

УДК 691.002

## НОВІ КОНЦЕПЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ШТУКАТУРНИХ РОЗЧИНІВ

ПАРУТА В.А. 1\*, к.т.н., доц.

БРИНЗИН Є.В. 2\* к.т.н.

1\*Каф. ПАТБМ Одеська державна академія будівництва і архітектури (ОГАСА), вул.\*Дідріхсона 4, м. Одеса, 65029,

Україна, e-mail: docent2155@gmail.com, тел. 0487238434, ORCID ID: 0000-0003-0326-8021

2\*ТОВ «ЮДК», вул. Александра Оцупа, 7Д, м. Дніпро, 49051, Україна, www.udkgazbeton.com, e-mail:

Yevgen.Brynzin@udkgazbeton.com, тiл.+380(562)33-80-09

**Анотація. Мета.** Розробити концепції і критерії для призначення властивостей та розрахунку складу штукатурних розчинів. У роботі запропоновані концепції: 1.Еластичного штукатурного покриття; 2.Демпфуючого прошарку між кладкою і штукатурним покриттям; 3.Об'єднаної, по якій еластичними мають бути як штукатурне покриття, так і контактна зона. Проектування складів і властивостей, штукатурних розчинів необхідно вести з урахуванням критеріїв - напруг, що виникають в контактній зоні тому що відбувається усадка штукатурного покриття і різниці його деформацій з кладкою при твердінні, а також деформацій стінової конструкції і самого покриття при експлуатації. Необхідно забезпечити такий рівень напруг в штукатурному покритті і контактній зоні до величин, менших, за руйнівні. Важливим елементом системи «кладка-штукатурне покриття» є контактна зона між ними. Вона значною мірою зумовлює спільність їх роботи у складі стінової конструкції. Для управління її формуванням необхідно розглянути процеси, що протікають в ній, при нанесенні штукатурного розчину, його твердінні та експлуатації стінової конструкції. **Методика.** Для розуміння процесів, що відбуваються в контактній зоні системи «кладка-покриття» застосовано моделювання роботи системи. Результати також отримані шляхом розрахунку напруги в контактній зоні за допомогою формул, програм «Ансис», «Ліра», на підставі експериментальних і літературних даних фізико-механічних характеристик газобетонної кладки і штукатурних розчинів. **Результати.** Отримані данні підтверджують, правильність запропонованих концепцій і те, що одним з основних критеріїв при призначенні властивостей і складів штукатурних розчинів, мають бути напруги в контактній зоні системи «кладка-покриття». **Наукова новизна.** У роботі запропоновані нові концепції які треба застосовувати при проектуванні властивостей і складів штукатурних розчинів. Розвинені уявлення про критерії відповідно до яких повинні призначатися властивості і проектуватися складу штукатурних розчинів. **Практична значущість.** Запропоновані концепції та критерії, виходячи з яких необхідно призначати властивості і проектувати склад штукатурних розчинів.

**Ключові слова:** система «кладка - штукатурне покриття», контактна зона в цій системі, концепції і критерії для проектування властивостей і складу штукатурних розчинів.

## НОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШТУКАТУРНЫХ РАСТВОРОВ

ПАРУТА В.А. 1\*, к.т.н., доц.

БРЫНЗИН Е.В. 2\* к.т.н.

1\* Кафедра ПАТСМ, Одесская государственная академия строительства и архитектуры (ОГАСА), ул. Дидрихсона 4, г.

Одесса, 65029, Украина, тел. 0487238434, [www.paruta.at.ua](http://www.paruta.at.ua), e-mail: [docent2155@gmail.com](mailto:docent2155@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-0326-80212\*ООО «ЮДК», ул. Александра Оцупа, 7Д, г. Днепр, 49051, Украина, [www.udkgazbeton.com](http://www.udkgazbeton.com), e-mail:[Yevgen.Brynzin@udkgazbeton.com](mailto:Yevgen.Brynzin@udkgazbeton.com)

**Аннотация. Цель.** Разработать концепции и критерии для назначения свойств и подбора состава штукатурных растворов. В работе предложенные концепции: 1.Еластичного штукатурного покрытия; 2.Демпфирующей прослойки между кладкой и штукатурным покрытием; 3.Объединенной: эластичными должны быть как штукатурное покрытие, так и контактная зона. Проектирование составов и свойств, штукатурных растворов, необходимо вести с учетом критериев - напряжений, которые возникают в штукатурном покрытии из-за его усадки и разницы деформаций с кладкой, при твердевании, а также деформаций стеновой конструкции и самого покрытия при эксплуатации. Необходимо обеспечить такой уровень напряжения в штукатурном покрытии и контактной зоне с величинами, меньшими, за разрушительные. Важным элементом системы «кладка-штукатурное покрытие» является контактная зона между ними. Она в значительной мере предопределяет общность их работы в составе стеновой конструкции. Для управления ее формированием необходимо рассмотреть процессы, которые протекают в ней, при нанесении штукатурного раствора, его твердении и эксплуатации стеновой конструкции. **Методика.** Для понимания процессов, которые происходят в контактной зоне ситемы «кладка-покрытие» применено моделирование работі системі «кладка-покрытие». Результаты также получено путем расчета напряжения в контактной зоне с помощью формул, программ «Ансис», «Ліра», на основании экспериментальных и литературных данных физико-механических характеристик газобетонной кладки и штукатурных растворов. **Результаты.** Полученные данные подтверждают правильность предложенных концепций и то, что одним из основных критериев при назначении свойств и составов штукатурных растворов, должны быть напряжения в контактной зоне системы «кладка-покрытие». **Научная новизна.** В работе предложены новые

концепции которые нужно применять при проектировании свойств и составов штукатурных растворов. Развитие представления о критериях в соответствии с которыми должны назначаться свойства и проектироваться составы штукатурных растворов. **Практическая значимость.** Предложенные концепции и критерии, исходя из которых необходимо назначать свойства и проектировать составы штукатурных растворов.

**Ключевые слова:** система «кладка-штукатурное покрытие», контактная зона в этой системе, концепции и критерии, для проектирования свойств и составов штукатурных растворов.

## NEW CONCEPTS OF PROJECTION PLASTERS

PARUTA V.A., PhD1\*

BRYNZIN I.V., PhD 2\*

1\*Department of Building Materials, Odessa State Academy of Construction and Architecture (OGASA), 4 Didrihsone st., Odesa, 65029, Ukraine, tel. 0487238434, e-mail: [docent2155@gmail.com](mailto:docent2155@gmail.com), [www.paruta.at.ua](http://www.paruta.at.ua), ORCID ID: 0000-0003-0326-8021

2\*UDK LLC, 7D Olexandra Otsupa st., Dnipro, 49051, Ukraine, [www.udkgazbeton.com](http://www.udkgazbeton.com), [Yevgen.Brynzin@udkgazbeton.com](mailto:Yevgen.Brynzin@udkgazbeton.com)

**Annotation. Purpose.** To develop concepts and criteria for purpose of properties and selection of composition of plaster solutions. In work the offered concepts: 1. Elastances of a plaster covering; 2. The damping layer between a laying and a plaster covering; 3. Integrated on which both the plaster covering, and a contact zone have to be elastic. Projection of structures and properties, plaster solutions, it is necessary to conduct taking into account criteria - tension which arises in a plaster covering because of its contraction and a difference of deformations with a laying at a tverdevaniye, and also deformations of a wall design and the covering at operation. It is necessary to provide such level of tension in a plaster covering and a contact zone with sizes, smaller, for destructive. Important element of system "the laying-shtukaturne a covering" is a contact zone between them. It considerably predetermines a community of their work as a part of a wall design. For management of its formation it is necessary to consider processes which proceed in it, when putting plaster solution, its concreting and operation of a wall design. **Methodology.** Physical model operation is applied to comprehension of processes which happen in a contact zone of a sitema "laying covering". Results it is also received by calculation of tension in a contact zoniya by means of formulas, the programs "Ansis", "Lira", on the basis of the experimental and literary data of physicommechanical characteristics of a gas-concrete laying and plaster solutions. **Results.** The obtained data validate the offered concepts and the fact that tension in a contact zone of the laying covering system has to be one of the main criteria at purpose of properties and compositions of plaster solutions. **Scientific novelty.** In work new concepts which need to be applied at projection of properties and compositions of plaster solutions are offered. Developed ideas of criteria according to which have to be appointed to property and be designed compositions of plaster solutions. **Practical meaningfulness.** The offered concepts and criterion proceeding from which it is necessary to appoint properties and to design compositions of plaster solutions.

**Keywords:** system "a laying - a plaster covering", a contact zone in this system, the concept and criterion, for projection of properties and compositions of plaster solutions.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Период эксплуатации стеновой конструкции 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 ее работы, необходимо знание процессов зарождения, накопления повреждений и роста макротрещин. Необходимо определить внутренние и внешние факторы и степень их воздействия, рассчитать напряжения и проектировать свойства и составы штукатурных растворов способных работать при максимальном уровне таких напряжений.

**МЕХАНИЗМ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ.** Кладка из автоклавного газобетона обладает высоким капиллярным потенциалом из-за значительного объема пор ( $520 \text{ мм}^3/\text{г}$ ) и их высокой удельной поверхности ( $22\text{-}34 \text{ м}^2/\text{г}$ ) [1]. При нанесении известково-цементной растворной смеси на кладку, из-за ее низкой водоудерживающей способности, происходит отсасывание жидкости из нее,

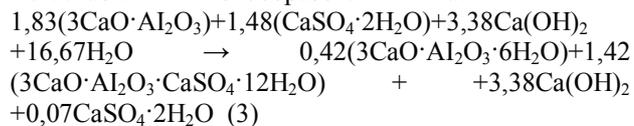
лиофильными порами и капиллярами материала кладки (рис.1б). Скорость заполнения поры ( $v$ ) определяется уравнением Пуазейля:

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

где  $l$  - длина участка впитавшейся жидкости,  $\eta$  - ее вязкость,  $\Delta p$  - перепад давления на участке  $l$ , равный капиллярному давлению мениска:

$$\Delta p = - 2s_{12} \cos q/r. \quad (2)$$

Поэтому растворение цемента и образование пересыщенного раствора происходит при пониженном содержании воды, что приводит к неполной гидратации цемента, образованию, метастабильных новообразований типа:



Потеря воды приводит к усадке штукатурного раствора (пластической и гидратационной): гидратационная -  $0,3\text{...}0,8 \text{ мм}$  (в среднем  $0,4\text{...}0,5 \text{ мм/м}$  или  $40\text{...}50 \cdot 10^{-5}$ ), пластическая -  $2\text{...}5 \text{ мм/м}$  ( $200\text{...}500 \cdot 10^{-5}$ ) [2]. В результате, в контактной зоне

«кладка-покрытие» образуются трещины и полости (рис.1г, д).

При эксплуатации они развиваются. Причинами развития трещин являются деформации кладки (температурные, влажностные, усадки) (рис.2) [3,4], разность деформаций штукатурного покрытия и кладки, воздействия влаги, льда и агрессивных веществ.

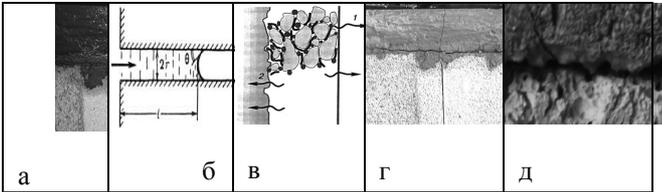


Рис.1. Трещинообразование: в контактной зоне «кладка-покрытие»

Fig. 1. Treshchinoobrazovaniye: in the contact zone "laying covering"

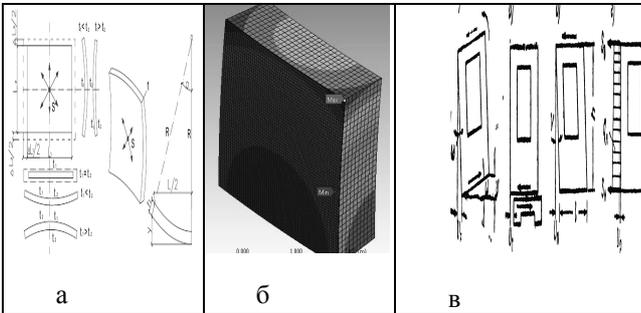


Рис. 2 Температурные и влажностные деформации кладки (а, в) и напряжения в ней (б)

Fig. 2 Temperature and moist strains of a laying (a, в) and tension in it (б)

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

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha_t \cdot \Delta t; \quad (4) \quad \Delta t = t_2 - t_1 \quad (5)$$

где:  $\Delta L$ -относительно удлинение или сокращение стеновой конструкции;  $L_0$ - длина стеновой конструкции на момент возведения;  $\alpha_t$ -коэффициент температурного расширения автоклавного газобетона,  $\alpha_t = 8 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  [1,5],  $\Delta t$ -изменение температуры стеновой конструкции;  $t_1$  – температура окружающей среды в момент возведения газобетонной кладки;  $t_2$ – максимальная и минимальная температура, воздействию которой подвергается стеновая конструкция в летний и зимний периоды;

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

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

Летом, при нагреве до +80°C [1], деформация расширения составит:

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

В общем виде деформации стеновой конструкции показаны на (рис.3). Пики на графиках приходится на

лето, а для зимы характерна самая низкая точка на графике.

Кладка и штукатурное покрытие имеют разные по величине температурные деформации. Зимой деформация сжатия штукатурного раствора (цементный раствор 1:4) составит 0,55 мм/м, а полная деформация штукатурного покрытия, например стены длиной 8м:

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

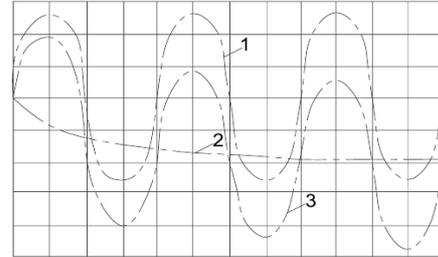


Рис.3 Температурные (1), усадочные (2) и суммарные деформации (3) и стеновой конструкции при эксплуатации

Fig. 3 Temperature (1), shrinkable (2) and cooperative deformations (3) and a wall design at operation

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

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

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

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

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

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

Деформации расширения или сжатия, вызывают напряжения ( $\sigma$ ) в кладке и штукатурном покрытии которое можно вычислить, преобразовав уравнение:

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

где:  $\Delta L$ -относительное удлинение или сокращение стеновой конструкции;  $L_0$ - длина стеновой конструкции на момент возведения;  $\sigma$ -напряжения в Н/мм<sup>2</sup>; E-модуль упругости в Н/мм<sup>2</sup> [5].

Деформации изгиба кладки (рис. 4а), разность деформаций и модулей упругости, ее и штукатурного покрытия, являются причиной деформаций сдвига в контактной зоне «кладка-покрытие» (рис.4а,4.б).

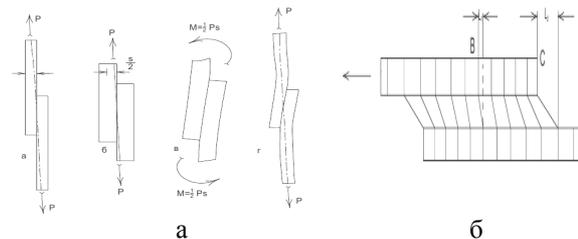


Рис. 4 Изгиб стены (а) и деформации сдвига в контактной зоне «кладка-покрытие» (б)

Fig. 4 Bend of a Wall (a) and Shearing Strain in the contact zone "laying covering"

Как следствие, в контактной зоне между ними, возникают напряжения сдвига ( $\tau$ ) (рис.5), 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:  $\tau$  - напряжение сдвига от температурных деформаций, кгс/см<sup>2</sup>;  $\Delta T_1, \Delta T_2$  - разность температуры в момент устройства и эксплуатации штукатурного покрытия и кладки, °С;  $\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициент температурного расширения кладки и штукатурного покрытия;  $E_1, E_2$  - модули упругости кладки и штукатурного покрытия, кгс/см<sup>2</sup>;

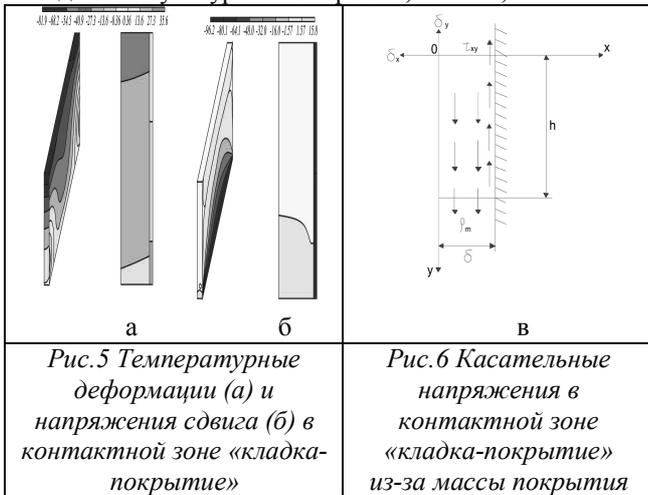


Рис.5 Температурные деформации (а) и напряжения сдвига (б) в контактной зоне «кладка-покрытие»

Рис.6 Касательные напряжения в контактной зоне «кладка-покрытие» из-за массы покрытия

Fig. 5 Temperature deformations (a) and shear stresses (b) in the contact zone "laying covering"

Fig. 6 the Tangential tension in the contact zone "laying covering" because of the mass of a covering

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

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

где:  $\delta$ -толщина штукатурного покрытия, м;  $\rho$ -средняя плотность штукатурного раствора, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau_k$ -напряжения в контактной зоне;  $h$ -высота штукатурного покрытия, м;

Разрушение контактной зоны обусловлено действием, как тангенциальных напряжений, так и растягивающих усилий направленных перпендикулярно 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. Когда напряжения превысят адгезионную прочность 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 влаги находящейся в трещине. При нагревании или увлажнении, или при их совместном воздействии, происходит рост деформаций, что приводит к увеличению радиуса кривизны вершины трещины. Если уровень напряжений меньше предельного значения адгезионной прочности, трещина не растет. При увеличении деформации, напряжения в устье трещины превзойдут предельный уровень, что приведет, к ее подрастанию (рис.7).

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.

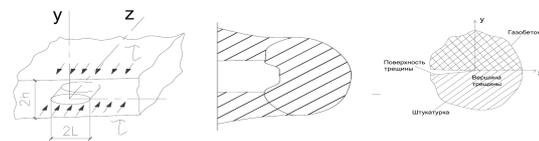


Рис. 7 Старт магистральной трещины в контактной зоне «кладка-покрытие»

Fig. 7 Start of a Turnpike Crack in the contact zone "laying covering"

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 время, 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  $V/C$  отношения имеет следующие значения: при  $V/C=0,35-0,67$  коэффициент интенсивности напряжений составляет 0,8-0,41.

Влага также способствует развитию магистральной трещины. Причин появления влаги в контактной зоне, несколько. При наличии штукатурки, с малой паропроницаемостью, происходит конденсация и накопление паробразной влаги, которая идет 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.8а), 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%.

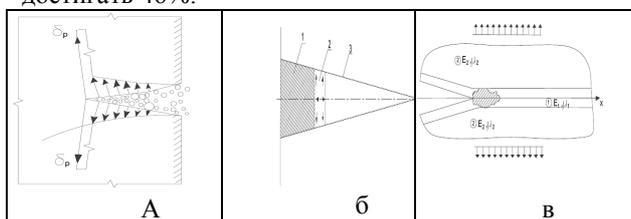


Рис. 8 Развитие магистральной трещины в контактной зоне под воздействием воды (а), и льда (б, в)

Fig. 8 Development of a Turnpike Crack in a contact zone under the influence of water (a), and ice (б, в)

Несмотря на высокую морозостойкость газобетона, при влажности более 30% и минусовых температурах наступает его разрушение [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.8б,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.9).

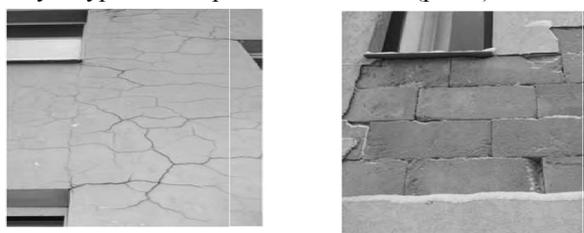


Рис. 9 Разрушение и отслоение штукатурного покрытия от газобетонной кладки

Fig. 9 Destruction and layer separation of a plaster covering from a gas-concrete laying

Предварительное грунтования 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.

**Пути решения проблемы** Для того, чтобы избежать деструктивных процессов разработаны теоретические предпосылки. Штукатурное 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.

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.

Авторами предложены три концепции решения проблемы: 1.Эластичного штукатурного покрытия; 2.Демпфирующего слоя; 3.Объединенная.

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 полное адгезионное сцепление с основанием, должен обладать достаточным относительным 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 отсутствие 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 трещиноперерывающей эластичной контактной зоны в виде прослойки из высокодеформируемого материала. Этого можно добиться целенаправленным формированием контактной зоны «кладка-покрытие» или предварительным нанесением на кладку полимерцементной смеси с увеличенным содержанием диспергируемого полимерного порошка.

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

Для обеспечения реализации концепций формализованы критериальные требования 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, м<sup>2</sup>;  $R_a$  – расчетный предел прочности сцепления штукатурного покрытия с газобетонным основанием, кПа.

2. Сдвигающее напряжение ( $\tau$ ) 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:  $\tau$  – напряжение сдвига от температурных деформаций, кгс/см<sup>2</sup>;  $\Delta T_1, \Delta T_2$  – разность температуры штукатурного покрытия и кладки, °С;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициент термического расширения кладки и штукатурного покрытия;  $E_1, E_2$  – модули упругости кладки и штукатурного покрытия, кгс/см<sup>2</sup>;

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 редицергируемые 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 ( $\Delta P$ ), которое можно вычислить из уравнения Пуазейля [10].

$$\frac{d\ell}{d\tau} = (r^2 \Delta P) / 8\eta\ell \quad (12)$$

где  $r$  – радиус капилляра, м;  $\Delta P$  – всасывающее давление капилляра, Па;  $\eta$  – динамическая вязкость жидкого реагента растворной смеси, Па·с;  $\ell$  – глубина проникновения жидкого реагента растворной смеси, м;  $\tau$  – время, с.

С учетом баланса энергии на границе раздела фаз (13) всасывающего давления поры ( $\Delta P$ ) будет равно (14):

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

где  $\sigma_m$  – поверхностное натяжение материала кладки, кДж/м<sup>2</sup>;  $\sigma_{m-p}$  – поверхностная энергия на границе раздела фаз жидкого реагента растворной смеси – материал кладки, кДж/м<sup>2</sup>;  $\theta$  – краевой угол смачивания, °.

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

где  $\sigma_p$  – поверхностное натяжение жидкого реагента растворной смеси и штукатурного раствора; кДж/м<sup>2</sup>.

Преобразовывая формулы (12-15), можно определить глубину проникновения жидкой фазы ( $\ell$ ) и ее количество ( $D$ ) при помощи уравнения Эйнштейна (16).

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

Объединив и преобразовав обе стороны уравнения получаем:

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

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

где  $D$  – количество жидкого реагента растворной смеси, м<sup>2</sup>/с;  $r$  – радиус частиц диффундирующего вещества, м.

Благодаря всасывающему давлению капиллярных пор, находящихся в стенках крупных пор-ячеек (рис.10а), крупные поры-ячейки газобетона полностью заполняются растворной смесью, что обеспечивает формирование контактной зоны с минимальным количеством дефектов (рис. 10б).

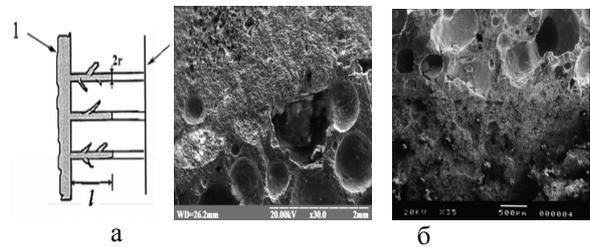


Рис. 10 Схема формирования контактной зоны «кладка-покрытие» (а) и ее фотографии (б)

1 – растворная смесь, в ячейке-поре; 2 – капилляры в стенке крупной поры ячеистого бетона /

*Scheme of formation of the contact zone "laying covering" (a) and its photo 1 – rastvorny mix, in a cell time; 2 – capillaries in a wall of a large time of cellular concrete*

При проникновении жидкого реагента растворной смеси, в реакцию вступают жидкость и твердое вещество материала кладки, что обеспечивает анкерирующий эффект (рис.10а), прочно фиксирующий штукатурное покрытие на поверхности кладки. В результате формируется эластичная, с малым количеством дефектов, контактная зона между кладкой и штукатурным покрытием (рис.10б).

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;  $\sigma_y$  – внутреннее усадочное напряжение в покрытии, МПа;  $\sigma_p$  – предел прочности при растяжении материала покрытия и кладки, МПа.

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

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

где  $e_t$  – относительная деформация от напряжения  $\sigma_t$ ;  $E_y$  – модуль упругости материала МПа;  $E_3$  – модуль пластичности, МПа;  $\theta$  – время релаксации напряжений, с;  $\sigma_0$  – предел длительной прочности, МПа;  $\beta$  – мера аномальности вязкости для аномально вязких материалов, какими являются мастики и штукатурки на полимерцементных вяжущих;  $\eta_0$  – наибольшая структурная вязкость неразрушенной 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  $\theta$ .

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

Для контактной зоны с повышенной эластичностью:

$$\sigma_t = \frac{(L_n - L_0) (T_{\max} - T_{\min}) E_y E_3 (1 - e^{-t/\theta})}{E_y + E_3 (1 - e^{-t/\theta})} \quad (21)$$

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

Приведенные выкладки свидетельствуют о том, что реализация предложенных концепций и критериев позволят уменьшить трещинообразование в системе «кладка-покрытие» 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 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 полное 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.

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

Реализация предложенных концепций и критериев позволит уменьшить трещинообразования 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.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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. –458с.
2. Кнатъко М.В. К вопросу о долговечности и энергоэффективности современных ограждающих стеновых конструкций жилых, административных и производственных зданий /Кнатъко 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. –224с. :ил.–Библиогр.: 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 поврежденных строительных конструкций – М.: Издательство литературы по строительству, 1964. Выпуск 2.– С.153-177

5. В.Блази Справочник проектировщика. Строительная физика / В.Блази – М.: Техносфера, 2005. –536с.
6. Р.Ф.Рунова, Л.О.Шейнич, О.Г.Гелевера, В.І.Гоц Основы виробництва стінових та оздоблювальних матеріалів. –К.; КНУБА, 2001.-354с.
7. Партон В.З. Механика упруго-пластического разрушения / Партон В.З., Морозов Е.М. –М.: Наука, 1985. – 504с.
8. Гранау Э. Предупреждение дефектов в строительных конструкциях / Э. Гранау – М.: Стройиздат, 1980. – 217с.: ил. –Библиогр.:с.191-213
9. Гринфельд Г. И. Инженерные решения обеспечения энергоэффективности зданий. Отделка кладки из автоклавного газобетона / Г.И. Гринфельд. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 130с.

#### REFERENCES

1. Galkin SL, Sazhnev NP Sokolovsky LV Sazhneva NN;The use of cellular concrete products. Theory and Practice &, Minsk, 2006, 448p.
2. Knatko M. V. To a question of longevity and energy efficiency of the modern protecting wall designs of residential, office and production buildings / Knatko M. V., Efimenko M. N., Pots of Ampere-second.//Construction magazine. –2008. –№ 2. – p. 50-53
3. Voldrzhikh F. Straining seams in designs land Buildings / Voldrzhikh F. – М.: Stroyizdat, 1978. – 224 p/: ooze. – Bibliogr.: p/ 209-221
4. Yemelyanov A.A. Damages of external panels of residential prefabrication buildings at temperature strains according to natural researches / Yemelyanov A.A.//The analysis of the reasons of accidents and damages of building constructions – М.: Publishing house of literature on construction, 1964. Release 2. – Page 153-177
5. V. Blasi Spravochnik of the designer. Structural physics / V. Blasi – М.: Technosphere, 2005. – 536 pages.
6. R.F.Runova, L. O. Sheynich, O. G. Gelevera, In.I. Gots Osnovi of a virobnitstv st\_novikh that ozdobyuvalnikh матеріалів. – То.; КНУБА, 2001. - 354 p.
7. Parton V. Z. Mekhanik's parton of elasto-plastic destruction / Parton V.Z., Morozov E.M. – М.: Science, 1985. – 504 p.
8. Granau E. Warning defects in build-enforcement structures. Moscow. Stroyizdat. Moscow 1980 p.217

Статья поступила в редакцию 10.08.2016