Строительные конструкции, здания и сооружения

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-8>
УДК 624.07

А.В. Покатилов, К.В. Ардеев

ПОКАТИЛОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., директор Строительного института,
pav.tsp@kuzstu.ru

АРДЕЕВ КОНСТАНТИН ВАЛЕРЬЕВИЧ – к.т.н., доцент
(автор, ответственный за переписку), ardeev.k@gmail.com

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
Кемерово, Россия

Определение прочности нормального сцепления кирпичной кладки методом раскалывания

Аннотация: Представлена разработанная и опробованная методика определения прочности сцепления в каменной кладке по неперевязанным швам посредством испытания отобранных из конструкции кернов методом раскалывания. Идея работы состоит в применении известного метода определения прочности на растяжение посредством раскалывания цилиндрического образца для оценки прочности сцепления в кирпичной кладке по неперевязанному шву. Выполнено сопоставление результатов испытаний кернов кирпичной кладки здания с данными, полученными с помощью прибора ОНИКС-1.СК. Получено совпадение по прочности сцепления с обеспеченностью 95%.

Ключевые слова: здание, кирпичная кладка, нормальное сопротивление, испытание кернов, сцепление, неперевязанный шов, испытательная машина

Введение

С изменением метода сейсмического районирования (переход от детерминированной карты к комплекту вероятностных карт ОСР-97/ОСР-2015) значительно увеличилась площадь сейсмоопасной территории. Одним из требований для конструктивного обеспечения сейсмостойкости каменных и армокаменных конструкций согласно СП 14.13330 является обеспечение требуемого нормального сцепления (временного сопротивления осевому растяжению по неперевязанным швам кладки), полученного по результатам испытаний. Ослабленное сцепление раствора с камнем, нарушение на отдельных участках монолитности кладки, отступления от требований нормативных документов и проекта при возведении зданий и сооружений, изменение сейсмичности отдельных районов может привести при землетрясениях к образованию дефектов либо к разрушению всего здания.

В связи с этим важно совершенствовать методы оценки сейсмостойкости каменных конструкций и повышать надежность результатов испытаний. Метод испытаний по ГОСТ 24992 и по евростандартам вызывает значительные сложности при обследовании зданий и сооружений после завершения строительства, так как чаще всего отсутствует доступ к верхнему ряду кладки для размещения испытательного оборудования. Цель настоящей статьи – обоснование применения метода раскалывания для определения прочности нормального сцепления каменной кладки.

Для этого нам необходимо решить следующие задачи.

1. Провести испытание образцов каменной кладки цилиндрической формы методом раскалывания.

2. Провести испытания каменной кладки прямым способом.
3. Выполнить сопоставление результатов испытаний, оценить их соответствие друг другу.

Анализ существующих методов оценки нормального сцепления каменной кладки

Исследованию работы каменной кладки посвящено достаточно большое количество трудов [1, 2, 4–8]. В зависимости от нормального сцепления R_t^u согласно СП 14.13330 кладка делится на две категории: I – $R_t^u \geq 180$ кПа; II – $120 \leq R_t^u < 180$ кПа. Если требуемое нормальное сцепление не обеспечивается, то применение кирпичной или каменной кладки не допускается. Категория влияет на ряд конструктивных требований по обеспечению сейсмостойкости зданий, от этого зависят допускаемая высота стен, количество этажей, минимальные размеры простенков.

В большинстве случаев трещина при растяжении кладки по неперевязанным сечениям проходит следующим образом:

- по плоскости соприкосновения камня и раствора в горизонтальных швах – в случае, когда предел прочности определяется нормальным (т.е. перпендикулярным плоскости шва) сцеплением между раствором и камнем;
- по раствору – в случае, когда предел прочности раствора при растяжении оказывается меньше сцепления.

Основными показателями, которые влияют на сопротивление раствора в швах каменной кладки растяжению и сцеплению между камнем и раствором, являются клеящая способность и состояние поверхности камня. Данные показатели определяются многими факторами, среди которых можно выделить [6]:

- способность кладочного раствора удерживать влагу, его предел прочности, подвижность и состав;
- влажность и температура твердения раствора;
- внешний вид камня или кирпича, его склонность к насыщению водой, состояние поверхности, соприкасающейся с раствором;
- возраст раствора, использовавшегося при устройстве кладки и в момент испытания и др.

Хотя клеящая способность растворов очень часто имеет высокую величину, из-за большой усадки цементного раствора возникают значительные усадочные напряжения в кладке, которые отрывают раствор от камня на отдельных участках их соприкосновения.

Снизить усадочные деформации и увеличить водоудерживающую способность кладки можно, используя смешанный раствор с содержанием извести или глины. Дополнительно уменьшить усадочные деформации раствора можно за счет увеличения количества песка. Однако увеличение содержания песка, извести и глины приводит к снижению клеящей способности раствора. Следовательно, чтобы достигнуть высоких значений сцепления кирпичной кладки необходимо оптимально подбирать содержание в растворе цемента, пластификатора и песка.

Большое значение для прочности сцепления имеют подвижность раствора и способность камня всасывать воду. Так, установлено, что разрыв по раствору происходит, как правило, в образцах кладки с наиболее высокими значениями прочности при разрыве, полученными в основном, когда предельное увлажнение кирпича составляло около 50%, т.е. 7–9% водонасыщения. Увлажнение кирпича с низкой водопоглощаемостью, равно как и применение чисто известковых растворов, нецелесообразно, так как оно снижает сцепление [1, 7].

Нами получена для сухого кирпича существенно большая величина сцепления при большем водоцементном отношении, но наилучший результат во всех случаях в образцах с кирпичами средней влажности (рис. 1).

Рис. 1. График нормального сцепления раствора с кирпичом в кладке R_t^u при кирпиче различного водонасыщения для трёх значений водоцементного отношения раствора.

Большого сцепления в кладке можно достигнуть ее вибрированием при изготовлении. В этом случае сцепление в кирпичной кладке может быть доведено до 0,8–1,0 МПа, в то время как максимальное сцепление, предусматриваемое в нормах проектирования, равно 0,18 МПа.

Нормальное сцепление R_t^u согласно СП 14.13330 зависит исключительно от предела прочности раствора при сжатии $R_{н2}$ и, как показано на рис. 2, повышение сцепления R_t^u с возрастанием прочности раствора при $R_{н2} > 5,0$ МПа не учитывается. Такой вариант оценки прочности сцепления R_t^u вызван трудностью учета влияния на него всех перечисленных факторов (каждый из которых может существенно изменить величину R_t^u) и как следствие – невозможностью достоверно прогнозировать данную величину [2, 5, 6].

Рис. 2. Зависимость прочности нормального сцепления R_t^u от прочности раствора $R_{н2}$.

В ГОСТ 24992-2014 «Конструкции каменные. Метод определения прочности сцепления в каменной кладке» сказано, что определение прочности сцепления в кладке должно выполняться путем испытания на осевое растяжение элементов кладки стен с незаполненными боковыми швами. Там же приведен метод оценки прочности сцепления раствора в кладке стен с камнем или кирпичом на объектах, на которых выполняется строительство, или на специальных образцах кладки в лабораториях.

Предел прочности сцепления при осевом растяжении P_t^n определяют по формуле

$$P_t^n = F/A, \quad (1)$$

где P_t^n – предел прочности сцепления при осевом растяжении элемента кладки в возрасте t суток, кПа; F – величина отрывающей нагрузки на образец, кН; A – общая площадь отрыва, м².

В Еврокоде EN 1996-1-1-2008 указано, что нахождение начальной прочности на сдвиг (адгезионной прочности при сдвиге) каменной кладки устанавливается стандартом EN 1052-3, а нахождение прочности каменной кладки на растяжение при изгибе – стандартом EN 1052-5 методом изгибающего момента.

Для каждого действительного разрушения вычисляют прочность сцепления, используя следующую формулу:

$$f_{wi} = \frac{F_1 e_1 + F_2 e_2 - \frac{2}{3} d \left(F_1 + F_2 + \frac{W}{4} \right)}{Z}, \quad (2)$$

где $Z = \frac{bd^2}{6}$, здесь b – средняя ширина испытываемого горизонтального шва в мм; d – средняя длина образца в мм; e_1 – расстояние от применяемой нагрузки до растянутой грани образца в мм; e_2 – расстояние от центра тяжести рычага и верхнего зажима до растянутой грани образца в мм; F_1 – применяемая нагрузка в Н; F_2 – нагрузка изгибающего момента в Н; W – нагрузка элемента каменной кладки, извлеченного из испытываемого образца, и прилипшего строительного раствора.

В любом описанном методе существенным недостатком в случаях обследования зданий является необходимость доступа к верхнему ряду кладки с незаполненными вертикальными швами.

Определение нормальных сопротивлений каменной кладки методом раскалывания

Метод раскалывания для определения прочности на растяжение достаточно хорошо известен [4]. Если нагрузка действует по образующей, то элементы вертикального диаметра цилиндра подвергаются вертикальному сжатию:

$$\sigma_c = \frac{2P}{\pi LD} \left[\frac{D^2}{r(D-r)} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где P – раскалывающая нагрузка, L – длина образца, D – диаметр образца, r – координата, и горизонтальному растяжению:

$$\sigma_p = \frac{2P}{\pi LD}, \quad (4)$$

где P – раскалывающая нагрузка, L – длина образца, D – диаметр образца.

В соответствии с ГОСТ 10180-2012 на плиту испытательной машины образец устанавливают по схеме рис. 3.

Рис. 3. Схема устройств для испытаний на растяжение методом раскалывания: 1 – испытываемый образец; 2 – нагружающее устройство – плита, при испытании цилиндра; 3 – нагружающее устройство – колющий стержень, при испытании куба или призмы; 4 – шаровой шарнир; 6 – нижняя опорная плита пресса (испытательной машины).

Прочность бетона при раскалывании определяется по формуле

$$R_{tt} = \gamma \frac{2F}{\pi A} K_W, \quad (5)$$

где γ – масштабный коэффициент, учитывающий размер и форму испытываемых образцов, A – площадь рабочего сечения образца, F – разрушающая нагрузка, K_W – коэффициент, вводимый для ячеистого бетона, учитывающий влажность образцов на момент испытания.

Данный метод также реализован в европейских стандартах, например в EN 12390-6:2009 *Testing hardened concrete*, применяемом при испытании бетонного камня.

Испытания производятся на цилиндрических и призматических образцах. Он широко применяется для определения прочности на растяжение каменных материалов, образцов горной породы, укрепленных грунтов, цементобетона покрытий и оснований автодорог и т.д. Испытание на раскалывание достаточно просто производится и даёт более воспроизводимые результаты, чем другие испытания на растяжение [3].

Методика испытаний каменной кладки

Для проведения испытаний произведен отбор образцов из несущих стен и перегородок здания, расположенного в г. Кемерово, ул. У. Громовой, 6А. Здание кирпичное, двухэтажное, 1960 г. постройки. Кладка выполнена из полнотелого керамического кирпича нормального формата. Швы заполнены цементно-песчаным раствором (10 мм).

Для проведения испытаний произведен отбор образцов из внутренних несущих стен здания. Место отбора выбиралось по внешним признакам, чтобы не было дефектов и участков стен, подвергшихся сильным атмосферным воздействиям.

Работы по отбору 6 образцов выполнялись при помощи установки алмазного бурения с водяным охлаждением *Husqvarna DMS 230*. Особое внимание уделялось расположению горизонтального шва посередине образца кладки. Одновременно с отбором проб проводились контрольные испытания образцов кирпичной кладки и определялись марка раствора и кирпича неразрушающим методом при помощи прибора «ОНИКС 2.5».

Испытание образцов кирпичной кладки осуществлялось при помощи универсальной разрывной машины Р-0,5, работающей в режиме сжатия, оснащенной рычажно-маятниковым силоизмерителем со сменными грузами и демпфированием в момент разрыва (рис. 4).

Рис. 4. Схема испытания образца.

Образцы нагружались с постоянной скоростью 10–20 мм/мин. Увеличение нагрузки составляло $0,005 \pm 0,01$ МПа/с в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Фиксировались скорость движения платформы, деформации и разрушающая нагрузка.

Анализ полученных результатов

Разрушение испытанных образцов происходило по поверхности контакта раствора и кирпича. Результат испытания представлен на рис. 5.

Рис. 5. Разрушение по поверхности контакта раствора и кирпича при методе раскалывания.

Значение прочности на растяжение определялось по зависимости (5) (табл. 1).

Таблица 1

Результаты лабораторных испытаний прочности сцепления методом раскалывания

Отсчёт	Разрушающая нагрузка P , кН	Нормальное сцепление R_{28t}^u , кПа	Время нагружения t , с	Скорость нагружения U , кН/с	Нормальное сцепление R_{28}^u , кПа
1	538	211	65	8	189
2	422	165	59	7	
3	522	205	77	7	
4	486	190	82	5	
5	444	174	55	9	
6	480	188	70	7	

Для сопоставления результатов измерений, полученных методом раскалывания, с прямым методом определения нормального сцепления согласно ГОСТ, проведены серии контрольных испытаний кирпичной кладки при помощи прибора ОНИКС-1.СК, используемого для определения величины сцепления искусственных и природных камней в фрагментах кладки методом нормального отрыва.

Принцип работы прибора заключается в том, что он на первом этапе измеряет усилие отрыва кирпича из кладки посредством траверсы захвата, а затем вычисляет прочность сцепления, соответствующую этому усилию. При нагружении устройства происходит увеличение усилия до максимального значения, и после отрыва кирпича оно падает до нуля. Прибор автоматически преобразовывает усилие отрыва F в предел прочности сцепления R_t , МПа, по формуле

$$R_t^u = F/A, \quad (6)$$

где R_t^u – предел прочности сцепления раствора с элементом кладки в возрасте t , сут.; F – величина отрывающей нагрузки, приложенной к образцу, Н; A – общая площадь отрыва, мм².

Подготовка образцов к испытаниям производилась в соответствии с требованиями норм. Образцы освобождались от заполнения вертикальных швов при помощи болгарки на величину, достаточную для установки захватной траверсы прибора. После расчистки вертикальных швов прибор ОНИКС-1.СК устанавливался в рабочее положение, захватывался образец и производился его отрыв от кладки с постоянной скоростью 0,1–0,18 кН/с. Возраст кладки 28 сут, размер кирпича задан в соответствии с испытываемыми образцами – 25×12 см.

В результате испытания фиксировалось усилие отрыва и автоматически вычислялась прочность на отрыв по неперевязанному шву (табл. 2).

Таблица 2

Данные контрольных испытаний кирпичной кладки по неперевязанному шву

Отсчёт	Разрушающая нагрузка P , кН	Нормальное сцепление R_{28i}^u , кПа	Температура воздуха T , °C	Скорость нагружения U , кН/с	Нормальное сцепление R_{28}^u , кПа
1	5.9	199	10	12	196
2	6.3	212	10	11	
3	5.6	190	11	12	
4	5.4	182	11	12	
5	5.7	193	11	10	
6	5.9	199	11	13	

Для калибровки проведено сравнение результатов лабораторных измерений прочности сцепления с контрольными испытаниями кладки. Получен уровень доверительной вероятности измерений 95%.

Случайная погрешность рассчитывалась из допущения нормального распределения исследуемых величин путем оценки среднеквадратичного отклонения отсчетов

$$S_{Ri} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{28i}^u - R_{28}^u)^2}{n-1}}, \quad (7)$$

где R_{28i}^u и R_{28}^u – результаты измерения прочности сцепления при контрольных испытаниях; n – количество испытанных образцов.

Коэффициент Стьюдента определялся для уровня вероятности 0,95 и количества степеней свободы $n-1$, где n – количество испытаний, равное 6.

Случайная погрешность:

$$\Delta_{cl} = \pm \frac{S_{Ri} t_{0.95}}{\sqrt{n}}, \quad (8)$$

где $t_{0.95}$ – коэффициент Стьюдента.

Суммарная погрешность:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{cl}^2 + \Delta_{ин}^2}, \quad (9)$$

где $\Delta_{ин}$ – инструментальная погрешность.

Относительная погрешность:

$$\delta = \Delta / R_{28}^u \cdot 100\% = 5,6 \%. \quad (10)$$

Результаты расчёта погрешностей измерений предложенным и базовым методом представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты относительной погрешности измерений методом раскалывания и прибором ОНИКС-1.СК

Метод раскалывания	S_{Ri} , кПа	$t_{0.95}$	Δ_{cl} , кПа	$\Delta_{ин}$, кПа	Δ , кПа	δ , %
	17,3	2,57	18,1	1,8	18,0	10,2
ОНИКС-1.СК	10,1	2,57	10,6	1,3	11,0	5,6

Доверительный интервал при уровне надежности – 95%, контрольных измерений – от 185 до 207 кПа. Доверительный интервал экспериментальных измерений – от 171 до 207 кПа. Интервалы перекрываются, результаты измерений близки друг другу (рис. 6).

Рис. 6. Графики функций плотности вероятности распределения результатов контрольных и экспериментальных измерений.

Закключение

Итак, мы провели сопоставление данных, полученных в лабораторных испытаниях, с контрольными испытаниями по ГОСТ 24992, с обеспеченностью 95%. Полученные результаты не противоречат друг другу, что говорит об адекватности предложенного метода раскалывания для определения прочности сцепления каменной кладки из полнотелого керамического кирпича.

Практическая значимость предложенной методики определения прочности сцепления заключается в возможности её применения для любого участка каменной кладки, тогда как действующие методики ориентированы на испытание образцов материалов, изготовленных в лабораторных условиях либо свободного верхнего ряда каменной кладки, доступ к которому часто ограничен или невозможен.

Дальнейшее направление исследований связано с увеличением статистической базы и расширением количества объектов с иными типами каменной кладки.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеенко В.Н., Чепурная Е.А. Методы повышения нормального сцепления в кладке существующих зданий // Строительство и техногенная безопасность. 2014. № 52. С. 37–40.
2. Блягоз А.М., Кретинин К.М., Раменский В.В., Фроленко В.В., Клименко Е.Б. К вопросу оценки достоверности результатов прогнозирования прочности нормального сцепления каменной кладки в раннем возрасте // Инновации и инвестиции. 2019. № 10. С. 245–248.
3. Голеско В.О. Исследование прочности укрепленных грунтов на растяжение методом раскалывания // Вестник ХНАДУ. 2014. № 64. С. 125–127 URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/is-sledovanie-prochnosti-ukreplennyh-gruntov-na-rastyazhenie-metodom-raskalyvaniya> (дата обращения: 15.06.2020).
4. Грановский А.В., Джамуев Б.К., Вишневский А.А., Гринфельд Г.И. Экспериментальное определение нормального и касательного сцепления кладки из ячеисто-бетонных блоков автоклавного твердения на различных клеевых составах // Строительные материалы. 2015. № 8. С. 22–25.
5. Гринфельд Г.И. Деформативность и прочность сцепления кладки из автоклавного газобетона в зависимости от его плотности и прочности // Технологии бетонов. 2016. № 5–6. С. 12–14.
6. Деркач В.Н. Прочность нормального сцепления цементных растворов в каменной кладке // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7(33). С. 6–13.

7. Деркач В.Н. Прочность каменной кладки при осевом растяжении // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 5(34). С. 58–64.
8. Sassoni E., Andreotti S., Bellini A., Mazzanti B., Bignozzi M.C., Mazzotti C., Franzoni E. Influence of mechanical properties, anisotropy, surface roughness and porosity of brick on FRP debonding force. *Composites. Part B: Engineering*. 2017;108(1):257–269.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 4/45

Buildings and Structures

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-8>

Pokatilov A., Ardeev K.

ANDREY POKATILOV, Candidate of Engineering Sciences, Director of the Construction Institute, pav.tsp@kuzstu.ru

KONSTANTIN ARDEEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate professor (corresponding author), ardeev.k@gmail.com

Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev
Kemerovo, Russia

Determination of the strength of normal adhesion of brick masonry by splitting

Abstract: A technique was developed and tested to determine the cohesion strength in masonry at non-tied seams by testing the core samples selected from the structure by the splitting method. The idea of the work is to apply the well-known method for determining tensile strength by cracking a cylindrical specimen to assess the adhesion strength in masonry along an untied seam. Masonry core samples were taken under natural conditions. A comparison of the test results of masonry cores with the data obtained by the standard method using the ОННКС-1.СК device was made. The test results do not contradict each other with a provision 95%.

Keywords: building, brick masonry, normal resistance, test of cores, cohesion, non-tied seam, testing machine

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Article: received: 20.04.2020; reviewed: 29.04.20; accepted: 25.08.2020; financing: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev.

REFERENCES

1. Alekseenko V.N., Chepuray E.A. Methods of increasing normal adhesion in the masonry of existing buildings. *Construction and Industrial Safety*. 2014(52):37–40
2. Blyagoz A.M., Kretinin K.M., Ramensky V.V., Frolenko V.V., Klimenko E.B. On the question of assessing the reliability of the results of predicting the strength of normal adhesion of masonry at an early age. *Innovation and investment*. 2019(10):245–248.
3. Golesko V.O. Investigation of tensile strength of reinforced soils by splitting. *Bulletin of KHNADU*. 2014(64):125–127. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-prochnosti-ukreplennyh-gruntov-na-rastyazhenie-metodom-raskalyvaniya>. – 15.04.2020.
4. Granovsky A.V., Dzhamev B.K., Vishnevsky A.A., Grinfeld G.I. Experimental determination of normal and tangential adhesion of masonry from cellular concrete blocks of autoclave hardening on various adhesive compositions. *Construction Materials*. 2015(8):22–25.
5. Greenfeld G.I. Deformability and adhesion strength of masonry from autoclaved aerated concrete depending on its density and strength. *Concrete Technologies*. 2016;(5–6):12–14.
6. Derkach V.N. Strength of normal adhesion of cement mortars in masonry. *Engineering and Construction Journal*. 2012;7(33):6–13.
7. Derkach V.N. Axial tensile strength of masonry. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012;5(34):58–64.
8. Sassoni E., Andreotti S., Bellini A., Mazzanti B., Bignozzi M.C., Mazzotti C., Franzoni E. Influence of mechanical properties, anisotropy, surface roughness and porosity of brick on FRP debonding force. *Composites. Part B: Engineering*. 2017;108(1):257–269.