

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.

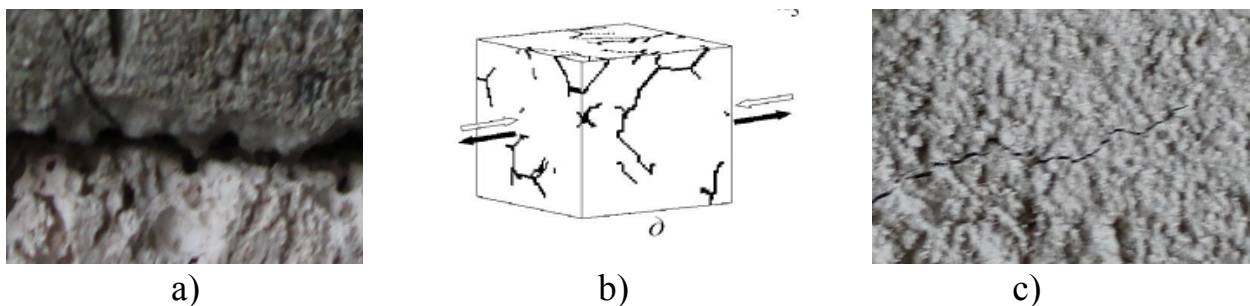
Разрушение штукатурного покрытия связано с образованием, накоплением и развитием дефектов в структуре материала (микро- и макротрещин) которые образуются при нанесении, твердении и эксплуатации. Особенностью процесса твердения штукатурного раствора является то, что гидратация цемента протекает при недостаточном 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 ( $\delta$ ), которые в семь раз превышают его предел прочности

при растяжении:

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

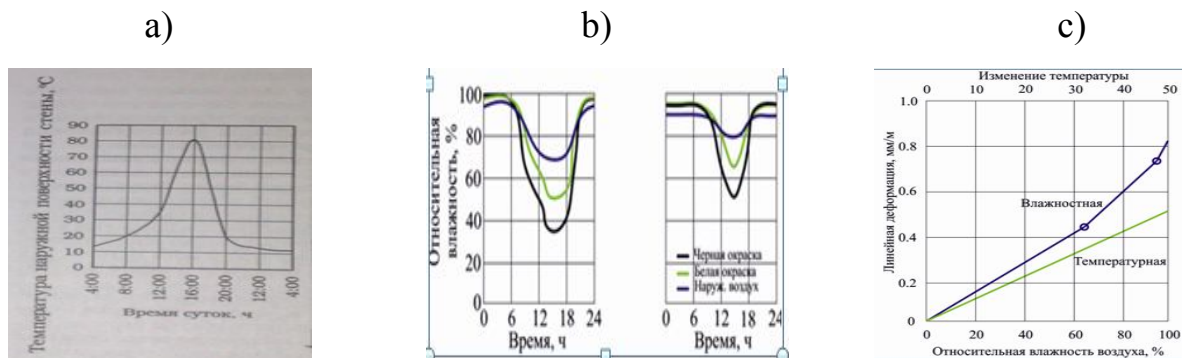
где:  $E$  и  $\mu$  - модуль упругости и коэффициент Пуассона штукатурного покрытия;  $\Delta\varepsilon$  - разность деформаций штукатурки и газобетонного основания [5]. Из-за этих напряжений и из-за того, что уменьшение степени гидратации цемента привело к снижению предельной растяжимости материала 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 ( $\Delta L_p$ ,  $\Delta L_c$ ,  $\Delta L_{ТВ}$ ) и дополнительным напряжениям в материале ( $\delta$ ).



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

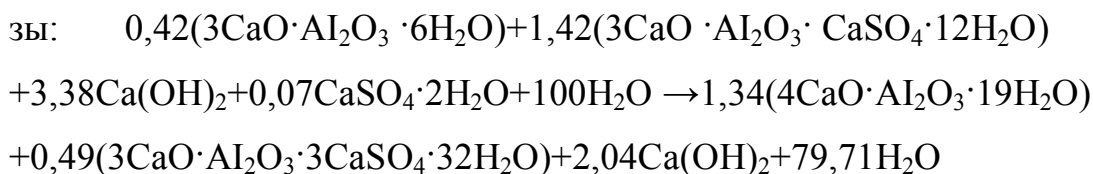
$$\Delta L_p = \alpha \Delta T^p L; \Delta L_c = \alpha \Delta T^c L; \quad \Delta L_{тв} = (\alpha \Delta T L F_m) + (\Delta L_q L)$$

где:  $\Delta L_p$ ,  $\Delta L_c$  – деформации растяжения и сжатия;  $\alpha$  – коэффициент температурного удлинения материала;  $\Delta T$  – разность температур;  $L$  – длина стенового элемента;  $\Delta L_{ТВ}$  - тепло-влажностные деформации;  $F_m$ – показатель материальных дефектов;  $\Delta L_q$  – 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;  $\alpha t$ -коэффициент линейного расширения штукатурного покрытия;  $\Delta t$ - расчетный перепад температур;

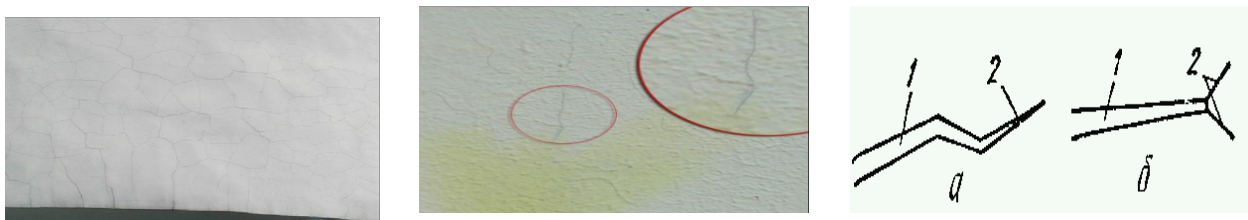
При увлажнении штукатурного покрытия, образовавшиеся ранее, менее обводненные гидраты, становятся термодинамически нестабильными и стремятся к переходу в более обводненные, стабильные в новых условиях, гидратные фазы:



Процесс перекристаллизации сопровождается увеличением объема твердой фазы (до 45%), что приводит к значительным внутренним напряжениям в материале, что также способствует развитию микротрещин.

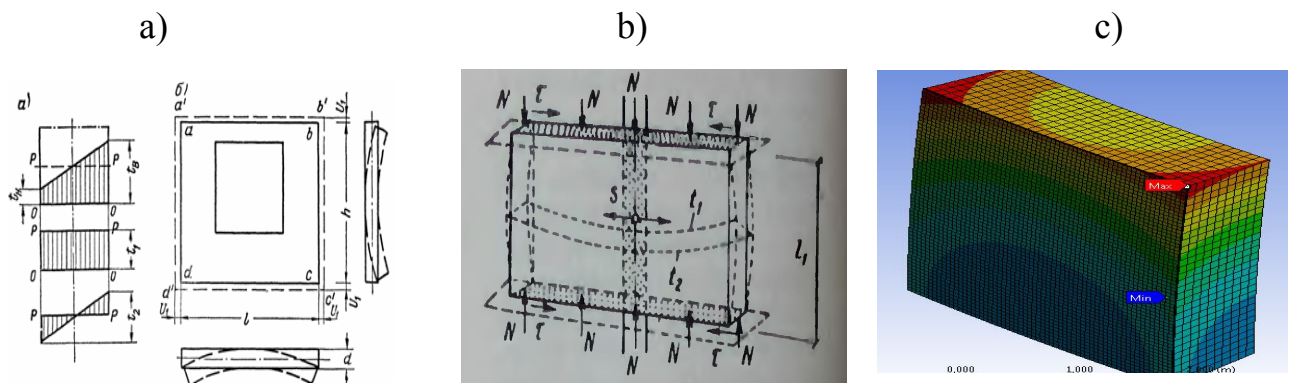
Влажностные деформации набухания и усадки, накладываясь на поле температурных деформаций, способствуют развитию трещин в материале. Для материала характерна неоднородность напряженного состояния. На границе цементной матрицы и мелкого заполнителя, двух фаз с различными КТР (коэффициентом температурного расширения -  $\alpha$ ), при изменении температуры, возникают сжимающие напряжения, действующие на фазу с высоким  $\alpha$  и растягивающие, действующие на фазу с меньшим  $\alpha$ . 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).

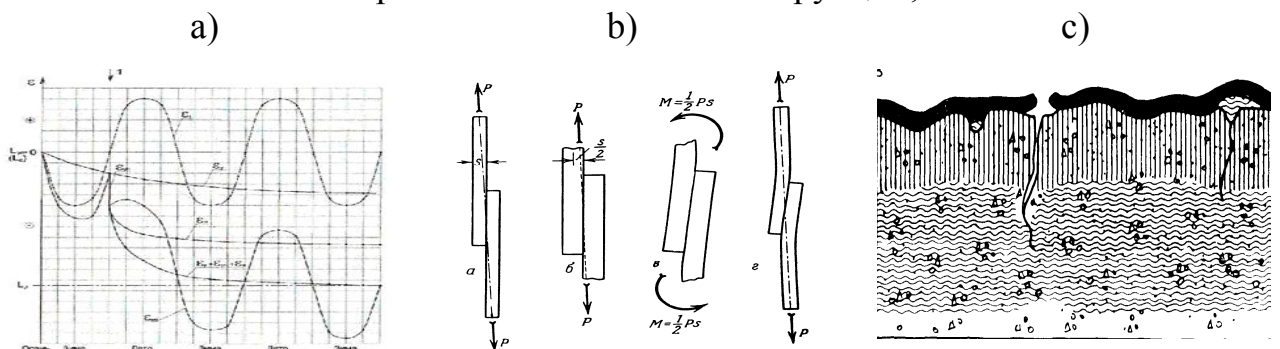


**Рисунок 3** Развитие трещин в штукатурном покрытии при эксплуатационных воздействиях

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 подростание 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;



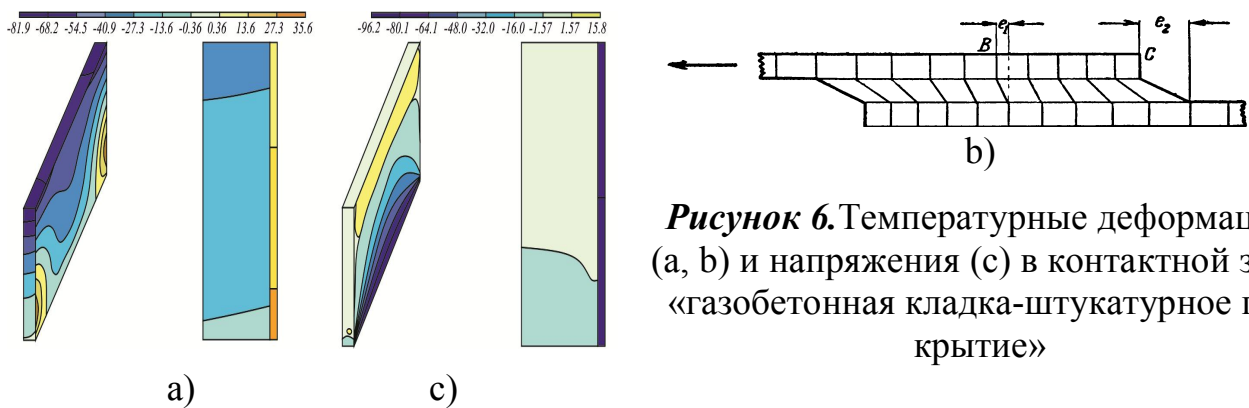
**Рисунок 5.** Деформации стеновой конструкции (а), стеновой конструкции и штукатурного покрытия (б), трещинообразование в стеновой конструкции с декоративно-защитным покрытием (с)

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

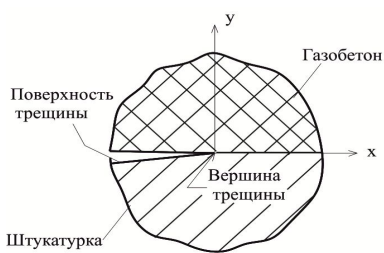
(рис.5b,6a,b), и напряжения сдвига ( $\tau$ ) (рис.5), которые являются причиной развития магистральной трещины в контактной зоне (рис.6-8):

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

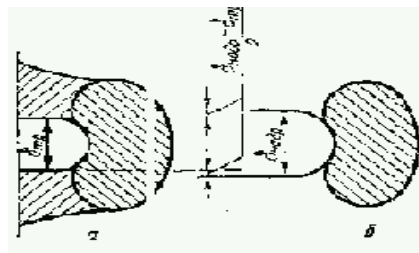
где:  $\tau$  - напряжение сдвига от температурных деформаций, кгс/см<sup>2</sup>;  $\Delta T_1, \Delta T_2$  – разность температуры штукатурного покрытия и кладки, °С;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициент термического расширения кладки и штукатурного покрытия;  $E_1, E_2$  – модули упругости кладки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



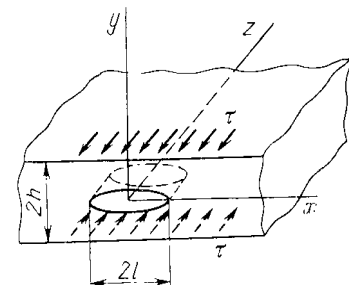
**Рисунок 6.** Температурные деформации (a, b) и напряжения (c) в контактной зоне «газобетонная кладка-штукатурное покрытие»



**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 ( $dl/dN$ ):

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

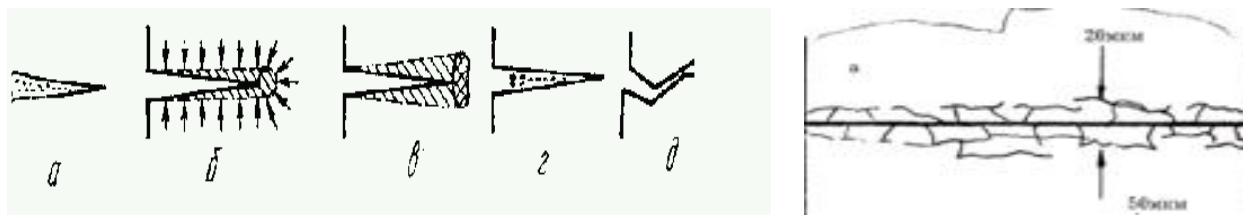
где:  $A$  и  $n$  - эмпирические коэффициенты,  $n = 2 - 7$ , с увеличением хрупкости материала  $n$  увеличивается;  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$  - перепад коэффициента интенсивности напряжений за один цикл,  $N$  — число циклов.

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,

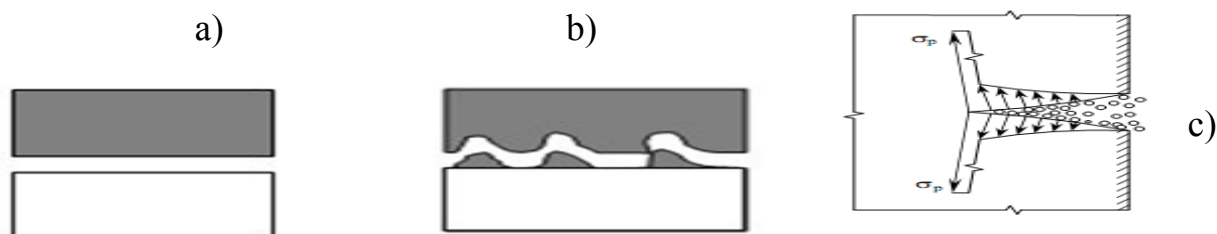


тем больше вероятность разрушения соединения непосредственно по границе - адгезионный характер разрушения (Рис.11).



**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.

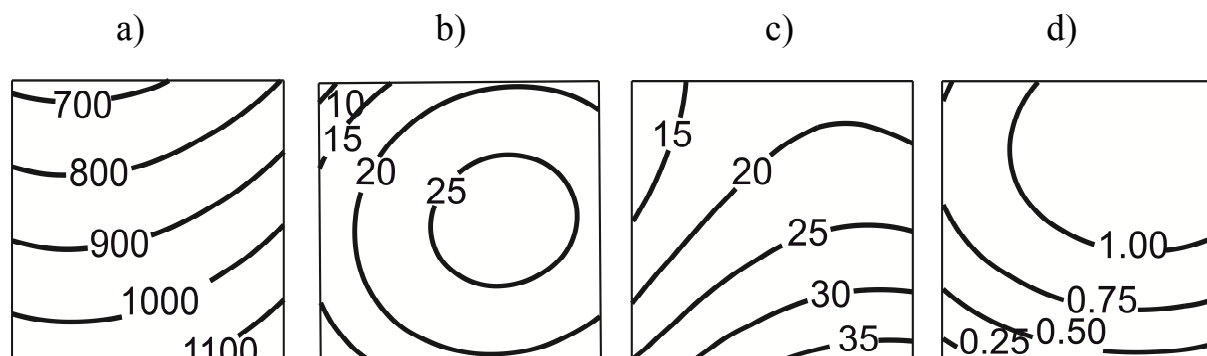
Исходя из вышеизложенных теоретических предпосылок, нами были оптимизированы составы штукатурных смесей на различных видах заполнителей и наполнителей – вермикулитовом и из боя газобетона (смесь №1), карбонатном и перлитовом (смесь №2). Для оптимизации рецептурно-технологических параметров использовали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

Таблица 1

## Диапазон варьирования факторов

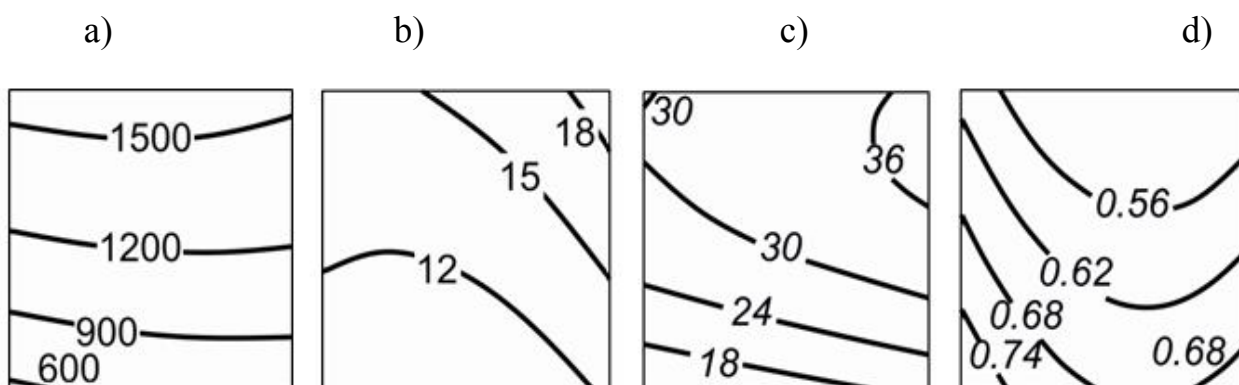
	Диапазон варьирования	Расход вяжущего, кг/м <sup>3</sup>	Расход за-полнителя и наполнителя, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Расход фибры, кг/м <sup>3</sup>	Расход редуспер-гируемого поли-мерного порошка Winnapas 5043 Н, %	Расход Tylose MBZ 15009, %
		X1	X2	X3	X4	X5
Смесь №1	1	500	1,05/1	1,2	5	0,5
	0	400	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/м<sup>3</sup>, прочность при изгибе 10-25 кг/см<sup>2</sup>, прочность при сжатии 15-35 кг/см<sup>2</sup>, 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/м<sup>3</sup>, прочность при изгибе 12-18 кг/см<sup>2</sup>, прочность при сжатии 18-36 кг/см<sup>2</sup>, коэффициент трещиностойкости 0,56-0,74 (рис.14a-d).



**Рисунок 14** Средняя плотность (a), прочность при изгибе (b), прочность при сжатии (c), 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.] 1<sup>st</sup> 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