



Парута В. А.



Брынзин Е. В.

Парута В. А., к.т.н., доцент,
Одесская государственная академия строительства и архитектуры (ОГАСА), ул. Дидрихсона 4, г. Одесса, 65029, Украина,
e-mail: docent2155@gmail.com, тел. 0487238434

Брынзин Е. В., к.т.н., начальник отдела маркетинга ООО «ЮДК»,
ул. Александра Оцупа, 7Д, г. Днепр, 49051, Украина,
www.udkgazbeton.com, e-mail: Yevgen.Brynzin@udkgazbeton.com,
тел.+380(562)33-80-09

V. Paruta, Cand.Tech.Sci., PhD,
Odessa state academy of construction and architecture (OGASA),
Didrikhson St. 4, Odessa, 65029, Ukraine,
e-mail: docent2155@gmail.com, ph. 0487238434

E. Brynzin, Cand.Tech.Sci. PhD, head of marketing department of LLC UDK,
Alexander Otsup St., 7D, Dnieper, 49051, Ukraine,
www.udkgazbeton.com, e-mail: Yevgen.Brynzin@udkgazbeton.com,
bodies.+380(562)33-80-09

СТРУКТУРА И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРЦЕМЕНТНОГО ШТУКАТУРНОГО РАСТВОРА

СТРУКТУРА І МЕХАНІЗМ РУЙНУВАННЯ ПОЛИМЕРЦЕМЕНТНОГО ШТУКАТУРНОГО РОЗЧИНУ

STRUCTURE AND MECHANISM OF DESTRUCTION OF POLIMERCEMENTNOGO OF CLOUT SOLUTION

Аннотация. Структура материала влияет на его свойства. В ранее опубликованных работах авторы рассмотрели причины разрушения штукатурного покрытия, предложили способ решения проблемы, путем целенаправленного формирования структуры полимерцементного раствора. В этой статье рассмотрено влияние структуры полученного материала на трещиностойкость системы «штукатурное покрытие-кладка». Проанализирована роль каждого структурного элемента и сырьевого компонента участвующего в его формировании.

Ключевые слова: полимерцементный штукатурный раствор, его структура, механизм трещинообразования и разрушения штукатурного покрытия.

Анотація. Структура матеріалу впливає на його властивості. У раніше опублікованих роботах автори розглянули причини руйнування штукатурного покриття, запропонували спосіб вирішення проблеми, шляхом цілеспрямованого формування структури полімерцементного розчину. У цій статті розглянуто вплив структури отриманого матеріалу на трещиностійкість системи «штукатурні покриття-кладка». Проаналізовано роль кожного структурного елементу і сировинного компонента який бере участь у формуванні структури.

Ключові слова: полімерцементний штукатурний розчин, його структура, механізм утворення тріщин і руйнування штукатурного покриття.

Abstract. The structure of the material affects its properties. In previously published works, the authors considered the reasons for the destruction of the plaster coating, suggested ways to solve the problem, by purposeful formation of the polymer-cement solution structure. In this article, the influence of the structure of the obtained material on the crack resistance of the "plaster coating-masonry" system is considered. The role of each structural element and the raw material component of the participant in its formation is analyzed.

Keywords: polymer cement plaster solution, its structure, mechanism of cracking and destruction of plaster coating.

Введение. В работах [1,2,3] авторы рассмотрели причины разрушения штукатурного покрытия, предложили пути решения проблемы, путем целенаправленного формирования структуры полимерцементного раствора. Это было обеспечено введением в растворную смесь редиспергируемых полимерных порошков (РПП), эфиров целлюлозы, полимерной фибры и заполнителей с низким модулем упругости. Критерием эффективности является трещиностойкость штукатурного покрытия и контактной зоны, его с кладкой. В этой статье рассмотрено влияние структуры полученного материала на трещиностойкость системы «штукатурное покрытие-кладка».

Актуальность исследования. Заключается в необходимости исследования влияния структуры полимерцементного штукатурного покрытия на его трещиностойкость и долговечность стеновой конструкции.

Цель и задачи исследований. Рассмотрение влияние структуры материала на его трещинообразование и долговечность.

Объект исследования. Штукатурное покрытие из полимерцементного раствора, его структура, процессы, протекающие в материале при твердении и эксплуатационных воздействиях.

Методы исследования. Исследование структуры материала, рассмотрение процессов протекающих в ней при эксплуатационных воздействиях.

Предмет исследования. Штукатурное покрытие, его структура, процессы протекающие в системе «кладка-штукатурное покрытие» при эксплуатационных воздействиях.

Результаты исследований. Макроструктура полимерцементного штукатурного раствора представляет собой композиционный материал, в котором зерна заполнителя и полимерная фибра, связаны полимерцементной матрицей. Матрица имеет микрогетерогенное строение, включая гидратные фазы, ча-

стицы негидратированного цемента, полимерные мембраны и наполнитель.

В результате введения полимеров (редиспергируемых порошков (РПП), эфиров целлюлозы), фибры и карбонатного наполнителя уменьшилось В/Ц отношение и, за счет этого, уменьшение усадочных деформаций. Следствием уменьшения усадочных деформаций явилось уменьшение трещинообразования в штукатурном покрытии и в контактной зоне его с кладкой (рис.1).

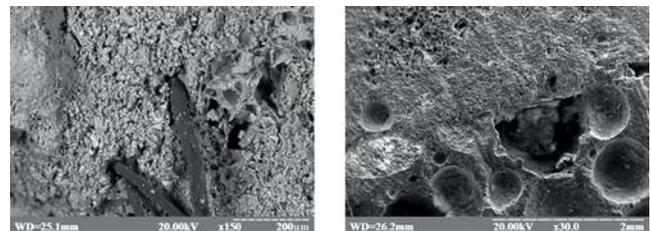


Рис.1 Структура материала

Матрица имеет преимущественно закрытую пористость с равномерным распределением пор, при уменьшении их размера. Если в цементно-известковом растворе преобладают поры размером 0,2-0,5 мм, то в полимерцементном 90-95% пор имеют размеры меньше 0,2 мм. В цементном камне уменьшается количество крупных пор с радиусом более 100 нм за счет увеличения количества микропор (3-5 нм) и средних пор (5-100 нм). Такая система распределенных пор в полимерцементной матрице способствует релаксации внутренних напряжений в материале и повышению трещиностойкости материала.

Поверхность пор, из-за наличия гидрофобного РПП, приобрели гидрофобные свойства. Результатом этого является снижение величины водопоглощения и водопрони-

цаемости материала и контактной зоны «кладка-покрытие» (рис. 2).



Рис.2. Механизм предотвращения проникновения атмосферной влаги в поры и трещины штукатурного покрытия и контактной зоны

Изменяется механизм разрушения системы «вода – штукатурное покрытие». Вблизи гидрофобной поверхности плотность воды и давление на стенки P меньше давления P_0 в объеме жидкой фазы, что приводит к возникновению «противокапиллярного давления». В результате расклинивающее давление становится отрицательным, что ведет к притяжению гидрофобных поверхностей к воде. Контакт воды с несмачиваемой ею поверхностью термодинамически не выгоден, поэтому вода самопроизвольно, под действием сил структурного притяжения выдавливается из гидрофобной поры или трещины.

В результате повышается атмосферостойкость, морозостойкость и долговечность штукатурного покрытия. Уменьшается степень и скорость карбонизации автоклавного газобетона из-за того, что разложение гидросиликатов кальция и рост кристаллов карбонатов кальция, в сухом материале не происходит [4].

В результате целенаправленного подбора компонентов растворной смеси, получен материал, который имеет низкий модуль упругости и коэффициент температурного расширения.

В материале существуют два вида связей между структурными элементами: между образовавшимися минералами и между минералами и полимерными прослойками. Наибольшую растяжимость имеют связи, в которых участвуют полимерные компоненты. Поэтому полимерцементный штукатурный раствор характеризуется повышенными значениями деформации и обладает вязкоупругими свойствами. Полимерные пленки препятствуют распространению трещин в штукатурном растворе, обеспечивают лучшее сцепление полимерцементной матрицы с заполнителем, а штукатурного раствора с кладкой. Эластичные полимерцементные образования в структуре материала, уменьшают локальные напряжения и гасят энергию роста трещин. Торможение роста трещины происходит за счет релаксации, происходящей в полимерцементном вяжущем и на границе с заполнителем, а также из-за наличия полимерной фибры. Способность структуры к микропластическим деформациям повышает эффективную энергию разрушения, тем самым повышая трещиностойкость. Наличие пластической деформации в устье трещины приводит к увеличению затрат работы на ее продвижения. Развитие трещины замедляется за счет релаксационных процессов вблизи устья трещины.

Повышенная трещиностойкость, деформативность, полимерцементных растворов по сравнению с обычными, обусловлено наличием полимерцементной матрицы с модулем упругости $(0,001-10) \cdot 10^3$ МПа, мелким заполнителем с низким модулем упругости и полимерной фиброй. Полимерная пленка выполняет функцию шарниров соединяющих блоки сросшихся гидратных новообразований и заполнителя. Переход от жесткой структуры характерной для цементно-песчаного раствора к цементно-полимерной шарнирной матрице кардинально изменяет основные структурно-механические свойства затвердевшего раствора и его трещиностойкость. Такая структура характеризуется меньшим модулем упругости, чем у цементно-песчаного раствора без добавок. Так как прочность на разрыв полимерной пленки превышает прочность на разрыв цементного

камня [5,6], то такой материал обладает повышенными значениями деформации и упругости, прочностью на растяжение при изгибе и трещиностойкостью.

Это изменяет характер развития трещин при эксплуатационных воздействиях. Когда нагрузка превысит критические напряжения, происходит страгивание трещины и начинается упругопластическое деформирование зоны предразрушения. При этом включается в работу первый механизм стабилизации: за счет деформации цементного геля находящейся в предзоне вершины трещины. В результате вершина достаточно острого концентратора (рис. 3а) приобретает более округлую форму (рис. 3е, ф).

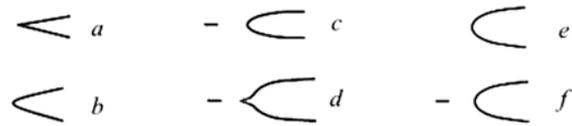


Рис.3. Изменение конфигурации концентратора из-за деформации цементного геля

Магистральная трещина (МТ) медленно прямолинейно или криволинейно продвигается через поперечное сечение штукатурного покрытия. Увеличение длины трещины вызывает увеличение, в предвершинной области, так называемой пластической зоны. Распределение напряжений в ней неоднородно, а максимум нормальных напряжений, сдвинут к границе этой зоны. Именно в этом направлении максимальной плотности энергии упругой деформации и растет магистральная трещина. По мере увеличения длины трещины и возрастания локальных напряжений увеличивается скорость роста трещины. Вследствие этого релаксация энергии посредством пластической деформации цементного геля на этом этапе деформирования становится неэффективной.

Поэтому включается другой механизм торможения: механизм более эффективного сброса накапливаемой энергии деформации вследствие расположения, в вершинной области макротрещины, полимерной мембраны или полимерной фибры (Рис.4).

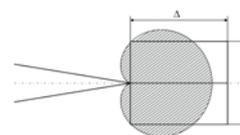


Рис. 4. Стабилизация роста трещины из-за наличия в вершине трещины полимерной мембраны

По истечении определенного времени, при разрушении полимерной мембраны или фибры, трещина опять некоторое время растет. Затем картина повторяется неоднократно, если опять впереди появляется новая полимерная мембрана или фибра. При одной и той же величине запасенной энергии размер трещины тем меньше, чем больше пластичность и диссипативные свойства матрицы.

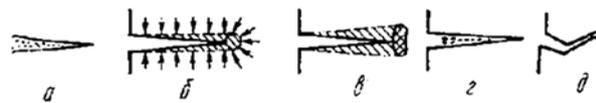


Рис. 5. Закрытие трещины при сжимающих деформациях

Применение эфиров целлюлозы и редиспрегируемых полимерных порошков в комплексе, позволило увеличить степень гидратации цемента и предотвратить его разрушение вследствие перекристаллизации образующихся гидратных фаз, при эксплуатации. Адсорбируясь на гидратных кристаллообразованиях, они стабилизируют гидратные фазы, например этрингит, предотвращая его переход в моногидросульфат алюмината кальция. Происходит блокирование коррозии материала за счет образования вторичного этрингита при многократном увлажнении и высушивании или замораживании и оттаивании [7].

Применение полимерной фибры позволило снизить трещинообразование, на этапе твердения, а при экс-

плуатации, замедлить их развитие. Полимерные волокна значительно повысили раннюю прочность полимерцементного раствора. Это особенно важно, так как в начальный период, когда еще не сформировались полимерные мембраны, и они не участвуют в процессах гашения трещинообразования, эту роль на себя берет полимерная фибра.

Уменьшение модуля упругости полимерцементной матрицы и применения фибры, оптимизация их соотношение, позволили снизить модуль упругости полимерцементного штукатурного покрытия (E_c) [8,9,10], что обеспечило оптимальные условия для работы системы «кладка-покрытие»:

$$E_c = \Phi_f \cdot E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

где: E_c – модуль упругости полимерцементного раствора с мелкодисперсным армированием, V_f – объемное содержание волокон, V_m – объемное содержание полимерцементной матрицы, Φ_f – коэффициент армирования композита, E_f – модуль упругости полимерных волокон, E_m – модуль упругости полимерцементной матрицы.

Снижение модуля упругости материала, является в данном случае достоинством, так как это позволяет снизить порог хрупкого разрушения штукатурного покрытия. Повышение трещиностойкости полимерцементного штукатурного раствора обусловлено и повышением выдерживающего усилия (ову) полипропиленового волокна из полимерцементной матрицы:

$$\sigma_{\text{ову}} = \tau/d \cdot [(1 - V_f) \cdot E_m / (E_f + \Phi_f \cdot V_f)]$$

С учетом напряжения разрыва волокна ($\sigma_{\text{рв}}$) и полимерцементной матрицы ($\sigma_{\text{пм}}$) [8,9,10], можно отметить повышении предельных напряжений растяжения в полимерцементном штукатурном растворе:

$$\sigma_{\text{рв}} = (1 - V_f) \cdot (E_m / E_f) \cdot \sigma_f + \Phi_f \cdot V_f \cdot \sigma_f$$

$$\sigma_{\text{пм}} = (1 - V_f) \cdot \sigma_m + \Phi_f \cdot V_f \cdot (E_f / E_m) \cdot \sigma_m$$

Введение полимерной фибры приводит к незначительному снижению прочности при сжатии полимерцементного раствора. Это объясняется тем, что при достаточно большой дисперсности, фибра ослабляет сечение полимерцементной матрицы. Однако для штукатурного раствора, главным является деформативность и трещиностойкость, а использование полимерной фибры значительно их улучшает. Это произошло за счет способности микроармированного композита воспринимать большие значения растягивающих напряжений. Так напряжения, при которых образуются трещины в штукатурке с мелкодисперсным армированием, превышают в 2 раза напряжения в неармированном материале [9,10].

В результате совмещения свойств мелкодисперсного армирования и цементно-полимерной матрицы изменился характер трещинообразования в штукатурном покрытии. Введение РПП обеспечило увеличение сцепления полимерной фибры и полимерцементной матрицы. В результате полимерная фибра не выдергивается из матрицы и воспринимает часть нагрузки, препятствуя развитию трещин.

Повышение вязкости разрушения микроармированного полимерцементного штукатурного раствора снижает скорость его разрушения. Если в обычном растворе она происходит достаточно быстро, то у полимерцементного этот процесс принимает длительный характер. В соответствии с формулой П.Париса, скорость роста трещины (dl/dN), зависит в наибольшей степени от коэффициента интенсивности напряжений (K) и эмпирического коэффициента n характеризующего степень хрупкости материала. Поэтому с повышением пластичности, растяжимости или деформативности полимерцементного раствора, скорость роста трещины замедляется.

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

где A и n – эмпирические коэффициенты, $\Delta K = K_{\text{max}} - K_{\text{min}}$ – перепад (размах) коэффициента интенсивности напряжений за один цикл нагружения, N – число циклов.

Материал обладает сложными вязкоупругими свойствами, влияющими на процессы постепенного накопления повреждений. Для разрушения системы «кладка-покрытие» отчетливо выраженные временные периоды, инкубационный, докритического роста трещин и разрушение покрытия. Инкубационный период – это период от трещинообразования в штукатурном покрытии и

контактной зоне после нанесения штукатурной смеси на поверхность кладки, до начала докритического роста трещины. Этот период зависит и от начального коэффициента интенсивности напряжений и увеличивается с его понижением.

Разрушение происходит в результате зарождения и медленного распространения трещин. Время зарождения трещины и период инициирования (заканчивающийся страгиванием трещины) обычно невелики по сравнению с долговечностью штукатурного покрытия, основную часть которой занимает период медленного роста трещины.

Развитие трещины замедляется за счет релаксационных процессов. В некоторых случаях возможна полная остановка трещины. При встрече трещины с полимерной мембраной или фиброй, распространение трещины в ней происходит по модели движения трещины в вязкоупругих средах. В полимерцементном растворе для развивающихся трещин устроены ловушки, границы раздела, в виде полимерных мембран и фибры, увеличивая его сопротивление распространению трещин в соответствии с механизмом торможения Кука – Гордона (рис. 6).

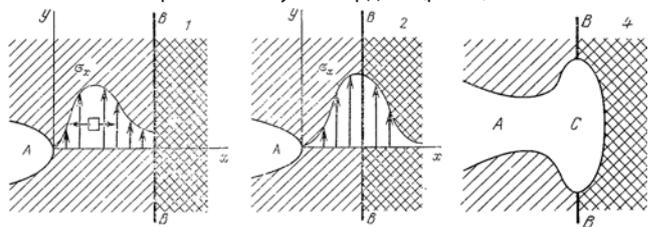


Рис. 6. Механизм торможения развития трещины при помощи полимерной мембраны

Это предопределено характером перераспределения напряжений в структуре материала. При увеличении напряжения в материале, первоначально, в работе принимает участие полимерцементная матрица. Деформация передается через нее к волокну. После начала роста трещин полимерцементная матрица не выключается полностью из работы, однако ее участие по мере возрастания напряжения несколько уменьшается, а возрастает роль фибры. При развитии трещины полимерная фибра не разрушается, а растягивается, замедляя рост трещины (рис. 7).

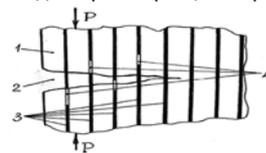


Рис. 6. Механизм торможения развития трещины при помощи полимерной мембраны

При дальнейшем увеличении деформаций, напряжения, в отдельных, наиболее натянутых волокнах, достигают предельных значений, в результате чего часть из них разрывается. Наличие фибры и полимерных мембран приводит к затуплению вершины трещины и релаксации напряжений. При деформации сжатия из-за высушивания или снижении температуры штукатурного покрытия, уменьшаются растягивающие напряжения. В результате происходит соединение поверхностей трещины позади ее вершины, закрытие трещин и снятие деформаций и напряжений в полимерной фибре и полимерцементной матрице.

Полимерцементный штукатурный раствор с мелкодисперсным армированием обладает более высокой долговечностью, благодаря изменению характера микроструктурных напряжений. На стадии структурообразования происходит перераспределение напряжений, от пластической усадки, с наиболее опасных зон на весь объем материала. При эксплуатации происходит замедление скорости роста трещины, снижение концентрации напряжений в области макродефектов, выравнивание и перераспределение напряжений в структуре раствора, между его составляющими.

Прочность на растяжение, трещиностойкость, является не только прямой характеристикой материала, но и косвенной, характеризующей его долговечность. С увеличением этого показателя, увеличится долговечность штукатурного покрытия и ограждающей конструкции.

В отличие от конструкций работающих на изгиб, в которых расположение фибры часто не совпадает с растягивающими усилиями, в штукатурном покрытии фибра распределена равномерно, расположена в направлении растягивающих усилий и поэтому наилучшим образом сопротивляется воздействующей нагрузке (рис.8). Это повышает коэффициент полезного действия фибры и эксплуатационную надежность покрытия.

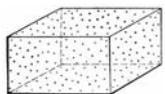


Рис. 8. Характер расположения полимерной фибры в штукатурном покрытии

Достигнутое увеличение отношения пределов прочности при растяжении и сжатии ($R_p/R_{сж}$) свидетельствует о повышении эффективности штукатурного раствора как конструкционного материала. Полимерцементное штукатурное покрытие, с микродисперсным армированием, воспринимает растягивающие деформации и знакопеременные нагрузки без трещинообразования или с замедлением развития трещины, имеет повышенную стойкость к динамическим (ударным) воздействиям, морозостойкость, водонепроницаемость.

Процесс трещинообразования замедляется и из-за рекомбинации связей в штукатурном покрытии за счет гидратации не прореагировавшего ранее цемента. Образующиеся при циклических нагрузках, в устье трещины, субмикротрещины пересекают гидратированные зерна цемента с негидратированными сердечниками. Свободная вода, присутствующая в капиллярах и порах, взаимодействует со свежееобнаженными цементными зернами и образует новые продукты гидратации. Гидратация протекает достаточно быстро вследствие разделения негидратированных цементных зерен на мелкие части, благодаря чему игольчатые кристаллы вида C-S-H образуют связи ("мостики") через берега субмикротрещин и тем самым препятствуют дальнейшему их раскрытию и развитию. В вершинах микротрещин образуются зоны упрочненного материала, и как следствие, повышается удельная работа разрушения, так как микротрещина должна или обойти эту зону, или пройти через нее, совершая дополнительную работу.

Механизм упрочнения заложен в концевой пластической зоне микротрещин, он проявляется в увеличении удельной работы разрушения материала. Субмикротрещины в зоне предразрушения образованные при циклическом нагружении, остаются постоянно открытыми, изменяя лишь размер при увеличении или снижении напряжений. Это облегчает доступ воды, способствуя образованию и росту новообразований гидрата C-S-H. Повторная гидратация, а следовательно микроструктурное упрочнение, продолжается без торможения в течение всего эксплуатационного периода.

Характер разрушения штукатурного покрытия свидетельствуют о том, что модификация позволила существенно

улучшить качество его структуры за счет уменьшения диаметров пор и их равномерного распределения по объему материала, формированию полимерных мембран и наличия полимерной фибры. Повышение однородности структуры позволило увеличить сопротивляемость развитию трещин, способствуя, тем самым, повышению долговечности материала и, стеновой конструкции.

Применение этих материалов является эффективным приемом для снижения образования трещин на всех уровнях его структуры, способствующее микроструктурному уплотнению и упрочнению, что является основным фактором повышения трещиностойкости штукатурного покрытия и долговечности стеновой конструкции.

Применение полимерных добавок и фибры позволило улучшить адгезию штукатурного покрытия к материалу кладки. В результате взаимодействия покрытия и кладки происходят физико-химические и физико-механические процессы, под воздействием которых изменилась энергия единицы связи и увеличилось их количество.

Достигнутый эффект объясняется клеящей способностью полимерной мембраны, адгезия которой к основанию значительно превышает адгезию C-S-H геля, и созданием оптимальных условий для процессов структурообразования в контактной зоне. Это обеспечило формирование контактной зоны с малым количеством трещин. Образование достаточно пластичной контактной зоны приводит к снижению напряжения в ней и штукатурном покрытии. При наличии такой зоны, тангенциальные напряжения, возникающие на границе между кладкой и штукатурным покрытием, постепенно исчезают после релаксации материала. Поэтому пластичная контактная зона обеспечивает большую (кажущуюся) адгезию. Связи между берегами трещин, в контактной зоне, образованные подкрепляющими волокнами полимерной фибры, также сдерживают развитие разрушения. Это обеспечивает смешанный характер разрушения в контактной зоне (рис. Рис. 9)

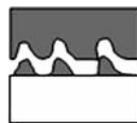


Рис. 9. Характер разрушения в контактной зоне «кладка – штукатурное покрытие»

Вывод. Характер разрушения штукатурного покрытия свидетельствуют о том, что целенаправленное модифицирование материала, введением РПП, эфиров целлюлозы, полимерной фибры и заполнителей с низким модулем упругости, позволяет существенно улучшить качество его структуры за счет уменьшения диаметров пор и их равномерного распределения по объему материала, формированию полимерных мембран и наличия полимерной фибры. Повышение однородности структуры позволило увеличить сопротивляемость развитию трещин, способствуя, тем самым, повышению долговечности материала и стеновой конструкции.

Литература:

1. Парута В. А. Физико-механические основы назначения свойств и подбора состава штукатурных растворов для газобетонной кладки / Парута В. А., Ляшук А. А. // 7-й выпуск сборника научных трудов «Проблемы современного бетона и железобетона» РУП «Институт БЕЛНИИС», Минск, Издатель А.Н.Верасин, 2015, с.90-102
2. Парута В.А. Базовые принципы проектирования штукатурных растворов / Парута В.А., Мартынов Е.И., Брынзин Е.В. // Строительные материалы и изделия №3-4, 2015, Киев, с.56-61
3. Парута В.А. Базовые принципы проектирования штукатурных растворов / Парута В.А., Брынзин Е.В., Гнып О.П., Лавренюк Л.И. // Нові технології в будівництві №31 НИИСП, 2016, Киев, с.66-71
4. Грануа Э. Предупреждение дефектов в строительных конструкциях / Э. Грануа – М.: Стройиздат, 1980. – 217 с.
5. Цюрбриген Р. Дисперсные полимерные порошки – особен-

- ности поведения в сухих строительных смесях / Р.Цюрбриген, П.Дильгер // Строительные материалы. – 1999. – №3. – с.10-12.
6. Shiroshida, K., Durability of Polymer-Modified Mortars (in Japanese) Master Thesis, Koriyama, Japan: College of Engineering, Nihon University, 136-216 (1983)
7. Сивков С.П. Особенности процессов гидратации цементов в сухих строительных смесях / С.П.Сивков // Строительные материалы. – 2008. – №2. – с.4-8.
8. A. J. M. Spenser, Deformations of fibre-reinforced materials. Oxford University Press, Oxford (1972)
9. Деревянко В.Н. Композиционные материалы армированные органическими волокнами / В.Н. Деревянко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. ПГАСиА. Вып. 7. – Днепропетровск: 1988. – с. 203-204
10. Рамачандран В. Наука о бетоне. Физико-химическое бетоноведение / Рамачандран В., Фельдман Р., Бодуэн Дж. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.