

#### **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

УДК 691:519.24

https://doi.org/10.31713/vt2201828

Довгань А. Д., к.т.н., доцент (Одесская государственная академия строительства и архитектуры), Довгань П. М. (ЧП «Портал Юг», г. Одесса), Ляшенко Т. В., д.т.н., профессор (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

### ВЛИЯНИЕ ЦЕОЛИТА И СТЕКЛЯННЫХ ВОЛОКОН НА КИНЕТИКУ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Представлены результаты исследования пластической прочности мелкозернистых цементных композиций. С помощью экспериментально-статистических моделей второго порядка подтверждено, что замена части цементного вяжущего добавкой тонкодисперсного цеолита и введение гибридных стеклянных волокон позволяет управлять процессом начального структурообразования растворов. Ключевые слова: мелкозернистый бетон, цеолит, стеклянное волокно, пластическая прочность, экспериментально-статистическая модель.

Введение. Производство высококачественных бетонов, в том числе его мелко- и тонкозернистых разновидностей, в настоящее время продолжает расширяться. К высококачественным бетонам с улучшенными свойствами относят бетоны, обладающие более высокими характеристиками для различных областей применения и соответствующие требованиям современных технологий [1, С. 9]. Получение бетонов с требуемым комплексом критериев качества достигается за счет управления процессами организации их структуры на разных масштабных уровнях. В работах В.И. Соломатова и В.Н. Вырового показано, что введение рациональных по количественному и качественному составам наполнителей приводит к снижению поврежденности и улучшению свойств бетона на микромасштабном уровне. Использование наполнителей разной дисперсности позволяет регулированию реологические свойства незатвердевших цементных систем, параметры кристаллизации и морфологии новообразований, изменяя тем самым физико-механические свойства бетона усадку, прочность, трещиностойкость, морозостойкость и т.д. Получение бетонов различного функционального назначения оказалось возможным благодаря достижениям в области создания химических добавок нового поколения – суперпластификаторов, в частности, на акриловой и поликарбоксилатной основе [2, С. 45]. Эффективное действие этих добавок обеспечивает значительное водопонижение и высокую подвижность смесей, регулирование в широких пределах реологических свойств цементных композиций и ее связности, а также микроструктуры цементного камня, ускорение темпов нарастания прочности бетонов на ранней стадии твердения, в том числе в зимних условиях, что сокращает сроки изготовления изделия и гарантирует высокое качество и т.д.

В последние годы активно внедряются в строительство многокомпонентные мелкозернистые бетоны, применение которых ранее сдерживалось рядом присущих им недостатков: высокая суммарная удельная поверхность заполнителей увеличивает водопотребность, а следовательно, и расход цемента, так как растворная смесь для обеспечения нормативной удобоукладываемости требует больше цементного клея; повышенный расход цемента и цементного теста повышает усадку и пористость, снижая прочность и трещиностойкость, ухудшает деформативные характеристики и др. [3, С. 253; 4, С. 704]. Существовавшие жесткие требования по ограничению расхода цемента в бетоне сдерживали применение мелкозернистых бетонов в разных областях строительства. Понятие об экономии цемента, как главного критерия технологической целесообразности уступило место комплексу требований рыночной экономики, среди которых решающими являются высокое качество, долговечность, эксплуатационная надежность и доступная цена. Переход к многокомпонентным мелкозернистым (песчаным) бетонам с использованием суперпластификаторов, тонкодисперсных минеральных наполнителей и других модифицирующих добавок позволил: свести к минимуму недостатки этих бетонов, в частности, повышение расхода воды и цемента, уменьшить усадку материала в несколько раз; изготавливать равнопрочные бетоны на малоподвижных и на высокоподвижных растворных смесях [4, С. 213].

Мелкозернистая структура цементных композитов обладает рядом преимуществ, среди которых хорошая удобоукладываемость растворной смеси, возможность создания более однородной тонко-дисперсной высококачественной структуры без крупных включений, возможность формования изделий различными методами, использование местных мелкозернистых заполнителей, возможность получения на их основе специальных бетонов – декоративного, дисперс-



но-армированного бетона и т.д. Кроме этого, следует отметить еще один положительный факт – это ограничение величины зерен заполнителя (до 10 мм) в бетоне позволяющий максимально использовать эффект дисперсного армирования в фибробетонах. В работах Ю.М. Баженова показано, что дискретное армирование композитов эффективно приостанавливает развитие волосяных трещин при расстоянии между волокнами разной природы не более 10 мм. По данным Ф.Н. Рабиновича оптимальные значения расстояний между армирующими элементами в матрице композита должны изменяться в пределах 5-20 мм для мелкозернистых бетонов, 0,5-5 мм для цементно-песчаных растворов, а для цементного камня не превышать 0,5 мм. При этом диапазон диаметров волокон составляет в первом случае 0,8-1,4 мм, во втором 0,1-0,8 мм и в третьем 0,01-0,1 мм [5].

Дисперсное армирование предполагает равномерное рассредоточение фибры по всему объему бетонной матрицы. При дискретном армировании цементных композитов возможно также использовать смеси волокон разных диаметров и длин (при необходимости – разного вида и химического состава) [6]. Распределение волокон должно осуществляться в соответствии с их параметрами на различных уровнях структуры бетона с учетом характеристик этих уровней и принципов армирования. Так, армирование цементного бетона на микромасштабном уровне, с учетом присущих в нем технологических трещин, целесообразно осуществлять минеральными волокнами длиной 1-5 мм и диаметром 10-50 мкм [3, С. 292], а для повышения эффективности работы волокнистых наполнителей на уровне макроструктуры бетона и улучшения их анкеровки возможно применение смеси волокон [5].

Постановка проблемы. Упрочнение цементных композитов на разных масштабных уровнях супертонкими минеральными волокнами положительно влияет на процессы структурообразования и характеристики готового материала. Это обеспечивается в первую очередь хорошей клеящей способностью цементных вяжущих (особенно высоких марок) к фибре, а также более высокими значениями механических характеристик волокон по отношению к матрице бетона. Особенностью фибробетонов заключается в объемно-произвольном (хаотичном) армировании их матрицы волокнами разных параметров, блокирующих развитие технологических трещин. Благодаря высокой степени сопротивления дальнейшего трещинообразования улучшаются качественные показатели мелкозернистых бетонов, такие как, прочность, ударостойкость, морозостойкость и т.д. При всех

преимуществах дисперсно-армированного бетона основным его недостатком является повышенная связность и жесткость. Это вызывает необходимость применения для его изготовления специальных смесителей, обеспечивающих равномерное распределение фибры по всему сечению материала и препятствующих комкованию волокон, эффективных суперпластифицирующих добавок, позволяющих в результате пластифицирования смесей повышать их удобоукладываемость, что в свою очередь будет способствовать более равномерному распределению тонкодисперсных волокон в матрице материала. Однако, применение фибробетонов для декоративных элементов связано с немаловажной проблемой - «выхода» дисперсных волокон на лицевую поверхность готовых изделий. С целью устранения этого недостатка рекомендуют наряду с введением волокон, добавлять в формовочную смесь в небольших количествах наполнители [5], а при формовании архитектурных элементов проводить технологические этапы двухслойного формования изделий, когда сначала в форму наносится лицевой слой без волокна, а затем – второй слой с добавлением волокна [7]. Но, данная технология имеет свои недостатки (www.owenscorning.com), связанные с контролем постоянной толщины лицевого и основного слоя растворных смесей в форме, растрескиванием и трещинообразованием затвердевшего неармированного лицевого слоя, ограниченностью производства изделий сложной конфигурации, трудностью контроля времени при изготовлении крупногабаритных изделий приводящее к чрезмерной сушке лицевого слоя смеси, скалыванием углов при распалубке и транспортировке готовых изделий, уровнем технических навыков у персонала и т.д.

Таким образом, научные исследования, опыт производственного применения и анализ недостатков цементных мелкозернистых бетонов показывают, что совершенствование их показателей качества требует введения активных тонкодисперсных наполнителей и эффективных пластифицирующих добавок комплексного действия, а также дисперсного армирования волокнами разных параметров, но равной плотности с бетоном. Однако, взаимодействие модифицирующих добавок и их совместное влияние на формирование свойств мелкозернистых бетонов на разных уровнях его структуры исследованы недостаточно. Изучение процессов и технологии изготовления исследуемого материала позволит решить вопросы оптимизации составов декоративных цементных композиций.



**Цель данной работы** — исследование влияния тонкодисперсных и волокнистых наполнителей и суперпластифицирующей добавки комплексного действия на пластическую прочность в первые полчаса твердения цементных композиций.

**Материалы и методика исследований.** Экспериментальные исследования состояли из двух этапов: на первом – определялись технологические свойства композиций; на втором – физико-механические характеристики раствора.

В эксперименте зафиксировано цементно-песчаное отношение 1:3.4 по массе смеси. В качестве вяжущего компонента раствора использовался белый портландцемент марки СЕМ I 52,5 R (**100 м.ч.**) турецкого производителя CIMSA (EN 197-1:2011). Для изготовления мелкозернистых композитов использовались следующие сырьевые материалы.

- Тонкодисперсный цеолит в количестве  $X_1(Z) = 4\pm 8\%$ , вводился взамен части цемента (нижняя допустимая граница вяжущего вещества 92 м.ч.). Природный цеолит, выпускаемый украинской компанией «Цеолит Био» фракции 0-140 мкм, представляет собой группу каркасных алюмосиликатов с концентрацией активного вещества клиноптилолита 83-96%, удельной поверхности 1370 м²/кг и соотношением Si/Al = 5.5. Благодаря своему поровому пространству (более 50%) поглощает и отдает воду без изменения своего объема.
- Доля мелкозернистого песка (со средним диаметром d=0,22 мм) в смеси с крупнозернистым (d=0,37 мм) составляла  $X_2(GS)=50\pm20$  м.ч. Использовались природные не фракционированные пески предприятий ЧАО «Никитовский гранитный карьер» и 000 «Георесурсы» (песчаный карьер с. Кардашинка), которые подвергались операциям сушки и просеивания.
- Суперпластификатор комплексного действия вводился в количестве  $X_3(MF) = 0.5\pm0.2\%$  от массы вяжущего вещества. Добавка Melflux 2651F (производитель BASF Constraction Polimers, Германия) представляет собой легкорастворимый в воде порошок модифицированного полиэфиркарбоксилата, действие которого основано на совокупности электростатического и стерического эффекта. Пластификатор снижает усадку цементных композиций и обеспечивает высокую раннюю прочность бетона.
- Щелочестойкие стеклянные волокна длиной 6 и 12 мм (производитель Owens Corning, США) водились соответственно, в количестве  $X_4(F6) = X_5(F12) = 0.015 \pm 0.015\%$  (к массе растворной смеси). Стекловолокна имеют свойство при попадании в смеситель распа-

даться на мельчайшие элементарные волокна, что создает дисперсное армирование всего объема растворной матрицы, а также, что немаловажно, они абсолютно не видны на финишной поверхности готовых изделий.

Планирование и анализ натурных исследований свойств декоративных песчаных бетонов проводилось с использованием экспериментально-статистического (ЭС) моделирования [8] и методологии рецептурно-технологических полей [9]. Эксперимент выполнен по 5-факторному плану второго порядка на кубе [8; 10], факторы  $X_i$  нормализованы к  $|x_i| \le 1$  по типовым формулам. Планирование эксперимента имело две особенности: во-первых, нижний уровень факторов  $x_1$ ,  $x_4$  и  $x_5$  соответствовал эталонным композитам ( $X_1 = X_4 = X_5 = 0$  или  $X_1 = X_4 = X_5 = -1$ ); во-вторых, использован ненасыщенный симметричный план, в котором 10 точек содержали одну координату  $x_4$  или  $x_5$  на эталонном уровне.

Составы цементно-песчаных композиций приготавливались с разным водоцементным отношением, при котором обеспечивалось выполнение требования одинаковой подвижности растворной смеси – марки *S*4.

Изготовление и испытание образцов композита осуществлялось в соответствии с требованиями ДСТУ Б B.2.7-214:2009 на призмах квадратного сечения размером  $40\times40\times160$  мм и их половинках, образцах кубах размером  $70.7\times70.7\times70.7$  мм.

Структурная прочность цементно-песчаных композиций. Начальный процесс структурообразования твердеющих многокомпонентных мелкозернистых композиций может быть оценен по их пластической прочности  $P_{\rm m}$  (кПа), определяемой на приборе Вика по методу П.А. Ребиндера усовершенствованному М.С. Винарским. Для расчета  $P_{\rm m}$  во времени, измерение глубины погружения конуса в исследуемую смесь выполнялось при постоянной нагрузке ( $F=2,98\,$  H) каждые 10 мин в ограниченный период начального структурообразования, до  $P_{\rm m}=1221,8\,$  кПа. В связи с тем, что время перемешивания цементных композиций влияет на кинетику структурообразования раствора, оно было принято постоянным и составляло 5 мин.

Математическое описание процесса начального структурообразования, имеющее достаточное физическое обоснование, неизвестно; целесообразно ориентироваться на точность и простоту описания эксперимента на исследуемом отрезке  $\tau$  (час). Изменение величины пластической прочности во времени  $P_{\rm m} = f(\tau \le 3)$  исследуемых композиций аппроксимируется полиномом 5-й степени (1), с высоким коэффициентом детерминации ( $R^2 > 0.99$ ).



(1)

$$P_{\rm m} = {\rm e}^{)\,{\rm p}(} = {\rm exp}({\rm a}_0 + {\rm a}_1 + {\rm a}_2^2 + {\rm a}_3^3 + {\rm a}_4^4 + {\rm a}_5^5).$$

Анализ кривых  $P_{\rm m} = f(\tau \le 3)$  для 27 композиций позволил выделить период формирования их пространственной коагуляционной структуры, продолжительность которого изменялась от 0,75 до 2,15, час и начало периода лавинообразного нарастания структурной прочности, соответственно от 1,07 до 2,58 час. Следует отметить, что начало формирования коагуляционно-кристаллизационной структуры для всех композиций наступает при достижении прочности  $P_{\mathrm{m}} \approx$ 134÷136 кПа. Как видно, продолжительность индукционного периода растворных смесей составляет не более т≤0,43 часа. Сокращение периода индукции можно объяснить повышенным содержанием в цементном клинкере трехкальциевого силиката ( $C_3S \approx 75\%$ ), большой скоростью его растворения и достаточно высокой удельной поверхностью цементного вяжущего ( $S = 4600 \text{ см}^2/\text{г}$  по Блейну) [11, C. 92]. В связи с тем, что добавка Melflux 2651 обладает высоким пространственным эффектом, достигаемым за счет увеличенной длины боковых гидрофобных полиэфирных цепей и уменьшенной длиной поликарбоксилатной цепи, часть поверхности зерен цемента не покрыта пленкой полимера. В результате на поверхности частицы вяжущего имеются свободные зоны для ее взаимодействия с водой, в итоге это приводит к тому, что суперпластифицирующая добавка в меньшей степени влияет на гидратацию [12].

При анализе влияния варьируемых компонентов состава на кривую  $P_{\rm m}$  нерационально рассматривать коэффициенты  $a_{\rm i}$  полинома  $p(\tau)$ , поскольку затруднительно оценить их физический смысл. Предпочтительно построить ЭС-модели для обобщающих показателей кривых. В частности, получена ЭС-модель для описания «полного» поля пластической прочности в первые полчаса структурообразования композиций  $P_{\rm m}\{\tau=0,5\}$  [13], максимальный уровень которой 35 кПа, достигается у состава с высоким содержанием цеолита, мелкого песка и добавки «Melfux» и средней дозировкой волокон.

Структурная прочность цементно-песчаных композиций с цеолитом. Тонкодисперсный цеолит, как активная минеральная пуццолановая добавка, способен участвовать в физико-механических и физико-химических процессах разных периодов организации структуры материала. В связи с этим определена задача изучения влияния дисперсности цеолита и его содержания на период формирования структуры раствора в первые полчаса без присутствия волокнистых наполнителей ( $X_4 = X_5 = 0\%$ ).

Для анализа индивидуального влияния цеолитового наполнителя на  $\ln P_m \{ \tau = 0,5 \}$  проведен вычислительный эксперимент. Из ЭСмодели «полного поля» этого критерия, в координатах нормализо-

ванных факторов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  и  $x_5$  [13], получены модели локальных полей вида (2) при фиксированных уровнях содержания цеолита  $x_1 = -1$ , 0 и +1, или  $X_1(Z) = 0$ , 4 и 8% и отсутствия фибры.

Как видно из рис. 1 процесс нарастания пластической прочности для составов не содержащих минеральной добавки  $X_1(Z)=0\%$  протекает медленнее, чем в ее присутствии  $X_1(Z)=4$  и 8%. Так, относительный прирост  $\{Y_{\text{max}}/Y_{\text{min}}\}$  критерия  $P_{\text{m}}\{\tau=0,5\}$  изменяется: для контрольного состава в 5,6 раз, для составов с тонкодисперсным цеолитом соответственно в 8,3 и 12,4 раз. Быстрый рост пластической прочности композиций в первые полчаса может объясняться: повы-

$$Y = b_0 + b_2 x_2 + b_2 x_2^2 + b_{23} x_2 x_3 + b_3 x_3 + b_3 x_3^2$$
 (2)

шенным содержанием в цементном клинкере трехкальциевого алюмината  $C_3A \approx 10\%$  и алита  $C_3S$ , что вызывает чрезмерно раннее структурообразование; присутствием в тонкодисперсном цеолите реакционно-активных оксидов  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$  в количестве 72,5% и 13,1%, что способствует интенсификации процессов гидратации клинкерных минералов  $C_3A$  и  $C_3S$ ; содержанием частиц тонких фракций размером меньше 10 мкм для цемента 36% и для цеолита 30% (по их объему); способностью суперпластифицирующей добавки Melflux 2651F, молекулы которой обладают высоким диспергирующим эффектом не только на частицы вяжущего, но и на зерна наполнителя, оказывать положительное влияние на интенсивность процессов гидратации и структурообразования цементного камня.

Структурная прочность дисперсно-армированных растворных смесей. Полученные Ю.В. Пухаренко результаты экспериментальных исследований влияния дисперсной арматуры на процесс гидратации цементного камня, показывают, что фибру (независимо от ее природы и геометрических характеристик) следует рассматривать в качестве своеобразной подложки – поверхности [14], на которой интенсивно формируется плотный и прочный слой цементных новообразований, состоящий главным образом из мелкокристаллических низкоосновных гидросиликатов и гидроалюминатов кальция.

Таким образом, можно предположить, что произвольное распределение дискретных армирующих супертонких волокон (диаметром 14 мкм) в цементных композициях с цеолитовым наполнителем будет изменять кинетику нарастания пластической прочности растворов, в том числе на начальных этапах структурообразования. Для обеспечения равномерного рассредоточения армирующих волокон



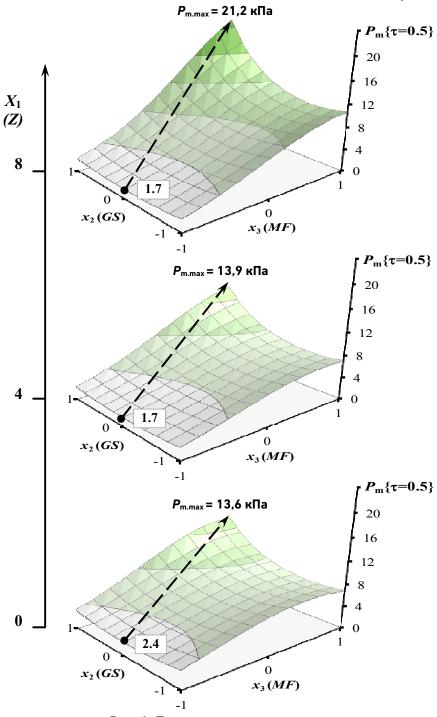


Рис. 1. Пластическая прочность растворных смесей (без волокон) с тонкодисперсным цеолитом через 0,5 часа от начала твердения

в равноподвижных смесях и хорошей проклейки фибры вяжущим клеем при изготовлении композитов применен ряд технологических мер: соблюдалась очередность загрузки ингредиентов смеси, смешивание компонентов происходило при двухскоростном режиме работы смесителя, виброуплотнение композиций осуществлялось до начала схватывания цементного вяжущего.

С целью выявления индивидуального и совместного влияния стеклянных волокон (длиной 6 и 12 мм) на процесс структурообразования растворных композиций в первые полчаса твердения смесей, выполнен ряд вычислительных экспериментов. Для их реализации из пятифакторной ЭС-модели полного поля  $lnP_m\{\tau=0,5\}$  [13] получены 3-х факторные модели вида (3), которые описывают локальные поля формируемые тремя факторами при фиксированных дозировках волокон:  $x_4 = x_5 = -1$ , 0 и +1 или  $X_4(F6) = X_5(F12) = 0$ , 0.015, 0,03% (рис. 2).

Сравнительный анализ локальных ЭС-моделей и соответствующих изоповерхностей (рис. 2) позволяют сделать следующие выводы.

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_1 x_1^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_2 x_2 + b_2 x_2^2 + b_{23} x_2 x_3 + b_3 x_3 + b_3 x_3^2$$
(3)

- Введение волокон на средних уровнях ( $X_4 = X_5 = 0,015\%$ ) значительно ускоряет процесс нарастания пластической прочности в первые полчаса твердения смесей с 21,2 до 35,1 кПа (т.е. на 65%). Анализ индивидуального влияния фибры показывает, что  $P_m\{\tau=0,5\}$  возрастает, но в меньшей степени: при  $X_4 = 0,015\%$  на 20%, а при  $X_5 = 0,015\%$  на 12%. Данный факт можно объяснить тем, что при низком насыщении композиций супертонкой арматурой, когда микроволокна удалены друг от друга на значительное расстояние, прочность раствора определяется в основном прочностью матричного материала.
- Увеличение процента армирования композиций до максимальных уровней (X4 = X5 = 0,03%) приводит к замедлению процессов начального структурообразования (при сравнении с неармированными растворными смесями) с 21,2 до 19,3 кПа. При моделировании ситуации индивидуального влияния коротких или длинных волокон на  $Pm\{\tau=0.5\}$  было выявлено, что период формирования пространственной коагуляционной структуры композиций существенно удлиняется. Причина этого заключается в том, что толщина



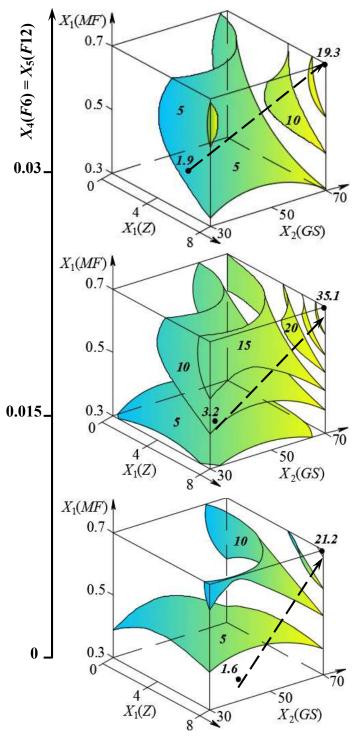


Рис. 2. Пластическая прочность ( $P_{\rm m}$ , кПа) растворных смесей со стеклянными гибридными волокнами через 0,5 часа от начала твердения

цементно-цеолитового слоя на микроволокнах уменьшается, в результате чего снижается темп роста пластической прочности. Но, интересным остается тот факт!, почему при высоком содержании обеих фибр ( $X_4 + X_5 = 0.06\% \rightarrow 1.2 \text{ кг/м}^3$ )  $P_m$  растворной смеси снижается всего на 9%, а при индивидуальном содержании каждой из фибр ( $X_4$  или  $X_5 = 0.03\% \rightarrow 0.6 \text{ кг/м}^3$ ) – соответственно на 27 и 44%.

— На рост структурной прочности растворов, кроме дисперсного армирования, оказывает влияние и размер частиц мелкозернистого заполнителя. Во всех случаях с увеличением доли частиц песка меньшей средней крупности  $P_m\{\tau=0,5\}$  незначительно, но возрастает.

Заключение. Вычислительные эксперименты на ЭС-модели полного рецептурного поля пластической прочности  $\ln P_m \{\tau=0,5\}$  позволило оценить индивидуальное влияние цеолита и стеклянных волокон на кинетику структурообразования цементных композиций. Замена части цементного вяжущего активной гидравлической добавкой цеолита в количестве 8% ускоряет процесс начального структурообразования растворов более чем на 50%. Индивидуальное или совместное введение стеклянных гибридных волокон, на средних или высоких уровнях, изменяет кинетику нарастания структурной прочности растворов на начальном этапе структурообразования. Так, содержание волокон на средних уровнях (0,03% или 0,6 кг/м³) сокращает период формирования коагуляционной пространственной структуры на 65%. Полученные результаты исследования структурной прочности будут полезны при анализе физико-механических свойств декоративных мелкозернистых бетонов.

1. Юай Юань, Ван Лин, Тянь Пе. Высококачественный цементный бетон с улучшенными свойствами. Москва: Изд-во АСВ, 2014. 418 с. 2. Химические и минеральные добавки в бетон / под ред. А. В. Ушерова-Маршака. Харьков : Колорит, 2005. 280 с. 3. Баженов Ю. М., Демьянова В. С., Калашников В. И. Модифицированные высококачественные бетоны : научное издание. М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. 368 с. 4. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1998. 768 с. 5. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкция: монография. М.: Издательство АСВ, 2004. 560 с. 6. Довгань П. М., Довгань А. Д. Влияние стеклянных и полипропиленовых волокон на пределы прочности и ударостойкость фибробетона. Вісник ОДАБА. Одеса : Друкарня ОДАБА, 2010. Вип. № 38. С. 236-241. 7. Елькин А. В., Выровой В. Н. Стеклофибробетон в аутентичной реконструкции и реставрации одесских фасадов. Вісник ОДАБА. Одеса: Друкарня ОДАБА, 2016. Вип. № 64. С. 136-140. 8. Вознесенский В. А., Ляшенко Т. В., Огарков Б. Л. Численные методы ре-



шения строительно-технологичных задач на ЭВМ : учебник. К. : Высшая школа, 1989. 328 с. 9. Ляшенко Т. В., Вознесенский В. А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном материаловедении. Одесса : Астропринт, 2017. 168 с. **10.** Планирование эксперимента в исследовании декоративных песчаных бетонов / П. М. Довгань, А. Д. Довгань, Т. В. Ляшенко, Н. В. Хлыцов. Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій. Одесса : Друкарня ОДАБА, 2018. С. 27-30. 11. Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 344 с. 12. Василик П. Г., Голубев И. В. Особенности применения поликарбоксилатных гиперпластификаторов Melflux. *Строительные материалы*. 2003. Вып. № 9. С. 24-26. 13. Lyashenko T. V., Dovgan A. D., Dovgan P. M. Decorative concrete with hybrid glass fibre: design and first results of the experiment. Вісник ОДАБА. Одеса: Друкарня ОДАБА, 2018. Вип. № 70. С. 99-105. **14**. Пухаренко Ю. В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов. Строительные материалы. 2004. Вып. № 10. С. 47–50.

#### **REFERENCES:**

1. Yuai Yuan, Van Lyn, Tian Pe. Vysokokachestvennyi tsementnyi beton s uluchshennymi svoistvami. Moskva: Izd-vo ASV, 2014. 418 s. 2. Khyimicheskie i mineralnye dobavki v beton / pod red. A. V. Usherova-Marshaka. Kharkov : Koloryt, 2005. 280 s. 3. Bazhenov Yu. M., Demianova V. S., Kalashnikov V. I. Modifitsirovannye vysokokachestvennye betony : nauchnoe izdanie. M. : Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov, 2006. 368 s. 4. Batrakov V. H. Modifitsirovannye betony. Teoriia i praktika. 2-e yzd., pererab. i dop. M., 1998. 768 s. **5.** Rabinovich F. N. Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniia, tekhnolohiia, konstruktsiia : monohrafiia. M.: Izdatelstvo ASV, 2004. 560 s. 6. Dovhan P. M., Dovhan A. D. Vliianie stekliannykh i polipropilenovykh volokon na predely prochnosti i udarostoikost fibrobetona. Visnyk ODABA. Odesa: Drukarnia ODABA, 2010. Vyp. № 38. S. 236–241. 7. Elkin A. V., Vyrovoi V. N. Steklofibrobeton v autentichnoi rekonstruktsii i restavratsii odesskikh fasadov. Visnyk ODABA. Odesa : Drukarnia ODABA, 2016. Vyp. № 64. S. 136–140. **8.** Voznesenskii V. A., Liashenko T. V., Oharkov B. L. Chislennye metody resheniia stroitelno-tekhnolohichnykh zadach na EVM: uchebnik. K.: Vysshaia shkola, 1989. 328 s. 9. Liashenko T. V., Voznesenskii V. A. Metodolohiia retsepturno-tekhnolohicheskikh polei v kompiuternom materialovedenii. Odessa: Astroprint, 2017. 168 s. 10. Planirovanie eksperimenta v issledovanii dekorativnykh peschanykh betonov / P. M. Dovhan, A. D. Dovhan, T. V. Liashenko, N. V. Khlytsov. Strukturoutvorennia, mitsnist ta ruinuvannia kompozytsiinykh budivelnykh materialiv i konstruktsii. Odessa: Drukarnia ODABA, 2018. S. 27-30. 11. Sheikin A. E., Chekhovskii Yu. V., Brusser M. I. Struktura i svoistva tsementnykh betonov. M.: Stroiyzdat, 1979. s. 12. Vasilik P. H., Holubev I. V. Osobennosti primeneniia 344

polikarboksilatnykh hiperplastifikatorov Melflux. *Stroitelnye materialy*. 2003. Vyp. Nº 9. S. 24–26. **13.** Lyashenko T. V., Dovgan A. D., Dovgan P. M. Decorative concrete with hybrid glass fibre: design and first results of the experiment. *Visnyk ODABA*. Odesa: Drukarnia ODABA, 2018. Vyp. Nº 70. S. 99–105. **14.** Pukharenko Yu. V. Printsipy formirovaniia struktury i prohnozirovanie prochnosti fibrobetonov. *Stroitelnye materialy*. 2004. Vyp. Nº 10. S. 47–50.

Рецензент: д.т.н., профессор Выровой В. Н. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

Dovhan A. D., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture), Dovhan P. M. (Portal Ug, Odessa), Liashenko T. V., Doctor of Engineering, Professor (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture)

## THE INFLUENCE OF ZEOLITE AND GLASS FIBRE ON STRUCTURE FORMATION OF CEMENT COMPOSITIONS

Some results of studying the plastic strength of decorative concrete mixes are presented. Numerical characteristics of the process of initial structure formation were determined for 27 mixes according to experiment design. On the data obtained experimental-statistical models were built describing the fields of these criteria in coordinates of composition. Specifically, the model for plastic strength after half an hour of hardening has made it possible to evaluate the influence of fine zeolite and hybrid glass fibre on this index, with the help of computational experiment. The replacement of 8% of cement binder with the zeolite as active hydraulic additive speeds up the initial structure formation one and a half times. Individual and combined effects of two kinds of alkali resistant glass fibre, 6 and 12 mm long, also change the kinetics of structural strength growth; the upper dosages of fibres slow down the process of forming coagulation structure. An ability of polycarboxylate based superplasticiser to influence positively on intensity of hydration process and structure formation of the cement stone is confirmed.

Keywords: fine-grained concrete, zeolite, glass fibre, plastic strength, experimental-statistical model.



**Довгань О. Д., к.т.н., доцент** (Одеська державна академія будівництва та архітектури), **Довгань П. М.** (ПП «Портал Юг», м. Одеса), **Ляшенко Т. В., д.т.н., професор** (Одеська державна академія будівництва та архітектури)

# ВПЛИВ ЦЕОЛІТУ І СКЛЯНИХ ВОЛОКОН НА КІНЕТИКУ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ

Представлені результати досліджень пластичної міцності дрібнозернистих цементних композицій. За допомогою експериментально-статистичних моделей другого порядку підтверджено, що заміна частини цементного в'яжучого добавкою тонкодисперсного цеоліту та введення гібридних скляних волокон дозволяє управляти процесом початкового структуроутворення розчинів. Ключові слова: дрібнозернистий бетон, цеоліт, скляне волокно, пластична міцність, експериментально-статистична модель.