

УДК 69.058.2

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-54-62](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-54-62)**Е.В. ШЕЙКИН**

Центральные научно-реставрационные проектные мастерские, Школьная ул., д. 24, г. Москва, 109544, Российская Федерация

АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ СЛОИСТЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИЯХ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

Аннотация

Введение. В статье приводятся результаты определения свойств слоистых пористых материалов, отобранных из глубины конструкций объектов культурного наследия, в той или иной степени подверженных долговременному воздействию влаги. Полученные данные сопоставляются со свойствами новых материалов, применяемых в аналогичных конструкциях и других объектах. Данные о новых материалах получены из литературных источников.

Цель. Выявление признаков изменения свойств слоистых пористых материалов, происходящих не только в поверхностном слое, но и по всей глубине конструкции.

Материалы и методы. Представленные исследования получены на основе результатов проведенных автором испытаний более 2500 образцов материалов из 24 памятников архитектуры разного времени и локаций, находящихся под долговременным влиянием неблагоприятных эксплуатационных факторов.

Результаты. Полученные результаты показывают, что, в отличие от однородных материалов, разрушение слоистых систем происходит не послойно, начиная с поверхности, а одновременно во всем объеме конструкции.

Выводы. Существенное изменение свойств материалов на всех исследованных участках показывает, что, в отличие от однородных материалов, разрушение слоистых систем происходит не послойно, а в объеме всей глубины конструкции.

Ключевые слова: кирпич, известковый раствор, свойства пористой системы, размер пор, удельная поверхность, сорбционные характеристики, слоистые материалы, исторические конструкции, объекты культурного наследия

Для цитирования: Шейкин Е.В. Характер разрушения слоистых пористых материалов в конструкциях объектов культурного наследия // *Бетон и железобетон*. 2025. № 2 (627). С. 54–62. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-54-62](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-54-62). EDN: RPQXZP

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 07.02.2025

Поступила после рецензирования 10.03.2025

Принята к публикации 13.03.2025

E.V. SHEIKIN

Central Scientific and Restoration Design Workshops, Shkolnaya str., 24, Moscow, 109544, Russian Federation

JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

THE NATURE OF THE DESTRUCTION OF LAYERED POROUS MATERIALS IN THE STRUCTURES OF CULTURAL HERITAGE SITES

Abstract

Introduction. The article presents the results of determining the properties of layered porous materials selected from the depths of the structures of cultural heritage sites, which are more or less susceptible to long-term exposure to moisture. The obtained data are compared with the properties of new materials used in similar structures and other objects according to literary sources.

Aim. Identification of signs of changes in the properties of layered porous materials occurring not only in the surface layer, but also throughout the entire depth of the structure.

Materials and methods. The presented studies are based on the results of the author's tests of more than 2,500 samples of materials from 24 architectural monuments of different times and locations that are under the long-term influence of adverse operational factors.

Results. The results show that, unlike homogeneous materials, the destruction of layered systems does not occur in layers, starting from the surface, but simultaneously throughout the entire volume of the structure.

Conclusions. A significant change in the properties of materials in all studied areas shows that, unlike homogeneous materials, the destruction of layered systems does not occur in layers, but in the volume of the entire depth of the structure.

Keywords: brick, lime mortar, properties of a porous system, pore size, specific surface area, sorption characteristics, layered materials, historical structures, cultural heritage objects

For citation: Sheikin E.V. The nature of destruction of layered porous materials in the structures of cultural heritage sites. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 2 (627), pp. 54–62. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-54-62](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-54-62) EDN: RPQXZP

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 07.02.2025

Revised 10.03.2025

Accepted 13.03.2025

Введение

Свойства пористых материалов могут изменяться во времени в результате развития различных деструктивных процессов. Несмотря на значительное количество исследований, посвященных данной проблематике, большинство из них проводилось на лабораторных образцах однородного материала, в связи с чем полученные результаты изменения слоистой структуры относились к поверхностным слоям [1–14]. В тех случаях, когда изучению подвергался массив естественной (горная порода) или искусственной (архитектура) конструкций, собственно исследуемым объектом также являлся поверхностный слой [15–17]. Поэтому использование полученных результатов для оценки характера разрушения слоистых систем, где понятие «поверхности» не ограничивается внешней границей материала с окружающей средой, а потенциально распространяется на все внутренние граничные участки соприкосновения различных материалов, невозможно.

В ряде проанализированных нами работ показано, что процесс разрушения определяется зоной испарения [18–20], соответственно, наличие внутренних поверхностей в слоистых системах может привести к деструкции материалов по всей толщине конструкции. Данная гипотеза подтверждается данными о повышенной уязвимости участков совмещения материалов с разными свойствами [21–23] или с внутренними трещинами [24].

В связи с этим была поставлена задача определить, наблюдаются ли признаки изменения свойств пористых слоистых систем по всей глубине на примере конструкций кладочного типа объектов культурного наследия.

Материалы и методы

В работе использовались материалы конструкций 24 памятников архитектуры, разного времени и локаций, в той или иной степени подверженных долговременному воздействию влаги. Для достижения поставленных целей образцы для лабораторных испытаний брались не с поверхности, а из толщи стены, на глубине от 1 до 50–65 см.

Отбор проб проводился методом сверления трубчатыми сверлами диаметром 10 мм. Получаемые образцы представляют собой микрокеры диаметром около 7 мм; длина и формат образцов зависят от состояния отбираемого материала и могут колебаться от качественных цилиндрических кернов длиной 10–20 мм до бесформенных осколков. Каждая проба состояла из нескольких образцов в среднем 5–6 см по глубине, так, что из каждого отверстия получалось от 8 до 12 проб. В одну пробу отбирались только материалы одного вида, в связи с чем при резкой смене материалов размер пробы сокращался, вплоть до одного образца. Полученные пробы упаковывали в лабораторные бюксы с притертой крышкой и герметизировали лентой Parafilm M.

Определение влажности. Оценка естественной влажности образцов проводилась гравиметрическим методом. Для взвешивания образцов применялись весы Sartorius GC 803S-OCE с точностью до 4 знака. Бюксы с пробами освобождались от герметизирующей пленки, взвешивались и высушивались со снятой крышкой до постоянной массы при температуре 105 °С. После сушильного шкафа бюксы закрывались крышками и помещались на 20 мин в эксикатор с силикагелем для остывания, после чего взвешивались. Влажность определялась по следующей формуле:

$$W = \frac{(m_{\text{бв}} - m_{\text{б}}) - (m_{\text{бс}} - m_{\text{б}})}{(m_{\text{бс}} - m_{\text{б}})} \times 100, \quad (1)$$

где W – естественная влажность;

$m_{\text{бв}}$ – масса бюкса с мокрой пробой;

$m_{\text{б}}$ – масса пустого бюкса;

$m_{\text{бс}}$ – масса бюкса с сухой пробой.

Для анализа полученные значения естественной влажности нормализовались относительно значений водопоглощения по следующей формуле:

$$\theta = \frac{W}{B} \times 100, \quad (2)$$

где θ – относительная влажность материалов;

B – водопоглощение, определяемое путем выдерживания образцов в кипящей дистиллированной воде в течение двух часов.

После кипячения образцы оставались в воде еще на два часа для остывания.

Определение сорбционных характеристик. Определение сорбционных характеристик проводилось по эксикаторному методу. Параметры воздуха в эксикаторе создавались при помощи насыщенных растворов солей. Для достижения 43 % использовался раствор карбоната калия (K_2CO_3), 63 % – нитрита натрия (NaNO_2), 74 % – нитрата натрия, 85 % – хлорида калия, 98 % – сульфата меди. Время выдержки образцов для достижения равновесия на каждом этапе было определено на основе опыта зарубежных исследователей, в работах которых оно составляет от нескольких часов до нескольких дней для кернов диаметром 2–5 см. Поскольку предварительные эксперименты показали, что 72 часов достаточно для достижения равновесия всех наших образцов, то именно этот период был выбран в качестве оптимального. После достижения равновесия образцы высушивались при 105 °С до постоянного веса, располагались на 20 мин в эксикатор с силикагелем для остывания, взвешивались и вновь размещались в эксикаторах с более высокой ступенью относительной влажности.

Сорбционные характеристики выражались в формате степени микропористости ($P_{0,1}$), представляющей собой процент сорбционных пор в материале. $P_{0,1}$ определяется по формуле:

$$P_{0,1} = \frac{a_{98}}{B} \times 100, \quad (3)$$

где a_{98} – количество сорбированной влаги при давлении водяного пара 0,98.

Определение сорбционных характеристик всех образцов проводилось дважды. «Первичная» сорбция выполнялась на образцах, прошедших только процедуру определения естественной влажности, т. е. не изменивших свое состояние. «Вторичная» сорбция проводилась на очищенных от примесей образцах после трех циклов увлажнения/высыхания, где каждый цикл состоял из выдержки в холодной воде в течение 8 часов, а затем в кипящей воде в течение 2 часов. Дистиллированная вода менялась после каждого этапа. Необходимость вторичной сорбции связана с тем, что в неблагоприятных влажностных условиях на отдельных участках скапливается множество примесей (частицы почвы, водорастворимые соли, микрообломки и т. д.), могущих существенно искажать физические свойства материалов, в частности уменьшать пористость, размер пор и гигроскопичность. Эти измененные «кажущиеся» свойства важны с той точки зрения, что именно в таком формате данные материалы проявляют себя внутри стены. Однако для определения истинных свойств необходимо очистить поровое пространство от примесей.

Определение среднего размера пор. Средний размер пор образцов (d_{cp}) рассчитывался по формуле:

$$d_{cp} = \frac{V_p \times 4 \times 10^3}{S_{уд}}, \quad (4)$$

$$V_p = \frac{V \times m_0 \times P_0}{100}, \quad (5)$$

где V – объем образца, см³;

V_p – объем пор, см³/г;

$S_{уд}$ – удельная площадь поверхности. Удельная площадь поверхности определялась сравнительным методом по следующей формуле:

$$S_{уд} = \frac{a_{62} - a_{45}}{\alpha_{62} - \alpha_{45}}, \quad (6)$$

где a_{62} – адсорбция исследуемого образца при относительной влажности 62 %, мкмоль/г;

a_{45} – адсорбция исследуемого образца при относительной влажности 45 %, мкмоль/г;

α_{62} – абсолютная величина адсорбции стандартного образца при относительной влажности 62 %, мкмоль/м²;

α_{45} – абсолютная величина адсорбции стандартного образца при относительной влажности 45 %, мкмоль/м².

Абсолютная величина адсорбции определялась по формуле:

$$\alpha_i = \frac{a_i - m_c}{m_c \times S_{уд} \times 0,000018}, \quad (7)$$

где a_i – адсорбция стандартного образца при относительной влажности i , г;

m_c – сухой вес стандартного образца, г.

В качестве стандартных образцов использовались четыре образца исторического кирпича с разными характеристиками пористого пространства. Анализ образцов проводился на кафедре функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС методом низкотемпературной адсорбции азота при помощи анализатора удельной поверхности и пористости Quantochrome Nova 1200e.

Характеристика свойств пористых материалов слоистых конструкций объектов культурного наследия

Данные, полученные по результатам лабораторных испытаний исторических материалов, приведены в формате усреднения по объектам в табл. 1–5.

Пористость. Пористость кирпича представлена в достаточно узком диапазоне 24–35 %. В большинстве случаев (15 объектов, 65 %) значения находятся в диапазоне 29–32 %, 6 объектов (26 %) – в диапазоне 24–27 % и только 2 объекта – в диапазоне 33–35 %. Пористость раствора демонстрирует несколько больший диапазон – от 22 до 44 %. Однако обе крайние точки представлены только одним случаем. Если не учитывать их, то более половины всех значений (52 %), как и в случае с кирпичом, находятся в диапазоне 29–33 %, 19 % (4 объекта) – в диапазоне 26–28 %, 29 % (6 объектов) – в диапазоне 35–37 % (табл. 1).

Средний размер пор. Средние показатели размера пор в большинстве случаев (71 %) находятся в диапазоне 0,1–0,5 мкм. Оставшиеся данные распределяются примерно поровну. Средние показатели размера пор трех объектов (13 %) находятся ниже 0,1 мкм, четырех (17 %) – выше. Средние показатели размера пор раствора для всех объектов расположены ниже 0,1 мкм (табл. 2).

Количество микропор менее 0,1 мкм. Для кирпича только на двух объектах количество пор меньше 0,1 мкм составляет менее 30 %. Более чем для половины объектов (52 %) количество участков со средним размером пор менее 0,1 мкм возрастает до 30–50 %. Для оставшихся девяти объектов (39 %) количество микропористых участков составляет более 50 %. Для раствора указанная тенденция проявляется еще более четко. На всех объектах количество микропористых участков превышает 80 %. При этом в восьми случаях (35 %) количество микропористых участков составляет 90–97 %, а более чем в половине всех случаев (57 %) они достигают 100 % (табл. 3).

Удельная площадь поверхности. Усредненные значения удельной площади поверхности кирпича по данным первичной сорбции (неочищенные от примесей образцы) достаточно равномерно распределились в широком диапазоне 2,4–17 м²/г. Для 35 % объектов

удельная поверхность не превышала 5 м²/г, для 35 % – находилась в диапазоне 5–10 м²/г, соответственно, для оставшихся 30 % удельная поверхность превышала 10 м²/г. По данным вторичной сорбции (очищенные от примесей образцы) средние показатели ожидаемо несколько снизились. Количество объектов с удельной площадью поверхности более 10 м²/г сократилось до 22 %, с удельной площадью поверхности в диапазоне 5–10 м²/г – до 30 %. Таким образом, процент объектов с удельной поверхностью менее 5 м²/г возрос до 48 % (табл. 4).

Для раствора значения удельной поверхности были существенно выше. По данным первичной сорбции для 87 % объектов средние значения удельной поверх-

ности превышали 10 м²/г. Оставшиеся 13 % объектов продемонстрировали значения удельной площади поверхности в диапазоне 5–10 м²/г. По данным вторичной сорбции значения снизились, но незначительно. Количество объектов с удельной площадью выше 10 м²/г сократилось до 70 %, с удельной площадью в диапазоне 5–10 м²/г выросло до 22 %. В оставшихся 9 % значения удельной поверхности располагались ниже отметки в 5 м²/г.

Сорбционные характеристики. Только в 13 % случаев по данным первичной сорбции (неочищенные от примесей образцы) и в 33 % случаев по данной вторичной сорбции (очищенные от примесей образцы) значения сорбционной влажности кирпича составили

Таблица 1
Table 1

Открытая пористость (P_o) исследуемых материалов. $P_{o-ср}$ – среднее значение пористости; < 30 ... > 40 % – процент кирпича с пористостью соответствующего диапазона

The open porosity (P_o) of the studied materials. $P_{o-ср}$ – the average porosity value; < 30 ... > 40 % – percentage of bricks with a porosity of the appropriate range

	Кирпич	Раствор
$P_{o-ср}$	29,4	32
< 30 %	42	21
30–40 %	58	75
> 40 %	0	4

Таблица 3
Table 3

Степень микропористости ($P_{0,1}$) исследуемых материалов. $P_{0,1-ср}$ – среднее значение степени микропористости; < 5 ... > 10 % – соответствующий процент микропор (пор менее 0,1 мкм)

The degree of microporosity ($P_{0,1}$) of the studied materials. $P_{0,1-ср}$ – the average value of the degree of microporosity; < 5 ... > 10 % – the corresponding percentage of micropores (pores less than 0.1 microns)

	Кирпич	Раствор
$P_{0,1-ср}$	48	96
< 5 %	0	0
5–10 %	0	0
> 10 %	100	100

Таблица 2
Table 2

Средний размер пор ($d_{ср}$) исследуемых материалов. $d_{ср-ср}$ – среднее значение среднего размера пор; < 0,1 ... > 1 мкм – процент кирпича с размером пор соответствующего диапазона

The average pore size ($d_{ср}$) of the studied materials. $d_{ср-ср}$ – the average value of the average pore size; < 0.1 ... > 1 microns – the percentage of brick with the pore size of the corresponding range

	Кирпич	Раствор
$d_{ср-ср}$	0,3	0,02
< 0,1 мкм	13	100
0,1–0,5 мкм	71	0
0,5–1 мкм	17	0
> 1 мкм	0	0

Таблица 4
Table 4

Удельная площадь поверхности ($S_{уд}$) исследуемых материалов. $S_{уд-ср}$ – среднее значение удельной площади; $S_{уд-1}$ – удельная площадь образцов с примесями (1) и без примесей (2); < 5 ... > 10 м²/г – процент кирпича с удельной поверхностью соответствующего диапазона

Specific surface area (sound insulation) of the studied materials. $S_{уд-ср}$ – the average value of the specific area; $S_{уд-1}$ – the specific area of samples with impurities (1) and without impurities (2); < 5 ... > 10 м²/г – the percentage of bricks with a specific surface area of the corresponding range

	Кирпич		Раствор	
	$S_{уд-1}$	$S_{уд-2}$	$S_{уд-1}$	$S_{уд-2}$
$S_{уд-ср}$ (м ² /г)	7,4	6,2	24,8	16,2
< 5 м ² /г	38	50	0	8
5–10 м ² /г	33	29	13	21
> 10 м ² /г	29	21	88	71

менее 1 %. В половине случаев по данным обеих сорбций значения максимальной сорбции находились в диапазоне 1–3 %. И, соответственно, в 38 % случаев по данным первичной сорбции и в 17 % по данным вторичной сорбции значения максимальной сорбции превысили 3 % (табл. 5).

Изменение свойств пористых материалов слоистых конструкций объектов культурного наследия

Пористость. На основании анализа литературных данных пористость новых материалов, как кирпичей, так и известковых растворов, находится в диапазоне 20–40 %, с максимальной концентрацией в

районе 30 %, что хорошо коррелирует с полученными результатами по проведенным испытаниям (табл. 6). Отсюда можно сделать вывод, что изменений пористости исследуемых материалов не наблюдается.

Размер пор. Средний размер пор новых материалов, как кирпичей, так и известковых растворов, стремится к микронному диапазону, что позволяет выявить явную тенденцию к снижению размера пор исследуемых материалов (табл. 7, 8). Следует отметить, что для раствора указанная тенденция проявляется значительно сильнее.

Удельная поверхность. Удельная поверхность новых материалов, как кирпичей, так и известковых растворов, в основном не превышает 2–3 м²/г, что

Таблица 5

Table 5

Сорбция при относительной влажности 98 % (A_{98}) исследуемых кирпичей. $A_{98-ср}$ – среднее значение сорбции; A_{98-1} – сорбция образцов с примесями (1) и без примесей (2); $< 1 \dots > 1 \%$ – процент материалов с сорбцией соответствующего диапазона
Sorption at a relative humidity of 98 % (A_{98}) of the studied bricks. $A_{98-ср}$ – the average sorption value; A_{98-1} – the sorption of samples with and without impurities (1) (2); $< 1 \dots > 1 \%$ – percentage of materials with sorption of the corresponding range

	A_{98-1}	A_{98-2}
$A_{98-ср}$	2,4	1,6
$< 1 \%$	13	33
1–3 %	50	50
$> 3 \%$	38	17

Таблица 6

Table 6

Сопоставление пористости исследуемых и новых материалов Comparison of porosity of investigated and new materials

	Кирпич		Раствор	
	исследуемые	новые	исследуемые	новые
$P_{о-ср}$	29	29,6	32	31
$< 30 \%$	42	46	21	39
30–40 %	58	46	75	55
$> 40 \%$	0	8	4	6

Таблица 7

Table 7

Сопоставление среднего размера пор исследуемых и новых материалов Comparison of the average pore size of the investigated and new materials

	Кирпич		Раствор	
	исследуемые	новые	исследуемые	новые
$d_{ср-ср}$ мкм	0,3	1,6	0,02	2,2
$< 0,1$ мкм (%)	13	0,3	100	0
0,1–0,5 мкм (%)	71	13	0	11
0,5–1 мкм (%)	17	29	0	0
> 1 мкм (%)	0	58	0	89

Таблица 8

Table 8

Сопоставление процента микропор (менее 0,1 мкм) исследуемых и новых кирпичей
Comparison of the percentage of micropores (less than 0.1 microns) of investigated and new bricks

	Исследуемые	Новые
$P_{0,1-ср}$	48	6,9
< 5 %	0	67
5–10 %	0	14
> 10 %	100	19

Таблица 9

Table 9

Сопоставление удельной площади поверхности исследуемых и новых материалов
Comparison of the specific surface area of the investigated and new materials

	Кирпич			Раствор		
	исследуемые		новые	исследуемые		новые
	$S_{уд-1}$	$S_{уд-2}$		$S_{уд-1}$	$S_{уд-2}$	
$S_{уд-ср}$ (м ² /г)	7,4	6,2	1,25	24,8	16,2	1,7
< 5 м ² /г	38	50	95	0	8	100
5–10 м ² /г	33	29	4	13	21	0
> 10 м ² /г	29	21	0,5	88	71	0

Таблица 10

Table 10

Сопоставление максимальной сорбционной влажности исследуемых и новых кирпичей
Comparison of the maximum sorption moisture of the studied and new bricks

	Кирпич		
	исследуемые		новые
	A_{98-1}	A_{98-2}	
$A_{98-ср}$	2,4	1,6	0,6
< 1 %	13	33	100
1–3 %	50	50	0
> 3 %	38	17	0

позволяет выявить явную тенденцию к возрастанию удельной поверхности исследуемых материалов (табл. 9). Следует отметить, что для раствора указанная тенденция проявляется значительно существеннее.

Сорбционная влажность. Данные по сорбционной влажности известковых растворов отсутствуют. Сорбционная влажность нового кирпича минимальна и в среднем не превышает 0,5 %, что позволяет выявить тенденцию к возрастанию гигроскопичности исследуемых кирпичей (табл. 10).

Сопоставление данных, полученных из литературных источников, с данными экспериментальных исследований показывает следующее:

– параметры объема пор исследуемых исторических материалов в целом не претерпели каких-либо явных изменений;

– параметры размеров пор и сорбционные характеристики слоистых материалов конструкций объектов культурного наследия демонстрируют явные и существенные изменения, выражающиеся в уменьшении среднего размера пор, возрастании количества микропор, удельной поверхности и сорбционных значений материалов;

– указанные тенденции проявляются как для кирпича, так и для раствора, однако интенсивность изменения тенденции для раствора выражена более явно.

Выводы

Результаты представленной работы позволяют сделать следующие выводы относительно характера разрушения пористых слоистых материалов конструкций объектов культурного наследия, в той или иной степени подверженных долговременному воздействию влаги.

Существенное изменение свойств материалов на всех исследованных участках показывает, что, в отличие от однородных материалов, разрушение слоистых систем происходит не послойно, а в объеме всей глубины конструкции.

Уменьшение размера пор и увеличение удельной поверхности материалов указывает на повсеместное зарождение и развитие сетей микротрещин и появление пустотности. Данная тенденция зафиксирована на всех объектах исследования, вследствие чего ее можно считать характерным проявлением для всех слоистых материалов конструкций кладочного типа, находящихся в неблагоприятных влажностных условиях. Микропоры размером менее 0,1 мкм повышают вероятность возникновения внутренних напряжений в результате подверженности основным процессам физического разрушения, в связи с чем возрастание их количества увеличивает подверженность материалов деструкции. Фактически описываемые процессы можно считать самоускоряющимися, поскольку уязвимость материалов возрастает вместе с возрастанием степени микротрещиноватости и пустотности их структуры.

Поскольку микроструктура раствора подвержена более значительным изменениям, то можно предположить, что известковый раствор оказывается более уязвимым для деструктивных процессов, соответственно, именно он является ответственным за возникновение первичных сетей микротрещин.

Список литературы / References

1. Ahmad A., Simon S., Middendorf B. Stone properties and damage induced by salt crystallisation in some jordanian Stones. *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. New York, 2012.
2. Cardell C., Benavente D., Rodríguez-Gordillo J. Weathering of limestone building material by mixed sulfate solutions. Characterization of stone microstructure, reaction products and decay forms. *Materials Characterization*. 2008, vol. 59, no. 10, pp. 1371–1385.
3. Colas E. Impact de l'humidité et des solutions salines sur le comportement dimensionnel de grès du Buntsandstein: contribution à la sélection de faciès de restauration. Université de Reims Champagne-Ardenne, 2011, 274 p.
4. Cultrone G., Sebastián E. Laboratory simulation showing the influence of salt efflorescence on the weathering of composite building materials. *Environmental Earth Sciences*. 2008, vol. 56, no. 3, pp. 729–740. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1332-y>
5. Franke W.A. The durability of rocks – Developing a test of rock resistance to chemical weathering. *American Journal of Science*. 2009, vol. 309, no. 8, pp. 711–730. DOI: <https://doi.org/10.2475/08.2009.04>
6. Kamh G.M.E., Oguchi C., Watanabe K. Factors controlling salt susceptibility and alteration indices on salt weathering of oolitic limestone using single salt at five weathering regimes, a case study. *Restoration of Buildings and Monuments*. 2013, vol. 19, no. 6, pp. 393–416. DOI: <https://doi.org/10.1515/rbm-2013-6625>
7. Kozłowski R., Magiera J., Weber J., Haber J. Decay and conservation of Pińczów porous limestone. I. Lithology and weathering. *Studies in Conservation*. 1990, vol. 35, no. 4, pp. 205–221.
8. Labus M., Bochen J. Sandstone degradation: An experimental study of accelerated weathering. *Environmental Earth Sciences*. 2012, vol. 67, no. 7, pp. 2027–2042. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1642-y>
9. Molina-Piernas E., Benavente D., Sebastián E., Cultrone G. The influence of rock fabric in the durability of two sandstones used in the Andalusian Architectural Heritage (Montoro and Ronda, Spain). *Engineering Geology*. 2015, vol. 197, pp. 67–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.08.009>
10. Navarre-Sitchler A.K., Cole D.R., Rother G., Jin L., Heather L.B., Brantley S.L. Porosity and surface area evolution during weathering of two igneous rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2013, vol. 109, pp. 400–413. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.02.012>
11. Nieminen P., Romu M. Porosity and frost resistance of clay bricks. *Brick and Block Masonry*. Elsevier / ed. De Courcy J.W. London, UK. 1988, vol. 1, pp.103–109.
12. Stryzewska T., Kańka S. Microstructure of ceramic brick contaminated by magnesium sulphate. *Advances in Science and Technology*. 2014, vol. 92, pp. 203–208. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.92.203>
13. Thomachot C. Modifications des propriétés pétrophysiques des grès soumis au gel ou recouverts "d'encroûtements noirs vernissés". Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 2002.
14. Walbert C. Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti: étude du comportement hydromécanique. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2015, 188 p.
15. Přikryl R., Melounová L., Varilova Z., Weishauptová Z. Spatial relationships of salt distribution and related physical changes of underlying rocks on naturally weathered sandstone exposures (Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic). *Environmental Earth Sciences*. 2007, vol. 52, no. 2, pp. 409–420. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0589-2>
16. Tang Y., Shao Z., Xu T. Pore structure of ancient Chinese bricks under environmental vicissitudes. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2016, vol. 20, no. 5, pp. 1895–1902. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0652-1>

17. Wetzel A., Einsele G. On the physical weathering of various mudrocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 1991, vol. 44, no. 1, pp. 89–100. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02602713>
18. Adamovič J., Mikuláš R., Schweigstillová J., Boehmova V. Porosity changes induced by salt weathering of sandstones, Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2011, vol. 8, no. 1, pp. 29–45.
19. Angeli M., Bigas J.-P., Menéndez B., Hébert R.L., David C. Influence of capillary properties and evaporation on salt weathering of sedimentary rocks. *Heritage Weathering and Conservation*, Madrid, Spain, 2006, pp. 253–259.
20. Jeannette D. Importance of the pore structures during the weathering process of stones in monuments. In: *Soils and Sediments*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1997, pp. 177–190. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-60525-3_9
21. Beck K. Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité. Université d'Orléans, 2006, 244 p.
22. Fookes P.G., Gourley C.S., Ohikere C. Rock weathering in engineering time. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 1988, vol. 21, no. 1, pp. 33–57. DOI: <https://doi.org/10.1144/gsl.qjeg.1988.021.01.03>
23. Graue B., Siegesmund S., Middendorf B. Quality assessment of replacement stones for the Cologne Cathedral: mineralogical and petrophysical requirements. *Environ Earth Sci*. 2011. vol. 63, pp. 1799–1822. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1077-x>
24. Garcia-Fernandez C.C. et al. Effect of environmental relative humidity in the tensile strength of layering in slate stone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2020, vol. 79, pp. 1399–1411. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01619-7>

**Информация об авторе /
Information about the author**

Евгений Валерьевич Шейкин, начальник сектора диагностики влажностного и структурного состояния конструкций, Центральные научно-реставрационные проектные мастерские; соискатель, АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: evg.sheykin@gmail.com

Evgeny V. Sheikin, Head of the Sector for Diagnostics of Humidity and Structural condition of Structures, Central Scientific and Restoration Design Workshops; Applicant, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: evg.sheykin@gmail.com