

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ШТУКАТУРНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СТЕН ИЗ АВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА С УЧЕТОМ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ СИСТЕМЫ «КЛАДКА - ШТУКАТУРНОЕ ПОКРЫТИЕ»

Парута В.А., Гавурский А.М., Марченко В.В., Фомина Т.И.
Одесская Государственная Академия Строительства и Архитектуры
г. Одесса, Украина

Брынзин Е.В.
ООО ЮД К
г. Днепропетровск, Украина

АНОТАЦІЯ: Міцність на стиск та вигин, тріщиностійкість штукатурних розчинів необхідно призначати з врахуванням механіки руйнування системи «кладка - штукатурне покриття».

АННОТАЦИЯ: Прочностные свойства штукатурных растворов, трещиностойкость, необходимо назначать с учетом механики разрушения системы «кладка - штукатурное покрытие».

ABSTRACT: Properties of clout solutions must be appointed taking into account mechanics of destruction of the system «laying - clout coverage», understanding of processes flowings.

Ключевые слова: Энергосбережение, автоклавный газобетон, проектирование состава штукатурки, механика разрушения

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Штукатурное покрытие, энергосберегающие стены, автоклавный газобетон.

Высокая стоимость энергоносителей требует внедрения энергосберегающих технологий в строительстве. Так как 40% теплопотерь происходит через стены, то необходимо увеличивать их термическое сопротивление. Возведение однослойных стен с использованием традиционных стеновых материалов (кирпич керамический и силикатный, керамзитобетон, известняк ракушечник) не эффективно. При традиционной толщине стены 0,52...0,62 м, термическое сопротивление составляет 0,84...1,23 м² К/Вт (табл. 1), что предопределяет значительные теплопотери.

Оптимальным является использование стеновой конструкции из автоклавного газобетона. При толщине 0,4...0,5 м обеспечивается термическое сопротивление 3,1...4,5 м²·К/Вт, достаточное для любого региона Украины (табл. 1). Такие стены используют с различными системами отделки: облицовкой кирпичом, керамической плиткой и навесным вентилируемым фасадом и др. Оптимальным технико-экономическим решением является оштукатуривание фасадной полимерцементной штукатуркой. Технология возведения проста, с высокой производительностью и малыми

затратами. Недостатком является то, что штукатурному покрытию присуще трещинообразование [1], которое приводит к его разрушению и снижению долговечности ограждающей конструкции.

Таблица 1

Характеристики стеновой конструкции

Характеристика стенового материала	Вид стенового материала					
	керамзитобетон	кирпич керамический пустотелый	кирпич силикатный полнотелый	кирпич силикатный пустотелый	известняк ракушечник	газобетон автоклавный
Средняя плотность, кг/м ³	1000	1400	1800	1400	1400	300...600
Теплопроводность, Вт/м·К	0,41	0,58	0,76	0,64	0,58	0,11...0,16
Термическое сопротивление (R) стены, при традиционных толщинах:						
-толщина, м	0,35	0,51...0,62	0,51...0,62	0,51...0,62	0,4	0,375...0,5
-R, м ² ·К/Вт	1,02	1,04...1,23	0,84...0,98	0,96...1,13	0,85	3,1...4,5
Толщина стены, м, при термическом сопротивлении (R _n), м ² ·К/Вт						
R _n =2,8	1,15	1,62	2,13	1,79	1,69	0,36...0,79
R _n =3,3	1,35	1,9	2,5	2,11	1,91	0,43...0,86
Масса м ² стены, кг, при термическом сопротивлении (R _n), м ² ·К/Вт						
R _n =2,8:	1150	2268	3834	2506	2268	108...438
R _n =3,3	1350	2660	4500	2954	2660	129...480

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

Для определения, какими параметрами должно обладать штукатурное покрытие, необходимо знать процессы, протекающие в системе «кладка - покрытие» при нанесении раствора, его твердении и эксплуатации, понимать механику разрушения системы. Рассмотрение напряжений в штукатурном покрытии и контактной зоне с кладкой, является предварительным условием построения механики разрушения системы. Расчет параметров напряженно-деформированного состояния, 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 макро-трещин) 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. Поэтому формируется дефектная структура материала, образуются нера-

вновесные, метастабильные поликристаллические новообразования цементного камня. Это, наряду с неполной реализацией вяжущего потенциала цемента, приводит к падению прочности, повышенному трещинообразованию и снижению долговечности штукатурного покрытия.

При твердении происходит гидравлическая (0,3...0,8 мм/м) и пластическая (2...5 мм/м) усадка штукатурного раствора [3, 4], 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:

$$\delta = \frac{\Delta \varepsilon * E}{1 - \mu}, \quad (1)$$

где: E и μ - модуль упругости и коэффициента 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% [3, 4], происходит трещинообразование в штукатурном покрытии, на поверхности и в объеме, (рис. 1 б, в), а также в контактной зоне с газобетонным основанием (рис. 1 а).

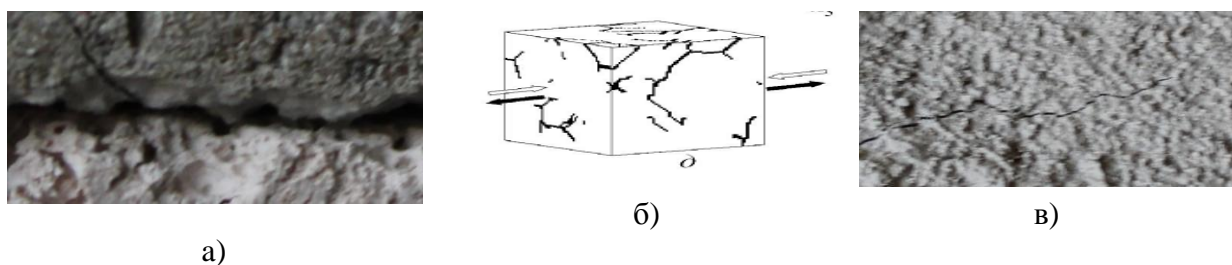


Рис. 1. Трещинообразование: а) в контактной зоне; б) в объеме штукатурного раствора в) и на его поверхности

В результате формируется дефектная структура материала, включающая поры, трещины, и совмещенные поры с трещинами. Трещины 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 крупных 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. При эксплуатации на стеновую конструкцию оказывают влияние комплексные нагрузки, включающие силовые, температурные, влажностные и коррозионные, под воздействием которых происходит развитие 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).

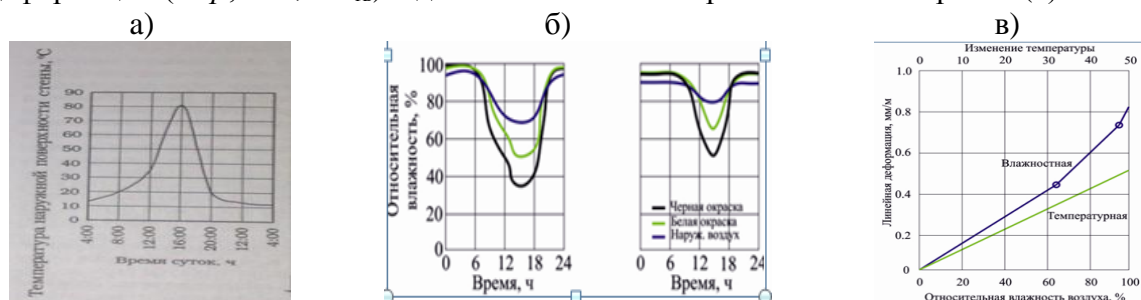


Рис. 2. Графики изменения а) температур б) влажности окружающей среды и в) деформаций штукатурного покрытия [2]

$$\Delta L_p = \alpha \Delta T^p L; \Delta L_c = \alpha \Delta T^c L; \Delta L_{ms} = (\alpha \Delta T L F_m) + (\Delta L_q L) \quad (2)$$

где: $\Delta L_p, \Delta L_c$ – 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].

$$\delta = \kappa \cdot \sqrt{[\alpha + b(L - c)]} \delta^* \quad \delta^* = E \cdot \alpha t \cdot \Delta t \quad (3)$$

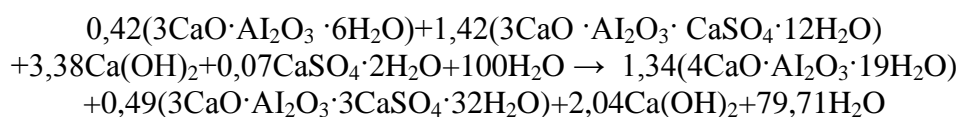
где: E – модуль упругости;

αt – коэффициент линейного расширения штукатурного покрытия;

Δt – расчетный перепад температур.

Для материала характерна неоднородность напряженного состояния, вызванная температурным воздействием. На границе цементной матрицы и кварцевого заполнителя, двух фаз с различными коэффициентом температурного расширения (α), возникают сжимающие напряжения, действующие на фазу с высоким α и растягивающие, действующие на фазу с меньшим α . Локальные напряжения особенно велики у вершины образовавшихся трещин. Влажностные деформации набухания и усадки, накладываясь на поле температурных деформаций, способствуют развитию трещин в материале. При напряжениях сверх некоторого критического значения происходит подрастание 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.



Перекристаллизация сопровождается увеличением объема твердой фазы (до 45%), что также приводит к значительным внутренним напряжениям в материале и 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 в штукатурном растворе, соединяясь, продолжают расти (рис. 3).



Рис. 3. Развитие трещин в штукатурном покрытии при эксплуатации

На напряженное состояние штукатурного покрытия оказывает влияние деформация 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 [7]. Вследствие этого стеновая конструкция испытывает деформации растяжения и сжатия, изгиба из плоскости (рис. 4, 5). При достижении определенного значения растягивающих напряжений из-за деформации кладки происходит дальнейшее подрастание трещин в штукатурном покрытии и декоративно-защитном слое (рис. 5в).

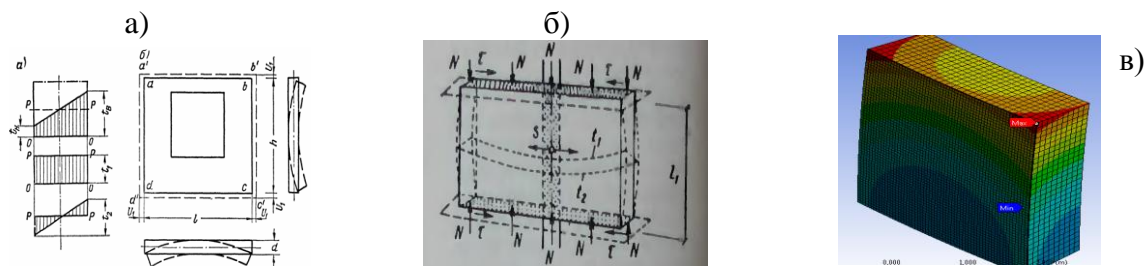


Рис. 4. Деформации стеновой конструкции и изополя напряжений:
 а – температурные деформации и напряжения в стеновой конструкции [1, 3];
 б – деформации стеновой конструкции при всех видах нагрузки; в - изополя напряжений в стеновой конструкции

Из-за разности деформаций и модулей упругости газобетонной кладки и штукатурного покрытия, в контактной зоне между ними, возникают деформации (рис. 5б, 6а, б), и напряжения сдвига (τ) (рис. 5), которые являются причиной развития магистральной трещины в контактной зоне (рис. 6-8).

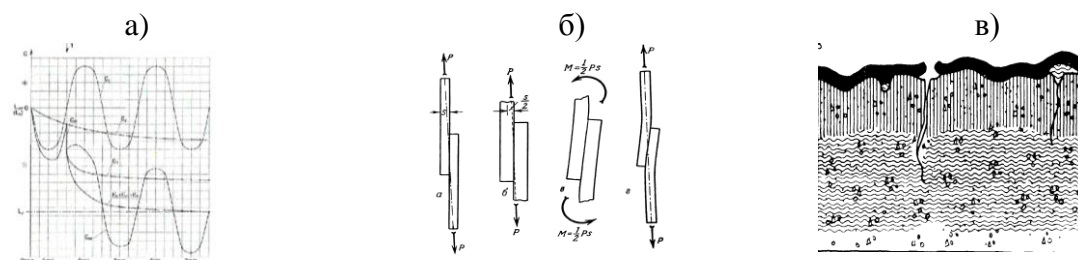


Рис. 5. Деформации стеновой конструкции (а), стеновой конструкции и штукатурного покрытия (б), трещинообразование в стеновой конструкции с декоративно-защитным покрытием (в)

$$\tau = [\Delta T_1 \alpha_1 - \Delta T_2 \alpha_2] / \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right], \quad (4)$$

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.

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):

$$dl/dN = A(\Delta K)^n \quad (5)$$

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 адгезионную прочность. 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.

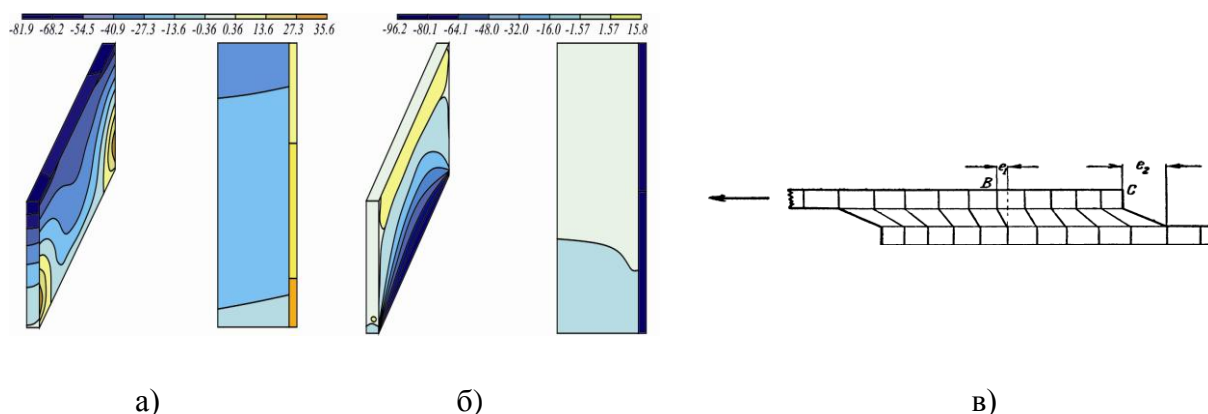


Рис. 6. Температурные деформации (а, б) и напряжения (в) в контактной зоне «газобетонная кладка - штукатурное покрытие»

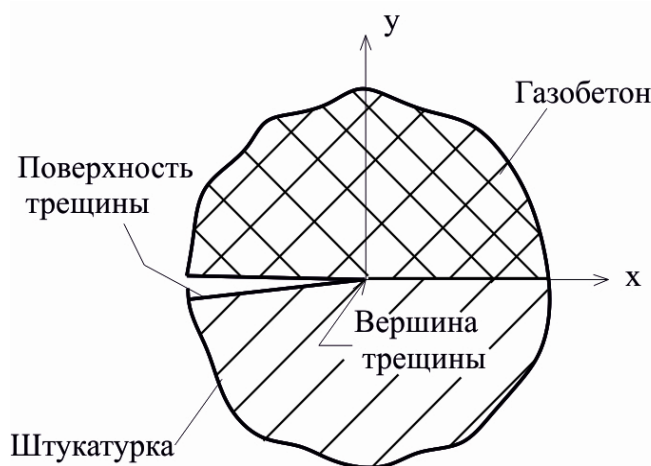


Рис. 7. Трещина в контактной зоне

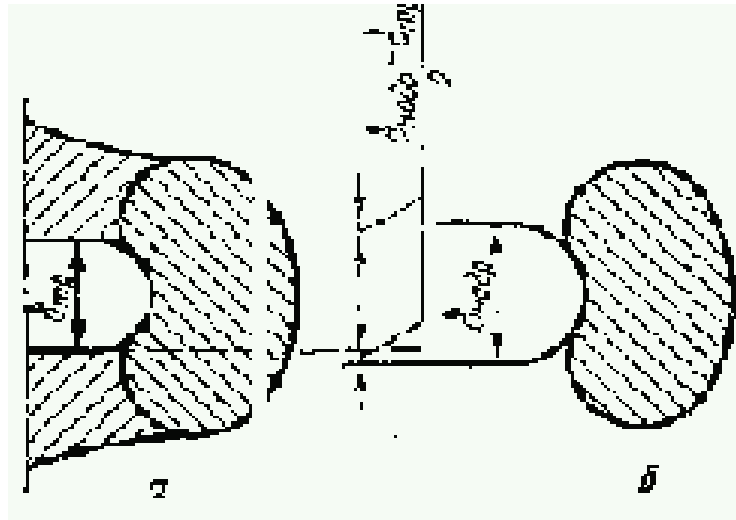


Рис. 8. Вершина магистральная трещины

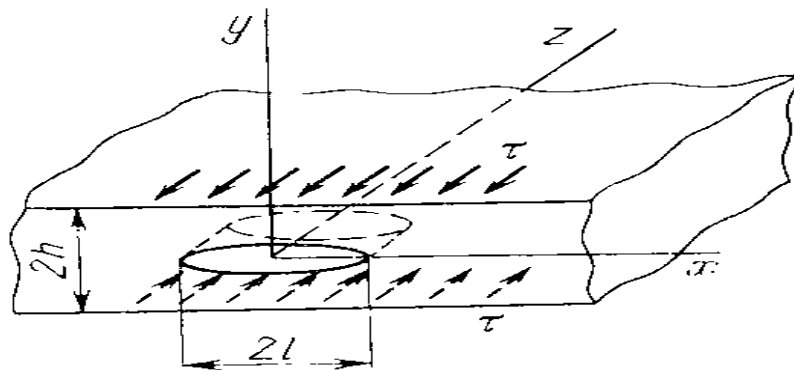


Рис. 9. Страгивание трещины в контактной зоне

В вершине микротрещины концентрируется напряжение (рис. 8), пока уровень напряжений меньше предельного значения адгезионной или когезионной прочности, трещина не растет. При увеличении деформаций конструкции, напряжения в устье трещины превзойдут предельный уровень, что приведет к ее подрастанию (рис. 7, 10). При снижении температуры или влажности произойдет частичное восстановление геометрии вершины трещины, однако в дальнейшем она увеличивает свою длину. С ростом трещины, растет и напряжение в ее вершине и когда трещина достигает критических размеров, произойдет разрушение контактной зоны 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.

Процесс разрушения интенсифицируется из-за наличия влаги, агрессивных жидкостей и газов, отрицательных температур. Влага, проникая в устье трещин, создает расклинивающее давление, а при испарении материале возникают напряжения усадки.

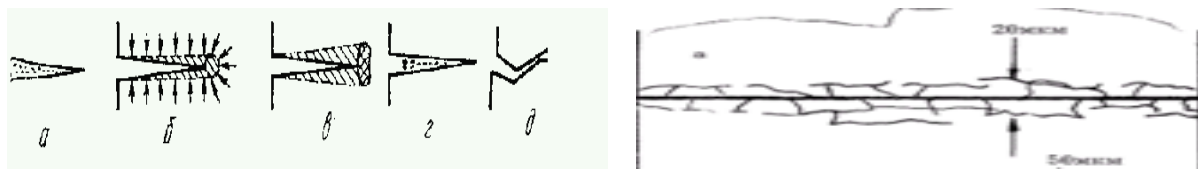


Рис. 10. Развитие магистральной трещины в контактной зоне

В результате происходит разрушение штукатурного покрытия и отслоения его от газобетонной кладки (рис. 11).



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

Для того, чтобы предотвратить трещинообразование в системе «кладка - штукатурное покрытие», проектирование штукатурных растворов необходимо вести с учетом процессов, протекающих при твердении раствора и механики разрушения.

Исходя из вышеизложенных теоретических предпосылок, нами 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 (табл. 2).

Таблица 2

Диапазон варьирования факторов

	Диапазон варьирования	Расход вяжущего, кг/м ³	Расход заполнителя и наполнителя, м ³ /м ³	Расход фибры, кг/м ³	Расход ретиспергируемого полимерного порошка Winnapas 5043 Н, %	Расход Tylose MBZ 15009, %
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. 12 а-г).

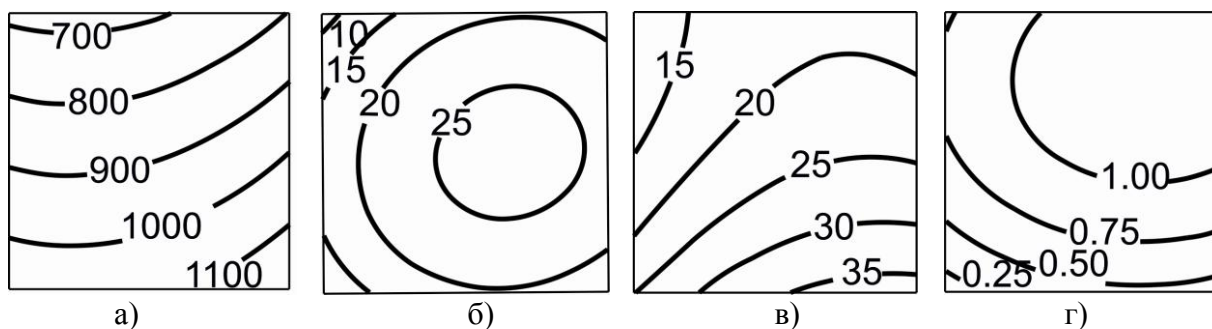


Рис. 12. Средняя плотность (а), прочность при изгибе (б), прочность при сжатии (в), коэффициент трещиностойкости (г) состава №2

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. 13а-г).

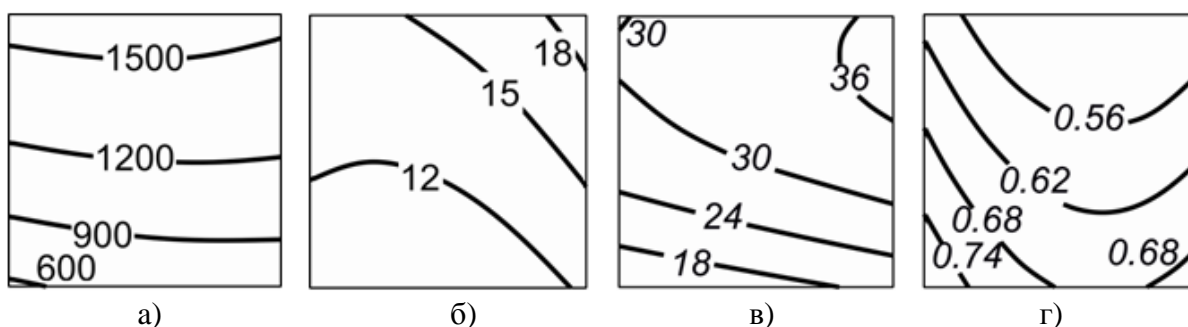


Рис. 13. Средняя плотность (а), прочность при изгибе (б), прочность при сжатии (в), коэффициент трещиностойкости (г) состава №1

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. Грануау Э. Предупреждение дефектов в строительных конструкциях / Грануау Э. - М.: Стройиздат, 1980. - С. 217.
2. Сажнева Н.Н. Защитные системы для отделки ячеистого бетона пониженной плотности / Сажнева Н.Н., Сажнев Н.П., Урецкая Е.А. // Строительные материалы. - 2009. - №1. - С. 17-19.
3. Горшков А.С. Оценка долговечности стеновой конструкции / Горшков А.С., Кнатько М.В., Рымкевич П.П. // Однослойные ограждения из автоклавного газозолобетона в современном домостроении: матер. семинара 24 ноября 2009 г. - Екатеринбург.
4. Cotterell Brian. Кривая сопротивления росту трещин и масштабный эффект при разрушении цементного камня / Cotterell Brian, Mai Yiu-Wing // J. Mater. Sci., -1987. - №8. - P. 2734 - 2738.
5. Struble L.J. Структурные аспекты разрушения цементного камня. / Struble L.J., Stutzman P.E., Fuller E.R. // 1st Symp. Rel. Multilayer Ceram. Capacitors, University Park, Pa, May 11-12. J. Amer. Ceram. Soc., 1989. - №12. - P. 2295-2299.
6. Применение ячеистобетонных изделий. Теория и практика / [Галкин С.Л., Сажнев Н.П., Соколовский Л.В., Сажнева Н.Н.]. - Минск: НП ООО "Стринко", 2006.
7. Выровой В.Н. Структура и свойства структурно-неоднородных сред / Выровой В.Н. // Механика неоднородных сред и ее применение. – Одесса: Город мастеров, 1997.
8. Дорофеев В.С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций / Дорофеев В.С., Выровой В.Н. – Одесса, 1998. – 168 с.

REFERENCES

1. Granau E. Warning defects in structures / Granau E. - M. Stroyizdat, 1980. - S. 217.
2. Sazhneva N.N. Protective systems for finishing low density cellular concrete / Sazhneva N.N., Sazhnev N.P., Uretskaya E.A. // Building Materials. - 2009. - №1. - S. 17-19.
3. Gorshkov A.S. Evaluation of durability of the wall structure / Gorshkov A.S., Knatko M.V., Rymkevich P.P. // Single-walled fencing autoclaved gas ash concrete in modern construction: Mater. Seminar November 24, 2009. - Yekaterinburg.
4. Cotterell Brian. Crack Growth Resistance Curve and Size Effect in the Fracture of Cement Paste / Cotterell Brian, Mai Yiu-Wing // J. Mater. Sci., -1987. - №8. - pp.2734-2738.
5. Struble L.J. Microstructural Aspects of The Fracture of Hardened Cement Paste / Struble L.J., Stutzman P.E., Fuller E.R. // 1st Symp. Rel. Multilayer Ceram. Capacitors, University Park, Pa, May 11-12, 1989. J. Amer. Ceram. Soc. - 1989. - №12. - P. 2295-2299.
6. Application of porous concrete products. Theory and practice / [Galkin SL, Sazhnev NP, Sokolovsky LV, Sazhneva NN]. - Minsk: NP LLC "Strinko", 2006
7. Vurovoi V.N. Structure and properties of heterogeneous media / Vurovoi V.N. // Mechanics of inhomogeneous media and its application. - Odessa: City of Craftsmen, 1997.
8. Dorofeev V.S. Technological damaged building materials and constructions / Dorofeev V.S., Vurovoi V.N. - Odessa, 1998. – 168 p.

Статья поступила в редакцию 02.03.2014 г.