

З.А. АЛЬДРЕБИ

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031,
Российская Федерация

СЕЙСМОУСИЛЕНИЕ ЗДАНИЙ, ПОСТРОЕННЫХ ИЗ НЕАРМИРОВАННОЙ КАМЕННОЙ КЛАДКИ С ПОМОЩЬЮ ТОРКРЕТИРОВАНИЯ БЕТОНА

Аннотация

Введение. В данной работе упоминается о существовании традиционных и нетрадиционных методов сейсмоусиления зданий и сооружений, в том числе зданий, построенных из каменной кладки, и исторических памятников архитектуры. Рассматривается торкретирование бетоном или другим строительным раствором на основе цемента как один из способов сейсмоусиления, который принадлежит к традиционным методам и считается в данном случае наиболее подходящим, так как позволяет сейсмоусилить здания, построенные из неармированной каменной кладки, в число которых входят многие исторические памятники архитектуры, увеличивая их несущую способность и при этом почти не утяжеляя их вес.

Цель. Исследование предназначено для того, чтобы внести вклад в сейсмоусиление зданий, в том числе памятников архитектуры, построенных из неармированной каменной кладки, чтобы они выдержали в дальнейшем сейсмические воздействия от такого природного явления, как землетрясение.

Материалы и методы. Выполнен обзор и детальное изучение метода сейсмоусиления, а именно торкретирования бетоном, который является традиционным методом, его преимуществ и недостатков, сути метода и последовательности его выполнения. Также выполнен обзор исторических землетрясений в разных странах и их разрушительных последствий для зданий, построенных из неармированной каменной кладки. Рассмотрено поведение неармированных каменных опор и стен в плоскости при воздействии сейсмических боковых сил.

Результаты. Предложены и наглядно продемонстрированы возможное практическое применение и шаги торкретирования бетоном по металлической сетке стен из неармированной каменной кладки для их сейсмоусиления.

Выводы. Сделаны выводы о целесообразности использования торкретирования бетоном по металлической сетке для сейсмоусиления зданий, построенных из неармированной каменной кладки, что дает возможность сохранить жизнь людей, проживающих в них в случае возникновения землетрясений.

Ключевые слова: торкретирование, неармированная каменная кладка, сейсмоусиление, металлическая сетка, землетрясение, исторические памятники архитектуры, здание, сопло, отскок

Для цитирования: Альдреби З.А. Сейсмоусиление зданий, построенных из неармированной каменной кладки с помощью торкретирования бетона // *Бетон и железобетон*. 2023. № 5/6 (619). С. 11–24. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6\(619\)-11-24](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6(619)-11-24)

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 31.10.2023

Поступила после рецензирования 28.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Z.A. ALDREBI

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Moskovsky Ave., 9, Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

SEISMIC REINFORCEMENT OF BUILDINGS CONSTRUCTED FROM UNREINFORCED MASONRY USING SHOTCRETE

Abstract

Introduction. This work mentions the existence of traditional and non-traditional methods of seismic reinforcement of buildings and structures, including buildings built from masonry and historical architectural monuments. Concrete shotcreting, or other cement-based mortar is considered as one of the methods of seismic reinforcement, which belongs to traditional methods and is regarded the most suitable in this case, since it allows seismic reinforcement of buildings constructed from unreinforced masonry, which includes many historical architectural monuments, increasing their load-bearing capacity and at the same time almost without increasing their weight.

Aim. The research is intended to contribute to the seismic reinforcement of buildings, including architectural monuments, built from unreinforced masonry to withstand future seismic impacts from natural phenomena such as earthquake.

Materials and methods. A review and detailed study of the seismic reinforcement method was carried out, namely shotcrete with concrete, which is a traditional method, its advantages and disadvantages, the essence of the method and the sequence of its implementation. A review of historical earthquakes in different countries and their devastating consequences for buildings constructed from unreinforced masonry was also carried out. The in-plane behavior of unreinforced masonry supports and walls under the influence of seismic lateral forces is considered.

Results. The possible practical application and steps of concrete shotcrete over a metal mesh of unreinforced masonry walls for their seismic reinforcement are proposed and clearly demonstrated.

Conclusions. Conclusions have been drawn about the feasibility of using shotcrete over a metal mesh for seismic reinforcement of buildings built from unreinforced masonry, which makes it possible to save the lives of people living in them in case of earthquakes.

Keywords: shotcrete, unreinforced masonry (URM), seismic reinforcement, metal mesh, earthquake, historical architectural monuments, building, nozzle, rebound

For citation: Aldrebi Z.A. Seismic reinforcement of buildings constructed from unreinforced masonry using shotcrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2023, no. 5/6 (619), pp. 11–24. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6\(619\)-11-24](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6(619)-11-24)

Author contribution statement

The author takes responsibility of all the aspects of the article preparation.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 31.10.2023

Revised 28.11.2023

Accepted 30.11.2023

Введение

Для повышения сейсмостойкости или сейсмоусиления зданий и сооружений, в том числе памятников архитектуры, существуют традиционные и нетрадиционные методы сейсмоусиления (рис. 1). Традиционные способы (рис. 2) подразумевают повышение несущей способности строительных конструкций путем увеличения сечений конструкций без изменения динамической схемы, а нетрадиционные (специальные) методы сейсмоусиления подразумевают изменение динамической схемы сооружения и включают в себя сейсмогашение и сейсмоизоляция.

Торкретирование бетона [1] или других строительных растворов относится к традиционным методам сейсмоусиления и позволяет сохранить аутентич-

ность и оригинальный облик старинных зданий, не слишком утяжеляя их из-за своего относительно малого веса и существенно увеличивая несущую способность строительных конструкций.

Торкретирование бетона в общем смысле означает послойное напыление цементирующих растворов под высоким давлением. В этом процессе происходит очень сильная адгезия частиц рабочей смеси и обрабатываемой поверхности, также заполняются трещины, мелкие поры, пустоты. Данный метод торкретирования лучше всего использовать с армированием обрабатываемой поверхности, то есть торкретирование бетона (рис. 3) по металлической сетке [1–12].

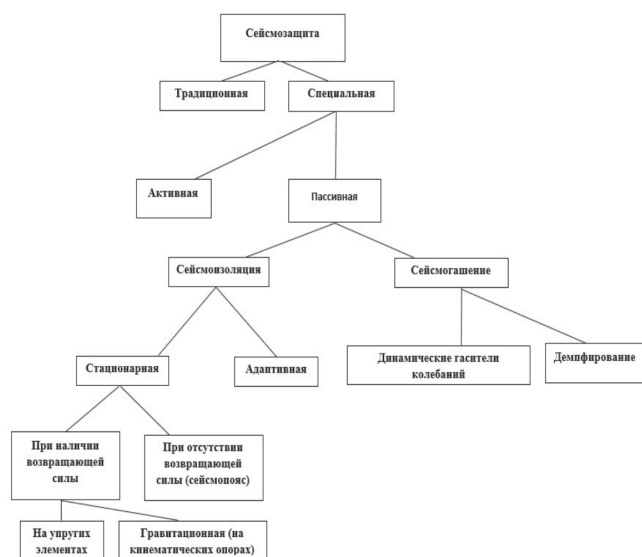


Рис. 1. Классификация систем сейсмозащиты зданий и сооружений
Fig. 1. Classification of seismic protection systems for buildings and structures



Рис. 3. Торкретирование бетона на вертикальную плоскость по металлической сетке
Fig. 3. Concrete shotcreting on a vertical plane over a metal mesh



Рис. 2. Традиционные методы усиления и восстановления каменных конструкций
Fig. 2. Traditional methods of strengthening and restoration of masonry structures

Существуют два способа торкретирования, иначе говоря торкрет-бетонирования, – мокрый и сухой. В мокром способе цемент и вода смешиваются в раствор заранее и подаются под давлением через шланг, а в сухом методе сухой цемент с наполнителями подается под давлением отдельно и смешивается с водой в распыляющем устройстве. Выбор того или иного вида зависит от различных факторов и определяется типом установки, условиями подготовки смеси и поставленными задачами.

Мокрый метод торкретирования бетона

При мокром методе торкретирования бетона (рис. 4) заранее приготовленный раствор подается ровным потоком под давлением, создаваемым бетононасосом, через шланги на сопло. Однако этот метод имеет ряд преимуществ и недостатков.

Преимущества

- возможность применения данного метода в закрытых помещениях;
- работа с готовым материалом выполняется достаточно легко;
- раствор имеет высокую однородность;
- почти отсутствует запыленность территории, где выполняются работы;
- нет необходимости в дополнительной обработке обрабатываемого слоя, есть возможность ограничиться только затиркой;
- оставшиеся лишние материалы можно использовать для других работ.

Недостатки

- низкая возможность маневрирования из-за недостаточной длины подающих шлангов;

- длительность распыления раствора занимает достаточно долгое время;
- максимальная толщина пласта не более 3 см;
- чистка установки достаточно сложна.

Сухой метод торкретирования бетона

При сухом методе торкретирования бетона (рис. 5) используется сухой цемент с различными наполнителями и подается со шланга вода под давлением, создаваемым бетононасосом, компоненты смешиваются в распыляющем устройстве, тем самым получается раствор требуемой густоты. Однако этот метод имеет ряд преимуществ и недостатков.

Преимущества

- максимальная толщина пласта может достигать 6 см;
- высокий коэффициент полезного действия;
- хорошие показатели межслойной адгезии;
- возможность регулирования расстояния подачи раствора;
- установка легко очищается и проста в использовании;
- нет необходимости грунтовать обрабатываемую поверхность.

Недостатки

- работа с сухим материалом достаточно сложна, так как частицы материала при нанесении отскакивают от обрабатываемой поверхности;
- повышенная загрязненность и запыленность на месте проведения работ;
- при смешивании компонентов смеси необходимо не допускать ошибок;
- оператор установки должен иметь достаточный опыт торкретирования.

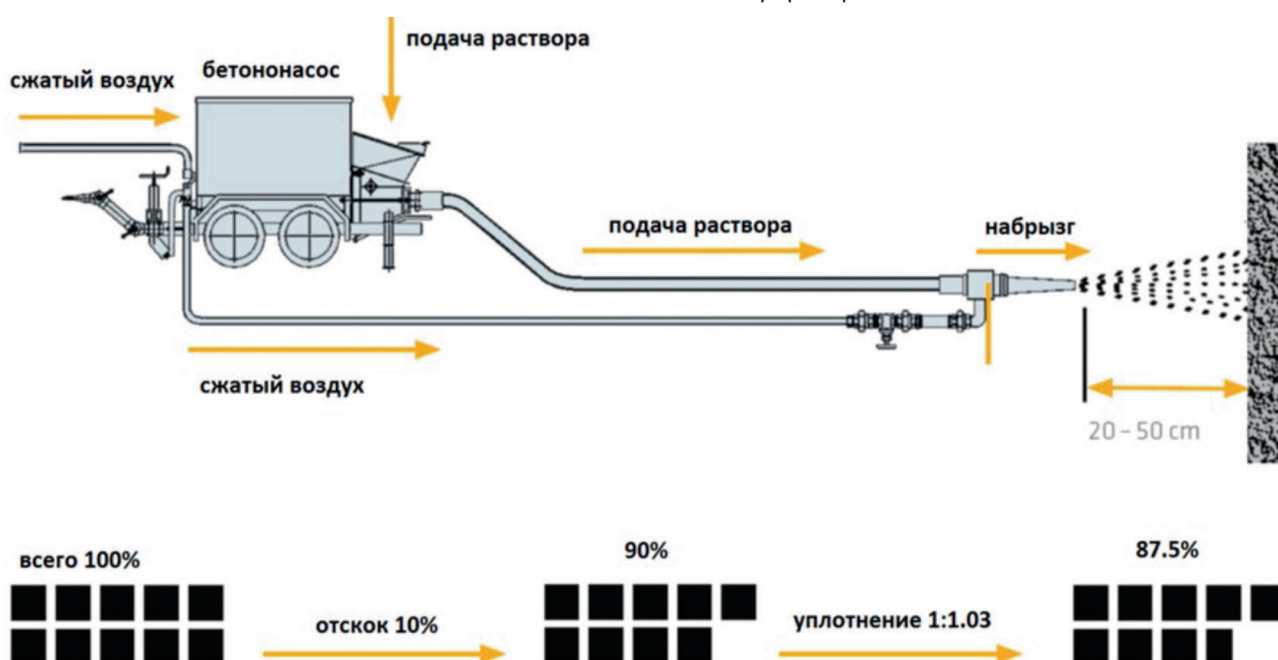


Рис. 4. Мокрый метод торкретирования бетона
Fig. 4. Wet shotcrete method

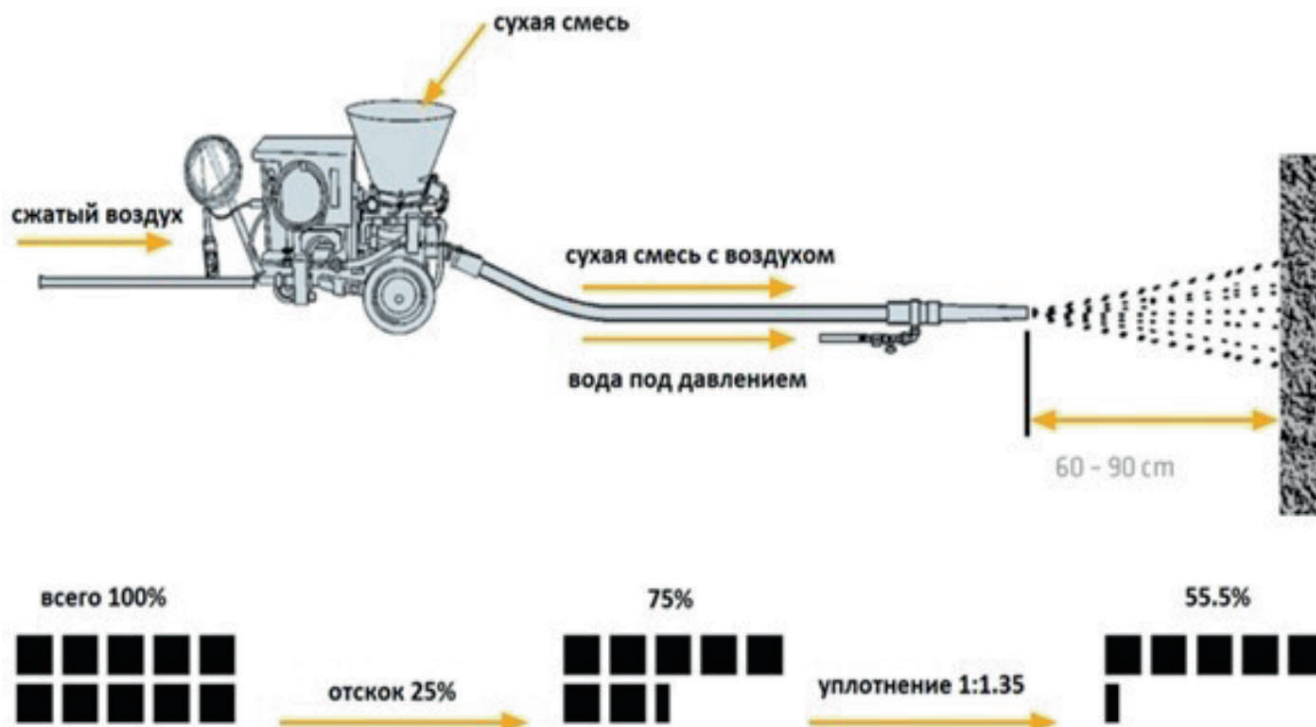


Рис. 5. Сухой метод торкретирования бетона
Fig. 5. Dry shotcrete method

Установки для торкретирования

Установки для торкретирования являются специализированным оборудованием и используются для нанесения под давлением на обрабатываемые поверхности раствора или бетонной смеси. Торкретирование обеспечивает создание уплотненного слоя. Достижение такого эффекта осуществля-

ется благодаря нанесению рабочего раствора под давлением, созданным торкрет-установкой. Существуют две разновидности торкрет-установок – для сухого (рис. 6а) и для мокрого (рис. 6б) торкретирования. Они состоят в общем из: бетоносмесителя; бетононасоса или компрессора; шланга; рукава и распылителя с соплами.

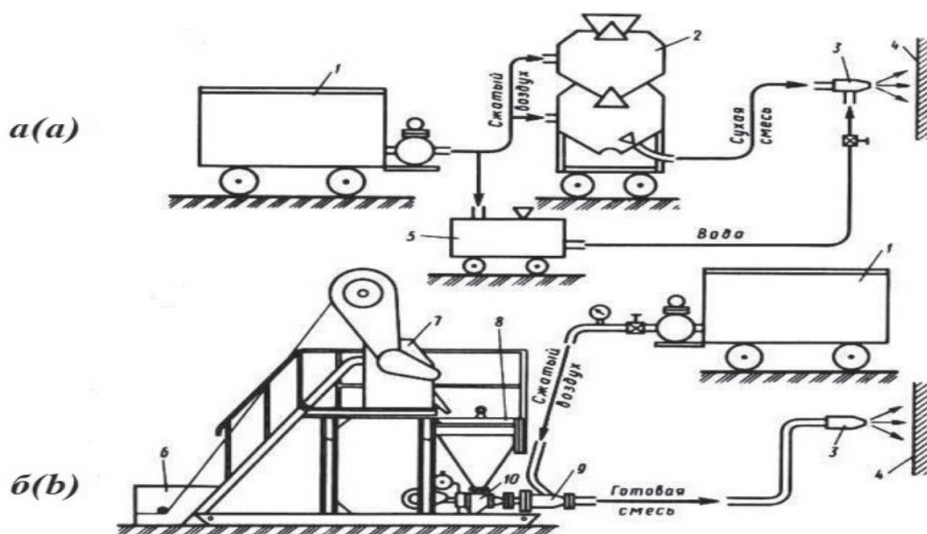


Рис. 6. Установки для торкретирования:

а – схема установки для торкретирования сухим способом; б – схема установки для торкретирования мокрым способом; 1 – компрессор с воздухоочистительным баком; 2 – цемент-пушка; 3 – сопло; 4 – поверхность торкретирования; 5 – водяной бак; 6 – скиповый подъемник; 7 – растворосмеситель; 8 – вибросито; 9 – смешивательная камера; 10 – рабочая камера растворонасоса

Fig. 6. Shotcrete installations:

а – scheme of the installation for dry shotcrete; б – scheme of the installation for wet shotcrete; 1 – compressor with air cleaning tank; 2 – cement gun; 3 – nozzle; 4 – shotcrete surface; 5 – water tank; 6 – skip hoist; 7 – mortar mixer; 8 – vibrating sieve; 9 – mixing chamber; 10 – working chamber of the mortar pump

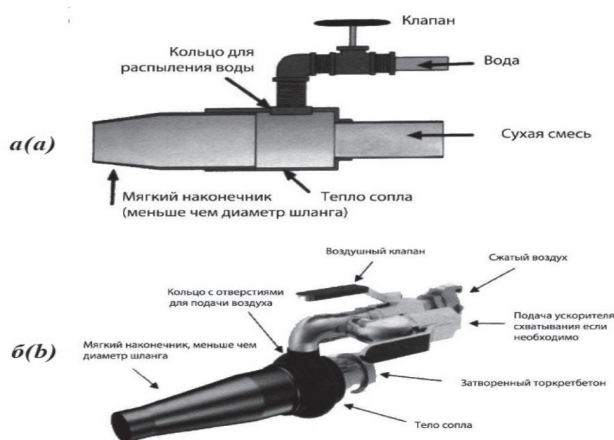


Рис. 7. Конструкция сопла установки торкретирования:
а – для сухого метода торкретирования; б – для мокрого метода торкретирования

Fig. 7. Design of the nozzle of the shotcrete installation:
а – for the dry shotcrete method; б – for the wet shotcrete method

Сопла установки для торкретирования

Сопла установки для торкретирования бетона при сухом (рис. 7а) и мокром методах (рис. 7б) различаются между собой.

Торкретирование

Традиционный метод сейсмоусиления с помощью торкрет-бетонирования по металлической сетке (рис. 8) с одной или двух сторон поверхности, отдельными участками или полностью, применяют при сейсмоусилении стен каменных зданий и сооружений [3, 5]. Суть метода заключается в нанесении торкрет-бетона на поверхность стены, предварительно покрыв ее металлической сеткой. Торкретирование бетоном является одним из основных традиционных методов сейсмоусиления и (или) восстановления кирпичных стен. Данный метод увеличивает несущую способность поврежденной либо усиливаемой стены по сравнению с первоначальным состоянием. Жесткость здания или сооружения практически может быть полностью восстановлена.

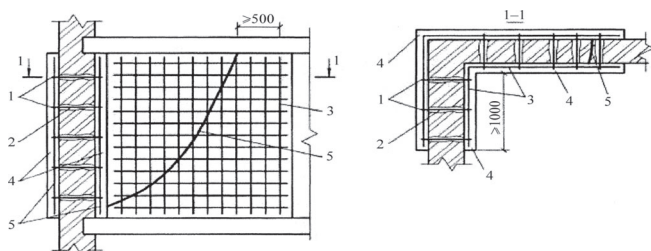


Рис. 8. Сейсмоусиление стены с трещиной с помощью торкретирования бетона по металлической арматурной сетке:

1 – анкеры диаметром $\varnothing 6$ мм; 2 – отверстия в стене; 3 – арматурная металлическая сетка; 4 – слой торкрет-бетона; 5 – трещина в стене

Fig. 8. Seismic reinforcement of a wall with a crack using shotcrete over a metal reinforcing mesh:

1 – anchors with a diameter of $\varnothing 6$ mm; 2 – holes in the wall; 3 – reinforcing metal mesh; 4 – shotcrete layer; 5 – crack in the wall

Последовательность выполнения работ и технология торкретирования

На протяжении многих веков строители применяли каменную кладку для строительных нужд. Из этого хорошо сохраняющего тепло и достаточно прочного материала возводятся несущие конструкции зданий.

Каменная кладка является основой и фундаментной опорой зданий и сооружений. Стоит отметить, что даже огромные и громоздкие здания из кирпича могут простоять много столетий при условии соблюдения всей технологии строительства. Кладкой можно возводить и внутренние, и наружные стены. Но ряд техногенных и природных факторов, в том числе и землетрясения, приводят к ослаблению несущей способности кладки и к появлению в ней дефектов, разрастающихся трещин и шовных разрушений. Эффективным методом сейсмоусиления, укрепления и восстановления является торкретирование каменной кладки с помощью растворов на основе цемента.

Обрабатываемую поверхность кладки необходимо подготовить путем тщательной очистки от грязи, ржавчины, пятен масла, пыли, битума, разрушенных элементов и отслоений, которые могут препятствовать хорошему сцеплению раствора с кладкой. Также необходимо проводить глубокую очистку хрупких, запыленных швов вплоть до двух сантиметров. Для этого применяют механическую чистку, пескоструйные, водоструйные установки. И используют составы, которые убивают плесень и грибок и предупреждают их появление в дальнейшем.

Преимущественно при капитальном ремонте стен и сводов используют мокрый метод торкретирования кладки. Основные требования или правила при торкретировании таковы, что распылитель насоса должен находиться от обрабатываемой поверхности минимум на расстоянии 50 сантиметров. Бетон должен подаваться круговыми движениями, а сопло должно быть расположено под углом 90° по отношению к поверхности, которую обрабатывают (рис. 9). В зависимости от состава торкрет-бетона, если необходимо добиться толстого слоя, то есть более 5–10 см, то наносят повторно раствор на поверхность кладки [1–12].

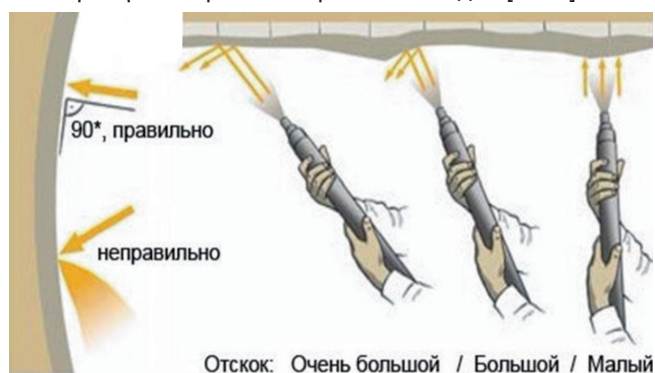


Рис. 9. Правильное и неправильное расположение сопла и расчет отскока раствора при торкретировании

Fig. 9. Correct and incorrect location of the nozzle and calculation of the rebound of the solution during shotcrete

Последующий слой необходимо наносить до затвердения предыдущего слоя, то есть тогда, когда он только схватился. По этой технологии наименьшая толщина торкрет-бетона, которой можно добиться, равна 0,5 см. Разглаживают обработанную поверхность кладки торкрет-бетоном с помощью деревянной или пластиковой терки. Разглаживание поверхности необходимо выполнить в самом начале процесса схватывания нанесенного раствора (рис. 10а–г, рис. 11).

Технология торкретирования

Процесс торкретирования, иначе говоря набрызга, осуществляется в три этапа:

1. Подготовка смеси или раствора для торкретирования;
2. Очистка обрабатываемой поверхности;
3. Торкретирование (напыление).

Подготовка смеси или раствора для торкретирования

В зависимости от эксплуатационных требований к поверхности соотношение цемента к песку меняется. При атмосферном торкретировании соотношение цемента к песку равно 1:4, а при механическом торкретировании составляет 1:3.

Качественное покрытие зависит от правильного соединения всех компонентов. Следует помнить, что готовый раствор необходимо использовать в течение

трех часов. Иначе бетон застынет, начнут образовываться комки с последующим снижением качества получаемого результата на обработанной поверхности. Во избежание снижения качества раствора торкрет-бетона в него часто добавляют пластификаторы. Очень важно учесть следующие два фактора:

- добавить жидкую добавку в раствор следует только после ее предварительного разведения с водой;
- необходимо заранее смешивать сухой состав с сухим бетоном и песком.

Очистка обрабатываемой поверхности

Подготовка обрабатываемой поверхности для усиления требуемого участка методом торкретирования бетоном подразумевает очистку поверхности от штукатурки, пыли, масла, следов краски, грязи. Для этого используют гидроабразивный, или пескоструйный, способ. Железную арматуру очищают от следов ржавчины. Для увеличения сцепления и адгезии создается равномерная шероховатость обрабатываемой поверхности. Для уменьшения возможности отскока бетона необходимо затереть щели. Обрабатываемую поверхность продувают воздухом и промывают при давлении 0,3 МПа водной струей.

Для укрепления и усиления торкрет-бетонного слоя выполняется армирование поверхности сеткой с размером ячеек 10 см.

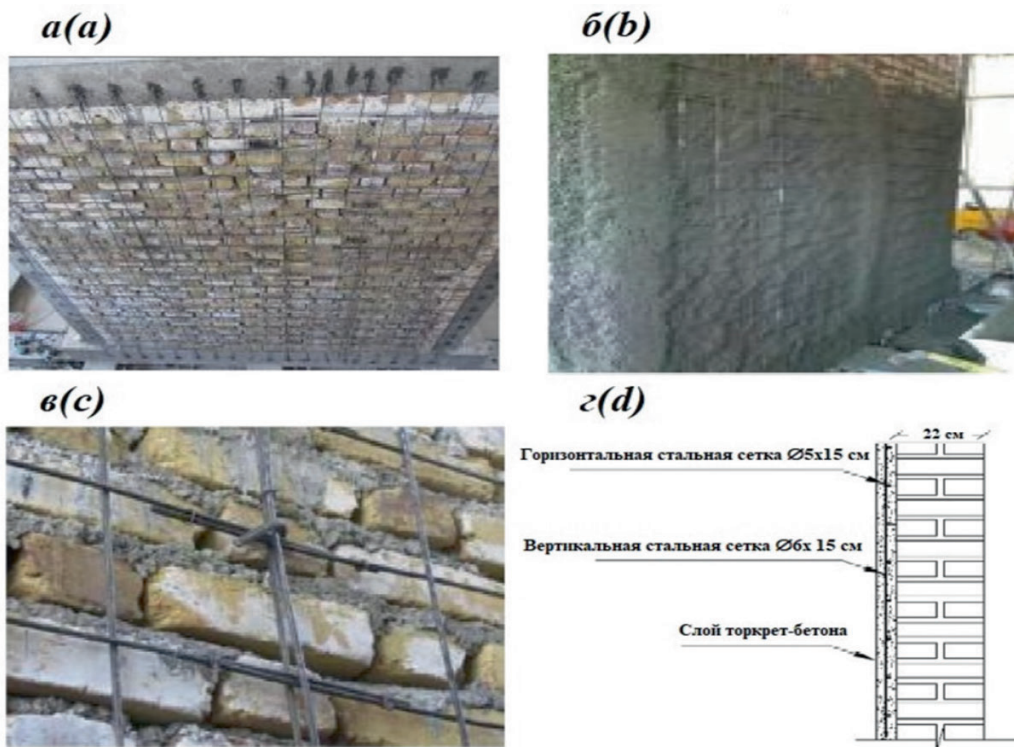


Рис. 10. Процедура сейсмоусиления стены:

а – крепление металлической сетки с помощью анкеров к отверстиям в стене; б – торкретирование стены; в – U-образные стержни крепления (анкеры) к стене; г – фрагмент разреза усиленной торкрет-бетоном стены

Fig. 10. Procedure of seismic reinforcement of the wall:

а – fastening the metal mesh using anchors to the holes in the wall; б – shotcrete wall; в – U-shaped fastening rods (anchors) to the wall; г – fragment of a section of the wall reinforced with a layer of shotcrete



Рис. 11. Торкрет-бетонирование по металлической сетке кирпичной стены
Fig. 11. Concrete shotcreting over metal mesh of a brick wall

Торкретирование (напыление)

Напыление торкрет-бетона выполняется послойно. Толщина пластов находится между 5 и 7 мм. Эти цифры зависят от расположения обрабатываемой плоскости, вида раствора и способа нанесения бетона. Толщина 2–5 мм считается достаточной, но даже ее наносят в два пласта. Высоту контролируют щупом или маячками.

Влияние землетрясений на здания из неармированной каменной кладки (URM)

Каменная кладка использовалась во всем мире с самого начала появления гражданского строительства. Глиняные кирпичи использовались не менее 10000 лет. Они изготавливались из высушенных на солнце кирпичей и широко использовались в Египте, Вавилоне, странах средиземноморского бассейна, США, Южной Америке и других странах. Старые здания (рис. 12), в том числе памятники архитектуры (рис. 13), в основном состоят из стен, построенных из неармированной каменной кладки, так называемой на английском *unreinforced masonry (URM)*. Элементы неармированной каменной кладки изготавливаются из собранных вручную блоков природного или искус-

ственного материала, таких как глиняный кирпич и т. д., которые укладываются друг на друга и соединяются вместе раствором. Существует множество способов изготовления глиняного кирпича, во многом зависящих от местных обычаев или традиций. На свойства кирпича влияют природа глины, способы формования и обжига. Чистые глины бесполезны для изготовления кирпича, если они не смешаны с непластичным материалом, и это различается для каждой страны или региона. Поскольку свойства глин различаются по всему миру, становится очевидным, что в разных регионах преобладают разные виды кирпича. Большое разнообразие кирпичей, полученных естественным путем, обладает большим разнообразием свойств.

Большинство старых каменных зданий спроектированы в первую очередь так, чтобы выдерживать гравитационные нагрузки, поскольку нормы сейсмической нагрузки тогда еще не были установлены. При частых землетрясениях наблюдалось, что старые каменные конструкции работают плохо, большинство из этих зданий рухнуло в результате сильного землетрясения. Материал глиняного кирпича относительно тяжелый, хрупкий, малопрочный на разрыв и обладает низкой пластичностью при воздействии сейсмических сил [13–20].

В XX и XXI веках произошло множество сильных землетрясений, в результате которых сильно пострадали здания, построенные из неармированной каменной кладки.

– В Соединенных Штатах исторически происходили землетрясения, которые нанесли значительный ущерб каменным зданиям. Землетрясение в Нортридже [21], произошедшее 17 января 1994 г. (рис. 14г), землетрясение в Коалинге, штат Калифорния, произошедшее в 1983 году, магнитудой 6,7 (рис. 14а), землетрясение в Нисквалли 28 февраля 2001 г. магнитудой 6,8 (рис. 14е), землетрясение Лома-Приета [22] около Сан-Франциско, штат Калифорния, произошедшее 17 октября 1989 года, магнитудой 7,1 (рис. 14в).



Рис. 12. Здание гостиницы «Кадиллак», построенное из неармированной каменной кладки в г. Сиэтле, США (год постройки 1889 г.)
Fig. 12. The Cadillac Hotel building, built of unreinforced masonry in Seattle, USA (year of construction 1889)

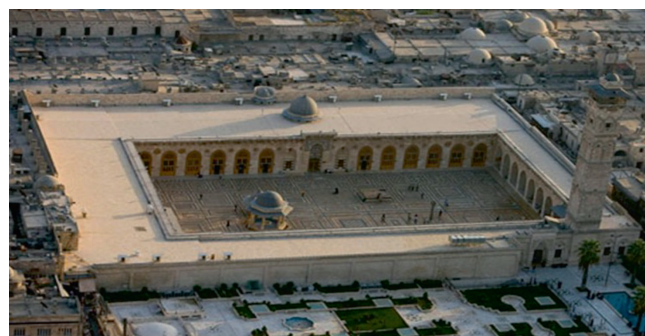


Рис. 13. Памятник архитектуры, построенный из неармированной каменной кладки, Великая мечеть в г. Алеппо, Сирия (начало строительства в 715 году)
Fig. 13. The architectural monument built from unreinforced masonry, the Great Mosque in Aleppo, Syria (construction started in 715)

– Землетрясение 7 декабря 1988 года магнитудой 6,8 произошло в Армянской ССР (рис. 14б). Такие города, как Спитак и Ленинакан, понесли тяжелый ущерб. Большинство зданий имели неармированную каменную конструкцию с несущими стенами и в целом работали плохо.

– Большое количество землетрясений в Индонезии, например землетрясение в Бенкулу (землетрясение в Энггано), которое произошло 04 июня 2000 года, магнитудой 7,9 (рис. 14д), нанесло значительный ущерб неармированным каменным домам. Дома обычно состоят из полуглиняного кирпича и строятся в соот-

ветствии с общепринятой местной практикой без учета сейсмостойкости. Тем не менее, старые каменные здания с более чем одним рядом кирпичей показали себя хорошо, получив лишь незначительные повреждения или вообще оставшись без повреждений при землетрясениях от слабых до умеренных.

Наблюдаемые сейсмические воздействия и их последствия для неармированных каменных зданий, отмеченные в результате вышеперечисленных и других землетрясений, привели к созданию серии документов, посвященных сейсмической оценке и усилению каменных конструкций в разных странах.

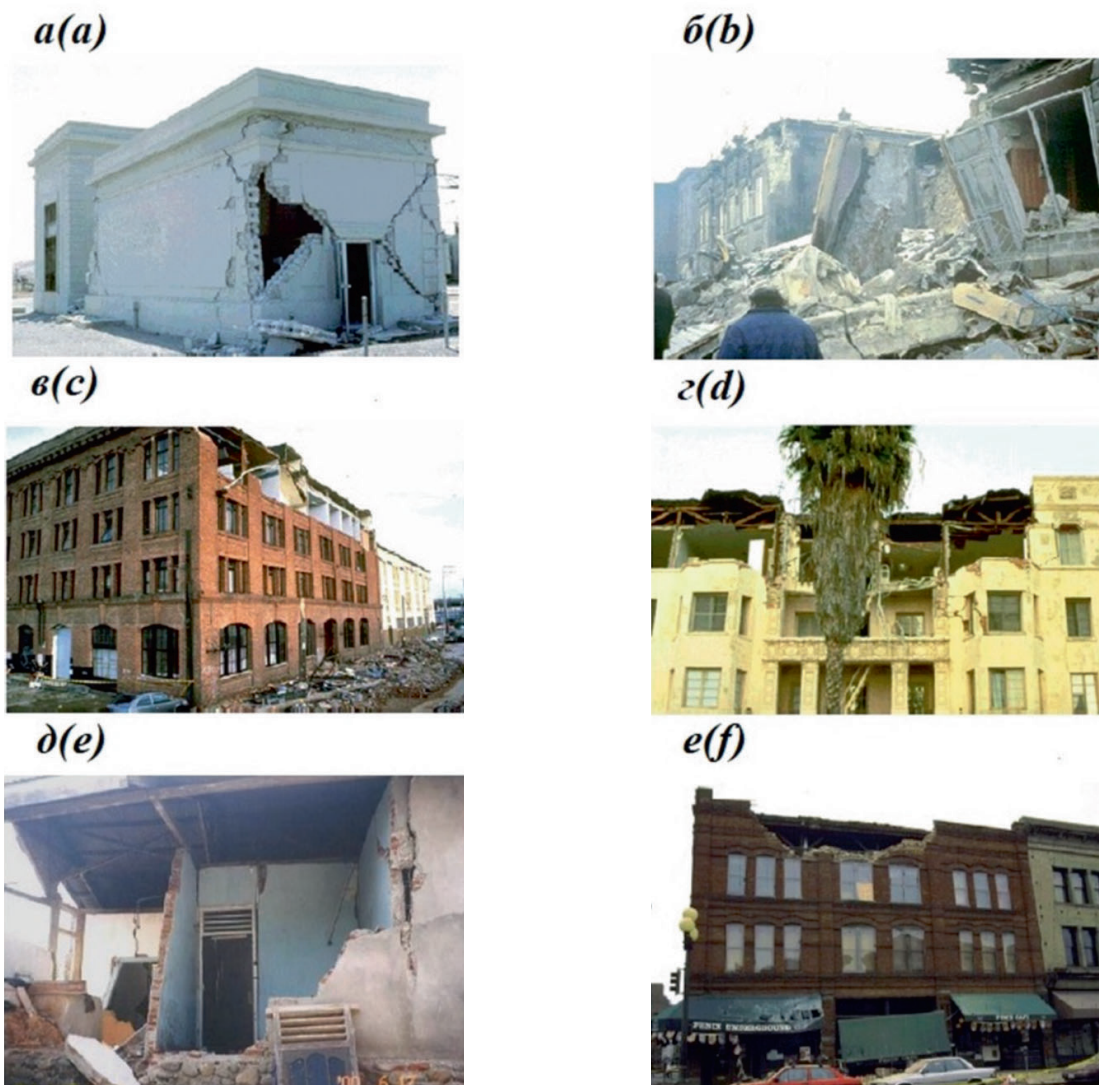


Рис. 14. Сильные повреждения зданий, построенных из неармированной каменной кладки, после землетрясения: а – после землетрясения в Коалинге, штат Калифорния, произошедшего 2 мая 1983 г.; б – после землетрясения в Армении, СССР, произошедшего 7 декабря 1988 г.; в – после землетрясения Лома-Приета около Сан-Франциско, штат Калифорния, произошедшего 17 октября 1989 г.; г – после землетрясения в Нортридже, произошедшего 17 января 1994 г.; д – после землетрясения в Бенкулу (землетрясения в Энггано), Индонезия, произошедшего 04 июня 2000 г.; е – после землетрясения в Нисквалли, США, произошедшего 28 февраля 2001 г.

Fig. 14. Severe damages of buildings built of unreinforced masonry after the earthquake: а – after the earthquake in Coalinga, California, which occurred on May 02, 1983; б – after the earthquake in Armenia, USSR, which occurred on December 07, 1988; в – after the Loma Prieta earthquake near San Francisco, California, which occurred on October 17, 1989; г – after the earthquake in Northridge, which occurred on January 17, 1994; д – after the earthquake in Benkulu (earthquake in Enggano), Indonesia, which occurred on June 04, 2000; е – after the earthquake in Nisqually, USA, which occurred on February 28, 2001

Стоит отметить, что во всем мире наблюдался ряд распространенных отказов зданий из неармированной каменной кладки во время землетрясений. Ведь во многих старых зданиях, построенных из неармированной каменной кладки, отсутствует надежное крепление полов и крыши к стенам из неармированной каменной кладки, что способствует внезапному разрушению при сейсмическом воздействии.

Опираясь на накопленный опыт о негативных последствиях землетрясений, который показал уязвимость зданий, построенных из неармированной каменной кладки, действующие правила строительства и проектирования в сейсмоопасных районах по всему миру больше не рекомендуют использовать неармированные каменные конструкции, поэтому необходимо уделять значительное и особое внимание средствам оценки состояния и укреплению всех старых каменных зданий, существующих в сейсмоопасных зонах.

Поведение неармированных каменных стен и опор в плоскости

В ходе многочисленных исследований разными учеными было изучено поведение неармированных каменных стен и опор в плоскости, поскольку они являются наиболее важными частями конструкций для сопротивления боковым сейсмическим нагрузкам. Неармированные каменные стены и опоры демонстрируют три типичных режима разрушения в плоскости (рис. 15):

1. Разрушение при изгибе: разрушение из-за превышения прочности на сжатие в сжатой части поперечного сечения, оно характеризуется образованием вертикальных трещин. Они отмечены зелеными линиями на рис. 15а. Разрушение характеризуется

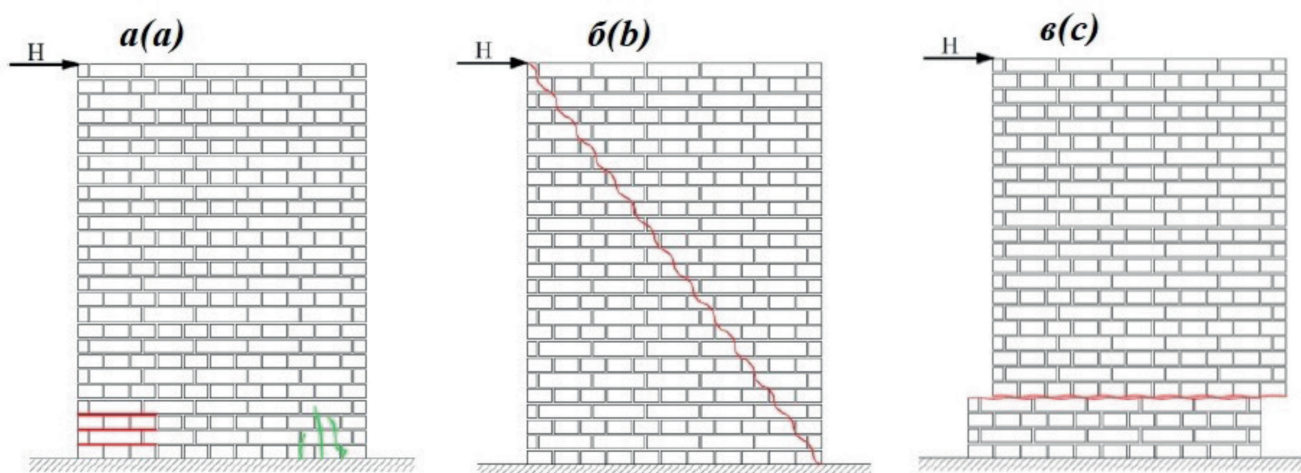
также образованием трещин на стороне растяжения, а именно появлением горизонтальных трещин. Они отмечены красными линиями на рис. 15а. Режим разрушения типичен для тонких стен с высоким сжимающим напряжением.

2. Разрушение при диагональном сдвиге: разрушение, связанное с превышением предела прочности кладки по главному направлению растяжения и характеризующееся появлением диагональных трещин в узлах или в растворных швах (рис. 15б). Это наиболее распространенный вид отказа.

3. Разрушение при скользящем сдвиге: в случае низкого сжимающего напряжения и высокой горизонтальной силы разрушение может произойти вдоль горизонтального шва раствора (рис. 15в). Этот механизм встречается редко, и его можно неправильно охарактеризовать, поскольку он вызывает ту же картину повреждений, что и в первом случае.

Наиболее важными параметрами, влияющими на режимы разрушения, являются геометрия стен, уровень сжимающих напряжений, а также прочность на сжатие и растяжение каменных блоков. Некоторые исследования показывают, что тип и размеры каменных блоков также существенно влияют на характер разрушения и трещин. Кладка из блоков с высокой прочностью имеет тенденцию разрушаться при сдвиге, тогда как кладка из блоков с невысокой прочностью имеет тенденцию разрушаться при изгибе [23–28].

Стоит отметить, что внеплоскостные [24] силы ориентированы перпендикулярно стене и действуют на стену как внутри, так и снаружи, они в первую очередь вызывают изгибающие напряжения. Силы в плоскости ориентированы параллельно стене и вызывают напряжения скольжения или сдвига (рис. 16а–б).



Н – Боковая нагрузка

Рис. 15. Виды разрушения неармированных каменных стен и опор в плоскости:

а – разрушение при изгибе; б – разрушение при диагональном сдвиге – прямая или ступенчатая схема; в – разрушение при скользящем сдвиге

Fig. 15. Types of in-plane failure of unreinforced masonry walls and piers:

а – flexural failure; б – diagonal shear failure–straight or stair–step pattern; в – sliding shear failure

Сейсмоусиление каменных стен с помощью торкретирования бетоном по металлической сетке

Торкретирование является одним из наиболее часто используемых традиционных методов сейсмического усиления существующих каменных конструкций. Идея состоит в том, чтобы разместить стальные сетки на поверхности стены и нанести бетон под высоким давлением. Покрытие необходимо правильно прикрепить к стене, что обычно достигается путем анкеровки. Также необходимо обеспечить правильное крепление сетки к фундаменту. Метод можно применять с одной или двух сторон стены.

Желательно применять метод по обе стороны стены для достижения симметричного поперечного сечения, более пластичного отклика и большего рассеяния энергии.

Метод усиления и детали соединения показаны на рис. 17. На рис. 17а показан типичный фундамент из бетонных опор с надлежащим соединением с каменной стеной с помощью анкеров. На рис. 17б показано соединение одностороннего торкрет-бетонного покрытия с каменной стеной с помощью анкеров. Существует возможность соединения между торкрет-бетонным покрытием и каменной кладкой посредством анкерных карманов с необходимым усилением арматурой, как показано на рис. 17в.

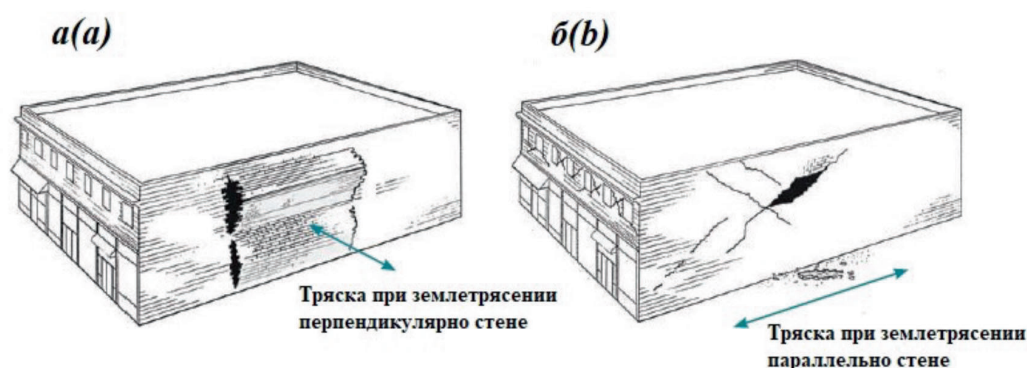


Рис. 16. Виды разрушения неармированных каменных стен:

а – внеплоскостное разрушение неармированной каменной стены; б – плоскостное разрушение неармированной каменной стены

Fig. 16. Failure types of unreinforced masonry walls:

a – out-of-plane failure of unreinforced masonry walls; b – in-plane failure of unreinforced masonry walls

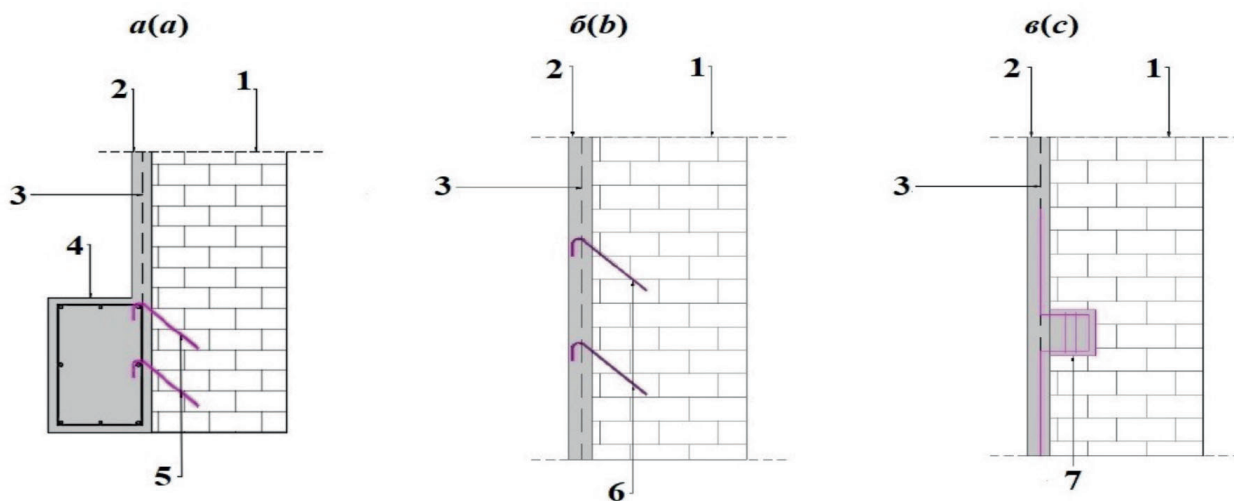


Рис. 17. Детали одностороннего торкретирования бетоном каменной стены:

а – деталь фундамента: 1 – каменная стена; 2 – слой торкрет-бетона; 3 – стальная сетка; 4 – торкрет-бетон фундамента; 5 – анкеры для торкрет-бетона фундамента; б – анкеры для торкрет-бетонного покрытия: 1 – каменная стена;

2 – слой торкрет-бетона; 3 – стальная сетка; 6 – анкеры для торкрет-бетонного покрытия; в – анкерные карманы для торкрет-бетонного покрытия: 1 – каменная стена; 2 – слой торкрет-бетона; 3 – стальная сетка; 7 – анкерные карманы для торкрет-бетонного покрытия с необходимым усилением арматурой

Fig. 17. Details of one-sided concrete shotcrete of a masonry wall:
a – foundation detail: 1 – masonry wall; 2 – shotcrete layer; 3 – steel mesh; 4 – shotcrete of the foundation; 5 – anchors for shotcrete foundation; b – anchors for shotcrete coating: 1 – masonry wall; 2 – shotcrete layer; 3 – steel mesh; 6 – anchors for shotcrete coating; c – anchor pockets for shotcrete coating: 1 – masonry wall; 2 – shotcrete layer; 3 – steel mesh; 7 – anchor pockets for shotcrete coating with the necessary reinforcement with building fittings

Преимуществами торкрет-бетонного покрытия являются повышенная несущая способность, способность к смещению, пластичность и рассеивание энергии. К сожалению, толстый слой торкрет-бетонного покрытия увеличивает массу и жесткость конструкции, что приводит к увеличению сейсмических сил. Кроме того, изменяется общее поведение конструкции, что может вызвать скручивающие эффекты всего здания и изменения в перераспределении жесткости. С точки зрения долговечности возможное окисление и коррозия стальных арматурных сеток могут снизить долговечность. Кроме того, этот метод достаточно дорогой и трудоемкий, и, наконец, измененный фасад и сокращение внутренних пространств делают этот метод возможно нежелательным с точки зрения собственников или жильцов зданий.

Возможным решением вышеназванных недостатков является выбор наименьшей допустимой толщины торкрет-бетонного слоя, который не слишком утяжеляет и не увеличивает массу конструкций, а также одновременно выполняет функцию по их сейсмоусилению.

Альтернативой торкретирования бетоном является использование вместо бетона раствора на цементной основе, который применяется в качестве штукатурки каменных стен [3, 23]. Раствор наносится гораздо меньшей толщиной, чем бетон, поэтому дополнительная масса каменной конструкции меньше. Кроме того, таким образом устраняются проблемы, связанные с изменением фасада. Наконец, важно подчеркнуть, что этот метод требует применения стальной сетки с обеих сторон стены и что сетки необходимо соединить через поперечное сечение стены, но проблема коррозии арматуры остается.

Выводы

В данной статье представлен наиболее часто используемый метод усиления каменной кладки стен и опор. Для сейсмического усиления каменных стен и опор широко используются различные традиционные методы, такие как нанесение торкрет-бетона, усиление напрягаемыми тяжами и другие. Литература по применению, тестированию и преимуществам традиционных методов весьма обширна. Эти методы обеспечивают повышение пластичности и несущей способности кладки стен и опор. Большинство компаний, которые занимаются укреплением и усилением строительных конструкций, чаще работают традиционными методами, чем новыми нетрадиционными методами сейсмоусиления, такими как сейсмогашение и сейсмоизоляция. Наконец, первоначальная стоимость традиционных методов по-прежнему ниже, чем у новых нетрадиционных методов.

Сейсмоусиление зданий, построенных из неармированной каменной кладки, является важным шагом для обеспечения и сохранения жизни людей, проживающих или работающих в них, в случае возникнове-

ния землетрясения, а для зданий, которые являются памятниками архитектуры, находятся под охраной местных законов или входят в список объектов всемирного наследия ЮНЕСКО, сейсмоусиление является первостепенной задачей для сохранения подобных памятников архитектуры для будущих поколений.

Данное исследование показало преимущества (увеличение пластичности и прочности каменных стен и т. д.) традиционного метода сейсмоусиления, а именно торкретирования бетоном или раствором на основе цемента для использования при сейсмоусилении зданий и памятников архитектуры, построенных из неармированной каменной кладки. Наряду с этим оно показало недостатки этого метода (недолговечность, коррозия арматурных сеток и т. д.), но, как оказалось, преимущества торкрет-бетонирования превалируют над недостатками, так как большинство недостатков легкоустраняемы.

Список литературы

1. ТУ 5745-001-16216892-06. Торкрет-бетон. Технические условия. 01 июня 2006 г.
2. ТУ 5745-001-02664750-2016. Смесь сухая для мелкозернистого торкрет-бетона. Технические условия. 25 августа 2016 г.
3. СП 15.13330.2020. Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81*. 2020.
4. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. Москва: Стандартинформ; 2017.
5. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Москва: Стандартинформ; 2018.
6. ГОСТ 24211-2003. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. Москва: МНТКС; 2003.
7. ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. Москва: ИПК Издательство Стандартов; 1987.
8. ГОСТ 8736-93. Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: МНТКС; 1993.
9. ГОСТ 965-89. Портландцементы белые. Технические условия. Москва: ИПК Издательство Стандартов; 1990.
10. ГОСТ 15825-80. Портландцемент цветной. Технические условия. Москва: Государственный строительный комитет СССР; 1983.
11. ГОСТ 23732-79. Вода для бетонов и растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2009.
12. Беленя Е.И., Стрелецкий Н.Н., Ведеников Г.С. и др. Металлические конструкции. Специальный курс / Под ред. Е.И. Беленя. Москва: Москва: Транспорт; 1982. 472 с.
13. Альдреби З.А. Сейсмическая опасность территории Сирии // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2019. № 6. С. 43–48.

14. Ambraseys N.N., Jackson J.A. Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean. *Geophys. Jour. Intern.* 1998, vol. 133, no. 2, pp. 390–406.

15. Sbeinati M.R., Darawcheh R., Mouty M. The historical earthquakes of Syria: an analysis of large and moderate earthquakes from 1365 B.C. to 1900 A.D. *Annals of Geophysics*. 2005, vol. 48, no. 3, pp. 347–435.

16. Yavartanoo F. Kang T.H.-K. Retrofitting of unreinforced masonry structures and considerations for heritage-sensitive constructions. *Journal of Building Engineering*. 2022, vol. 49, 103993.

17. Chuang S.W., Zhuge Y. Seismic Retrofitting of Unreinforced Masonry Buildings—A Literature Review. *Australian Journal of Structural Engineering*. 2005, vol. 6, no. 1, pp. 25–36.

18. Aprile A., Benedetti A., Grassucci F. Assessment of Cracking And Collapse for Old Brick Masonry Columns. *Journal of Structural Engineering*. 2001, vol. 127, no. 12, pp. 1427–1435.

19. Bruneau M. State-of-The-Art Report on Seismic Performance of Unreinforced Masonry Buildings. *Journal of Structural Engineering*. 1994, vol. 120, no. 1, pp. 230–251.

20. Kapos A.J., Penelis G.G., Drakopoulos C.G. Evaluation of Simplified Models for Lateral Load Analysis of Unreinforced Masonry Buildings. *Journal of Structural Engineering*. 2002, vol. 128, no. 7, pp. 890–897.

21. William T. Holmes and Peter Somers, editors, Northridge Earthquake of January 17, 1994 Reconnaissance Report – Volume 2, Earthquake Spectra, supplement C to Volume 11, January 1996, pp. 195–217.

22. Mahaney J.A., Paret T.F., Kehoe B.E., Freeman S.A. The capacity spectrum method for evaluating structural response during the Loma Prieta earthquake. *Proceedings of the 1993 United States National Earthquake Conference*. 1993, pp. 501–510.

23. Ghiassi B., Soltani M., Tasnimi A.A. Seismic Evaluation of Masonry Structures Strengthened with Reinforced Concrete Layers. *Journal of Structural Engineering*. 2012, vol. 138, no. 6, pp. 729–743.

24. Cassol D., Giongo I., Ingham J., Dizhur D. (2021). Seismic out-of-plane retrofit of URM walls using timber strong-backs. *Construction and Building Materials*. 2020, vol. 269, no. 4, 121237.

25. Romano F., Ganduscio S., Zingone G. Cracked Nonlinear Masonry Stability under Vertical and Lateral Loads. *Journal of Structural Engineering*. 1993, vol. 119, no. 1, pp. 69–87.

26. Priestley M.J.N., Limin H. Seismic Response of T-Section Masonry Shear Walls. *Proceedings of the Fifth North American Masonry Conference*. University of Illinois at Urbana-Champaign. 1990, pp. 359–372.

27. Ali S., Page A.W. Concentrated Loads on Solid Masonry Wall—a Parametric Study and Design Recommendations. *Proceeding Institution of Civil Engineers*. 1988, Part 2, pp. 271–289.

28. Basoenondo E.A., Thambiratman D.P., Purnomo H. Study on The Effect of Surface Mortared Confinement to The Improvement of Lateral Stiffness of Masonry Wall Panels Under Lateral Loading. *Proceedings of the Ninth North American Masonry Conference*. Clemson, South Carolina USA. 2003, pp. 370–380.

References

1. TU 5745-001-16216892-06. Shotcrete. Specifications. June 01, 2006. (In Russian).

2. TU 5745-001-02664750-2016. Dry mixture for fine-grained shotcrete concrete. Specifications. August 25, 2016. (In Russian).

3. SP 15.13330.2020. Masonry and reinforced masonry structures. Updated edition of SNiP II-22-81*. 2020. (In Russian).

4. SP 20.13330.2016. Loads and actions. Updated version of SNiP 2.01.07-85*. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. (In Russian).

5. SP 14.13330.2018. Seismic building design code. Updated edition of SNiP II-7-81*. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).

6. State Standard 24211-2003. Additives for concrete and mortars. General specifications. Moscow: MNTKS; 2003. (In Russian).

7. State Standard 10178-85. Portland cement and portland blastfurnace slag cement. Specifications. Moscow: IPK Standards Publishing House; 1987. (In Russian).

8. State Standard 8736-93. Sand for construction works. Specifications. Moscow: MNTKS; 1993. (In Russian).

9. State Standard 965-89. Portland cements, white. Specifications. Moscow: IPK Standards Publishing House; 1990. (In Russian).

10. State Standard 15825-80. Coloured portland cement. Specifications. Moscow: State Construction Committee of the USSR; 1983. (In Russian).

11. State Standard 23732-79. Water for concretes and mortars. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2009. (In Russian).

12. Belenya E.I., Streletsky N.N., Vedenikov G.S., et al. Metal constructions. Special course / Ed. E.I. Belenya. Moscow: Transport; 1982. 472 p. (In Russian).

13. Aldrebi Z.A. Seismic hazard of the territory of Syria. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety]. 2019, no. 6, pp. 43–48. (In Russian).

14. Ambraseys N.N., Jackson J.A. Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean. *Geophysical Journal International*. 1998, vol. 133, no. 2, pp. 390–406.

15. Sbeinati M.R., Darawcheh R., Mouty M. The historical earthquakes of Syria: an analysis of large and moderate earthquakes from 1365 B.C. to 1900 A.D. *Annals of Geophysics*. 2005, vol. 48, no. 3, pp. 347–435.

16. Yavartanoo F. Kang T.H.-K. Retrofitting of unreinforced masonry structures and considerations for heritage-sensitive constructions. *Journal of Building Engineering*. 2022, vol. 49, 103993.

17. Chuang S.W., Zhuge Y. Seismic Retrofitting of Unreinforced Masonry Buildings—A Literature Review. *Australian Journal of Structural Engineering*. 2005, vol. 6, no. 1, pp. 25–36.
18. Aprile A., Benedetti A., Grassucci F. Assessment of Cracking And Collapse for Old Brick Masonry Columns. *Journal of Structural Engineering*. 2001, vol. 127, no. 12, pp. 1427–1435.
19. Bruneau M. State-of-The-Art Report on Seismic Performance of Unreinforced Masonry Buildings. *Journal of Structural Engineering*. 1994, vol. 120, no. 1, pp. 230–251.
20. Kapos A.J., Penelis G.G., Drakopoulos C.G. Evaluation of Simplified Models for Lateral Load Analysis of Unreinforced Masonry Buildings. *Journal of Structural Engineering*. 2002, vol. 128, no. 7, pp. 890–897.
21. William T. Holmes and Peter Somers, editors, Northridge Earthquake of January 17, 1994 Reconnaissance Report – Volume 2, Earthquake Spectra, supplement C to Volume 11, January 1996, pp. 195–217.
22. Mahaney J.A., Paret T.F., Kehoe B.E., Freeman S.A. The capacity spectrum method for evaluating structural response during the Loma Prieta earthquake. *Proceedings of the 1993 United States National Earthquake Conference*. 1993, pp. 501–510.
23. Ghiassi B., Soltani M., Tasnimi A.A. Seismic Evaluation of Masonry Structures Strengthened with Reinforced Concrete Layers. *Journal of Structural Engineering*. 2012, vol. 138, no. 6, pp. 729–743.
24. Cassol D., Giongo I., Ingham J., Dizhur D. (2021). Seismic out-of-plane retrofit of URM walls using timber strong-backs. *Construction and Building Materials*. 2020, vol. 269, no. 4, 121237.
25. Romano F., Ganduscio S., Zingone G. Cracked Nonlinear Masonry Stability under Vertical and Lateral Loads. *Journal of Structural Engineering*. 1993, vol. 119, no. 1, pp. 69–87.
26. Priestley M.J.N., Limin H. Seismic Response of T-Section Masonry Shear Walls. *Proceedings of the Fifth North American Masonry Conference*. University of Illinois at Urbana-Champaign. 1990, pp. 359–372.
27. Ali S., Page A.W. Concentrated Loads on Solid Masonry Wall—a Parametric Study and Design Recommendations. *Proceeding Institution of Civil Engineers*. 1988, Part 2, pp. 271–289.
28. Basoenondo E.A., Thambiratman D.P., Purnomo H. Study on The Effect of Surface Mortared Confinement to The Improvement of Lateral Stiffness of Masonry Wall Panels Under Lateral Loading. *Proceedings of the Ninth North American Masonry Conference*. Clemson, South Carolina USA. 2003, pp. 370–380.

Информация об авторе / Information about the author

Зиад Ахмад Альдреби, канд. техн. наук, исследователь, преподаватель-исследователь, инженер-строитель, ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург
e-mail: ziald67@gmail.com

Ziad A. Aldrebi, Ph.D. in civil engineering, Researcher, Lecturer-researcher, Civil Engineer, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg
e-mail: ziald67@gmail.com



Вышло в свет учебное пособие «Долговечность бетона».

Автор пособия – заведующий лабораторией коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», доктор технических наук, профессор, академик Российской инженерной академии, Почетный строитель России и г. Москвы, дважды лауреат премии Правительства РФ Валентина Федоровна Степанова.

В пособии приведена теория коррозии бетона и металла, рассматривается правильный подход к выбору строительных материалов, приготовлению бетона и железобетона, обеспечивающих требуемую долговечность конструкций. Даны основные признаки коррозии бетона в жидких агрессивных средах, механизм коррозии арматуры. Показаны способы повышения коррозионной стойкости бетона и обеспечения сохранности арматуры на стадии проектирования состава бетона в процессе приготовления и эксплуатации конструкций. Приведены математические модели коррозии бетона, позволяющие совершенствовать технологию получения бетонов повышенной долговечности.

Пособие ориентировано на студентов, обучающихся по направлению «Строительство», а также будет полезно всем специалистам, занимающимся изучением бетона и железобетона.