

КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ГЛИНЯНОГО КИРПИЧА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ И ОТТАИВАНИИ

Введение. Информация о кинетике разрушения водонасыщенных образцов изделий стеновой керамики при циклическом замораживании и оттаивании позволяет судить о морозостойкости и долговечности этих изделий в строительных конструкциях, эксплуатируемых в условиях агрессивного воздействия климатических факторов. При этом циклическое замораживание и оттаивание может быть как объемным [1], так и односторонним [2]. Морозостойкость испытываемых образцов обычно оценивается по числу легко наблюдаемых повреждений поверхности.

Очевидно, что деструкция как неморозостойкости, так и морозостойкости образцов начинается после первых же циклов замораживания и оттаивания. Скорость деструкции материала зависит от начального уровня повреждений. Чем выше этот уровень, тем быстрее разрушается материал. Однако, как свидетельствуют данные работ [3, 4], первые признаки поверхностной деструкции морозостойких образцов, характеризуемых низкой скоростью накопления повреждений, могут наблюдаться только после нескольких десятков и даже сотен циклов одностороннего замораживания и оттаивания. Поэтому результаты наблюдений за поверхностными разрушениями испытываемых образцов не могут в полной мере отражать действительную кинетику их объемного разрушения и необходимо использовать другие показатели деструкции керамических материалов.

Можно исходить из представлений о микротрещинах как источнике разрушения структуры материала при последующем циклическом замораживании и оттаивании и отслеживать их развитие. Такой подход использован, например, в работе [5], в которой с помощью рентгеновского метода отслеживался процесс развития относительной глубины разрушающей трещины в керамических образцах, изготовленных в лабораторных условиях (температура обжига 1050°C), при циклическом объемном замораживании и оттаивании. Исследования показали, что скорость развития разрушающей трещины в образцах зависит от количества микротрещин, накопленных в процессе их изготовления, т.е. от начального уровня повреждений. При низком уровне начальных повреждений развитие разрушающей трещины характеризуется двумя этапами. Первоначально имеет место скрытое накопление повреждений, и трещина развивается довольно медленно. Как только накопленные повреждения достигают критического уровня, развитие трещин приобретает лавинный характер. Если начальный уровень повреждений превышает критический, то разрушающая трещина сразу же развивается лавинообразно. Такая ситуация является достаточно типичной при объемном замораживании глиняного кирпича пластического формования, имеющего различные начальные дефекты.

Дефекты в изделиях пластического формования связаны прежде всего с тем, что перемещаемая в корпусе пресса сырьевая масса расслаивается и сформованные изделия характеризуются осевой текстурой. Эти дефекты не устраняются полностью даже при высокой температуре обжига изделий и являются источником быстрого развития разрушающей трещины при циклическом замораживании и оттаивании. Однако, как отмечается в работе [6], при достаточной температуре обжига, несмотря на возникновение разрушающей трещины, после испытаний на морозостойкость материал кирпича остается прочным и не обнаруживает склонности к разрушению, сохраняя несущую способность в стенах. Поэтому разрушающая трещина также не может достаточно полно характеризовать степень разрушения материала изделий.

По нашему мнению наиболее полное представление о кинетике разрушения глиняного кирпича при циклическом замораживании и оттаивании можно получить путем отслеживания процесса снижения прочности испытываемых изделий при сжатии. Цель данной работы

состояла в том, чтобы при испытаниях на морозостойкость выявить особенности процесса утраты прочности при сжатии двух серий образцов глиняного кирпича пластического прессования, отличающихся температурой обжига. Опытные данные были получены в полном соответствии с основополагающим принципом рандомизации (от англ. random – случайный) и проанализированы с использованием статистических методов. Определены выбранные показатели капиллярных свойств образцов обеих серий, объясняющие различия кинетики их разрушения при циклическом замораживании и оттаивании.

Методика исследования. Исходным материалом для проведения сравнительного эксперимента служила случайная выборка кирпича – сырца, сформованного пластическим способом на предприятии строительной керамики «Левково». Из одного кирпича сырца вырезалось четыре образца в виде параллелепипедов размером $65 \times 55 \times 55$ мм так, как это показано на рисунке 1. Эти образцы нагревались в электрической печи со скоростью $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до максимальной температуры обжига и выдерживались при ней 2 часа, а затем охлаждались вместе с печью. Для одной части образцов максимальная температура обжига составляла 850°C , а для другой – 1050°C . Нижняя и верхняя границы температуры обжига были установлены исходя из термических свойств глины месторождения «Левково-Старе». Характеристика этого глинистого сырья описана в работе [7]. В качестве отощающей добавки на предприятии используется кварцевый песок со средним размером частиц $0,37$ мм. Содержание этой добавки в сырьевой смеси составляет примерно 15% от массы сухой глины.

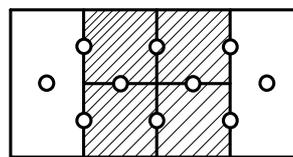


Рис. 1. Схема вырезания образцов из кирпича-сырца.

При температуре 850°C было обожжено 60 образцов, а при 1050°C – 80 образцов. Из этих двух групп случайным образом было отобрано по пять образцов, испытанных затем на прочность при сжатии. Остальные образцы после водонасыщения подвергались объемному замораживанию и оттаиванию в соответствии с требованиями нормы PN-B-12012 [1]. Деструкция образцов в процессе циклического замораживания и оттаивания отслеживалась через каждые пять циклов путем определения прочности при сжатии случайным образом отобранных пяти образцов из каждой группы. Перед испытанием на прочность образцы высушивались до постоянной массы. Сжимающая сила действовала в направлении прессования кирпича-сырца. Случайный отбор образцов для испытания обеспечивал получение статистически независимых результатов измерений.

Известно [8, 9], что морозостойкость керамического материала можно прогнозировать на основе показателей капиллярного впитывания воды. Значения этих показателей зависят от особенностей капиллярно-пористой структуры материала и, следовательно, могут быть использованы для сравнительной оценки слоистой текстуры обожженных образцов кирпича. Для определения значений показателей капиллярных свойств образцов кирпича было проведено исследование процесса одномерного капиллярного впитывания воды этими образцами. При этом капиллярное впитывание воды наблюдалось как вдоль слоев текстуры (совпадало с направлением формования кирпича-сырца), так и перпендикулярно им. В том и другом случаях было испытано по восемь образцов, обожженных при тем-

пературе 850 и 1050°C. Методика таких испытаний приведена, например, в работах [10, 11].

Анализ результатов эксперимента. Изменение средних значений прочности испытываемых образцов при сжатии от числа циклов замораживания и оттаивания приведено на рисунке 2. Общее число средних, представленных на этом рисунке, равно $N=21$. Каждое среднее значение \bar{y}_i ($i = 1, 2, \dots, 21$) определено по $n = 5$ независимым измерениям. Сумма квадратов отклонений измеренных значений прочности от средних составляет

$$SSE = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n (y_{ik} - \bar{y}_i)^2 \quad (1)$$

Число степеней свободы для этой суммы равно $v = N(n - 1)$.

Разделив сумму квадратов SSE на число стержней свободы, получим средний квадрат для случайной ошибки

$$s_e^2 = SSE / v \quad (2)$$

Оценка s_e^2 играет очень важную роль в статических исследованиях. Для анализируемых данных получаем:

$$SSE = 1806,60; \quad v = 84 \quad \text{и} \quad s_e^2 = 21,51.$$

Из рисунка 2 видно, что процесс морозной деструкции у образцов, обожженных при температуре 850°C (кривая а), качественно характеризуется иначе, чем у образцов, обожженных при температуре 1050°C (кривая б). При визуальном сравнении кривых а и б на рисунке 2 нетрудно заметить известный эффект повышения морозостойкости керамических образцов с увеличением температуры обжига. Гипотеза о статически значимых различиях средних значений прочности на этих двух кривых при одинаковом числе цикле замораживания и оттаивания подтверждена с помощью предложенной Р.Фишером наименьшей значимой разницы LSD (от англ. least significant difference), определяемой по формуле [12]:

$$LSD = t_{\alpha, v} \sqrt{\frac{2s_e^2}{n}} \quad (3)$$

где $t_{\alpha, v}$ – критическое значение из t -распределения Стьюдента при уровне значимости α и степени свободы v для оценки s_e^2 .



Рис. 2. Зависимость прочности образцов при сжатии от числа циклов замораживания и оттаивания

Принимаем традиционное для инженерных исследований значение $\alpha = 0,05$. Тогда имеем: $t_{0,05;84} = 1,99$ и $LSD = 5,837$. Найденное значение наименьшей значимой разницы LSD оказалось меньше разниц средних значений всех сравниваемых пар прочности образцов, что свидетельствует о статически значимом положительном влиянии повышения температуры обжига на морозостойкость испытываемых образцов.

При рассмотрении кривой а на рисунке 2 (температура обжига равна 850°C) можно заметить, что снижение прочности испытываемых образцов происходит достаточно быстро (лавинообразно). Как уже отмечалось, такая кинетика разрушения кирпичей пластического прессования, прежде всего, связана с большим количеством дефектов слоистой текстуры, превышающим критический уровень. Разрушения в виде трещин расслаивания начали наблюдаться после первых 5–10 циклов замораживания и оттаивания. При этом среднее снижение прочности образцов после 10 циклов составило 31,3%, а после 40 циклов образцы раскрошились и практически полностью утратили прочность. Появление трещин расслаивания можно объяснить низкой температурой обжига (850°C), при которой количество образовавшейся стеклофазы оказалось недостаточно для того, чтобы существенно уменьшить дефектность слоистой структуры кирпича-сырца.

Особенность кинетики морозного разрушения образцов глиняного кирпича, обожженного при температуре 1050°C (см. кривую б на рисунке 2), состоит в том, что сравнительно быстрое снижение прочности образцов наблюдается только до 20 цикла замораживания и оттаивания. Тогда как на отрезке от 20 до 60 цикла средние результаты независимых измерений свидетельствуют о тенденции стабилизации прочности, которая не прогнозировалась на этапе планирования эксперимента.

Имеются основания предположить (см. рисунок 2), что на отрезке стабилизации зависимость прочности образцов от числа циклов замораживания и оттаивания C является линейной. Некоторые отклонения средних значений прочности образцов \bar{y}_i ($i = 1, 2, \dots, 9$) от этой зависимости связаны со случайной природой изучаемого явления. Для проверки выдвинутой гипотезы был выполнен регрессионный анализ.

При проведении регрессионного анализа целесообразно от натуральных значений независимой переменной C (число циклов) перейти к кодированным значениям x . Для $20 \leq C \leq 60$ формула кодирования имеет вид:

$$x = \frac{C - C_0}{l} \quad (4)$$

где $C_0 = (C_{\max} + C_{\min}) / 2 = 40$,

$l = (C_{\max} - C_{\min}) / 2 = (60 - 20) / 2 = 20$. Тогда имеем

$x = \frac{C - 40}{20}$. Значения кодированного фактора приведены в по-

следней строке таблицы 1, а в предыдущих строках записаны соответствующие им значения числа циклов C и средние значения прочности \bar{y}_i (по пяти независимым измерениям $n = 5$).

Таблица 1

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\bar{y}_i, \text{МПа}$	16,37	15,3	13,8	19,58	15,8	16,93	16,33	17,72	13,71
C_i	20	25	30	35	40	45	50	55	60
x_i	-1,0	-0,75	-0,5	-0,25	0	0,25	0,5	0,75	1,0

С помощью данных таблицы 1 необходимо было оценить параметры модели линейной регрессии

$$\bar{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, 9), \quad (5)$$

где ε_i являются случайными отклонениями средних значений \bar{y}_i от математического ожидания $E = (Y / x = x_i)$, в которых отражается совместное влияние всех неучтенных факторов. Дисперсию этой случайной величины $D^2(\varepsilon)$ можно оценить с помощью статистики s_e^2 / n (дисперсия среднего), где s_e^2 определяется по формуле (2). Для анализируемых девяти средних ($N = 9$), определенных по пяти ($n = 5$) повторным независимым измерениям, имеем: $s_e^2 = SSE / N(n - 1) = 569,32 / 9(5 - 1) = 15,81$.

Таблица 2. Средняя плотность ρ , средняя активная Φ_a и открытая Φ_N пористости, коэффициент сорбции воды A и сопротивления впитыванию воды M , а также их стандартные отклонения S_A и S_M для четырех случайных выборок, состоящих из четырех образцов глиняного кирпича пластического формования

Выборка	Температура обжига, °С	ρ , кг/м ³	Φ_a	Φ_N	A , кг/м ² с ^{0,5}	$S_A \cdot 10^3$, кг/м ² с ^{0,5}	$M \cdot 10^{-4}$, с/м ²	$S_M \cdot 10^{-4}$, с/м ²
Капиллярное всасывание воды перпендикулярно направлению формования								
1	850	1795	0,268	0,295	0,076	7,83	1259,5	227,0
2	1050	1844	0,254	0,275	0,079	2,45	1111,1	182,7
Капиллярное всасывание воды в направлении формования								
3	850	1789	0,295	0,305	0,232	45,74	202,4	52,6
4	1050	1840	0,271	0,288	0,165	15,53	261,6	54,3

После реализации процедуры метода наименьших квадратов получены следующие оценки коэффициентов регрессии:

$$b_0 = 16,171 \text{ и } b_1 = -0,065.$$

В отличие от коэффициента b_0 , статистическая значимость b_1 , отражающего тенденцию снижения прочности, вызывала сомнения. Можно записать нулевую гипотезу $H_0: \beta_1 = 0$ и проверить её с помощью статистики

$$t = |b_1| / s_{b_1}, \quad (6)$$

которая при справедливости гипотезы H_0 имеет t -распределение Стьюдента со степенями свободы $\nu = N(n-1) = 9(5-1) = 36$. Здесь s_{b_1} есть стандартной ошибкой оценки параметра β_1 , которую можно определить по формуле:

$$s_{b_1} = \sqrt{\frac{s_e^2}{n} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^N x_i^2}} = \sqrt{\frac{15,81}{5} \cdot \frac{1}{3,75}} = 0,918.$$

Тогда получим $t = 0,065 / 0,918 = 0,071$. При выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $\nu = 36$ из таблицы t -распределения Стьюдента находим критическое значение $t_{\alpha, \nu} = t_{0,05; 36} = 2,03$, которое значительно превышает вычисленное $t = 0,071$. Поэтому нет оснований отклонять гипотезу $H_0: \beta_1 = 0$. Следовательно, значение коэффициента $b_1 = -0,065$ не отличается существенно от нуля. После исключения коэффициента b_1 уравнение регрессии получает вид:

$$\hat{y} = b_0 = 16,17. \quad (7)$$

Это означает, что на отрезке от 20 до 60 циклов замораживания и оттаивания средние значения прочности образцов не зависят от числа циклов.

Для определения степени соответствия зависимости (7) экспериментальным данным можно воспользоваться статистикой

$$F = \frac{S_R^2 \cdot n}{S_e^2}, \quad (8)$$

где $S_R^2 = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 / (N-1) = 3,405$ является средним квадратом для ошибки модели (7). Статистика (8) имеет F -распределение Фишера-Снедекора с числом степеней свободы для числителя $\nu_1 = N-1 = 8$ и знаменателя $\nu_2 = N(n-1) = 36$. При выбранном нами уровне значимости $\alpha = 0,05$, вычисленная по формуле (8) статистика $F = 3,405 \cdot 5 / 15,81 = 1,077$ не превышает критического значения $F_{0,05; 8; 36} = 2,22$. Следовательно, зависимость (7), показывающая отсутствие влияния числа циклов на прочность, достаточно точно соответствует опытными данным.

Для образцов, обожжённых при температуре 1050°С, эффект снижения прочности на первом этапе морозных циклических воздействий ($C < 20$) и эффект её стабилизации на другом этапе циклических воздействий ($20 \leq C \leq 60$), по нашему мнению прежде всего можно объяснить сохранившейся слоистой текстурой. На границе между слоями сконцентрировано основное количество микротрещин, в которые в первую очередь проникает вода. В месте наибольшей концентрации микротрещин при морозном воздействии возникает разрушающая трещина, которая быстро развивается и примерно к двадцатому циклу становится видимой на поверхности большинства испытываемых образцов. Как правило, разрушающая трещина является сквозной и делит образец на две слабо связанные части.

Развитие разрушающей трещины сопровождается быстрым снижением прочности образцов. После 10 циклов прочность испытываемых образцов снизилась в среднем на 24,8%. Реализованная процедура сравнения двух средних показала, что при $\alpha = 0,05$ такое снижение прочности следует признать статически значимым. При этом видимых повреждений на поверхности испытываемых образцов не наблюдалось.

После завершения процесса образования разрушающей трещины ($C \approx 20$), разделившей образец на две части, последующие циклические воздействия ($20 \leq C \leq 60$), как показал статический анализ, не приводят к снижению прочности керамического материала. Это означает, что в керамическом материале двух частей образца имеет место инкубационный период накопления повреждений. Как только накопленные повреждения достигнут критического уровня (это произойдёт при $C > 60$), начнут образовываться новые разрушающие трещины, что приведёт к лавинообразному снижению прочности образца и его распаду на более мелкие части.

Таким образом, слоистая текстура глиняного кирпича пластического прессования при различных температурах обжига является основной причиной его быстрого разрушения при циклическом замораживании и оттаивании. Как уже отмечалось, наличие слоистой текстуры у кирпичей пластического формования можно подтвердить с помощью изучения кинетики одномерного капиллярного впитывания воды вдоль и перпендикулярно слоям текстуры. Для этого по результатам четырёх случайных четырёхэлементных выборок были определены средние значения плотности; объёма пор в единице объёма материала, заполненного водой при испытаниях на водопоглощение Φ_N (открытая пористость) и в результате одномерного капиллярного всасывания Φ_a (активная пористость); коэффициента сорбции воды A и коэффициента сопротивления капиллярному впитыванию воды M . Кроме того, для коэффициентов A и M были определены оценки их стандартных отклонений S_A и S_M . Значения указанных показателей испытанных образцов приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что у рассмотренных образцов средние показатели капиллярного впитывания воды A и M наиболее существенно зависят от направления, в котором происходил этот процесс. В направлении, перпендикулярном слоям текстуры, образцы характеризуются наименьшей скоростью капиллярного впитывания воды (коэффициент A) и наибольшим сопротивлением этому впи-

тиванию (коэффициент M) по сравнению с образцами, для которых процесс капиллярного впитывания наблюдался вдоль слоёв текстуры (в направлении формования). Такая ситуация типична для изделий с выраженной слоистой текстурой.

В меньшей степени и неоднозначно на показатели капиллярного впитывания воды влияет повышение температуры обжига с 850°C до 1050°C . В направлении, перпендикулярном слоям текстуры, образцы, обожжённые при различных температурах (850°C и 1050°C), имеют практически одинаковые показатели капиллярного впитывания воды A и M , так как при уровне значимости $\alpha = 0,05$ разница между средними значениями этих коэффициентов, как при температуре 850°C , так и при 1050°C , не превышает критической величины (LSD) и, следовательно, статически незначима. Так, при сравнении значений двух коэффициентов A имеем: $(0,079-0,076) = 0,003 < \text{LSD}_A = 0,009$, аналогичное соотношение имеем при сравнении коэффициентов M $(1259,5 - 1111,1) \cdot 10^4 = 148,4 \cdot 10^4 < \text{LSD}_M = 354,4 \cdot 10^4$.

При изучении процесса капиллярного впитывания воды вдоль слоёв текстуры образцов (в направлении формования) эффект повышения значения коэффициента M с повышением температуры обжига является статически незначимым, так как $(261,6 - 202,4) \cdot 10^4 = 59,2 \cdot 10^4 < \text{LSD}_M = 92,5 \cdot 10^4$. Однако при том же повышении температуры обжига ожидаемый эффект снижения значения коэффициента A подтверждается статически: $(0,232 - 0,165) = 0,067 > \text{LSD}_A = 0,053$. Такую значимую разницу можно объяснить тем, что при температуре обжига 1050°C образуется большее, чем при температуре 850°C , количество стеклофазы и слоистая текстура керамического материала размывается сильнее. Тем не менее, слоистая текстура образцов сохраняется и при температуре обжига 1050°C , что подтверждается статически значимой разницей значений коэффициентов A и M в двух рассмотренных взаимноперпендикулярных направлениях. Для коэффициента A наблюдаемая разница $(0,165-0,074) = 0,086$ превышает критическое значение $\text{LSD}_A = 0,016$. Аналогичная ситуация для коэффициента M $(1111,1 - 261,6) \cdot 10^4 = 849,5 \cdot 10^4 > \text{LSD}_M = 205,0 \cdot 10^4$.

Однозначно подтверждается хорошо известная зависимость плотности и пористости керамического материала от температуры обжига. Не вызывает сомнений тесная взаимосвязь между открытой Φ_N и активной пористостью Φ_A . При этом открытая пористость превышает активную в среднем лишь на 6 % (малый объём резервных пор). Как известно, недостаточный объём резервных пор может снижать морозостойкость стеновой керамики.

Кроме того, нами был выполнен сравнительный эксперимент на 15 образцах в виде куба со стороной 5 см, приготовленных в лабораторных условиях из пластичной массы, имеющей одинаковый с промышленной массой состав. Эти образцы (как и промышленные) нагревались в электрической цепи со скоростью $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до максимальной температуры обжига 1050°C и после двухчасовой выдержки охлаждались вместе с печью.

Циклические морозные испытания показали, что кинетика разрушения лабораторных образцов существенно отличается от таковой для промышленных образцов. После 35 циклов замораживания и оттаивания на поверхности лабораторных образцов не наблюдалось каких-либо повреждений, а их прочность на сжатие уменьшилась в среднем лишь на 11 %. Это объясняется тем, что из-за отсутствия выраженной слоистой текстуры уровень начальных повреждений лабораторных образцов был значительно меньше, чем промышленных. В таком случае деструкция лабораторных образцов характеризуется довольно длительным этапом скрытого накопления повреждений до критического уровня, после достижения которого структура материала разрыхляется и наступает этап быстрой утраты прочности.

При сравнении капиллярных свойств лабораторных и промышленных образцов, обожжённых при одинаковой температуре 1050°C , также установлены существенные различия. Первые имеют практически одинаковые показатели капиллярных свойств в двух взаимноперпендикулярных направлениях и значительно более низкую открытую Φ_N и активную Φ_A пористости (в среднем на 29%). У

промышленных образцов коэффициент A , характеризующий начальную скорость капиллярного впитывания воды, на 16% (в направлении перпендикулярном слоям текстуры) и на 142% (в направлении формования) превышает среднее значение коэффициента A лабораторных образцов. Всё это дополнительно объясняет более высокую морозостойкость лабораторных образцов по сравнению с промышленными.

Выполненный сравнительный эксперимент показал, что морозостойкость глиняного кирпича, производимого на предприятии «Левково», можно повысить за счёт улучшения механической переработки сырьевой смеси и условий формования изделий. Эффективность таких мероприятий подтверждается, например, результатами работы [13], выполненной на действующей технологической линии Брестского комбината строительных материалов. Результаты этой работы свидетельствуют о том, что в рассмотренном факторном пространстве путём оптимизации условий переработки и формования сырьевой смеси морозостойкость глиняного кирпича, обжигаемого при температуре 980°C и 1020°C , можно повысить на 61 % относительно среднего значения, определённого по данным выполненного эксперимента.

Заключение. Наиболее правильное представление о кинетике разрушения керамического материала при циклическом замораживании и оттаивании можно получить путём отслеживания снижения прочности испытываемых изделий. Основной причиной низкой морозостойкости глиняного кирпича пластического формования на предприятиях строительной керамики является дефектная слоистая текстура кирпича-сырца, которая проявляется даже после высокотемпературного обжига. Для оценки наличия слоистой текстуры у обожжённых изделий можно использовать показатели капиллярного впитывания воды в направлении перпендикулярным слоям текстуры и параллельно этим слоям. Лавинообразный характер снижения прочности испытываемых образцов после первых же циклов замораживания и оттаивания свидетельствует о том, что начальный уровень повреждений структуры материала превышает критический. У образцов, обожжённых при низкой температуре (850°C), такой уровень начальных повреждений приводит к быстрому образованию нескольких разрушающих трещин и полной утрате прочности, а у образцов, обожжённых при высокой температуре (1050°C), к возникновению одной трещины, наличие которой при последующих циклических воздействиях (после 20 циклов) не приводит к утрате прочности материала. Снижение уровня начальных повреждений материала за счёт улучшения механической переработки сырьевой смеси и условий формования изделий позволит повысить морозостойкость глиняного кирпича на предприятиях строительной керамики.

В соответствии с принятыми в норме *PN-B-12012* критериями оценки морозостойкости изделий стеновой керамики может оказаться, что число поверхностных повреждений изделий не превышает допустимой величины, но при этом снижение прочности может превысить принятое допустимое значение. И наоборот, число поверхностных повреждений выше допустимого, однако существенного снижения прочности может не произойти. В связи с этим необходимо и далее уточнять критерии оценки морозостойкости изделий стеновой керамики.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Metody badan elementow myrowych – Okreslanie odpornosci na zamrazanie-odmrazanie elementow myrowych ceramicznych: PN-B-12012:2007.
2. Methods of test for masonry units – Part 22: Determination of freeze/thaw resistance of clay masonry units: PKN-CEN/TS 772-22:2007.
3. Kicaite Asta, Maciulaitis Jurqita, Kudabiene Gema: Structure and destruction processes of building ceramic products. Modern Building Materials, Structures and Techniques, Papers of the 9th Internanional Conference, May 16-18, 2007 Vilnius, Lithuania.
4. Boltryk, M. Influence of some technological upon wall ceramics frost resistant / M. Boltryk, V. Nikitin, B. Backiel-Brzozowska // J. Civ. Eng. Manag. – 2004. – V.10. – N 4. – S. 249–253.

5. Зеликин, С.И. Исследование кинетики разрушения материалов рентгенографическим методом / С.И. Зеликин, В.Н. Землянский, Р.П. Цивилев // Стекло и керамика. – 1979. – № 6. – С. 23–24.
6. Будников, П.П. Химия и технология строительных материалов и керамики. – М.: Стройиздат, 1965. – 608 с.
7. Boltryk, M. Optimalizacja ilosci i skladu granulometrycznego piasku oraz temperatury wypalu ceramiki sciennej pod katem wytrzymałości na sciskanie / M. Boltryk, V. Nikitin, B. Backiel-Brzozowska // Pol. Biul. Ceram. Ceram – Vol. 80. – 2003. – P. 587–592.
8. Zygadlo, M. Prognozowanie mrozoodpornosci ceramicznych materialow budowlanych na podstawie ich wlasciwosci kapilarnych / M. Zygadlo, Z. Piasta // Inzynieria i Budownictwo. – 1989. – № 2. – S. 56–57.
9. Nikitin, V. Prognozowanie mrozoodpornosci tworzyw ceramicznych na podstawie wskaznikow kapilarnego podciagania wody / V. Nikitin, B. Backiel-Brzozowska // Pol. Biul. Ceram. Ceram – Vol. 103/2. – 2008. – S. 1023–1030.
10. Janz, M. Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels, Report TVBM-3076. Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, University of Lund (in Swedish), 1997. – 73 p.
11. Nikitin, V. Wplyw parametrow procesu wypalania na wskazniki podciagania kapilarnego wody w tworzywach ceramicznych / V. Nikitin, B. Backiel-Brzozowska, M. Boltryk // Pol. Biul. Ceram. Ceram. – 2005. – V. 91. – S. 1223–1230.
12. Jozwiak, J. Statystyka od podstaw / J. Jozwiak, J. Podgorski. – Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2001. – 549 s.
13. Роговой, М.И. Влияние технологических факторов на морозостойкость стеновой керамики / М.И. Роговой, О.И. Никитина // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1982. – № 9. – С. 76–79.

Материал поступил в редакцию 24.01.11

NIKITIN V.I., BACKIEL-BRZOZOWSKA BEATA Kinetics of destruction caused by cyclic freezing and thawing of specimens from ceramic bricks

Properties of the process of the compressive strength loss caused by cyclic freezing and thawing of specimens from ceramic bricks were explained based on experimental date. The ceramic bricks were formed from plastic clay in factory conditions, dried in laboratory condition and burned at the temperature of 850 and 1050°C. After 20 cycles of freezing and thawing specimens burned at 850°C were practically destroyed, while those burned at 1050°C preserved their compressive strength even up the 60th cyclic. The capillary properties of specimens were also evaluated. Based on that the difference between frost resistance of ceramic brick specimens from both series was explained.

УДК 624.15:725.4+539.3.01

Пойта П.С., Шведовский П.В., Невейков А.Н.

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ПЛОТНОСТИ ГРУНТОВ НА ХАРАКТЕР ИХ УПЛОТНЕНИЯ ПРИ УСТРОЙСТВЕ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ ИЗ БЕТОНОВ НА НАПРЯГАЮЩИХ ЦЕМЕНТАХ

Введение. В буронабивных сваях, устраиваемых из бетонов на напрягающих цементах, за счет развития объемных деформаций, создается давление на грунт как минимум на порядок выше, чем из обычного тяжелого бетона. При этом несущая способность таких свайных фундаментов, с точки зрения энерго- и ресурсосбережения, определяется оптимизацией состава бетона, длиной и месторасположением зоны укладки напрягающего бетона и диаметра сваи [1, 2].

Однако ранее приведенные нами исследования [2, 3] и полунатурные испытания свай в лабораторных пространственных лотках показывают, что как по глубине, так и в радиальном направлении характерна значительная неравномерность уплотнения грунтового массива вокруг буронабивной сваи. В песчаных грунтах уплотнение по глубине (ρ) колеблется в пределах от 1,65 до 1,98 г/см³ у стенок скважины и до 1,85 г/см³ в зоне трёх радиусов от стенок скважины, а глинистых – соответственно с 1,9 до 2,2 г/см³ и 1,9 до 2,1 г/см³.

Такие различия в формировании зон уплотнения указывают на специфику процессов, которая может быть связана с множеством факторов, основными из которых являются инженерно-геологические условия (структура грунта, его физические характеристики) способ устройства скважины (пневматическое, механическое и инъекционное расширение) и степень обжатия.

Как известно, формирование структуры и плотности грунтов в основном определяется степенью сохранения постоянного объема и степенью контакта между структурными элементами (частицами). Отсюда, только посредством анализа особенностей процесса уплотнения можно выявить оптимальные значения исходной плотности грунтов стройплощадки, обеспечивающие желаемые деформационно-

но-прочностные свойства [4].

Следует отметить, что как грунты, так и грунтовые массивы являются классическими образцами стохастических природных фрактальных объектов пористой структуры, для которых характерна одна принципиальная особенность – с ростом размеров их плотность убывает по степенному закону [5].

Методика исследований. Процесс уплотнения целесообразно разделить на три стадии с различными механизмами консолидации.

Для первой стадии процесса уплотнения характерна роль упругой разгрузки и нагрузки дисперсной системы. При этом нагрузка одних контактов сопровождается местной разгрузкой других, способствующей потере контакта между частицами, т.е. вероятность сохранения контактов меньше вероятности их образования.

Количественно это выражается следующим условием

$$\alpha = \theta^2 (\Delta\theta / \rho_0)^e, \quad (1)$$

где α – контактное сечение и $\alpha = E / E_k$; E – модуль упругости грунта, отнесенный к номинальной площади поперечного сечения; E_k – модуль упругости, отнесенный к критическому сечению α ; $\Delta\theta = \theta - \theta_0$; θ – относительная конечная плотность; θ_0 – относительная начальная плотность; $\rho_0 = 1 - \theta_0$; e – показатель степени потерь контактов и $e > 1$.

Для второй стадии уплотнения характерна незначительная роль местной упругой разгрузки, перераспределение нагрузки реже нару-

Пойта Петр Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций, ректор Брестского государственного технического университета.

Шведовский Петр Владимирович, кандидат технических наук, зав. кафедрой геотехники и транспортных коммуникаций Брестского государственного технического университета.

Невейков Александр Николаевич, аспирант кафедры геотехники и транспортных коммуникаций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура