

PACS numbers: 61.05.cp, 62.20.-x, 62.23.Pq, 68.37.Hk, 81.05.Rm, 81.20.Ev, 83.80.Ab

## **Перспективы получения ультрапрочных бетонных композитов введением полифункциональных наномодификаторов**

А. В. Сумарюк, В. Ф. Романкевич, И. М. Фодчук

*Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича,  
ул. Коцюбинского, 2,  
50002 Черновцы, Украина*

Проведён литературный анализ результатов исследований перспективных составов ультравысокопрочных бетонных композитов (УСПБ), полученных при введении различных наномодификаторов и рецептур. Указаны пути получения бетонных композитов сверхвысокой прочности и плотности, в частности, из-за уменьшения отношения воды к вяжущему веществу ниже теоретически необходимого и количества пустот в переходной зоне между матрицей цемента и большими агрегатными частицами. Приведены характеристики наполнителей и их влияния на плотность упаковки зёрен цементной матрицы и её микро- и наноструктуры.

Проведено літературну аналізу результатів досліджень перспективних складів ультрависокоміцних бетонних композитів, одержаних при введенні різних наномодифікаторів і рецептур. Вказано на шляхи одержання бетонних композитів надвисокої міцності та щільності, зокрема, через зменшення відношення води до зв'язувальної речовини нижче теоретично необхідного та кількості пустот у перехідній зоні між матрицею цементу і великими агрегатними частинками. Наведено характеристики наповнювачів та їхнього впливу на щільність пакування зерен цементної матриці та її мікро- і наноструктури.

A literature analysis is carried out for the research results concerning the promising compositions of ultrahigh-strength concrete composites fabricated by means of the introduction of various nanomodifiers and formulations. It is indicated on the ways of fabrication of concrete composites having excess of strength and density, in particular, due to both the decrease in the ratio of water to the binding material below the theoretically necessary one and the number of air voids within the transition zone between the cement matrix and the large aggregate particles. The characteristics of fillers and their effect on the packing density of grains of the

cement matrix and its micro- and nanostructures are presented.

**Ключевые слова:** ультрапрочный бетон, суперпластификатор, наномодификаторы, микрокремнезём, кварцевый порошок, сканирующая электронная микроскопия.

**Ключові слова:** ультрависокоміцний бетон, суперпластифікатор, наномодифікатори, мікрокремнезем, кварцовий порошок, сканувальна електронна мікроскопія.

**Key words:** ultrahigh-strength concrete, fluidizing agent, nanomodifiers, microsilica, quartz powder.

*(Получено 30 ноября 2017 г.; после доработки — 1 февраля 2018 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Ультрасверхпрочные бетоны (УСПБ) — одно из последних достижений в области технологии бетона, который характеризуется высокой прочностью на сжатие и стойкостью к агрессивным средам, а также технологичностью внедрения в производство. В условиях изготовления технологически сложных конструкций применение литых смесей с прочностью, превышающей прочность обычного бетона до 10 раз, является целесообразным для строительства уникальных зданий и сооружений.

Однако информация о практическом использовании таких бетонов в Украине отсутствует. Хотя существуют литературные источники, подтверждающие получение бетонов сверхвысокой прочности в лабораторных условиях [1]. В то же время остаётся проблема возможности практического внедрения таких бетонов в отечественное производство, из-за технологической сложности их получения и недостаточное определение фундаментальных закономерностей условий разработки и контроля качества смесей сверхвысокой прочности с объяснением структуры, строения и условий их образования.

Несмотря на наличие за рубежом многочисленных экспериментальных исследований физико-механических характеристик ультрасверхпрочного бетона, актуальна проблема натурной апробации и исследования применения этого наноматериала в строительной промышленности [2–4]. Особенно важным при реконструкции и усилении конструктивных элементов является предоставление строительным поверхностям специальных свойств (водо-, кислото-, радиационной непроницаемости и огнестойкости); при этом они должны иметь достаточные прочностные характеристики; именно эти свойства могут обеспечить композиты ультравысокой прочности. Эти задачи требуют детального изучения

и физико-химического обоснования процессов образования и взаимодействия ультрасверхпрочных композитов с существующими конструкциями. В наше время уже реализованы пилотные проекты использования УСПБ в конструкциях [5], которые показывают перспективность применения сверхвысокопрочных композитов в специальном строительстве.

В данной работе проведён анализ литературных источников, в которых описаны технологические особенности получения ультрасверхпрочных бетонов и анализ физико-химических процессов, происходящих при этом. Отмечены перспективные рецептуры бетонных композитов сверхвысокой прочности и плотности. Приведены характеристики наполнителей и их влияние на плотность упаковки зёрен цементной матрицы и её микро- и наноструктуру.

## **2. УЛЬТРАСВЕРХПРОЧНЫЕ БЕТОНЫ. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ**

Ультрасверхпрочные бетоны — это композиты сверхвысокой структурной прочности и плотности. Изготовлен в виде специального дисперсного продукта с пределом прочности при сжатии от 150 Н/мм<sup>2</sup>. Предел прочности при растяжении УСПБ со стальными волокнами может составлять до 15 Н/мм<sup>2</sup>, предел прочности при изгибе до 50 Н/мм<sup>2</sup>. УСПБ является высокотехнологичным материалом, который позволяет создавать достаточно долговечные и очень устойчивые к коррозии конструкции из бетона.

Формирование структуры ультрасверхпрочного бетона происходит при физико-химических реакциях, сопровождающихся связыванием свободной воды с клинкерными минералами, образованием насыщенного раствора кристаллогидратов и их последующей кристаллизацией. Учитывая сложность и недостаточную изученность указанных физико-химических процессов, существуют разные теоретические трактовки их характера и последовательности.

Первая работа над разработкой ультрасверхпрочного бетона началась в 1970-х годах в США [6]. Высокопрочный бетон впервые был использован в 1997 году в расширении (достройке — реконструкции) атомной электростанции Каттенон во Франции [7].

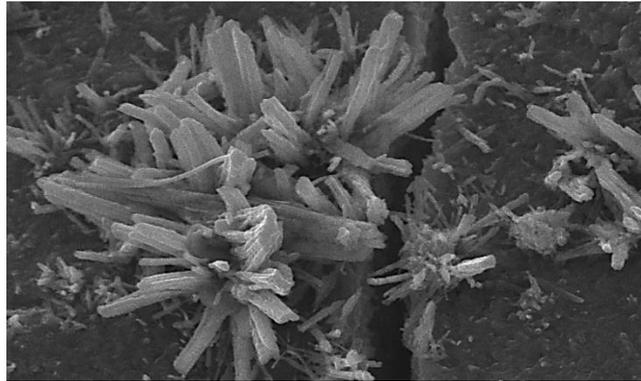
Внедрение литых бетонных смесей высокой однородности, жизнеспособности и сверхпрочных бетонов на их основе невозможно без использования полифункциональных модификаторов, наиболее эффективными из которых являются комплексы на основе суперпластификаторов и высокодисперсных добавок типа микрокремнезёма [8]. В то же время, за ходом физико-

химических процессов, происходящих в УСПБ при введении суперпластификаторов необходимы комплексные исследования механизмов и динамики структурных изменений. Такую возможность предоставляют методы высокой разрешающей X-лучевой дифрактометрии, атомно-силовой микроскопии и метода масс-спектрометрии вторичных ионов [9]. В частности, в работе [10] разработана достаточно эффективная методика определения с помощью оптико-корреляционного метода гранулометрического состава наноматериалов. Также перспективным является комплексное использование методов X-лучевой, корреляционно-оптической и атомно-силовой микроскопии как методов контроля физико-химических процессов наноструктурных релаксаций поликристаллов [11]. Обусловлено это тем, что до сих пор невыясненным остаётся целый ряд физических проблем относительно структурных характеристик исследуемых кристаллов с большим количеством неконтролируемых примесей и их роль в формировании структуры ультрасверхпрочного бетона. Помехой широкому использованию таких бетонов в объёмном строительстве являются высокая стоимость и нестабильность химического состава наполнителей украинского производства в бетонной смеси. В то же время, внедрение таких смесей в конструктивных элементах специального строительства, усиление существующих бетонных конструкций, работающих в условиях экстремального сжатия и агрессивной среды, имеют широкие перспективы не только в Украине.

### **3. ВЛИЯНИЕ ТИПА ЦЕМЕНТА НА СВОЙСТВА И ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ УЛЬТРАСВЕРХПРОЧНОГО БЕТОНА**

Немецкий государственный стандарт DIN EN 197-1 содержит 27 стандартных типов цемента, которые имеют разный химический состав [12], а, следовательно, и технологические свойства. Эффективность использования определённых типов цемента проведено в исследованиях [13, 14]. В данных работах было установлено целесообразность использования цементов с низким содержанием  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , причиной является то, что избыточное содержание данного клинкерного минерала приводит к образованию вторичных этtringитов, которые в микроструктуре сверхвысокой прочности и плотности бетона, в значительной степени приводят к появлению трещин (рис. 1).

По этим причинам в основном используется портландцемент марки СЕМ I 42.5R HS/NA с содержанием сульфатов в УСПБ. Типичный состав композитов для формирования УСПБ для двух водоцементных отношений ( $v/c=0,24$  и  $v/c=0,4$ ) приведён в



**Рис. 1.** Электронно-растровая микроскопия. Образование кристаллов этtringита в непосредственной близости к микротрещине [15].  $\times 4000$ -увеличение. Ширина изображения 62,5 мкм.<sup>1</sup>

**ТАБЛИЦА 1.** Типичный состав композитов для формирования УСПБ.<sup>2</sup>

Составляющие	в/ц = 0,24, кг/м <sup>3</sup>	в/ц = 0,4, кг/м <sup>3</sup>
СЕМ I 42,5R	733	664
Песок 0,125/0,5мм	1008	913
Микрокремнезём	230	208
Металлическая фибра (9/0,15 мм)	0	0
Мука кварца	183	165,8
Суперпластификатор FM 1	29,4	7,3
Вода	161	262
Плотность бетона 28д	2140	2280

табл. 1.

На рисунке 2 приведены временные зависимости величины прочности образцов УСПБ, полученные на основе цемента СЕМ I 42.5R HS/NA при различных условиях твердения и демонстрируют прирост её значения. Образцы УСПБ типа M1Q-S-WL, которые хранились в воде, на 7 день преодолели отметку прочности 100 Н/мм<sup>2</sup> на сжатие и 11 Н/мм<sup>2</sup> на изгиб. Для образцов M1Q-S-90 в результате тепловой обработки при 90°C прочность в течение 7 дней достигает отметки в 153 Н/мм<sup>2</sup> на сжатие и 15 Н/мм<sup>2</sup> на изгиб. Для образца M1Q-S-70 гидротермической обработки при температуре 70°C и 100% относительной влажности значение прочности достигает предела 125 Н/мм<sup>2</sup> на сжатие и 15 Н/мм<sup>2</sup> на изгиб.

Дальнейшая гидратация смесей бетонных образцов M1Q-S-90 и M1Q-S-70 не показала существенного прироста прочности на сжа-

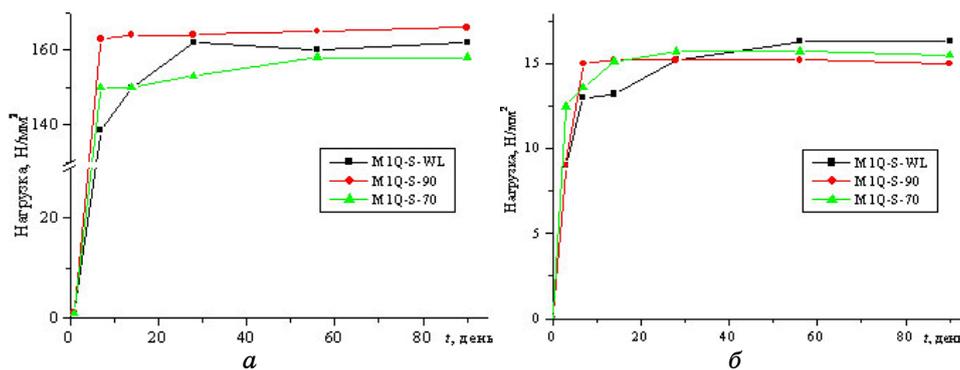


Рис. 2. Градация динамики прироста величины прочности образцов УСПБ при  $v/c = 0,24$  [15]: а) на сжатие; б) на изгиб.<sup>3</sup>

тие и достигла значений  $170 \text{ Н/мм}^2$  и  $150 \text{ Н/мм}^2$ . В то же время, для серии образцов M1Q-S-WL, которые были выдержаны в воде, произошёл прирост прочности на  $25 \text{ Н/мм}^2$ , достигнув предела в  $165 \text{ Н/мм}^2$ . Характерно, что для этих же образцов произошёл прирост прочности и на изгиб, данные образцы пересекли отметку в  $16 \text{ Н/мм}^2$ .

Следовательно, градация и характер набора прочности бетона в зависимости от условий твердения характеризует собой измене-

ТАБЛИЦА 2. Составляющие характеристики наполнителей в УСПБ.<sup>4</sup>

	Содержание $\text{SiO}_2$	Наибольшие зерна	Плотность	Удельная поверхность	Содержание зёрен $0,125$ мм	Содержание зёрен $0,09$ мм
	%	МКМ	г/дм <sup>3</sup>	см <sup>2</sup> /г	%	%
Песок $0,125/0,5$	99,5	500	2,65	100	1	0,3
Базальт	—	8000	3,06	—	—	—
СЕМ I 52,5 R HS	—	50	3,1	4530	100	100
Микрокремнезём МI	94,0	1	2,20	$20 \cdot 10^4$	100	100
Микрокремнезём МII	98,3	1	2,20	$20 \cdot 10^4$	100	100
Измельчённый песок QI	99	60	2,65	3800	99,9	99
Измельчённый песок QII	99	300	2,65	1000	68	55
Металлическая фибра	—	—	7,85	—	—	—
Полипропиленовая фибра	—	—	0,92	—	—	—

ние процессов протекания химических реакций и процессов структурообразования, что в дальнейшем требует тщательного изучения и установления физико-химических причинно-следственных связей изменения характера и степени гидратации.

#### 4. КАЧЕСТВЕННЫЕ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ УСПБ

Для достижения плотности упаковки зёрен цементной матрицы в УСПБ добавляется микрокремнезём и тонко измельчённые порошки кварца. Их основные характеристики указаны в табл. 2.

В работе [15] проведён анализ влияния трёх вариантов размеров зёрен базальта (табл. 3), которые традиционно используются в качестве заполнителя пустот в бетонных смесях, на значение прочности на сжатие на 7-й день (табл. 4). Образцы были термически обработаны при температуре 90°C. Интересно, что значение прочности для образцов с вариациями по размерам зёрен базаль-

**ТАБЛИЦА 3.** Состав характерных компонентов для УСПБ.<sup>5</sup>

	ВЗQ — 2/8 мм, кг/м <sup>3</sup>	ВЗQ — 2/16 мм, кг/м <sup>3</sup>	ВЗQ — 8/16 мм, кг/м <sup>3</sup>
СЕМ I 52,5 R HS-NA	580	580	580
Песок 0,125/0,5	354	354	354
Базальт 2/6	427	217	—
Базальт 6/8	284	144	—
Базальт 8/11	—	210	427
Базальт 11/16	—	140	284
Микрокремнезём МП	177	177	177
Металлическая фибра 9/0,15	192	192	192
Кварцевая мука Q1	131	131	131
Кварцевая мука Q2	325	325	325
Суперпластификатор FM3	30,5	30,5	30,5
Вода	141	141	141

**ТАБЛИЦА 4.** Результаты испытаний.<sup>6</sup>

Испытания	ВЗQ — 2/8 мм	ВЗQ — 2/16 мм	ВЗQ — 8/16 мм
Предел прочности при сжатии [Н/мм <sup>2</sup> ]	194,8	185,5	197,2

та от 2 до 16 мм ВЗQ — 2/16 мм составило  $\approx 186$  Н/мм<sup>2</sup>, тогда как для образцов с вариациями от 2 до 8 мм  $\approx 195$  и от 8 до 16 мм  $\approx 197$  Н/мм<sup>2</sup>. В целом, это свидетельствует об определённом нелинейном влиянии приведённой градации заполнителей на прочность и требует более детальных исследований.

## 5. ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ НА УПАКОВКУ ЗЁРЕН В БЕТОННОЙ МАТРИЦЕ

Отличительной чертой УСПБ является его низкое соотношение воды с вяжущим веществом, примерно от 0,20 до 0,25. Для прочности таких бетонов важное значение имеет плотность упаковки используемых материалов; в частности это относится к частицам в диапазоне менее 0,5 мм [14, 15]. Связь между вяжущими, агрегатами и наполнителями имеет важное значение для плотности упаковки всех составляющих.

В работе [16] был установлен оптимальный эффект, который достигается, когда отношения границ меньших частиц к большим  $X_{\max}/X_{\min}$  должно быть примерно 0,315. Если это отношение меньше, эффект наполнения также выполняется при условии, что дальнейшие мелкие частицы должны дозаполнить пустоты.

Оптимизация упаковки частиц может быть получена путём добавления наноматериалов, которые заполняют пустоты между цементом и микрокремнезёмом. Это приводит к более высокой плотности упаковки, а также генерированию большого количества силиката кальция-гидрата (C-S-H). Это обусловило бы значительное улучшение устойчивости и механические характеристики бетона. Проведённые исследования в работе [15] показали, что пуццолановая активность нано-SiO<sub>2</sub> значительно выше, чем у микрокремнезёма, что в свою очередь положительно влияет на превращение нестабильного и растворимого гидроксида кальция в прочный кристаллический гидрат силиката кальция, дополнительное количество которого уплотняет структуру бетона и даёт прирост прочности.

## 6. ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИЙ И ВОДОРЕДУЦИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТЫ

Для увеличения прочности бетонного композита при достаточной водопотребности и консистенции смеси необходимо применять пластификаторы нового поколения. Из-за низкого содержания воды, которое близко к теоретически необходимому (в/ц значение  $\leq 0,25$ ), эффективны применения суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов. Для этой цели в [17] были использо-

ТАБЛИЦА 5. Показатели консистенции бетонной смеси.<sup>7</sup>

СП	Химическая основа	Пластифицирующий эффект, мин	Усадка, см
FM 1	Карбоксилат	3,5	10,0
FM 2	Карбоксилат	3	18,5
FM 3	Модифицированный поликарбоксилат	2	25,0

ваны три типа суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов (FM-3) и два на основе карбоксилатных эфиров (FM-1, FM-2). Они были апробированы в предыдущих экспериментах и обеспечили особую технологическую эффективность. Обычные бетонные суперпластификаторы на основе нафталина и лигносульфонатов в сравнительных тестах оказались менее эффективными.

В таблице 5 описаны технологические эффекты влияния трёх типов пластификаторов, эффективность которых определялась в соответствии с DIN EN 1015-3 [18]. Дозировка пластификатора для каждого замеса составляла 28,5 кг/м<sup>3</sup>. Испытания показали, что модифицированные поликарбоксилаты (FM 3) оказались значительно эффективнее, применение их в растворе увеличило подвижность смеси до 25 см, а для пластификаторов на основе эфиров карбоксилатов — до 10 см и 18,5 см соответственно. Разным является и пластифицирующий эффект — для FM 3 в смесителе он начал визуально наблюдаться через 2 минуты, а для других пластификаторов (FM 1 и FM 2) только через 3 мин.

В то же время в работе [17] показано, что наиболее эффективными для использования в формировании УСПБ являются пластификаторы на основе модифицированных поликарбоксилатов нового поколения.

## 7. ВЛИЯНИЕ ФИБРЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕТОНА

Для достижения пластического разрушения и высокой прочности на изгиб бетона, используют стальные или другие типы волокон, диаметром от 0,15 до 0,2 мм и длиной 6 и 9 мм. Лабораторные исследования [19] показали, что под действием усилий на изгиб и сжатие, короткие волокна и более длинные волокна не продемонстрировали существенной разницы (табл. 6). Тем не менее, использование более длинных волокон положительно влияет на пластическое поведение образцов во время испытаний на изгиб и сжатие.

С 1% содержанием волокон величина прочности на растяжение

ТАБЛИЦА 6. Влияние содержания и размеров фибры.<sup>8</sup>

	Содержание волокон %	Длина волокна, мм	Предел прочности на разрыв, Н/мм <sup>2</sup>
1	0	—	5,04
2	1	6	7,56
3	2,5	6	8,52
4	2,5	9	9,04

увеличилась с 5,04 Н/мм<sup>2</sup> до 7,56 Н/мм<sup>2</sup>, что составляет 50%. С 2,5% содержанием волокон на 70% (до 8,52 Н/мм<sup>2</sup>). Содержание волокон размером 9 мм, показало прирост значения прочности на растяжение на 79% (до 9,04 Н/мм<sup>2</sup>).

### 8. МИКРОСТРУКТУРА УЛЬТРАСВЕРХПРОЧНОГО БЕТОНА С ДОБАВЛЕНИЕМ НАНОМОДИФИКАТОРОВ

В работе [20] исследовано влияние двух типов модификаторов,

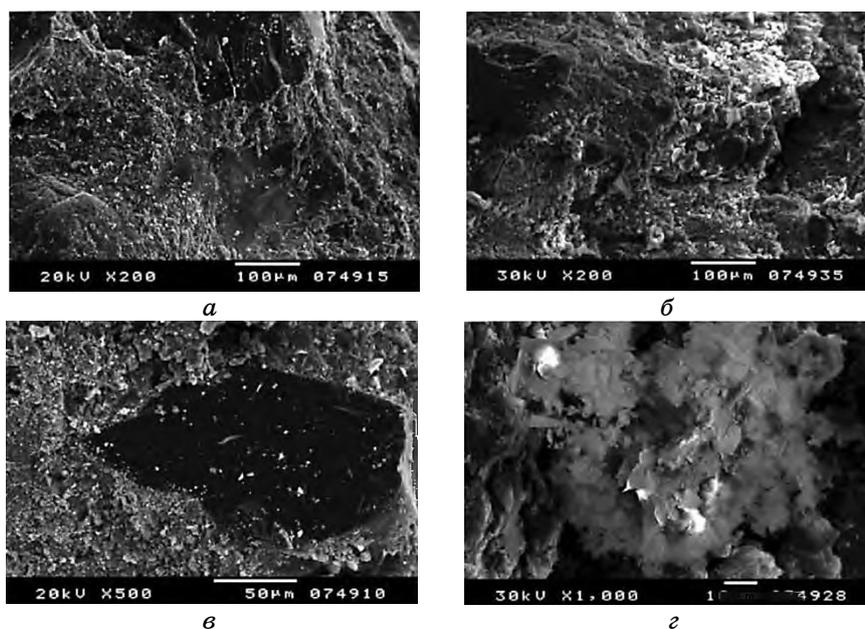


Рис. 3. Электронно-растровая микроскопия. Микроструктура цементного камня модифицированной нано-SiO<sub>2</sub>: (а) микроструктура УСПБ нано-SiO<sub>2</sub>; (б) микроструктура УСПБ; (в) образование C-S-H-геля в цементе и нано-SiO<sub>2</sub> пасте; (г) на границе раздела фаз в переходной зоне [22].<sup>9</sup>

основа которых составляет нано-SiO<sub>2</sub> на механические и реологические свойства УСПБ. Экспериментальные результаты свидетельствуют, что включение нано-SiO<sub>2</sub> приводит к более плотной микроструктуре. Это в свою очередь влияет на повышение механических свойств.

Лабораторные исследования в [21] показали, что пористая структура УСПБ также может быть эффективно модифицирована с добавлением нано-SiO<sub>2</sub>. Топограммы на рис. 3, полученные с помощью электронно-растровой микроскопии, подтверждают эффективность воздействия нано-SiO<sub>2</sub> на микроструктуру межфазной переходной зоны (между агрегатами и связующей пастой).

## 9. ВЫВОДЫ

Проанализированы перспективные рецептуры ультрасверхпрочных бетонных композитов. Приведены примеры влияния на динамику значений прочности бетонных композитов в зависимости от условий твердения, а также качественного и количественного состава различных наномодификаторов, цемента, полимерных добавок, фиброволокна.

Определены основные фундаментальные принципы получения бетонов нового поколения, а именно:

— уменьшением пористости затвердевшего цементного камня пропорционально увеличению плотности упаковки зёрен [23] — через уменьшение отношения воды к вяжущему веществу ниже теоретически необходимого (от 0,2 до 0,3), в результате чего гидраты заполняют структуру пор, содержание которых значительно снижается в микроструктуре затвердевшего цементного камня;

— добавление 30% микрокремнезёма от массы цемента приводит к тому, что уменьшается количество пустот в переходной зоне между матрицей цемента и крупных агрегатных частиц (межфазной зоны) [23] — именно там Ca(OH)<sub>2</sub> вступает в реакцию с диоксидом кремния и образует дополнительные CSH-фазы;

— при тепловой обработке в интервале температур 65°C и 90°C [24] ускоряется гидратация цементного и бетонного раствора, реакция микро кремнезёма с портландитом под влиянием испарения воды нарушается, вследствие этого: сопротивление бетона на сжатие в течение двух дней достигает  $\approx 250$  Н/мм<sup>2</sup> [25]; прочность на сжатие термически обработанных образцов становится значительно выше прочности идентичных бетонных образцов, которые хранились в воде.

— добавление от 2 до 4% стальных волокон обеспечивает достаточную пластичность бетона [26, 27], при этом, существенное влияние имеет размер волокон, а также их геометрия на реологические особенности смеси и прочности на изгиб.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА—REFERENCES

1. V. N. Kalashnikov and S. V. Ananiev, *Stroitelnyye Materialy*, **6**: 59 (2015) (in Russian).
2. M. Behloul, G. Chanvillard, P. Casanova, and G. Orange, *Fire Resistance of Ductal, Ultra High Performance Concrete: Proceedings (Osaka, Japan: 2002)*.
3. R. Runova, I. Rudenko, and V. Troyan, *Ibausil. Internationale Baustofftagung (Weimar, September 12–15, 2012)* (Weimar: 2012), Tagungsbericht, **2**: 2-0082.
4. R. F. Runova, I. I. Rudenko, and V. V. Troyan, *Stroitelstvo, Materialovedenie, Mashinostroenie*, **56**: 379 (2010) (in Russian).
5. *RILEM Proceedings, PRO 53, RILEM Pbs., S.A.R.L. (Cachan, France, June 2007)* (Eds. H. W. Reinhardt and A. E. Naaman), p. 518.
6. D. M. Roy, G. R. Gouda, and A. Bobrowski, *Cement and Concrete Research*, **2**: 349 (1972).
7. P. Francisco, F. Benboudjema, P. Rougeau, and J. M. Torrenti, *Ultra High Performance Concrete for Prestressed Elements—Interest of Creep Prediction, Colloque BFUP 2009* (Marseille: 2009).
8. M. Schmidt, R. Krelaus, T. Teichmann, T. Leutbecher, and E. Fehling, *Beton und Stahlbetonbau*, **102**, No. 10: 681 (2017).
9. D. Stephan, R. Krelaus, and M. Schmidt, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete* (Kassel, Germany: Kassel University Press: 2008).
10. M. P. Gorsky, P. P. Maksimyak, and A. P. Maksimyak, *Appl. Opt.*, **51**, No. 10: 208 (2012).
11. E. N. Kislovskii, V. B. Molodkin, S. I. Olikhovskii, E. G. Len, B. V. Sheludchenko, S. V. Lizunova, T. P. Vladimirova, E. V. Kochelab, O. V. Reshetnyk, V. V. Dovganyuk, I. M. Fodchuk, T. V. Lytvynchuk, and V. P. Kladko, *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **7**, No. 3: 523 (2013).
12. *DIN EN 197-1, Zement—Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung* (EN 197-1: 2000, Ausgabe: Nov. 2000).
13. K. P. Metha and P. J. M. Monteiro, *Concrete—Microstructure, Properties and Materials. Second Edition* (USA: 1993).
14. T. Reschke, *Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton* (Verein Deutscher Zementwerke e.V: 2001).
15. Q. Ye, D. Kong, and R. Chen, *Construction and Building Materials*, **21**: 539 (2007).
16. K. Wille, A. E. Naaman, S. El-Tawil, and G. J. Parra-Montesinos, *Materials and Structures (August 27th, 2011)*.
17. E. Sakai, K. Yamada, and A. Ohta, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1**, No. 1: 16 (2013).
18. *Methods of Test for Mortar for Masonry, Part 3: Determination of Consistence of Fresh Mortar* (German version EN 1015-3: 1999 +A1: 2004).
19. H. Li, H. Gang, X. Jie, J. Yuan, and J. Ou, *Composites: Part B*, **35**, No. 2: 185 (2004).

20. X. He and X. Shi, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2070**, Iss. 1: 13 (2008).
21. T. Ji, *Cement and Concrete Research*, **35**, No. 10: 1943 (2005).
22. M. Schmidt, E. Fehling, T. Teichmann, K. Bunje, and R. Bornemann, *Ultra-Hochfester Beton: Perspektiven für die Betonfertigteilindustrie. In: Beton + Fertigteiljahrbuch* (Gütersloh: Bauverlag: 2003).
23. R. Bornemann and E. Fehling, *Ultraschallfester Beton — Entwicklung und Verhalten* (Leipziger Massivbau-Seminar: 2000).
24. M. Ramezaniapour, M. Moravej Jahromi, R. Elmaili, *Mechanical Properties and Durability of Concrete Incorporating Nanosilica* (Japan: 2008).
25. P. Aitcin and P. Richard, *Proc. 4th International Symposium on Utilization of High Strength Concrete* (Paris: 1996).
26. M. Collepardi, A. Marcialis, and R. Turriziani, *II Cemento*, **67**: 157 (1970).
27. M. Cherezy, V. Malet, and L. Frouin, *Cement and Concrete Research*, **25**: 1491 (1995).

---

*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,  
2 Kotsyubyns'kyy Str.  
58012 Chernivtsi, Ukraine*

<sup>1</sup> Fig. 1. Electron-raster microscopy. Formation of ettringite crystals in immediate proximity to microcracks [15].  $\times 4000$  increase. The width of the image is 62.5  $\mu\text{m}$ .

<sup>2</sup> TABLE 1. A typical composition of composites for the USPB formation.

<sup>3</sup> Fig. 2. Gradation of the growth dynamics of the strength of the USPB samples at  $v/\text{ц} = 0.24$  [15]: (a) by compression; (б) for bending.

<sup>4</sup> TABLE 2. Component characteristics of excipients in USPB.

<sup>5</sup> TABLE 3. Composition of characteristic components for USPB.

<sup>6</sup> TABLE 4. Test results.

<sup>7</sup> TABLE 5. The consistency of the concrete mixture.

<sup>8</sup> TABLE 6. Effect of the content and size of the fibre.

<sup>9</sup> Fig. 3. Electron-raster microscopy. Microstructure of a cement stone of modified nano-SiO<sub>2</sub>: (a) microstructure of the USPB nano-SiO<sub>2</sub>; (б) microstructure of the USPB; (в) formation of C-S-H-gel in cement and nano-SiO<sub>2</sub> paste; (г) at the phase boundary in the transition zone [22].