

УДК 691.002

Парута В.А., Гнып О.П., Лавренюк Л.И., Русев А.Г.,

Цонда Д.А., Вандинский В.Ю.

ОГАСА, Одесса, Украина

Проектирование состава штукатурного раствора для стен из газобетонных камней с учетом механики разрушения системы «кладка-штукатурное покрытие»

Разработка составов штукатурных растворов для стен из автоклавного газобетона и технологии их применения, является актуальной задачей, которую решают многие специалисты [1,2,3,4]. Недостатком разработанных составов является то, что им всем, в той или иной мере, присуще трещинообразование [5,3] 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 кладкой. Стеновую конструкцию следует рассматривать как многослойную систему. В зависимости от характеристик газобетонной кладки, ее деформаций, напряжений в кладке и штукатурном покрытии, необходимо 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 изгибе, водопоглощение, морозостойкость, паропроницаемость, адгезия к кладке. При этом в разных нормативных документах требуются различные показатели прочности и нет требований по трещиностойкости для фасадных штукатурок. Не совсем понятно, из каких предпосылок вытекают требования по прочностным параметрам.

Задачей исследований является разработка теоретических и практических основ совместной работы газобетонной кладки и штукатурного покрытия, на основании 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 твердении и эксплуатации, понимать механику разрушения системы. Рассмотрение внутрискрутурных 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 построения 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 картины разрушения, расчет параметров 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. 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 раствора [18,19,20].

Происходит гидравлическая (0,3...0,8 мм/м) и пластическая (2...5 мм/м) усадка штукатурного раствора [6,7, 8, 9, 1], 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 коэффициент Пуассона штукатурного покрытия; $\Delta\varepsilon$ - разность деформаций штукатурки и газобетонного основания [5]. Из-за этих напряжений и из-за того, что уменьшение степени гидратации цемента привело к снижению предельной растяжимости материала на 20...50% [5,10,3], происходит трещинообразование в штукатурном покрытии, на поверхности и в объеме материала, (рис.1b,c), а также в контактной зоне с газобетонным основанием (рис. 1a).

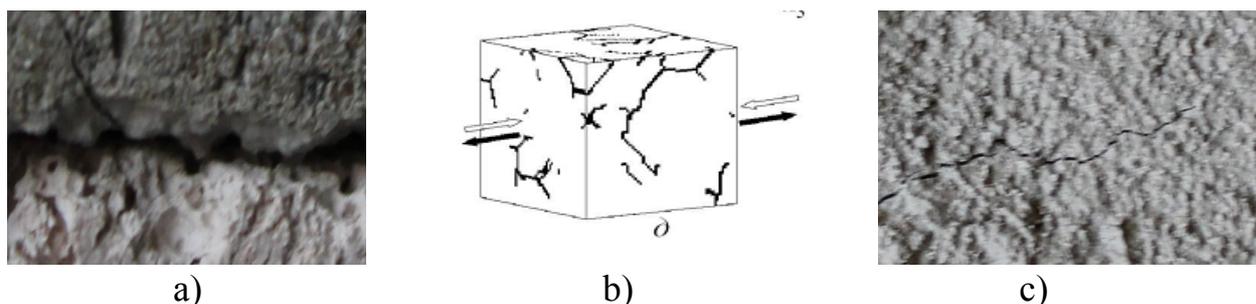


Рисунок 1 Трещинообразование: а) в контактной зоне «газобетонное основание –штукатурное покрытие»; б) в объеме штукатурного раствора с) и на его поверхности

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, а также через поры. Устье трещин располагается около зерен песка, вблизи устья трещин наблюдается множество микро-трещин [11]. Трещины имеют разветвления, зигзагообразные включения длиной 10 мкм, а также пересечения. Наблюдаются неразрушенные участки цементного камня, являющиеся мостиками прочности [17].

При эксплуатации на штукатурное покрытие оказывают влияние комплексные нагрузки, включающие 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 (δ).

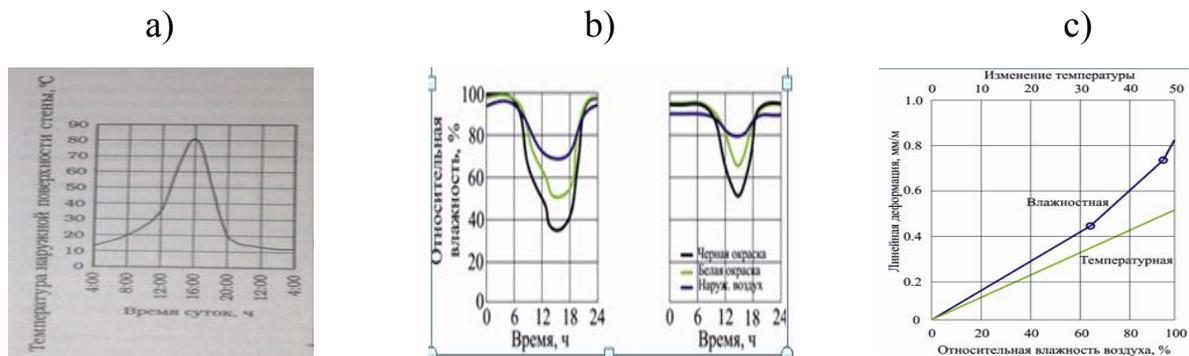


Рисунок 2. Графики изменения а) температур б) влажности окружающей среды и в) температурно-влажностных деформаций штукатурного покрытия [2,16].

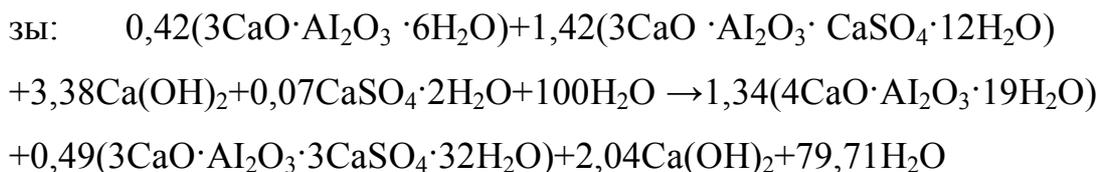
$$\Delta L_p = \alpha \Delta T^p L; \Delta L_c = \alpha \Delta T^c L; \quad \Delta L_{тв} = (\alpha \Delta T L F_m) + (\Delta L_q L)$$

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].

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

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

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.

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 мелкого 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 образовавшихся трещин, где происходит концентрация напряжений, причём они тем больше, чем больше их размер. При напряжениях сверх некоторого критического значения происходит подрастание трещин.

Концентрация микротрещин растет, и при достижении некоторого критического значения образуются макротрещины [21]. Рост макротрещин, проходит через контактную зону с заполнителем и цементный камень. Когда деформация в вершине трещин, достигает критического значения, область, прилегающая к устью трещины, 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).

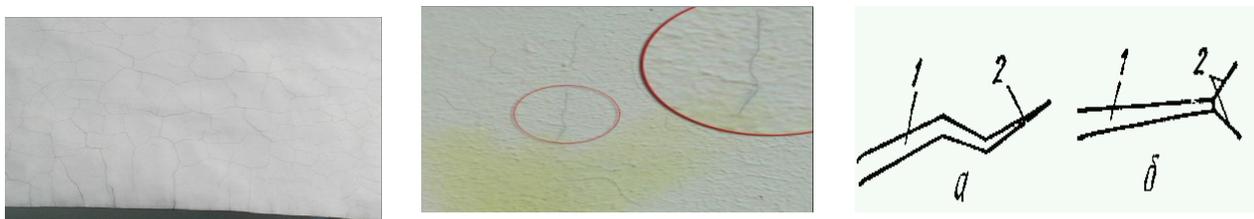


Рисунок 3 Развитие трещин в штукатурном покрытии при эксплуатационных воздействиях

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 парообразной влагой мигрирующей из помещения и конденсирующейся внутри конструкции, температуры и влажности окружающей среды, от ветровых нагрузок, деформации железобетонного каркаса [12,13]. 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)

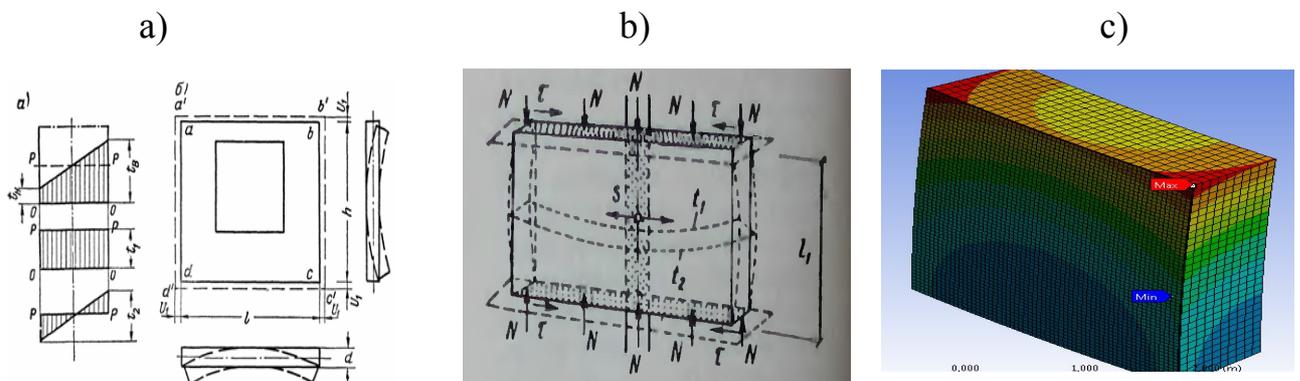


Рисунок 4. Деформации стеновой конструкции и изополя напряжений а – температурные деформации и напряжения в стеновой конструкции [14]; б–деформации стеновой конструкции при всех видах нагрузки; с-изополя напряжений в стеновой конструкции;

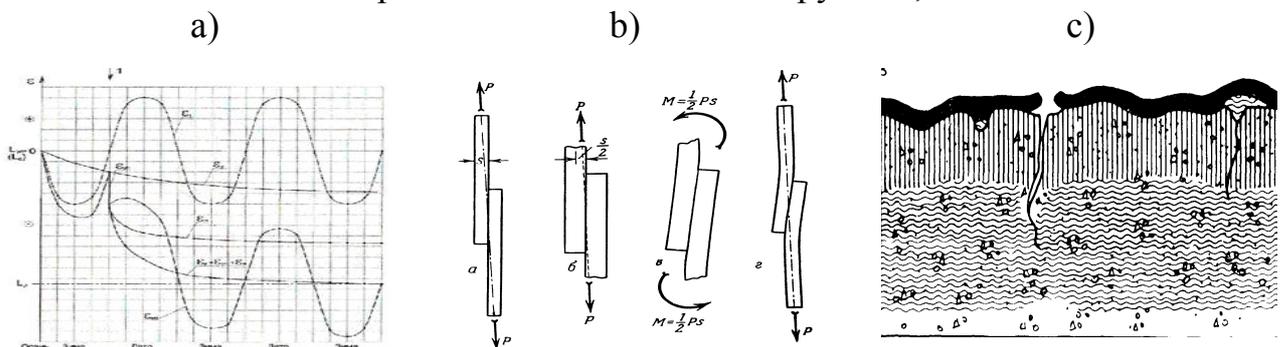


Рисунок 5. Деформации стеновой конструкции (а), стеновой конструкции и штукатурного покрытия (б), трещинообразование в стеновой конструкции с декоративно-защитным покрытием (с)

Из-за разности деформаций и модулей упругости газобетонного основания и штукатурного покрытия, в контактной зоне между ними, возникают деформации

(рис.5b,6a,b), и напряжения сдвига (τ) (рис.5), которые являются причиной развития магистральной трещины в контактной зоне (рис.6-8):

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

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;

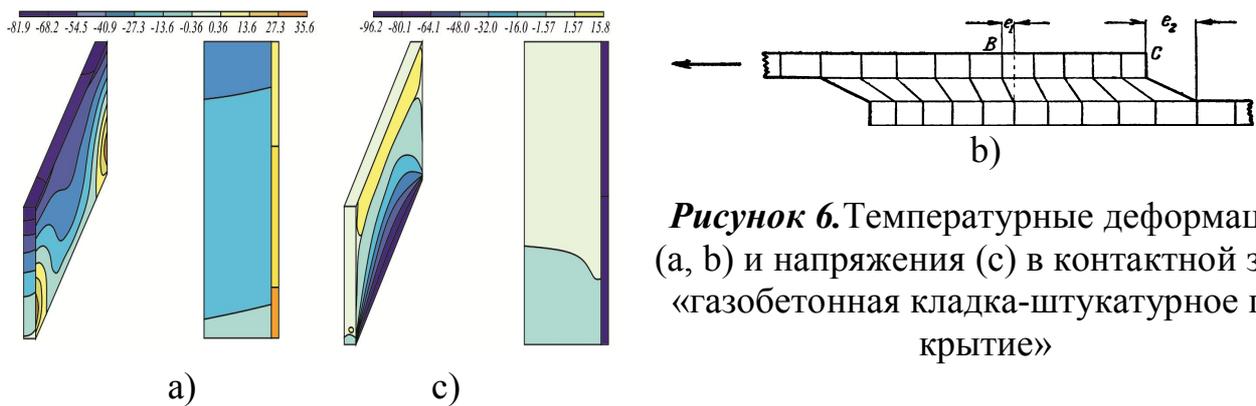


Рисунок 6. Температурные деформации (a, b) и напряжения (c) в контактной зоне «газобетонная кладка-штукатурное покрытие»

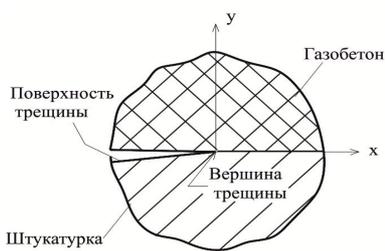


Рисунок 7 Трещина в контактной зоне

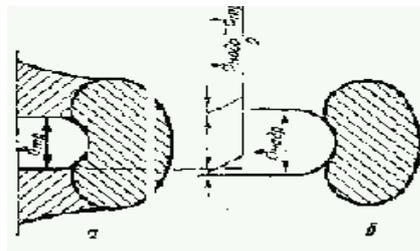


Рисунок 8 Вершина магистральной трещины

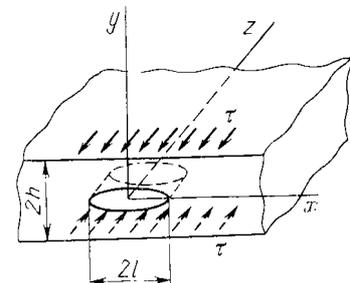


Рисунок 9 Страгивание трещины в контактной зоне

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). 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 (Рис.8). 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.7,10). 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.11).

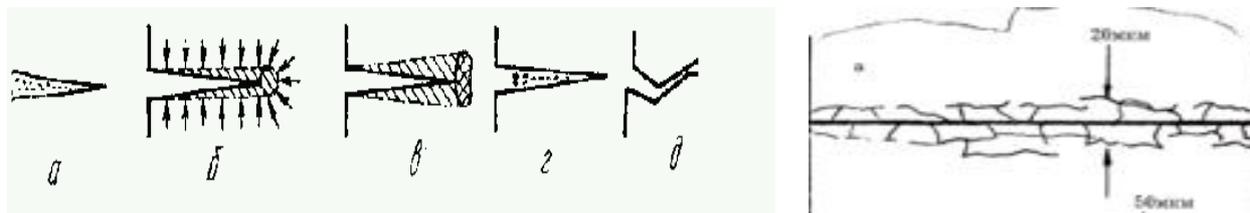


Рисунок 10 Развитие магистральной трещины в контактной зоне «газобетонное основание-штукатурное покрытие»

Процесс разрушения интенсифицируется 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.11с). 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.

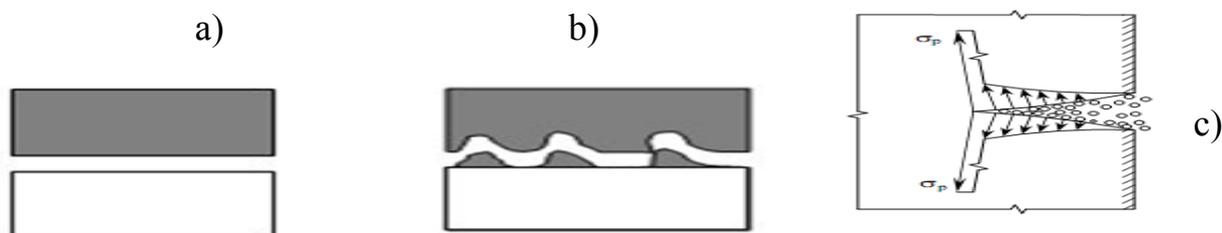


Рисунок 11 Виды разрушений в контактной зоне «газобетонная кладка-штукатурное покрытие»: а – адгезионное; б – смешанное, с) расклинивающее действие водных пленок в магистральной трещине

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 магистральных трещинах в штукатурном растворе и контактной зоне влага увеличивается в объеме, вызывая значительные напряжения в устье трещины, поэтому цикл замораживания, сопровождается скачкообразным подрастанием трещины [7]. В результате вышеописанных процессов происходит разрушение штукатурного покрытия и отслоения его от газобетонной кладки (Рис.12)



Рисунок 12 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, должны обеспечивать высокую трещиностойкость штукатурного покрытия и контактной зоны. Только в этом случае можно будет обеспечить высокую долговечность штукатурного покрытия и стеновой конструкции в целом.

Исходя из вышеизложенных теоретических предпосылок, нами были оптимизированы 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

	Диапазон варьирования	Расход вяжущего, кг/м ³	Расход за-полнителя и наполнителя, м ³ /м ³	Расход фибры, кг/м ³	Расход редиспергируемого полимерного порошка Winnapas 5043 Н, %	Расход Tylose MBZ 15009, %
		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

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.13а-d);

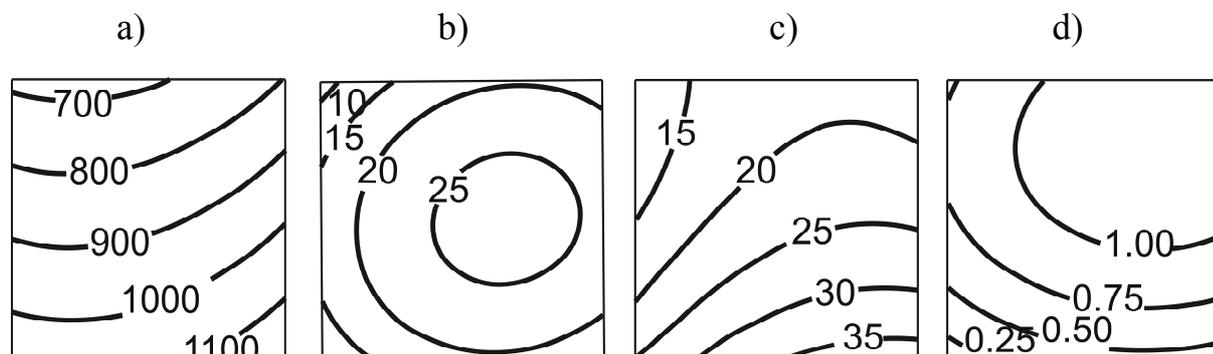


Рисунок 13 Средняя плотность (а), прочность при изгибе (b), прочность при сжатии (с), коэффициент трещиностойкости (d) состава №2

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.14а-d).

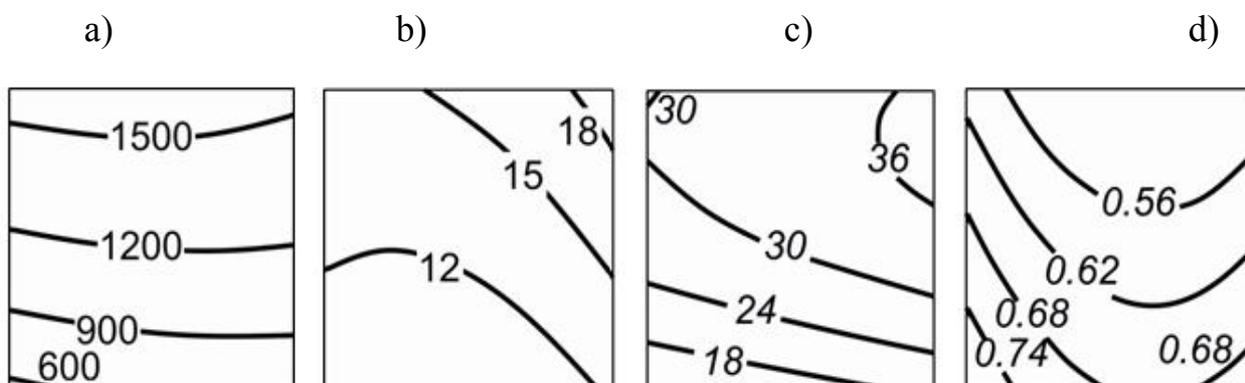


Рисунок 14 Средняя плотность (а), прочность при изгибе (b), прочность при сжатии (с), коэффициент трещиностойкости (d) состава №1

Приведенные данные свидетельствуют о том, что целенаправленной модификацией штукатурной смеси, можно улучшить ее параметры и обеспечить совместность 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».

2. Обеспечить необходимые свойства штукатурных растворов возможно путем целенаправленной модификации.

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. Гранау Э. Предупреждение дефектов в строительных конструкциях. Москва. Стройиздат. 1980.- с.217

3. Сажнева Н.Н., Сажнев Н.П., Урецкая Е.А. Защитные системы для отделки ячеистого бетона пониженной плотности // Строительные материалы. 2009. №1. С. 17-19.
4. Халимов Р.К. Исследование совместной работы строительных материалов в составе современных многослойных теплоэффективных наружных стен зданий, Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Специальность: 05,23.05 - Строительные материалы и изделия; Уфа, 2007
5. Я.Паплавскис, А.Фрош, Требования к штукатурным составам для наружной отделки стен из ячеистых бетонов. Проблемы эксплуатационной надежности наружных стен на основе автоклавных газобетонных блоков и возможности их защиты от увлажнения. Штукатурные составы для наружной отделки стен из газобетона: материалы семинара; под редакцией Н.И.Ватина, - СПб. Изд-во. Политехнического ун-та, 2010, с.10-15
6. Горшков А.С., Кнатько М.В., Рымкевич П.П., Оценка долговечности стеновой конструкции .Семинар "Однослойные ограждения из автоклавного газобетона в современном домостроении", 24 ноября 2009г. Екатеринбург.
7. Cotterell Brian, Mai Yiu-Wing. Crack Growth Resistance Curve and Size Effect in the Fracture of Cement Paste. Кривая сопротивления росту трещин и масштабный эффект при разрушении цементного камня. //J. Mater. Sci., -1987. -№8. - pp.2734-2738.
8. Комохов П.Г., Попов В.П. Энергетические и кинетические аспекты механики разрушения бетона. – Самара: см. филиал секции «Строительство» РИА, 1999. – 111с.
9. 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

10. Галкин С.Л., Сажнев Н.П., Соколовский Л.В., Сажнева Н.Н. «Применение ячеистобетонных изделий. Теория и практика" НП ООО "Стринко", Минск, 2006.
11. 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.
13. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. – Одесса, 1998. – 168 с.
14. 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.

Парута В.А., Гнып О.П., Лавренюк Л.И., Русев А.Г., Цонда Д.А., Вандинский В.Ю.
Проектирование состава штукатурного раствора для стен из газобетонных камней с учетом механики разрушения системы «кладка-штукатурное покрытие»
Прочностные свойства штукатурных растворов необходимо назначать с учетом механики разрушения системы «кладка-штукатурное покрытие», процессов протекающих при его твердении и эксплуатации. В статье рассмотрены процессы, протекающие при твердении штукатурного раствора, механика разрушения системы «кладка-штукатурное покрытие». Ключевые слова: проектирование состава, штукатурные растворы, механика разрушения

Paruta V.A., Gnyup O.P., Lavrenyuk L.I., Rusev A.G., Conda D.A., Vandinskiy V.Y.
Planning of composition of clout solution for sthenes from gazobetonnykh stone taking into account mechanics of destruction of the system «laying-clout coverage»
Properties of clout solutions must be appointed taking into account mechanics of destruction of the system «laying-clout coverage», understanding of processes flowings at his hardening and exploitation. In the article processes are considered flowings at hardening of clout solution, mechanics of destruction of the system «laying-clout coverage». Keywords: planning of composition, shtukaturne solutions, mechanics of destruction

Парута В.А., Гнип О.П., Лавренюк Л.И., Русев А.Г., Цонда Д.А., Вандінський В.Ю.
Проектування складу штукатурного розчину для стін з газобетонних каменів з урахуванням механіки руйнування системи «кладка-штукатурне покриття»
Анотація: Показники міцності штукатурних розчинів треба призначати з урахуванням механіки руйнування системи «кладка-штукатурне покриття», розумінні процесів що протікають при його твердінні і експлуатації. У статті розглянуті процеси що протікають при твердненні штукатурного розчину, механіка руйнування системи «кладка-штукатурне покриття». Ключові слова: проектування складу, штукатурні розчини, механіка руйнування