирования используется метод конечных элементов, реализованный в программе Ansys.

Выполнение условия одноосного напряженного состояния может быть оценено на основе анализа в зоне измерения деформаций соотношений $-\varepsilon_z / \varepsilon_x = \nu$, $-\varepsilon_y / \varepsilon_x = \nu$, где ε_x , ε_y , ε_z – значения деформаций, полученные в рамках трехмерной модели четырехточечного изгиба при коэффициенте Пуассона ν . Выполнение гипотез Бернулли – Эйлера может быть оценено по отклонению деформаций ε_x от линейной зависимости по толщине образца. Зона измерения деформаций $-a \leq x \leq a$, $a \leq y \leq a$ определяется линейным размером волоконно-оптического датчика деформаций.

При выполнении гипотез Бернулли – Эйлера, описывающих чистый изгиб, и различных свойствах материала при растяжении и сжатии модули упругости могут быть вычислены на основе значений деформаций, измеренных в зонах растяжения (+) и сжатия (–), по следующим формулам [9]:

$$E^+ = \frac{3M (\varepsilon_x^+ - \varepsilon_x^-)}{bh^2 (\varepsilon_x^+)^2}; \quad E^- = \frac{3M (\varepsilon_x^+ - \varepsilon_x^-)}{bh^2 (\varepsilon_x^-)^2}. \quad (1)$$

Здесь E^+ , E^- – модули упругости при растяжении и сжатии; M – изгибающий момент; h – толщина образца; b – ширина образца; ε_x^+ , ε_y^+ – деформации в зоне растяжения; ε_x^- , ε_y^- – деформации в зоне сжатия.

При наличии информации о погрешности измерения деформации волоконно-оптическими датчиками δ для рассматриваемой методики может быть дана оценка максимальной погрешности определения коэффициентов Пуассона и модулей упругости [9]:

$$\alpha_\nu = \left| \frac{(\varepsilon_x^+ - \varepsilon_y^+) \delta}{(\varepsilon_x^+ - \delta) \varepsilon_y^+} \right|; \quad \alpha_E = \left| 1 - \frac{\varepsilon^2}{(\varepsilon - \delta)^2} \right|. \quad (2)$$

Здесь: $\varepsilon = \max \{ |\varepsilon^+|, |\varepsilon^-| \}$.

Погрешность определения коэффициентов Пуассона в зоне сжатия имеет вид, аналогичный соотношениям (2).

3. Результаты определения модулей упругости и коэффициентов Пуассона различных кирпичей

Принцип работы волоконно-оптического датчика на брэгговской решетке основан на измерении резонансной длины волны, отраженной части широкополосного оптического спектра, который запускается интеррогатором по оптическому волокну (рис. 2).

В рамках рассматриваемой методики были выполнены эксперименты по определению упругих постоянных силикатного кирпича с размерами $250 \times 120 \times 65$ мм.

С учетом соответствия формы кирпича схеме четырехточечного изгиба представляет интерес непосредственное использование промышленных образцов кирпича в экспериментах по определению упругих постоянных.

Для силикатного кирпича будут следующие размеры, определяющие схему четырехточечного изгиба: $L = 210$ мм; $b = 120$ мм; $h = 65$ мм.

Численное моделирование на основе метода конечных элементов было выполнено при одинаковых свойствах материала при растяжении и сжатии и различных значениях коэффициента Пуассона $0,1 \leq \nu \leq 0,4$. Результаты численного моделирования показали, что для

кирпича в зоне, определяемой размером $a = 10$ мм, отличие коэффициентов Пуассона, вычисленных на основе полученных значений деформаций по формулам $\nu^+ = -\varepsilon_y^+ / \varepsilon_x^+$ и $\nu^- = -\varepsilon_y^- / \varepsilon_x^-$, от коэффициента Пуассона, при котором решалась трехмерная задача для $\nu = 0,1$, составляет не более 1 %, для $\nu = 0,2$ – не более 3,6 %, для $\nu = 0,3$ – не более 8,2 %, для $\nu = 0,4$ – не более 15 %. Отклонение деформаций ε_x от линейной зависимости по толщине образца, которая получена при расчете с использованием гипотез Бернулли – Эйлера, составляет не более 0,1 % для всех рассмотренных значений коэффициента Пуассона. Полученные оценки дают основание для использования промышленных образцов кирпичей в рассматриваемом варианте определения упругих постоянных.



Рис. 2. Фотография испытания образца в виде прямоугольной балки на четырехточечный изгиб

Для определения деформаций использовались волоконно-оптические датчики на брэгговской решетке, имеющей линейный размер 5 мм. Погрешность измерения деформаций используемых датчиков, связанная с измерительным шумом, составляет $\sim 2 \cdot 10^{-6}$. На рис. 2 приведена фотография эксперимента по определению упругих постоянных при испытании на четырехточечный изгиб, который обеспечивается заданием усилия универсальной испытательной машиной МИМ.2-20. Расположение опор при четырехточечном изгибе, соответственно, $l = L/2$.

В таблице для силикатного кирпича приведены результаты измерения деформаций при соответствующих нагрузках и вычисленные на их основе по соотношениям (1) значения модулей упругости и коэффициентов Пуассона в зонах растяжения и сжатия.

Максимальные погрешности определения механических характеристик, вычисленные по соотношениям (2), при точности измерения деформаций используемыми датчиками при максимальных уровнях деформаций, реализованных в эксперименте, составляют 4,9 % для модулей упругости и 19 % для коэффициентов Пуассона. Следует отметить, что при реали-



зованных уровнях нагружения диаграмма σ - ε соответствует упругому поведению материала, и при снятии нагрузок материал возвращается в исходное состояние.

Таблица

Силикатный кирпич

$P, \text{Н}$	$\varepsilon_x^+; \varepsilon_x^-$	$\varepsilon_y^+; \varepsilon_y^-$	$E^+, \text{ГПа}$	$E^-, \text{ГПа}$	ν^+	ν^-
2500	59,4; -58,2	-8,6; 9,0	16,0	16,7	0,145	0,154
3000	72,4; -69,4	-10,5; 11,8	15,6	17,0	0,145	0,170
3500	84,1; -81,1	-12,4; 12,8	15,7	16,9	0,148	0,158

4. Заключение

Рассмотрена схема эксперимента по определению модулей упругости и коэффициентов Пуассона строительных кирпичей на основе результатов измерения деформаций прямоугольных образцов при четырехточечном изгибе. Для измерения деформаций используются волоконно-оптические датчики на брэгговских решетках. В качестве примера получены значения модулей упругости и коэффициентов Пуассона силикатного кирпича. Для силикатного кирпича отличия модулей упругости при растяжении и сжатии составляют $\sim 7\%$. Ориентируясь на оценки максимальных погрешностей, приведенных в конце раздела 2, можно отметить незначительную разномодульность у силикатного кирпича.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020700047-3.

Литература

- ГОСТ Р 57349–2016/EN 772-1:2011. Кирпич и блоки. Метод определения прочности на сжатие. – М. : Стандартиформ, 2017. – 12 с.
- ГОСТ 8462–85. Материалы стеновые методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 7 с.
- Segura J., Pelà L., Roca P. Monotonic and cyclic testing of clay brick and lime mortar masonry in compression // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 193. – P. 453–466. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.198.
- Chatterjee P., Ghosh A., Bhanja S. Compressive stress–strain behavior of masonry prisms made of low elastic modulus burnt clay bricks // Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 78. – P. 107561. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107561.
- Cabané A., Pelà L., Roca P. Effect of cross section aspect ratio and bearing surfaces treatment on the compressive strength of solid fired clay brick specimens // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 383. – P. 131397. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131397.
- EN 1015–11:2019. Methods of test for mortar for masonry. Part 11 : Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. – European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2019.
- Grazzini, R., Misseri, G., and Rovero L. A bi-modulus material model for bending test on NHL3.5 lime mortar // Materials. – 2023. – Vol. 16, No. 2. – P. 486. – DOI: 10.3390/ma16020486.



8. Measuring elastic constants of wood through static bending using a strain gauge / C.-W. Chang, F.-L. Hsu, F.-C. Chang, Y.-S. Huang // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2022. – Vol. 80 (3). – P. 611–620. – DOI: 10.1007/s00107-021-01771-6.
9. Determination of elastic moduli and Poisson's ratios of bi-modulus materials based on the results of four-point bending test / V. Matveenko, G. Serovaev, A. Fedorov, E. Galkina, A. Zaitsev // *Materials and Structures*. – 2024. – Vol. 57 (4). – Art. No. 96. – DOI: 10.1617/s11527-024-02373-3.