



АВТОРЫ



ПАРУТА В.А.
Канд. техн. наук,
доцент, Одесская
государственная
академия
строительства и
архитектуры



БРЫНЗИН Е.В.,
Канд. техн. наук,
начальник отдела
маркетинга
ООО «ЮДК»

НОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ ПОЛУЧЕНИЯ ШТУКАТУРНЫХ РАСТВОРОВ

УДК 691.55

АННОТАЦИЯ

Причиной трещинообразования и развития трещин в контактной зоне кладки со штукатурным покрытием является его усадка, деформация кладки, воздействие влаги, льда и агрессивных веществ. Для решения проблемы предложены концепции: эластичного штукатурного покрытия, демпфирующей прослойки, объединенная.

Reason of cracks origin and development of cracks in the contact area of laying with clout coverage is shrinkage, deformation of laying, influence of moisture, ice and aggressive matters. For the decision of problem conceptions are offered: elastic clout coverage, antivibration layers, incorporated.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

система «кладка - штукатурное покрытие», контактная зона между ними, концепции и критерии для проектирования свойств и составов штукатурных растворов

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение доли высотного строительства и широкое применение автоклавного газобетона требуют переосмысления подхода к проектированию свойств и составов штукатурных растворов. Необходимость вызвана тем, что воздействия и нагрузки на штукатурное покрытие, находящееся на 24 этаже здания, кардинально отличаются от тех, которые испытывает такое же покрытие на 1-3 этажах (рис. 1).

Необходимо учитывать и то, что изменяется и основной кладочный материал, применяемый при возведении многоэтажных зданий. В основном на территории Украины для этого используют автоклавный газобетон со средней плотностью 150...600 кг/м³, свойства которого (прочность при сжатии, модуль упругости, температурные деформации) значительно отличаются от свойств традиционных стеновых материалов (кирпича керамического и силикатного, блоков из легкого бетона и горных пород).

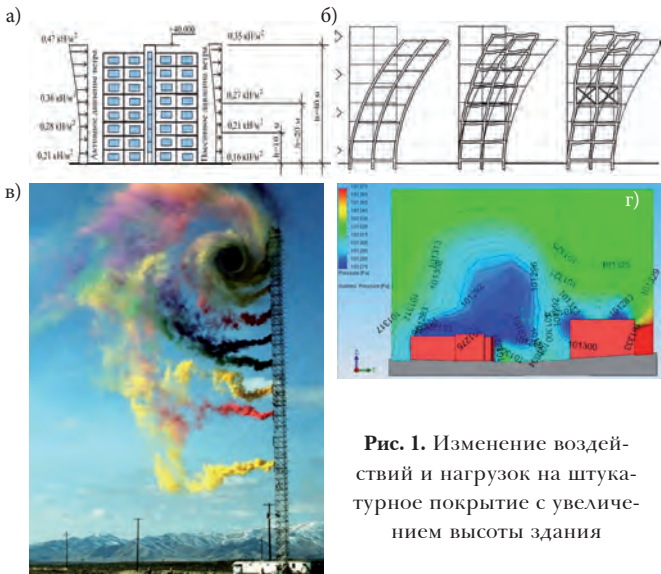


Рис. 1. Изменение воздействий и нагрузок на штукатурное покрытие с увеличением высоты здания

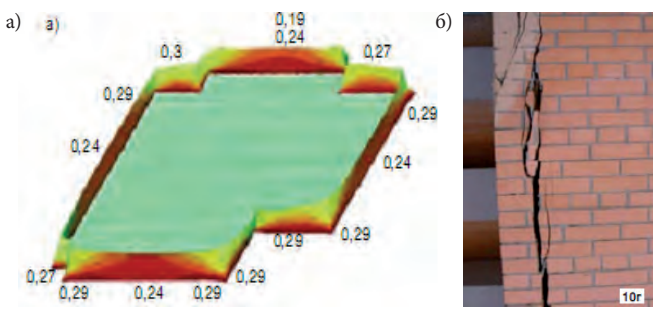


Рис. 2. Напряжения в облицовке из кирпича керамического и вызванные ими трещины

Отказ от учета этого уже имел плачевные последствия при устройстве многослойных стен с облицовкой кирпичом керамическим (рис. 2).

Решить поставленную задачу в рамках существующих представлений и принципов невозможно. Они применимы для растворов, эксплуатируемых в малоэтажном строительстве. Нормативные требования, предъявляемые к штукатурным растворам для стен из автоклавного газобетона, также этого не учитывают, они противоречивы и, по нашему мнению, не обоснованы. Так, например, прочность при сжатии должна составлять 1,5...7,5 МПа (Россия), 2,5 МПа (Украина) и 10 МПа (Германия). Прочность на изгиб должна составлять 1...1,25 МПа (Украина) и 2 МПа (Россия). Величина адгезии к газобетонной кладке должна составлять 0,15...3 МПа (Россия) и 0,5 МПа (Украина).

Для достижения требуемых целей необходима разработка новых базовых принципов проектирования свойств и составов штукатурных растворов, базирующихся на учете напряженно-деформированного состояния стеновой конструкции. Для этого необходимы знания процессов разрушения системы «кладка - штукатурное покрытие», расчет её напряженного состояния и

проектирование свойств и составов штукатурных растворов, способных работать при максимальном уровне таких напряжений.

Долговечность стеновой конструкции в значительной мере зависит от количества дефектов в штукатурном покрытии и контактной зоне между ним и кладкой. Разрушение системы «кладка - покрытие» обусловлено накоплением и развитием микро- и макротрещин, в ней. Для оценки ресурса работы системы необходимо знание процессов зарождения, накопления повреждений и роста макротрещин. Необходимы определение внутренних и внешних факторов, степень их воздействия, расчет напряженного состояния и проектирование свойств и составов штукатурных растворов, способных работать при максимальном уровне таких напряжений.

МЕХАНИЗМ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ «КЛАДКА - ШТУКАТУРНОЕ ПОКРЫТИЕ»

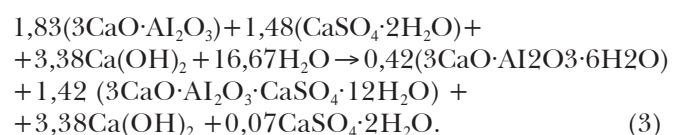
Для управления формированием контактной зоны необходимо рассмотреть происходящие в ней процессы. Кладка из автоклавного газобетона обладает высоким капиллярным потенциалом из-за значительного объема пор (520 мм³/г) и их высокой удельной поверхности (22...34 м²/г) [1]. При нанесении известково-цементной растворной смеси на кладку из-за ее низкой водоудерживающей способности происходит отсасывание жидкости из нее лиофильными порами и капиллярами материала кладки (рис. 1 а, б, в). Скорость заполнения поры (v) определяется уравнением Пуазейля:

$$v = -\frac{r^2 \Delta p}{8\eta l}, \quad (1)$$

где l - длина участка впитавшейся жидкости, η - ее вязкость, Δp - перепад давления на участке l , равный капиллярному давлению мениска:

$$\Delta p = -2\sigma_{sl} \cos \theta / r. \quad (2)$$

Поэтому растворение цемента и образование пересыщенного раствора происходит при пониженном содержании воды. Из-за этого происходит неполная гидратация цемента, образуются неравновесные, метастабильные новообразования типа:



Потеря воды приводит также к усадке штукатурного раствора (пластической и гидра-

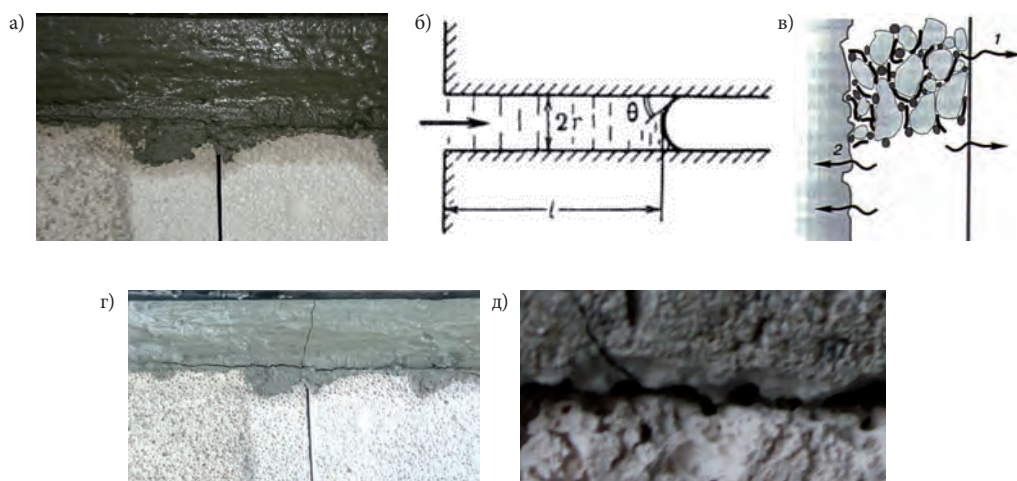


Рис. 3. Трещинообразование: в контактной зоне «кладка - покрытие»

α_t - коэффициент температурного расширения автоклавного газобетона, $\alpha_t = 8 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ [1, 5], Δt - изменение температуры стеновой конструкции; t_1 - температура окружающей среды в момент возведения газобетонной кладки; t_2 - максимальная и минимальная температуры, воздействию которых подвергается стеновая конструкция в летний и зимний периоды.

Зимой, при -20°C , для кладки, выполненной летом при температуре

$+30^\circ\text{C}$, при коэффициенте температурного расширения газобетонной кладки $8 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и изменении температуры от $+30$ до -20°C , т.е. $\Delta t = 50^\circ\text{C}$, полная деформация сжатия составит:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha_t \cdot \Delta t = 8 \cdot 0,000008 \cdot 50 = 0,0032 \text{ м} = 3,2 \text{ мм}; \Delta t = 50^\circ\text{C}.$$

Летом, при нагреве до $+80^\circ\text{C}$ [1], деформация расширения составит:

тационной): гидратационная - $0,3 \dots 0,8$ мм (в среднем $0,4 \dots 0,5$ мм/м), пластическая - $2 \dots 5$ мм/м [2]. В результате, в контактной зоне «кладка - покрытие» образуются трещины и полости (рис. 3 г, д).

При эксплуатации они развиваются и объединяются в магистральную трещину. Причинами развития трещин в контактной зоне являются деформации кладки (температурные, влажностные) (рис.4) [3, 4], разность деформаций штукатурного покрытия и кладки, воздействия влаги, льда и агрессивных веществ.

Величину линейных изменений размеров кладки при температурных воздействиях определяют из выражения [5]:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha_t \cdot \Delta t; \quad (4)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1, \quad (5)$$

где: ΔL - относительное удлинение или сокращение стеновой конструкции; L_0 - длина стеновой конструкции на момент возведения;

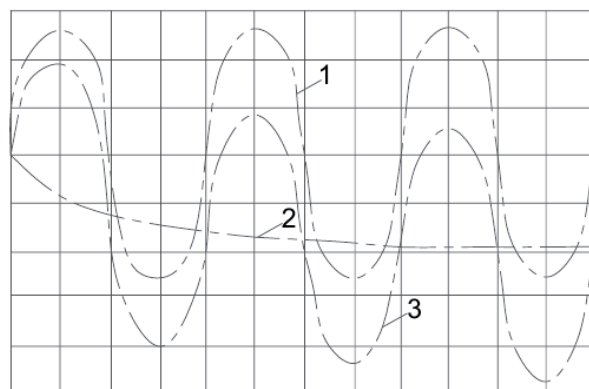


Рис. 5. Температурные (1), усадочные (2) и суммарные деформации (3) стеновой конструкции при эксплуатации

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha_t \cdot \Delta t = 8 \cdot 0,000008 \cdot 50 = 0,0032 \text{ м} = 3,2 \text{ мм}; \quad \Delta t = 50^\circ\text{C}.$$

В общем виде графики деформации стеновой конструкции показаны на (рис. 5). Наибольшие деформации расширения проявляются летом, а для зимы характерны самые большие деформации сжатия.

Кладка и штукатурное покрытие имеют разные по величине температурные деформации. Зимой деформация сжатия штукатурно-

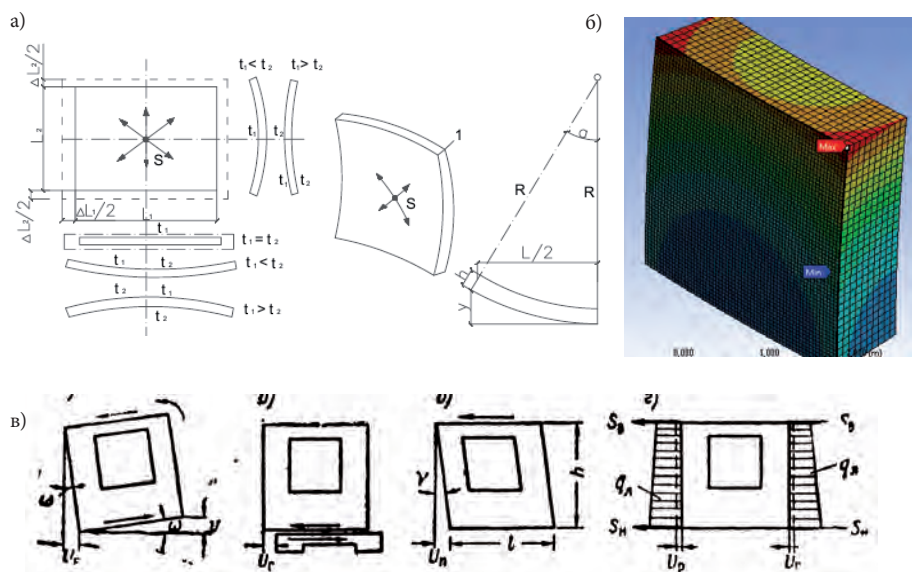


Рис. 4. Температурные и влажностные деформации кладки (а, в) и напряжения в ней (б)



го раствора (цементный раствор 1:4) составит 0,55 мм/м, а полная деформация штукатурного покрытия, например, стены длиной 8 м:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha_i \cdot \Delta t = 8 \cdot 0,0000104 \cdot 50 = 0,0044 \text{ м} = 4,4 \text{ мм};$$

$$\Delta t = 50^\circ \text{C}.$$

Деформация сжатия штукатурного раствора (сложный раствор) составит 0,3 мм/м, а полная деформация штукатурного покрытия:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha_i \cdot \Delta t = 8 \cdot 0,000006 \cdot 50 = 0,0024 \text{ м} = 2,4 \text{ мм};$$

$$\Delta t = 50^\circ \text{C}.$$

Летом деформация расширения штукатурного раствора (цементный раствор 1:4) составит 0,55 мм/м, а полная деформация штукатурного покрытия:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha_i \cdot \Delta t = 8 \cdot 0,0000104 \cdot 50 = 0,0044 \text{ м} = 4,4 \text{ мм};$$

$$\Delta t = 50^\circ \text{C}.$$

Деформация расширения штукатурного раствора (сложный раствор) составит 0,3 мм/м, а полная деформация:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha_i \cdot \Delta t = 8 \cdot 0,000006 \cdot 50 = 0,0024 \text{ м} = 2,4 \text{ мм};$$

$$\Delta t = 50^\circ \text{C}.$$

Деформации расширения или сжатия вызывают напряжения (σ) в кладке и штукатурном покрытии, которое можно определить, преобразовав уравнение:

$$\Delta L : L_0 = \sigma : E, \quad (6)$$

где: ΔL - относительное удлинение или сокращение стеновой конструкции; L_0 - длина стеновой конструкции на момент возведения; σ - напряжения в Н/мм²; E - модуль упругости в Н/мм² [5].

Деформации кладки (рис. 6а), разность деформаций и модулей упругости ее и штукатурного покрытия, являются причиной деформаций сдвига в контактной зоне «кладка - штукатурное покрытие» (рис. 6б).

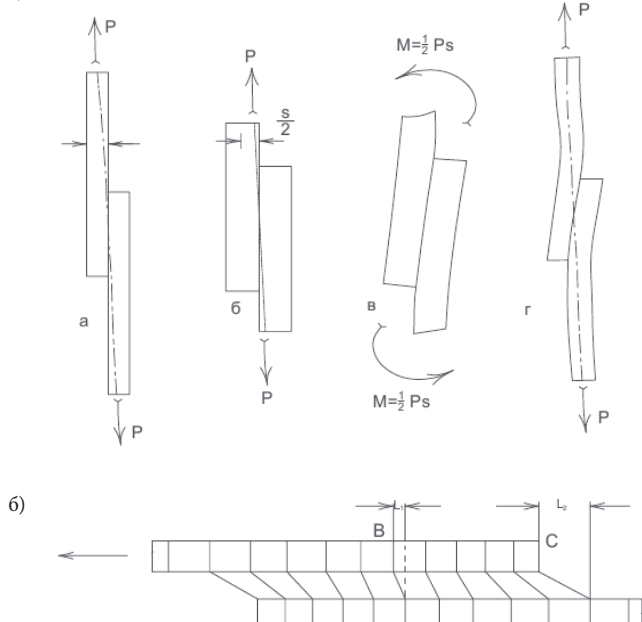


Рис. 6. Изгиб стеновой конструкции (а) и деформации сдвига в контактной зоне «кладка - покрытие» (б)

покрытие» (рис. 6а, б).

Как следствие, в контактной зоне между ними возникают напряжения сдвига (τ) (рис. 7), которые определяют развитие трещины в контактной зоне:

$$\tau = [\Delta T_1 \alpha_1 - \Delta T_2 \alpha_2] \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right], \quad (7)$$

где: τ - напряжение сдвига от температурных деформаций, кгс/см²; $\Delta T_1, \Delta T_2$ - разность температуры в момент устройства и эксплуатации штукатурного покрытия и кладки, °С; α_1, α_2 - коэффициент температурного расширения кладки и штукатурного покрытия; E_1, E_2 - модули упругости кладки и штукатурного покрытия, кгс/см².

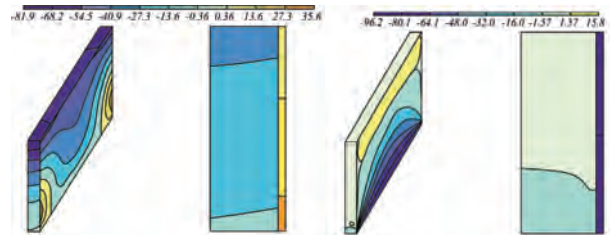


Рис. 7. Температурные деформации (а) и напряжения сдвига (б) в контактной зоне «кладка - покрытие».

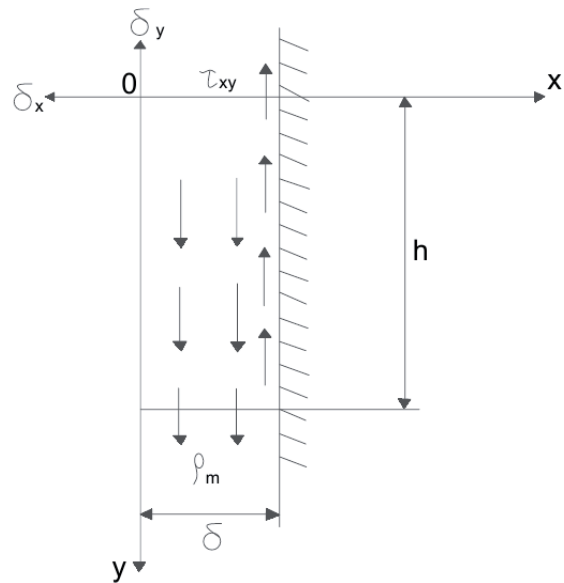


Рис. 8. Касательные напряжения в контактной зоне «кладка - покрытие» из-за массы покрытия

На поле напряжений, возникающем в контактной зоне, из-за разности температурных и влажностных деформаций накладываются касательные напряжения (τ_k) из-за массы штукатурного покрытия (рис. 8) [6].

$$\tau_k = \rho \cdot \left(-\frac{1,5 \cdot \delta^3}{h^2} - 4 \cdot \delta \right), \quad (8)$$

где: δ - толщина штукатурного покрытия, м; ρ - средняя плотность штукатурного раствора, кг/м³;



τ_k - напряжения в контактной зоне; h - высота штукатурного покрытия, м;

Разрушение контактной зоны обусловлено действием как тангенциальных напряжений, так и растягивающими усилиями в перпендикулярном направлении к плоскости стены. Напряжения распределены неравномерно, поэтому участки, подвергающиеся более высоким напряжениям, разрушаются в первую очередь, уменьшая тем самым прочность всей контактной зоны в целом. Эти напряжения могут превысить адгезионную прочность, и тогда происходит старт магистральной трещины.

Этот процесс включает зарождение и развитие микротрещин в зоне предразрушения и их объединение в макротрещину. Основной причиной ее развития является изменение деформации и напряжения в вершине трещины, возникающие при увлажнении и нагревании стеновой конструкции, замораживании и оттаивании влаги, находящейся в трещине. При нагревании или увлажнении или при их совместном воздействии, происходит рост деформаций, что приводит к увеличению радиуса кривизны вершины трещины. До тех пор, пока уровень напряжений будет меньше предельного значения адгезионной прочности, трещина не растет. При дальнейшем росте деформации напряжения в устье трещины превзойдут предельный уровень, что приведет, к ее подрастанию (рис. 9).

На обратном ходе цикла нагружения (снижении температуры или влажности), происходит частичное восстановление геометрии вершины трещины и размера упругопластической зоны, однако, в дальнейшем трещина увеличивает свою длину.

Разрушение имеет усталостный характер, при относительно низком уровне напряжений и частой их цикличности. Это связано с характером разрушающей нагрузки и тем, что и в процессе возникновения трещины и ее распространения участвует пластическая деформация из-за наличия цементного геля, так как в противном случае ничто не останавливало бы трещину от бесконечного роста во время одного цикла нагружения. Трещина может остановиться на некоторое вре-

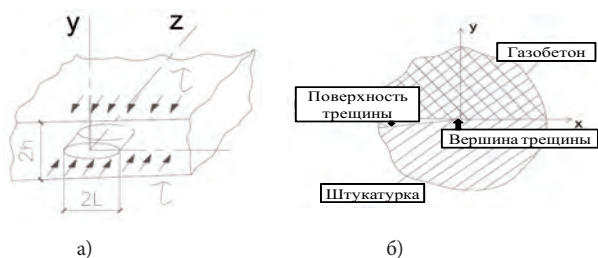


Рис. 9. Старт магистральной трещины в контактной зоне «кладка-покрытие»

мя, так как не хватает энергии на обеспечение динамического роста, но в дальнейшем происходит ее развитие. Скорость развития магистральной трещины (dl/dN) определяется уравнением [7]:

$$dl/dN = A(\Delta K)^n, \quad (9)$$

где: N - число циклов; A и n - эмпирические коэффициенты, $n = 2 - 7$, с увеличением хрупкости материала n увеличивается; $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ - перепад коэффициента интенсивности напряжений за один цикл. Коэффициент интенсивности напряжений цементного раствора в зависимости от В/Ц отношения имеет следующие значения: при В/Ц=0,35...0,67 коэффициент интенсивности напряжений составляет 0,8...0,41.

Влага также способствует развитию магистральной трещины. Причин появления влаги в контактной зоне несколько. Это и наличие на фасаде плотной, с низкой паропроницаемостью штукатурки, что приводит к конденсации и накоплению парообразной влаги, идущей из помещения, между штукатурным слоем и наружной плоскостью кладки. Атмосферная влага проникает через трещины (более 0,2 мм) в контактную зону благодаря гидрофильности материала, а также кинетической энергии, которой она обладает, скатываясь по плоскости стены [8]. Попадая в трещину, вода получает повышенную плотность и вязкость, а ее упругость становится равной упругости материала. Упругость влаги повышается к вершине трещины и в результате увеличивается расклинивающее действие влаги. В устье магистральной трещины возникают растягивающие напряжения (рис. 10а), что приводит к значительному снижению адгезионной прочности и дальнейшему развитию магистральной трещины в контактной зоне.

При минусовых температурах в зимнее время развитие магистральной трещины в контактной зоне интенсифицируется из-за образования льда. Влажность газобетона возле контактной зоны может достигать 46%. Несмотря на высокую морозостойкость газобетона, при влажности более 30% и минусовых температурах наступает его разру-

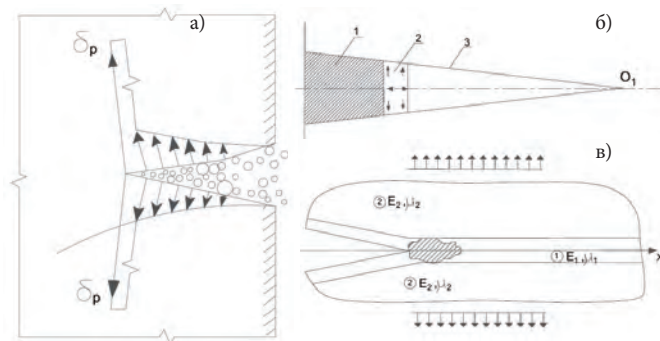


Рис. 10. Развитие магистральной трещины в контактной зоне под воздействием воды (а) и льда (б, в)



шение [9]. Отслоение штукатурного покрытия происходит за счет образования льда в контактной зоне, либо за счет постепенного разрушения материала кладки в зоне, расположенной рядом с контактной зоной (рис. 10 б, в) [8].

В результате, на фасаде образуется большое количество макротрещин в контактной зоне, которые постоянно развиваются. На определенном этапе они объединяются в одну магистральную трещину, образуя полость, что приводит к отслоению штукатурного покрытия от кладки (рис. 11).



Рис. 11. Разрушение и отслоение штукатурного покрытия от газобетонной кладки

Предварительное грунтование или увлажнение газобетонной кладки перед нанесением штукатурной смеси малоэффективно, так как не предотвращает испарение влаги из штукатурки со стороны фасада, а поэтому существенно не влияет на основные свойства раствора.

Для того, чтобы избежать деструктивных процессов, разработаны теоретические предпосылки. Штукатурный раствор следует рассматривать как покрытие, связанное с кладкой через контактную зону. Ранее мы рассматривали процессы, протекающие в штукатурном покрытии, а в этой работе акцентируем внимание на формировании качественной контактной зоны. Необходимо использовать компоненты смеси в нужном количестве с учетом процессов, протекающих в контактной зоне при твердении штукатурного покрытия и разрушении системы «кладка - покрытие» при эксплуатации. Их использование должно обеспечить уровень напряжений в контактной зоне, меньших, чем разрушающие, необходимо также уменьшить трещинообразование и замедлить развитие образовавшихся трещин.

Ранее превалировала точка зрения, что штукатурные растворы должны иметь высокую адгезию к кладке. Однако, если прочность штукатурного раствора будет больше прочности материала кладки, то это приведет к когезионному разрушению, то есть по материалу кладки.

Автором предложены три концепции для решения проблемы: эластичного штукатурного покрытия, демпфирующей прослойки между кладкой и штукатурным покрытием, а также объединенная, по которой эластичными должны быть как штукатурное покрытие, так и контактная зона.

Концепция эластичного штукатурного покрытия исходит из того, что деформации кладки (температурные, усадочные и др.) компенсируются за счет эластичности (упругой растяжимости) штукатурного покрытия, для чего материал, имеющий адгезионное сцепление с основанием, должен обладать достаточным удлинением. Заданная величина относительного удлинения будет перекрывать деформации кладки, предотвращать образование и развитие трещин, исключая разрушение штукатурного покрытия. При этом предпочтительно, чтобы материал работал в упругой стадии и имел величину остаточного относительного удлинения.

Концепция демпфирующего слоя предполагает, что при деформации кладки растягивающие усилия воспринимаются за счет эластичности контактной зоны между кладкой и покрытием. И в этом случае прочность на разрыв штукатурного покрытия также должна превышать растягивающие в нем напряжения. Но основной демпфирующий эффект берет на себя уже контактная зона. Для штукатурных покрытий наружных стен существует условие отсутствия растрескивания и отслаивания в условиях эксплуатации, которое сводится к тому, что адгезионная прочность должна быть выше внутренних усадочных напряжений в покрытии и ниже предела прочности при растяжении материала покрытия. В связи с этим для повышения его трещиностойкости необходимо формирование эластичной контактной зоны в виде прослойки из материала с высокой эластичностью. Этого можно добиться целенаправленным формированием контактной зоны «кладка - покрытие» или предварительным нанесением на кладку полимерцементной смеси с увеличенным содержанием редиспергируемого полимерного порошка.

Объединенная концепция предусматривает формирование как эластичного штукатурного покрытия, так и контактного слоя между кладкой и покрытием.

Для обеспечения реализации концепций формализованы критерии требований к штукатурному покрытию:

1. Проверка прочности сцепления штукатурного слоя с кладкой выполняется по формуле, определяющей величины напряжения при растяжении:

$$\sigma = \frac{F_k}{A_k} \leq R_a, \quad (10)$$



где: F_k – реакция в податливой связи метода конечных элементов, кН; A_k – площадь элемента, м²; R_a – расчетный предел прочности сцепления штукатурного покрытия с газобетонным основанием, кПа.

2. Сдвигающее напряжение (τ) должно быть меньше прочности сцепления покрытия с кладкой:

$$\tau = [\Delta T_1 \alpha_1 - \Delta T_2 \alpha_2] / \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right], \quad (11)$$

где: τ – напряжение сдвига от температурных деформаций, кгс/см²; ΔT_1 , ΔT_2 – разность температуры штукатурного покрытия и кладки, °С; α_1 , α_2 – коэффициент термического расширения кладки и штукатурного покрытия; E_1 , E_2 – модули упругости кладки и штукатурного покрытия, кгс/см²;

Используя эти концепции и критерии, мы получаем основу для управления качеством контактной зоны в системе «кладка - покрытие».

Способы реализации теоретических предпосылок

Для обеспечения оптимальных условий твердения, предотвращения трещинообразования в контактной зоне, растворная смесь должна иметь высокую водоудерживающую способность. Для этого в смесь необходимо вводить известь взамен части цемента, известняковую муку, эфиры целлюлозы и релаксируемые полимерные порошки. В результате получаем цементно-полимерную массу, по реологическим параметрам приближающуюся к мастикам. Теперь для формирования качественной контактной зоны можно использовать высокий капиллярный потенциал материала кладки. Это обеспечит присасывание вязкой массы при помощи всасывающего давления (ΔP), которое можно вычислить из уравнения Пуазейля [10]:

$$(r^2 \Delta P) / 8 \eta \ell, \quad (12)$$

где r – радиус капилляра, м; ΔP – всасывающее давление капилляра, Па; η – динамическая вязкость жидкого реагента растворной смеси, Па·с; ℓ – глубина проникновения жидкого реагента растворной смеси, м; t – время, с.

Изменение микроструктуры пор, при всасывании, может быть рассмотрено на основе баланса энергии на границе раздела фаз:

$$\sigma_m = 2\sigma_m - \frac{p \cos \theta}{2}, \quad (13)$$

где σ_m – поверхностное натяжение материала кладки, кДж/м²; σ_{m-p} – поверхностная энергия на границе раздела фаз жидкого реагента растворной смеси и материала кладки, кДж/м²; θ – краевой угол смачивания, °. Тогда значение всасывающего давления поры (ΔP) будет равно:

$$\Delta P = 2\sigma_p \cos \theta / r, \quad (14)$$

где σ_p – поверхностное натяжение жидкого реагента растворной смеси и штукатурного раствора; кДж/м².

Преобразовывая формулы (12) и (15), можем определить глубину проникновения жидкой фазы (ℓ) и ее количество (D) при помощи уравнения Эйнштейна (17):

$$\frac{dl}{d\tau} = r \sigma_p \cos \theta / 4, \quad (15)$$

Объединив и преобразовав обе стороны уравнения (4), получаем:

$$\ell^2 = \left(\frac{r \cos \theta}{2} \right) (\sigma_p / \eta) \tau; \quad (16)$$

$$D = \frac{k T}{6 \pi \eta r}, \quad (17)$$

где D – количество жидкого реагента растворной смеси, м²/с; r – радиус частиц диффундирующего вещества, м.

Из уравнений (12-17) следует, что скорость проникновения жидкого реагента растворной смеси уменьшается с повышением его вязкости. По мере протекания реакции гидратации вязкость жидкого реагента растворной смеси увеличится так, что дальнейшее ее проникновение в капилляры материала кладки становится невозможным. Однако благодаря присасывающему эффекту капиллярных пор (рис. 10 а), крупные поры-ячейки автоклавного газобетона оказываются полностью заполненными растворной смесью, что обеспечивает формирование контактной зоны с минимальным количеством дефектов (рис. 12 б).

Во время проникновения жидкого реагента растворной смеси, в реакцию вступает жидкость и твердое вещество материала кладки, что обеспечивает анкерующий эффект (рис. 12а), прочно фиксирующую



Рис. 12. Схема формирования контактной зоны «кладка-покрытие» (а) и ее фотографии (б): 1 – растворная смесь, в ячейке-поре; 2 – капилляры в стенке крупной поры ячеистого бетона



щий штукатурное покрытие на поверхности кладки. В результате формируется эластичная, с малым количеством дефектов, контактная зона между кладкой и штукатурным покрытием (рис. 126).

Формирование эластичной контактной зоны, наряду с образованием штукатурного покрытия с повышенной эластичностью, меняет качественную картину работы системы «кладка - покрытие». Трещиностойкость такого покрытия в значительной мере, наряду с их собственной деформативностью, определяется интенсивностью взаимодействия покрытий с кладкой. При соотношении (18) обеспечивается предотвращение растрескивания и отслаивания:

$$A > \sigma_y < \sigma_p, \quad (18)$$

где A – адгезия штукатурного покрытия к поверхности кладки, МПа; σ_y – внутреннее усадочное напряжение в покрытии, МПа; σ_p – предел прочности при растяжении материала покрытия и кладки, МПа.

Относительное деформирование контактной зоны увеличивается за счет изменения модулей упругости и пластичности [10]:

$$e_t = \frac{\sigma_t}{E_y} + \frac{\sigma_e}{E_3(1 - e^{-\frac{t}{\theta}})} + \frac{(\sigma_t - \sigma_0)^\beta}{\eta_0} \cdot t e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (19)$$

где e_t – относительная деформация от напряжения σ_t ; E_y – модуль упругости материала МПа; E_3 – модуль пластичности, МПа; θ – время релаксации напряжений, с; σ_0 – предел длительной прочности, МПа; β – мера аномальности вязкости для аномально вязких материалов, какими являются мастики и штукатурки на полимерцементных вяжущих; η_0 – наибольшая структурная вязкость не разрушенной структуры материала, Па·с.

Из зависимостей следует, что температурные напряжения в штукатурном покрытии (20) и контактной зоне (21, 22), из-за релаксации напряжений и меньшего значения модуля эластичности снижаются, при условии, что время (t) изменения температуры (T) больше времени релаксации θ :

$$\sigma_t = (L_0 - L_n) (T_{max} - T_{min}) E_y, \quad (20)$$

где: L_0, L_n – коэффициенты линейного температурного расширения основания (кладка) и покрытия, соответственно; T_{max}, T_{min} – максимальная и минимальная температура покрытия, соответственно.

Для контактной зоны с повышенной эластичностью:

$$\sigma_t = \frac{(L_n - L_0)(T_{max} - T_{min}) E_y E (1 - e^{-\frac{t}{\theta}})}{E_y + E (1 - e^{-\frac{t}{\theta}})}, \quad (21)$$

$$\tau = [\Delta T_1 \alpha_1 - \Delta T_2 \alpha_2] / \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right], \quad (22)$$

Приведенные выкладки свидетельствуют о том, что реализация предложенных концепций и критериев позволят уменьшить напряжения в системе «кладка-покрытие» и трещинообразование на стадии нанесения и твердения растворной смеси и их развитию на стадии эксплуатации. А это позволит увеличить долговечность стеновой конструкции, уменьшить эксплуатационные затраты.

ВЫВОДЫ

Снижение долговечности стеновой конструкции происходит из-за разрушения и отслоения штукатурного покрытия от кладки. В работе рассмотрен механизм трещинообразования в контактной зоне системы «кладка - покрытие», предложены концепции и критерии, позволяющие проектировать свойства и составы штукатурных растворов обеспечивающих оптимальную работу системы «кладка - покрытие».

Концепция эластичного штукатурного покрытия исходит из того, что деформации кладки (температурные, усадочные и др.) компенсируются за счет эластичности (упругой растяжимости) штукатурного покрытия, для чего материал, имеющий адгезионное сцепление с основанием, должен обладать достаточным относительным удлинением.

Концепция демпфирующего слоя предполагает, что при деформации кладки растягивающие усилия воспринимаются за счет эластичности контактной зоны между кладкой и покрытием.

Объединенная концепция предусматривает формирование как эластичного штукатурного покрытия, так и контактного слоя между кладкой и покрытием.

Реализация предложенных концепций и критериев позволит уменьшить трещинообразование в системе «кладка - покрытие» на стадии нанесения и твердения растворной смеси и их развитию на стадии эксплуатации. А это приведет к увеличению долговечности стеновой конструкции, уменьшит эксплуатационные затраты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галкин С.Л. Применение ячеистобетонных изделий. Теория и практика / [Галкин С.Л., Сажнев Н.П., Соколовский Л.В. и др.] – Минск: НП ООО "Стринко", 2006. – 458 с.
2. Кнатько М.В. К вопросу о долговечности и энергоэффективности современных ограждающих стеновых конструкций жилых, административных и производственных зданий / Кнатько М.В., Ефименко М.Н., Горшков А.С. // Инженерно-строительный



- журнал. – 2008. – № 2. – С. 50-53.
3. Волдржих Ф. Деформационные швы в конструкциях наземных зданий / Волдржих Ф. – М.: Стройиздат, 1978. – С. 209-221.
 4. Емельянов А.А. Повреждения наружных панелей жилых полносборных зданий при температурных деформациях по данным натурных исследований / Емельянов А.А. // Анализ причин аварий и повреждений строительных конструкций. – М.: Издательство литературы по строительству, 1964. – Вып. 2. – С. 153-177.
 5. Блази В. Справочник проектировщика. Строительная физика / В. Блази – М.: Техносфера, 2005. – 536 с.
 6. Основи виробництва стінових та оздоблювальних матеріалів / [Рунова Р.Ф., Шейнич Л.О., Гелевера О.Г., Гоц В.І.]. – К.: КНУБА, 2001. – 354 с.
 7. Партон В.З. Механика упруго-пластического разрушения / Партон В.З., Морозов Е.М. – М.: Наука, 1985. – 504 с.
 8. Гранау Е. Предупреждение дефектов в строительных конструкциях / Гранау Е. – М.: Стройиздат, 1980. – С. 217.
 9. Гринфельд Г.И. Инженерные решения обеспечения энергоэффективности зданий. Отделка кладки из автоклавного газобетона : учеб. пособие / Г.И. Гринфельд. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 130 с.
 - outward panels of dwellings fullcollapsible buildings at temperature deformations from data of model researches]. Analiz prichin avariij i povrezhdenij stroitel'nyh konstruktzij - Analysis of reasons of failures and damages of build constructions – М.: Publishing house of literature on building. – Vol.2. – P. 153-177 [in Russian].
 5. V. Blazi (2005). Spravochnik proektirovshchika. Stroitel'naja fizika. [Reference book of designer. Build physics.] – Moscow: Tehnosfera. – 536 p. [in Russian].
 6. Runova R.F. (2001). Osnovi virobництва stinovyh ta ozdobyval'nyh materialiv [Bases of production of wall and finishings materials]. – Kyiv: KNUBA, 2001. – 354 p. [in Ukrainian].
 7. Parton V.Z. (1985). Mehanika uprugoplastychnogo razrusheniya [Mechanics of resiliently-plastic destruction]. – Moscow: RIF «Nauka». – 504 p. [in Russian].
 8. Granau E. (1980). Preduprezhdenie defektov v stroitel'nyh konstruktciyah [Warning of defects in building constructions]. – Moscow: RIF «Strojizdat». – 217 p. [in Russian].
 9. Grinfeld G. (2011). Inzhenernoe obespechenie energo-effektivnyh zdaniij. Otdelka zdaniij iz avtoklavnogo gazobetona [Engineering decisions of providing energy efficiency buildings. Finishing of laying from an autoclave aerocrete]. – SPb.: Izd-vo Politehn. In-ta. – 130 p. [in Russian].

REFERENCES

1. Galkin S.L., Sagnev N.P. & Sokolovskij L.V. (2006). Primenenie jacheistobetonnyh izdelij. Teorija i praktika [Application of cellular concrete wares. Theory and practice]. – Minsk: NP ООО "Strinko". – 458 p. [in Russian].
2. Knat'ko M.V., Efimenko M.N. & Gorshkov A.S. (2008). K voprosu o dolgovechnosti i energoefektivnosti sovremennyh ograzdayuchih stenovyh konstruktzij zilyh, administrativnyh i proizvodvennyh zdaniij [To the question about longevity and energy efficiency of modern non-load-bearing wall constructions of dwellings, administrative and production buildings]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering building magazine. No 2. – P. 50-53 [in Russian].
3. Voldrzhij F. (1980). Deformacionnye shvy v nazemnyh konstruktciyah zdaniij [Deformation guy-sutures in the constructions of surface buildings]. – Moscow: RIF «Strojizdat». – 224p. [in Russian].
4. Emel'yanov A.A. (1964). Povrezhdenia naruzhnyh paneley zilyh polosbornykh zdaniij pri temperaturnykh deformatsiyah po dannym naturnykh issledovaniij [Damages of