

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ ШТУКАТУРНЫХ
РАСТВОРОВ С УЧЕТОМ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ
СИСТЕМЫ «ГАЗОБЕТОННАЯ КЛАДКА-ШТУКАТУРНОЕ
ПОКРЫТИЕ»**

**к.т.н., доц. Парута В.А., Гнып О.П., Лавренюк Л.И.,
студ. Русев А.Г., Цонда Д.А., Вандинский В.Ю.,
к.т.н. Брынзин Е.В.*,**

*Одесская Государственная Академия Строительства и
Архитектуры
Одесса, Украина*

**ООО ЮД К, г.Днепропетровск, Украина*

Разработка составов штукатурных растворов для автоклавного газобетона и технологии их применения, является актуальной задачей, которую решают многие специалисты [1,2,13]. Недостатком разработанных составов является то, что им всем, в той или иной мере, присуще трещинообразование [3,13,14], которое приводит к разрушению штукатурного покрытия снижению долговечности ограждающей конструкции.

По нашему мнению, происходит это из-за того, что при проектировании состава и свойств штукатурного покрытия, не в полной мере учитывают совместность его работы с газобетонной кладкой. Стеновую конструкцию следует рассматривать как многослойную систему, для которой необходимо, в зависимости от характеристик материала кладки, деформаций и возникающих напряжений в кладке и штукатурном покрытии, целенаправленно подбирать состав штукатурной смеси, с определенными качественными и количественными параметрами.

Нормативные документы определяют необходимые параметры для штукатурных растворов, это средняя плотность, прочность при сжатии и при изгибе, водопоглощение, морозостойкость, паропроницаемость, адгезия к стеновому материалу. При этом в разных нормативных документах требуются различные показатели прочности. Так, прочность сцепления с газобетонным основанием должна составлять 0,15-3 МПа, прочность при сжатии 2,5-10 МПа, прочность на изгиб от 1,25 и до более 2 МПа [3,6,9,10,15]. Не совсем понятно, из каких предпосылок вытекают требования по прочностным параметрам, совсем не оговариваются требования по трещиностойкости для фасадных штукатурок, что по нашему мнению совершенно не правильно.

Задачей исследований является разработка теоретических и практических основ совместной работы газобетонной кладки и штукатурного покрытия, на основе которых проектировать составы штукатурных растворов с высокой трещиностойкостью. Для определения, какими параметрами должно обладать штукатурное покрытие, необходимо знать процессы, протекающие в системе «кладка-покрытие» при нанесении штукатурного раствора на кладку, его

твердения и эксплуатации, понимать механику разрушения системы. Рассмотрение внутрискруктурных напряжений в штукатурном покрытии и контактной зоне, его с кладкой, процессов зарождения, накопления и развития трещин при циклических (нагревании и охлаждении, замораживании и оттаивании, увлажнении и высушивании) и силовых нагрузках, является предварительным условием в построении механики разрушения системы. Это позволит предсказать поведение системы «кладка-покрытие» во времени, разработать рекомендации по предотвращению деструктивных процессов, повышению долговечности штукатурного покрытия и ограждающей конструкции. Использование картин разрушения, расчет конкретных показателей напряженно-деформированного состояния и других энергетических и силовых параметров механики разрушения, позволит проектировать составы штукатурного раствора с необходимыми прочностными параметрами и трещиностойкостью.

Разрушение штукатурного покрытия связано с образованием, накоплением и развитием дефектов в структуре материала (микро- и макротрещин) которые образуются при нанесении, твердении и эксплуатации [15]. Особенностью процесса твердения штукатурного раствора является то, что гидратация цемента протекает при недостаточном количестве воды, из-за ее интенсивного испарения и поглощения пористым основанием. В этих условиях формируется дефектная структура цементного камня, образуются неравновесные, метастабильные поликристаллические новообразования. Твердение при пониженном В/Ц приводит к неполной реализации вяжущего потенциала цемента, падению прочности, повышенному трещинообразованию и снижению долговечности затвердевшего штукатурного [8,11].

Происходит гидравлическая (0,3...0,8 мм/м) и пластическая (2...5 мм/м) усадка штукатурного раствора [1,5], а так как газобетонная кладка сдерживает эти деформации, то это приводит к возникновению напряжений в штукатурном покрытии (δ), которые в семь раз превышают его предел прочности при растяжении:

$$\delta = \frac{\Delta \varepsilon * E}{1 - \mu}$$

где: E и μ - модуль упругости и коэффициента Пуассона штукатурного покрытия; $\Delta \varepsilon$ - разность деформаций штукатурки и газобетонного основания. Из-за этих напряжений и из-за того, что уменьшение степени гидратации цемента привело к снижению предельной растяжимости материала на 20...50% [3], происходит трещинообразование в штукатурном покрытии, на поверхности и в объеме материала, (рис. 1b,c), а также в контактной зоне с газобетонным основанием (рис. 1a).

В результате формируется дефектная структура материала, включающая поры, трещины, и совмещенные поры с трещинами. Трещины в штукатурном покрытии распространяются по всем направлениям. В цементном камне они проходят преимущественно вокруг или через негидратированные зерна цемента, вдоль кристаллов

портландита, которые имеют склонность к раскалыванию, а также через поры. Устье трещин располагается около зерен песка, вблизи устья трещин наблюдается множество микротрещин. Трещины имеют разветвления, зигзагообразные включения длиной 10 мкм, а также пересечения. Наблюдаются неразрушенные участки цементного камня, являющиеся мостиками прочности [11].

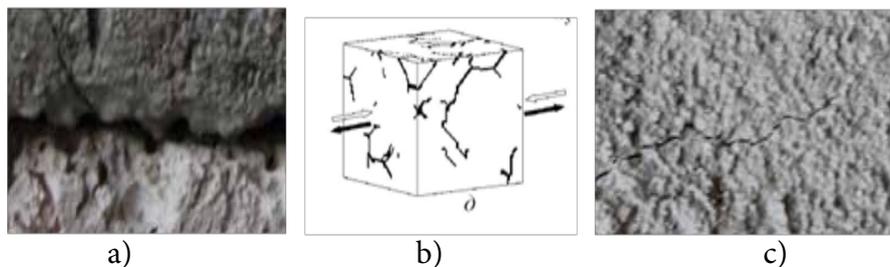


Рис. 1 Трещинообразование: а) в контактной зоне «газобетонное основание –штукатурное покрытие»; б) в объеме штукатурного раствора с) и на его поверхности

При эксплуатации на стеновую конструкцию оказывают влияние комплексные нагрузки (силовые, температурные, влажностные и коррозионные), под воздействием которых происходит развития дефектов образовавшихся в структуре материала на стадии твердения. Циклические температурно-влажностные воздействия (рис. 2,3), приводят к деформации (ΔL_p , ΔL_c , $\Delta L_{тв}$) и дополнительным напряжениям в материале (δРис. 2).

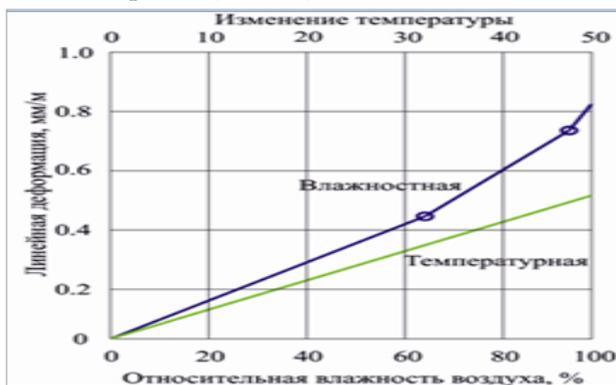


Рис. 2. Деформации штукатурного покрытия

$$\Delta L_p = \alpha \Delta T^p L; \Delta L_c = \alpha \Delta T^c L; \quad \Delta L_m = (\alpha \Delta T L F_m) + (\Delta L_q L)$$

где: ΔL_p , ΔL_c – деформации растяжения и сжатия; α – коэффициент температурного удлинения материала; ΔT – разность температур; L –

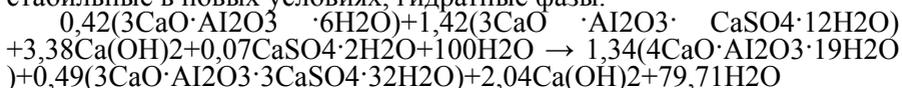
длина стенового элемента; $\Delta L_{тв}$ - тепло-влажностные деформации; F_m – показатель материальных дефектов; ΔL_q – влажностные деформации [3].

$$\delta = \kappa \cdot \sqrt{[\alpha t + b(L-c)] \delta^*} \quad \delta^* = E \cdot \alpha t \cdot \Delta t$$

где: E -модуль упругости; α -коэффициент линейного расширения штукатурного покрытия; Δt - расчетный перепад температур;

Влажностные деформации набухания и усадки, накладываясь на поле температурных деформаций, способствуют развитию трещин в материале. Для материала характерна неоднородность напряженного состояния. На границе цементной матрицы и кварцевого заполнителя, двух фаз с различными КТР (коэффициентом температурного расширения α), при изменении температуры, возникают сжимающие напряжения, действующие на фазу с высоким α и растягивающие, действующие на фазу с меньшим α . Локальные напряжения особенно велики в устье образовавшейся трещины, где происходит концентрация напряжений, причём они тем больше, чем больше её размер. При напряжениях сверх некоторого критического значения происходит образование трещины.

При увлажнении штукатурного покрытия, образовавшиеся ранее, менее обводненные гидраты, становятся термодинамически нестабильными и стремятся к переходу в более обводненные, стабильные в новых условиях, гидратные фазы.



Процесс перекристаллизации сопровождается увеличением объема твердой фазы (до 45%), что приводит к значительным внутренним напряжениям в материале, что также способствует развитию микротрещин. Концентрация этих микротрещин растет, и при достижении некоторого критического значения образуются макроскопические трещины. Рост макроскопических трещин, проходит через контактную зону с заполнителем или через цементный камень в зависимости от их прочности и наличия дефектов. Когда деформация в вершине трещин, достигает критического значения, область разрушается, длина трещины возрастает, напряжение перераспределяется на соседние элементы, после чего процесс повторяется. Перераспределяя деформации и напряжения в материале, трещины соединяясь, продолжают расти (Рис.3).

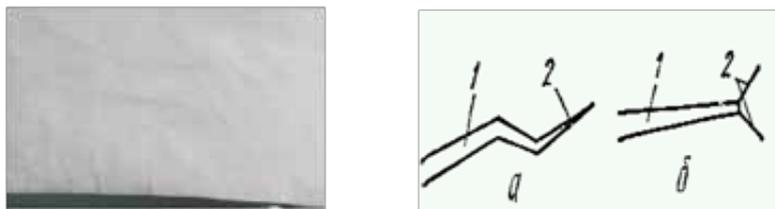


Рис. 3 Развитие трещин в штукатурном покрытии при эксплуатационных воздействиях

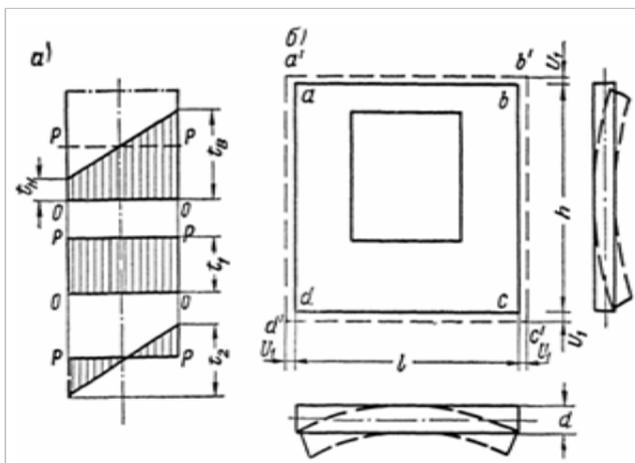


Рис. 4. Деформации стеновой конструкции и изополя напряжений

Штукатурное покрытие «не работает» обособленно в стеновой конструкции, поэтому на его напряженное состояние оказывает влияние деформации кладки. Деформация кладки происходит под воздействием постоянных и временных нагрузок, усадки кладочного раствора, карбонизации газобетона, увлажнения паро-образной влагой мигрирующей из помещения и конденсирующейся внутри конструкции, температуры и влажности окружающей среды, от ветровых нагрузок, деформации железобетонного каркаса [7]. Вследствие этого стеновая конструкция испытывает деформации растяжения и сжатия, изгиба из плоскости (рис.4, 5).

При достижении определенного значения растягивающей нагрузки из-за деформации кладки, происходит дальнейшее подрастание трещин в штукатурном покрытии и декоративно-защитном слое (Рис.5с). Из-за разности деформаций и модулей упругости газобетонного основания и штукатурного покрытия, в контактной зоне между ними, возникают деформации (рис.5,6) и напряжения сдвига (τ) (рис.6), которые являются причиной разгития магистральной трещины в контактной зоне (рис.6,7).

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

где: τ - напряжение сдвига от температурных деформаций, кгс/см²; $\Delta T_1, \Delta T_2$ - 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;

а)

б)

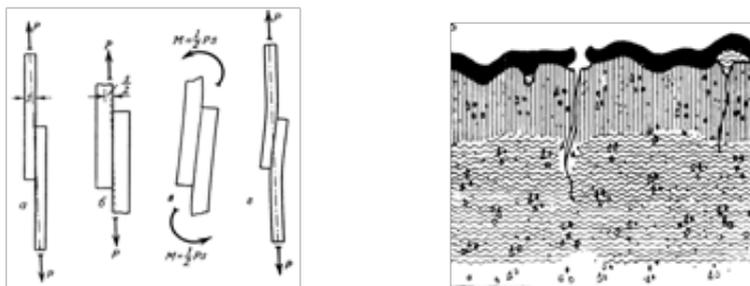


Рис. 5 Деформации стеновой конструкции и штукатурного покрытия (а) и трещинообразование в штукатурном покрытии и отделочном слое

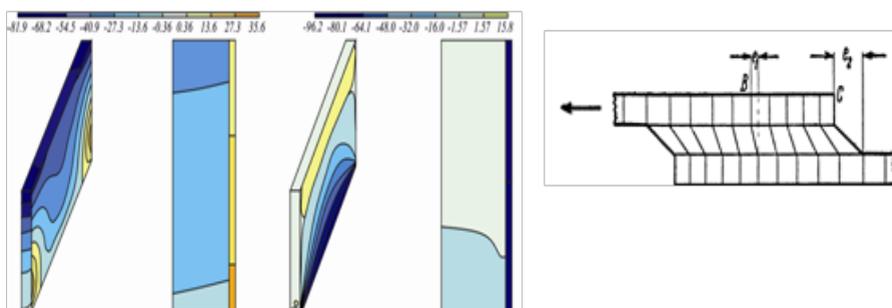


Рис. 6 Температурные деформации (а, б) и напряжения (с) в контактной зоне

Особенностью процесса является то, что магистральная трещина в контактной зоне развивается на границе двух разнородных материалов с отличительными свойствами - газобетонной кладке и штукатурке (рис. 7).

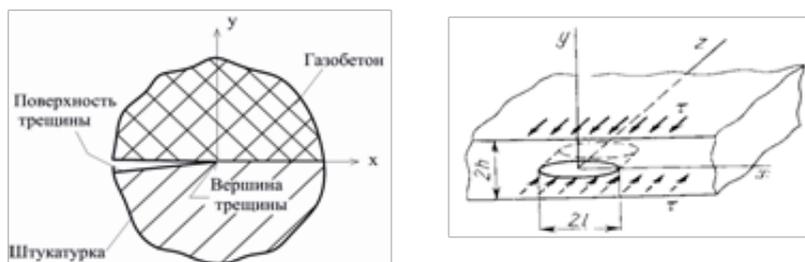


Рис. 7. Развитие трещин в контактной зоне «кладка-штукатурное покрытие»

Для системы «кладка - штукатурное покрытие» характерно усталостное разрушение, при относительно низком уровне напряжений и частой их цикличности, которое приводит к прорастанию магистральной трещины в контактной зоне между штукатуркой и

кладкой и семейства магистральных трещин в штукатурном покрытии со скоростью (dl/dN):

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

где: 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, N — число циклов.

Разрушение адгезионного соединения не происходит сразу по всей поверхности. Из-за того, что напряжения в контактной зоне распределены неравномерно, участки, подвергающиеся более высоким напряжениям, разрушаются в первую очередь, уменьшая тем самым прочность всей контактной зоны в целом. Старт и рост магистральной трещины в контактной зоне определяется состоянием и процессами у ее вершины и реализуется по механизму, который включает развитие микротрещин в зоне предразрушения и их объединение в макротрещину. Основной причиной ее развития является изменение деформаций и напряжений в вершине трещины, возникающие при увлажнении и высушивании, нагревании и охлаждении стеновой конструкции и штукатурного покрытия. В вершине микротрещины концентрируется напряжение. Пока уровень напряжений меньше предельного значения адгезионной или когезионной прочности, трещина не растет. Если в ходе дальнейшего роста внешней нагрузки, деформации и напряжения в устье трещины превзойдут предельный уровень, произойдет ее подрастание (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. С ростом трещины растет и напряжение в ее вершине, и когда размер трещины достигает критических размеров, а напряжение в вершине трещины превосходит поверхностную энергию разрушения вещества, то происходит неуправляемое разрушение соединения и отслоение штукатурного покрытия от газобетонной кладки.

Возникновение и рост трещин может происходить как непосредственно на границе контакта кладки со штукатурным покрытием, так и в штукатурном покрытии или газобетонной кладке, что определяется соотношением величин адгезии между ними к величине их когезии. Чем ниже адгезия и выше когезия, тем больше вероятность разрушения соединения непосредственно по границе - адгезионный характер разрушения (Рис.8).

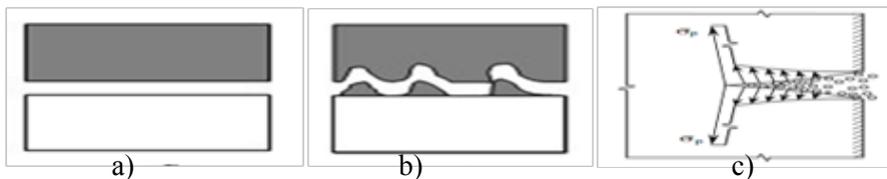


Рис. 8 Виды разрушений в контактной зоне «газобетонная кладка-штукатурное покрытие»: а – адгезионное; б – смешанное, в) расклинивающее действие водных пленок в магистральной трещине

Процесс разрушения ускоряется из-за наличия влаги, агрессивных жидкостей и газов, отрицательных температур. Влага, проникая в устье трещин штукатурного покрытия, и контактной зоны «кладка-покрытие» создает расклинивающее давление, которое способствует развитию трещин (Рис. 8с). При испарении влаги расклинивающие силы перестают действовать и в материале возникают напряжения усадки. С увеличением относительной влажности окружающей воздушной среды материал вновь увлажняется, а трещины раскрываются и развиваются.

Процесс разрушения интенсифицируется из-за воздействия на ограждающую конструкцию агрессивных газов и жидкостей (окиси углерода, двуокиси серы, азотных соединений и др.). Так SO_3 соединяясь с атмосферной влагой, превращается в серную кислоту, а затем в виде ионов SO_4 разрушает силикаты кальция и карбонатные образования в штукатурке и кладке. В трещинах образуются продукты коррозии которые оказывают расклинивающее влияние, что также способствует развитию магистральных трещин в штукатурном растворе и контактной зоне.

Еще одним из видов разрушающего воздействия внешней среды в период эксплуатации стеновой конструкции является многократное замораживание и оттаивание. Замерзающая в трещинах штукатурного покрытия и контактной зоны, влага увеличивается в объеме, вызывая значительные напряжения в устье трещин, что приводит к подрастанию трещины [7]. В результате вышеописанных процессов происходит разрушение штукатурного покрытия и отслоения его от газобетонной кладки (Рис. 9).



Рис. 9. Разрушение и отслоение штукатурного покрытия от газобетонной кладки [14]

Для того чтобы предотвратить трещинообразование в системе «кладка-штукатурное покрытие», проектирование штукатурных растворов необходимо вести с учетом процессов протекающих при нанесении и твердении раствора и напряжений, возникающих в штукатурном покрытии из-за деформаций стеновой конструкции и самого покрытия. Необходимо минимизировать количество усадочных трещин, которые возникают в покрытии при нанесении и твердении штукатурного раствора. Прочность при растяжении раствора его деформативность и контактной зоны, должна обеспечивать высокую трещиностойкость штукатурного покрытия и контактной зоны.

Только в этом случае можно будет обеспечить высокую долговечность штукатурного покрытия и стеновой конструкции в целом.

Целью исследований явилось получение штукатурных растворов с высокой трещиностойкостью, при обеспечении требований нормативных документов по средней плотности, прочности при сжатии и изгибе и других параметрах. Это обеспечит оптимальные условия работы системы «газобетонная кладка-штукатурное покрытие», высокую долговечность стеновой конструкции.

Исходя из вышеизложенных теоретических предпосылок, были подобраны составы штукатурных смесей на различных видах заполнителей и наполнителей – вермикулитовом и из боя газобетона (смесь №1), карбонатном и перлитовом (смесь №2). Для оптимизации рецептурно-технологических параметров использовали пятифакторный эксперимент со следующими варьируемыми факторами, Таблица 1.

Таблица 1

Диапазон варьирования факторов

| Вид смеси | Диапазон варьирования | Расход вяжущего, | Расход за-полнителя и наполнителя, | Расход фибры, | Расход редиспер-гируемого полимерного порошка Winnapas 5043 Н, % | Расход Tylose MBZ 15009,% |
|-----------|-----------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|--|---------------------------|
| | | кг/м ³ | м ³ /м ³ | кг/м ³ | | |
| | | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 |
| Смесь № 1 | 1 | 500 | 1,05/1 | 1,2 | 5 | 0,5 |
| | 0 | 400 | 1,05/1 | 0,9 | 3 | 0,3 |
| | -1 | 300 | 1,05/1 | 0,6 | 1 | 0,1 |
| Смесь №2 | 1 | 400 | 1,05/1 | 1,2 | 5 | 0,5 |
| | 0 | 300 | 1,05/1 | 0,9 | 3 | 0,3 |
| | -1 | 200 | 1,05/1 | 0,6 | 1 | 0,1 |

Для определения свойств штукатурного раствора изготавливали образцы балочки с размером 40х40х160мм. Балочки формовали на газобетонном основании. Режим твердения воздушно-сухой, моделирующий работу штукатурного покрытия в реальных условиях. После 28 суток твердения определяли основные физико-механические свойства: прочность при сжатии и изгибе, среднюю плотность, и др. Трещиностойкость определяли качественно, визуально по наличию трещин в покрытии, и количественно, рассчитывая отношение прочности при изгибе к прочности при сжатии.

В результате получена штукатурка позволяющая обеспечить совместность работы газобетонной кладки со штукатурным покрытием и тем самым высокую долговечность стеновой конструкции. Основные

физико-механические характеристики штукатурки из смеси №2: средняя плотность 700-1100 кг/м³, прочность при изгибе 10-25 кг/см², прочность при сжатии 15-35 кг/см², коэффициент трещиностойкости 0,25-1 (рис.10а-d); Для смеси №1: средняя плотность 600-1500 кг/м³, прочность при изгибе 12-18 кг/см², прочность при сжатии 18-36 кг/см², коэффициент трещиностойкости 0,56-0,74 (рис.11а-d).

Полученные штукатурные растворы удовлетворяют требованиям нормативных документов по средней плотности (600-1600 кг/м³), прочности при изгибе (10-25 кг/см²) и сжатии (25-50 кг/см²). Штукатурное покрытие обладает высокой трещиностойкостью, коэффициент трещиностойкости составляет 0,25-1, тогда как трещиностойким считается штукатурка с показателем большим 0,26.

a) b) c) d)

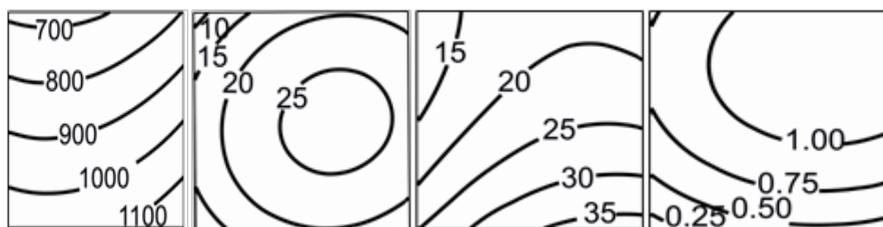


Рис. 10. Средняя плотность (а), прочность при изгибе (b), прочность при сжатии (с), коэффициент трещиностойкости (d) состава №2

a) b) c) d)

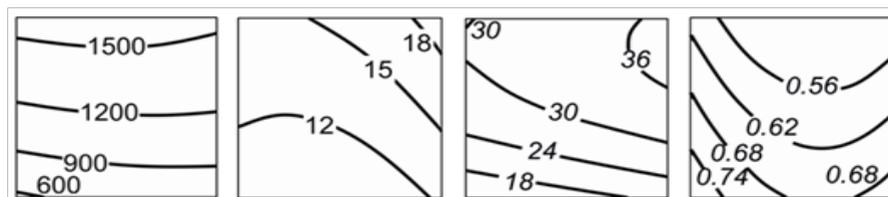


Рис. 11. Средняя плотность (а), прочность при изгибе (b), прочность при сжатии (с), коэффициент трещиностойкости (d) состава №1

Приведенные данные свидетельствуют о том, что целенаправленной модификацией штукатурной смеси, можно получить штукатурное покрытие с высокой трещиностойкостью и обеспечить оптимальные условия совместной работы «газобетонная кладка-штукатурное покрытие». Это в свою очередь, обеспечит повышение долговечности стеновой конструкции.

Выводы

1. При проектировании прочностных параметров и трещиностойкости штукатурных растворов, необходимо базироваться на механике разрушения системы «кладка-штукатурное покрытие». Назначать конкретные требования по прочности при сжатии, изгибе и трещиностойкости исходя из напряжений, возникающих в штукатурном

покрытии при твердении и эксплуатационных воздействиях.

2. Обеспечить необходимые свойства штукатурных растворов возможно путем целенаправленной модификации, то есть введением водиспергируемых полимерных порошков, эфиров целлюлозы, низкомолекулярных наполнителей, микродисперсным армированием.

3. В результате целенаправленной модификации получены штукатурные растворы со средней плотностью 600-1500 кг/м³, прочностью при изгибе 10-25 кг/см², прочностью при сжатии 15-36 кг/см², что соответствует требованиям нормативных документов. Материал обладает высокой трещиностойкостью, коэффициент трещиностойкости 0,25-1, что обеспечит высокую долговечность штукатурного покрытия и стеновой конструкции.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности технологии возведения и эксплуатации наружных стен из автоклавного газобетона / Парута В.А., Семина Ю.А., Столяр Е.А., Устенко А.В., Брынзин Е.В., // Строительные материалы, оборудование, технологии 21 века, №12, Москва, 2012, С. 35-39
2. Сажнева Н.Н., Сажнев Н.П., Урецкая Е.А. Защитные системы для отделки ячеистого бетона пониженной плотности // Строительные материалы. 2009. №1. С. 17-19.
3. Горшков А.С., Кнатько М.В., Рымкевич П.П., Оценка долговечности стеновой конструкции. Материалы семинара «Однослойные ограждения из автоклавного газозобетона в современном домостроении», 24 ноября 2009г. Екатеринбург, С.12-16
4. Struble L.J., Stutzman P.E., Fuller E.R. Microstructural Aspects of The Fracture of Hardened Cement Paste: [Pap.] 1st Symp. Rel. Multilayer Ceram. Capacitors, University Park, Pa, May 11-12, 1989. Структурные аспекты разрушения цементного камня. // J. Amer. Ceram. Soc. -1989. -№12. -pp.2295-2299.
5. Емельянов А.А. Повреждения наружных панелей жилых полносборных зданий при температурных деформациях по данным натурных исследований. // Анализ причин аварий и повреждений строительных конструкций/. Выпуск 2, Под ред. А.А.Шишкина. Издательство литературы по строительству, -М.: 1964., С.153-177
6. Галкин С.Л., Сажнев Н.П., Соколовский Л.В., Сажнева Н.Н. «Применение ячеистобетонных изделий. Теория и практика» НП ООО «Стринко», Минск, 2006., 448с.
1. 11. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. – Одесса, 1998. 168 с.
7. Пучков Р. Ю. Сухие смеси для отделки стен зданий: Дисс. канд. техн. наук- Пенза, 2005, 143 с.
8. 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.
9. СТО 501-52-01-2007 ч.1 «Проектирование и возведение ограждающих конструкций жилых и общественных зданий с применением ячеистых бетонов в Российской Федерации», Москва 2009г. 68с.
10. Руководство по наружной отделке стен из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения / Ассоциация НААГ. – Белгород, 2010. 10 с.