

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

Бетонные композиты высокой структурной прочности и плотности, модифицированные комплексом мелкодисперсных добавок на основе нанокремнезёма и метакаолина

А. В. Сумарюк¹, В. Ф. Романкевич¹, Ю. Т. Роман¹, И. М. Фодчук¹,
В. М. Ткач²

¹*Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2,
50002 Черновцы, Украина*

²*Институт сверхтвёрдых материалов им. В. М. Бакуля НАН Украины,
ул. Автозаводская, 2,
04074 Киев, Украина*

Проведён анализ структурообразования бетонных композитов, прочность на сжатие которых превышает 115 МПа, и количественный анализ их качественного состава и продуктов гидратации методами рентгеноструктурного, рентгеноспектрального анализа и электронно-растровой микроскопии. Исследованы основные факторы влияния различных нанонаполнителей на их физико-механические параметры и формирования более плотной структуры цементного камня, которая в основном включает гидросиликаты кальция, гидроалюминаты силиката кальция и гидроалюминаты различной основности.

Проведено аналізу структуроутворення бетонних композитів, міцність на стиск яких перевищує 115 МПа, та кількісну аналізу їхнього якісного складу та продуктів гідратації методами рентгеноструктурної та рентгеноспектральної аналізи й електронно-растрової мікроскопії. Досліджено основні чинники впливу комплексу різних нанонаповнювачів на їхні фізико-механічні параметри і формування більш щільної структури цементного каменю, яка переважно містить гідросилікати кальцію, гідроалюмінати силікату кальцію та гідроалюмінатів різної основности.

Analysis of the structure formation of concrete composites, compressive strength of which exceeds 115 MPa, and a quantitative analysis of their qualitative composition and hydration products by means of X-ray diffraction, X-ray spectral analysis, and electron microscopy. The main impacts of the complex of various nanofillers affecting both the physicome-

chanical parameters and the formation of a dense cement-stone structure, which mainly includes calcium hydrosilicates, calcium silicate hydroaluminates and hydroaluminates of various basicities, are studied.

Ключевые слова: бетон, ультрадисперсные модификаторы, нанокремнезём, метаксаолин, рентгеноструктурный и рентгеноспектральный анализы, растровая электронная микроскопия.

Ключові слова: бетон, ультрадисперсні модифікатори, нанокремнезем, метаксаолін, рентгеноструктурна та рентгеноспектральна аналізи, растрова електронна микроскопія.

Key words: concrete, ultrafine modifiers, nanosilica, metakaolin, X-ray and X-ray spectral analyses, raster electron microscopy.

(Получено 23 февраля 2018 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка рецептуры высокопрочных бетонов, как правило, основывается на модифицировании микроструктуры бетонной матрицы мелкодисперсными наполнителями [1–9]. Плотность упаковки зёрен играет определяющую роль в формировании композита сверхвысокой структурной прочности и плотности. Среди технологических наполнителей, которые проявляют высокую пуццолановую активность и вяжущие свойства, особое внимание уделяется аморфному конденсированному нанокремнезёму (НК), размером микросфер в пределах 100–300 нм. Наличие НК способствует ускорению гидратации алитовой и белитовой фазы цемента и оптимизирует плотность упаковки зёрен [1]. Это приводит к более высокой плотности бетонной матрицы, а также генерации большого количества силиката кальция-гидрата (C–S–H) [2]. Эффективным модификатором также является метаксаолин — продукт дегидратации каолиновой глины (природного гидроалюмосиликата), который уплотняет микроструктуру бетонной матрицы при твердении гидратных новообразований [3]. Другое его качество — пуццолановая активность, которая носит смешанный алюминатно-кремнезёмный характер [4]. По данным [5, 6] в системе взаимодействия «оксидов алюминия, кальция и воды» « Al_2O_3 –CaO–H₂O» на ранней стадии возможно возникновение геля гидрата глинозёма Al(OH)₃, который в дальнейшем, в зависимости от водородного показателя среды и других факторов, кристаллизуется в высокоосновные гидроалюминаты кальция $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot nH_2O$, гидрогранаты, гидрогеленит C₂ASH₈ и низкоосновные гидросиликаты кальция CSH-I [7–9].

Одним из важных направлений прогнозируемого формирова-

ния оптимальной мезо- и макроструктуры бетона является метод подбора оптимального гранулометрического состава полифракционного заполнителя, который основан на анализе уравнений идеальных кривых Fullera, Andreasena, Funka and Dingera (FAFD) [10]. В то же время, в исследовании [11] указано, что данный метод дает только приблизительный состав максимальной упаковки зёрен заполнителем. Поскольку указанные уравнения описывают «идеальную» кривую просеивания для систем с шаровидной формой зёрен и не учитывают возможных отклонений от этой формы для реальных систем. Считается, что корректировка данного фактора может быть выполнена с помощью коэффициента формы зерна, который определяется отношением площади поверхности шара к площади поверхности зерна равного объёма [12].

В данной статье проведены исследования механизмов структурообразования в бетонных композитах, модифицированных комплексом мелкодисперсных добавок, прочность на сжатие которых превышает 115 МПа. Для определения состава и продуктов гидратации использованы методы рентгеноструктурного, рентгено-спектрального анализа и электронно-растровой микроскопии. Проведены также исследования, направленные на уточнение физико-химических процессов, которые определяют механические характеристики (прочность на растяжение и сжатие) бетонного композита.

2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Внедрение перспективных рецептур бетонов со стабильными показателями качества смеси класса не ниже C100/110 (согласно стандарту DIN EN 206-1/DIN 1045-2 [12]) с учётом особенностей производства отечественного портландцемента, мелкодисперсных модификаторов (табл. 1), водоредуцирующих добавок является актуальной задачей и сегодня. Новый подход химического модифицирования товарной бетонной смеси возможен при неразру-

ТАБЛИЦА 1. Химический состав, размеры и плотность мелкодисперсных наполнителей.¹

Добавка	Химический состав в %					Размер зёрен	Плотность
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO		
Нано кремнезём	96	0,10	0,08	0,65	0,16	100–300 нм	280–350 кг/м ³
Мета каолин	51,4	0,8	42	—	—	10–40 мкм	1250 кг/м ³

ТАБЛИЦА 2. Составляющие смесей №1 и №2.²

	Рецептура №1, кг/м ³	Рецептура №2, кг/м ³
Цемент ПЦ-I 52,5 (ДСТУ Б В.2.7-46:2010) [14]	600	600
Песок кварцевый, фракция 0,4–0,63 мм	584	654
Щебень гранитный фракция 2/5 мм	315	212,86
Щебень гранитный фракция 5/10 мм	315	255,71
Щебень гранитный фракция 10/20 мм	660	543,81
Нанокремнезем 100–300 нм	—	180
Метакаолин 1–40 мкм	—	30
Вода, дистиллированная	160	160
Пластификатор поликарбоксилатный	5%	5%

шающем контроле на наноуровне процессов структурообразования и определения качественного и количественного фазового состава соединений гидратации и их свойства [13–17]. С этой целью для физико-механических испытаний были выбраны две экспериментальные рецептуры бетонной смеси, которые приведены в табл. 2. В частности, смесь №1 — оптимальная полифракционная смесь, составленная на основе анализа уравнений идеальных кривых FAFD и которая может обеспечить формирование наиболее плотно упакованного композита [18], а также смесь №2 — модифицированная смесь №1 мелкодисперсными модификаторами на основе нанокремнезёма и метакаолина.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рентгеноструктурные исследования фазового состава образцов цементного камня проведены на дифрактометре X'Pert PRO MRD в однокристалльной схеме для $\text{CuK}_{\alpha 1}$ -излучения. Выходные образцы измельчались и в виде мелкодисперсного порошка просеивались через сито, диаметр ячеек которого составил $\cong 0,08$ мм.

Экспериментальные рентгеновские данные обрабатывались с помощью программного обеспечения Match3:

<http://www.crystalimpact.com/match>.

Определение особенностей влияния различных добавок и их комплексов на формирование гидратных фаз и микроструктуры срезов цементного камня проводили с помощью растрового электронного микроскопа фирмы 'Zeiss' EVO-50 с использованием CCD-детектора. Элементный состав композитов определялся с

помощью рентгеноспектрального анализатора Link-860, Oxford IncaEnergy 450. Физико-механические исследования проведены в соответствии с действующими нормативными документами ДБН В.2.7-64, ДБН В.2.7-65, ДБН В.2.7-69, ДСТУ Б В.2.7-96, ДСТУ Б В.2.7-114 [19].

Определение прочности на сжатие проводилось на гидравлическом прессе П250, нагрузка образцов осуществлялась непрерывно со скоростью, обеспечивающей повышение расчётного напряжения в образце к его полному разрушению в пределах $0,6 \pm 0,4$ МПа/с.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Образцы бетонных композитов были выдержаны в течение 28 дней в нормальных условиях и в процессе механических испытаний преодолели следующие отметки прочности на сжатие: состава №1 — в 631 кН, тогда как состава №2 — в 1155 кН, что превышает показатель высочайшего класса бетона С100/115 (согласно стандарту DIN EN 206-1/DIN 1045-2 [20]). Консистенция бетонной смеси определялась конусом Абрамса [21] и для состава №1 составляет 4 см, а для состава №2 — 9 см.

На рисунке 1 представлены фрагменты изображений электронно-растровой микроскопии и данные рентгеноспектрального анализа в отмеченных цифрами областях срезов образцов (табл. 3 и табл. 4). Перечень элементов и их процентное содержание указывает на наличие в бетонной матрице гидросиликатов и алюминатов кальция, а также гидроксида кальция. Характерно, что содержание основных компонент ограниченной линиями области (7 — на рис. 1) для образцов №1 и №2 практически не отличается. В локальных зёрнах процентное содержание основных элементов

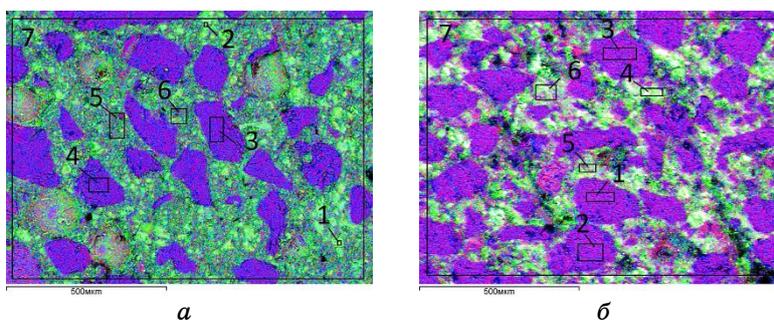


Рис. 1. Фрагменты электронно-растровых изображений макро- и микро-структуры поверхностных срезов цементной матрицы: а) состав №1; б) состав №2.³

ТАБЛИЦА 3. Спектральное распределение основных элементов в отмеченных цифрами областях срезов цементной матрицы состава №1 (рис. 1, а).⁴

№ Область	C	O	Mg	Al	Si	K	Fe	Ca
	%							
1	2,52	40,30	0,57	1,78	13,38	0,49	1,74	39,23
2	6,54	36,56	0,59	0,43	12,34	—	—	43,54
3	20,32	42,05	—	—	37,18	—	—	0,45
4	18,40	40,61	—	—	40,19	—	0,34	0,46
5	21,33	37,56	0,70	1,8	17,81	0,8	1,30	18,69
6	21,66	38,90	0,71	2,15	18,44	0,92	1,01	16,20
7	19,06	40,28	0,54	1,37	23,64	0,58	0,8	13,74

ТАБЛИЦА 4. Распределение элементов в областях для образцов состава №2 (рис. 1, б).⁵

№ Область	C	O	Mg	Al	Si	Fe	Ca
	%						
1	11,51	46,05	—	—	42,24	—	0,20
2	12,12	45,50	—	—	41,95	—	0,43
3	17,15	42,85	—	0,18	38,98	—	0,55
4	14,06	41,09	1,24	1,92	17,09	0,94	22,95
5	9,37	45,89	1,00	2,92	21,94	1,13	17,09
6	8,02	45,23	1,10	2,86	23,41	1,01	17,80
7	20,28	40,69	0,40	1,53	26,38	0,80	9,34

также совпадает, в частности, в зёрнах 3 и 4 на рис. 1, а и 1, 2 и 3 на рис. 1, б. В то же время, в межзёренных зонах 1 и 2 (рис. 1) существенно (в два раза) меньше содержание углерода и больше (в два раза) содержание кальция, чем в соответствующих зонах 5 и 6 на рис. 1, б, при этом, соотношение кальция к силицию почти не отличается. Весомо отличается на электронно-растровых изображениях микроструктура срезов, для образца №2 на рис. 1, б — она более развитая и уплотнённая. Причиной этому может быть то, что для модифицированных образцов характерно большее содержание продуктов гидратации. Видимо, в процессе гидратации клинкерных минералов при твердении бетона образуется ряд химически активных веществ, в первую очередь, гидрат оксида кальция и гидрат силиката кальция.

Вероятно, НК и МТК в бетонной смеси создают условия для преобразования нестабильного и растворимого гидроксида кальция в прочный кристаллический гидрат силиката кальция (ГСК).

Таким образом уплотнённая структура бетона и даёт увеличение показателя прочности для состава №2.

На рисунке 2 приведена характерная рентгеновская дифрактограмма, а в табл. 5 результаты идентификации на ней отдельных максимумов интенсивности от определённых кристаллических составляющих бетонного композита №2. Соответствующие продукты гидратации портландцемента представлены линиями етtringита $Al_2Ca_6H_{66}O_{49,68}S_3$ ($d/n = 0,975$ нм и др.), портландида

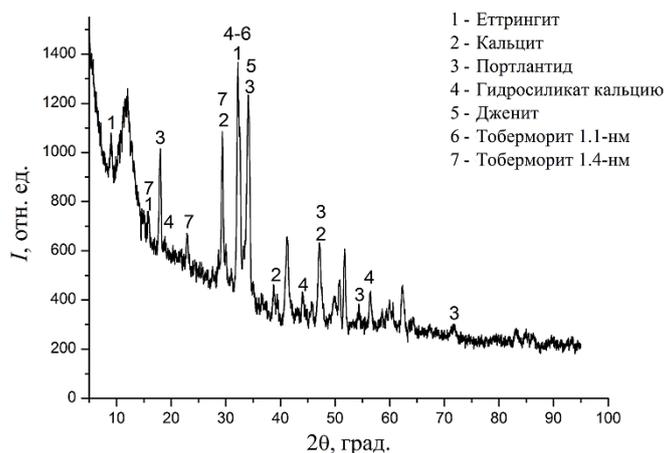


Рис. 2. Дифрактограмма цементного камня, модифицированного ультрадисперсными модификаторами (состав №2).⁶

ТАБЛИЦА 5. Составляющие цементного камня состава №2, определённые по угловым положениям максимумов интенсивности на дифрактограмме на рис. 2 и рис. 3.⁷

№	Химическая формула	d/n	Название соединения
1	$Al_2Ca_6H_{66}O_{49,68}S_3$	0,974, 0,563, 0,388,	етtringит
2	$CaCO_3$	0,278, 0,303, 0,191	кальцит
3	$Ca(OH)_2$	0,491, 0,262, 0,192	портландид
4	$Ca_3H_2O_{7,5}Si_{1,5}$	0,278, 0,335, 0,181	гидросиликат кальция
5	$Ca_9H_{22}O_{32}Si_6$	1,049, 0,262, 0,278	дженит
6	$Ca_2H_3O_{11}Si_3$	0,308, 0,297, 0,351	тоберморит 1,1-нм
7	$Ca_{2,5}H_{11}O_{12,5}Si_3$	0,552, 0,310, 0,301	тоберморит 1,4-нм
8	$Ca_5H_{10}O_{22}Si_6$	0,307, 0,301, 0,279	клинотоберморит
9	$Ca_2H_2O_5Si$	0,287, 0,269, 0,260	ГСК
10	$Ca_5H_2O_{10}Si_2$	0,303, 0,277, 0,256	ГСК
11	$Al_2CaH_{10}O_{21}Si_6$	0,305, 0,275, 0,268	ГАСК
12	$Al_2CaH_8O_{10}Si_{12}$	0,263, 0,262	ГАСК
13	$Al_{3,5}Ca_3H_{9,7}O_{12}$	0,276, 0,309	ГАК

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d/n = 0,491, 0,262, 0,192$ нм), кальцита CaCO_3 ($d/n = 0,303, 0,191$ нм др.), где d — период кристаллической решётки, n — порядок дифракции.

Анализ дифрактограммы на рис. 2 (и отдельного её фрагмента на рис. 3) позволяет утверждать, что модифицирование цементной матрицы комплексом мелкодисперсных добавок на основе НК и МТК приводит преимущественно к формированию низкоосновных гидросиликатов кальция (соответствующие максимумы интенсивности — $d/n = 0,278, 0,335, 0,181$ нм) и таких структурных моделей геля CSH, как дженит ($\text{Ca}_9\text{H}_{22}\text{O}_{32}\text{Si}_6$ с $d/n = 1,049, 0,262, 0,278$ нм.) и многослойного тоберморита ($\text{Ca}_2\text{H}_3\text{O}_{11}\text{Si}_3$ с толщинами слоёв 1,1 нм и 1,4 нм) [22].

Эти фазы, скорее всего, образовались из смеси СН и активного кремнезёма при отношении Ca/Si — 1,1–1,2. Однако для состава №2 в течение последующих реакций сформировался тоберморит преимущественно одной фазы с толщиной слоя 1,4 нм ($d/n = 0,552, 0,310, 0,301$ нм). Это, вероятно, является причиной значительного уплотнения микроструктуры и значительного увеличения прочности образца №2.

На дифрактограмах, полученных от образцов состава №2, в отличие от образцов состава №1, наблюдается повышенный фон интенсивности в области малых углов дифракции и уменьшение максимумов интенсивности при росте интегрированной интенсивности от кристаллических фаз карбоната кальция ($d/n = 0,303$ нм и др.). По видимому, наличие гидросиликата кальция, гидроалюмината силиката кальция и гидроалюмината различной основности в составе №2 способствует формированию более плотной

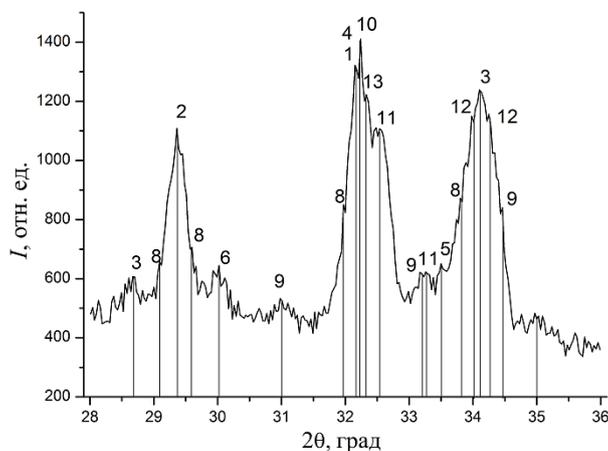


Рис. 3. Фрагмент рентгеновской дифрактограммы рис. 2 цементного камня состава №2.⁸

структуры цементного камня, что является причиной повышения прочности.

4. ВЫВОДЫ

Применение комплекса модификаторов для получения высокопрочного бетона (прочность на сжатие которых превышает 115 МПа) позволяет разработать новые подходы к модифицированию свойств бетонной смеси и создания бетонных композитов высокой структурной прочности и плотности с заданными физико-механическими параметрами.

Модифицирование цементной матрицы комплексом мелкодисперсных добавок на основе НК и МТК приводят, преимущественно, к формированию низкоосновных гидросиликатов кальция и таких структурных моделей геля С–S–Н как дженита и тоберморита, имеющих слоистую структуру. Эти фазы, скорее всего, образовались из компонентов СН и активного кремнезёма при отношении Ca/Si — 1,1–1,2.

Влияние нанокремнезёма на механические свойства бетона в комплексе с метакаолином и поликарбоксилатным эфиром проявляется в повышении прочностных характеристик бетона более чем на 80% в условиях сохранения технологических свойств смеси. Вероятно, комплекс модификаторов на основе НК и МТК в бетонной смеси создаёт условия для преобразования нестабильного и растворимого гидроксида кальция в прочный кристаллический гидрат силиката кальция. Уплотнённая таким образом структура бетона значительно увеличивает его прочность.

Формирование таких структурных элементов цементного геля как тоберморит и дженит, являющихся по своей сути наноматериалом, поскольку состоят из множества отдельных слоёв молекул с различными свойствами, также способствует созданию более прочного бетонного композита.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. K. Jayakumar, *International Symposium on Ultra High Performance Concrete (Kassel, Germany, September 13–15, 2004)*, p. 165.
2. А. В. Сумарюк, В. Ф. Романкевич, И. М. Фодчук, *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*, **16**, вып. 1: 103 (2018).
3. J. F. Martirena, R. L. Day, B. Middendorf, M. Gehrke, L. Martinez, and J. M. Dopico, *International Symposium on Ultra High Performance Concrete (Kassel, Germany, September 13–15, 2004)*, p. 117.
4. А. С. Брыков, *Цемент и его применение*, **4**: 36 (2012).
5. Л. И. Дворкин, Н. В. Лушникова, Р. Ф. Рунова, *Метакаолин в строительных растворах и бетонах* (Киев: Издательство КНУБА: 2007).

6. Я. Малолепши, Э. Питель, *Химические и минеральные добавки в бетон: Сборник трудов* (Харьков: Колорит: 2005), с. 61.
7. H. Li, H. Gang, X. Jie, J. Yuan, and J. Ou, *Composites: Part B*, **35**, No. 2: 185 (2004).
8. X. He and X. Shi, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Academies: 2008), No. 2070, p. 13.
9. T. Ji, *Cement and Concrete Research*, **35**, No. 10: 1943 (2005).
10. M. Stechyshyn, M. Sanytsky, and O. Pozniak, *Journal of Enterprise Technologies*, **3/11**, No. 75: 49 (2015).
11. В. В. Белов, М. А. Смирнов, *Вестник Центрального регионального отделения РААСН*, **9**: 65 (2010).
12. С. А. Удодов, В. Ф. Черных, *Сухие строительные смеси*, № 2: 68 (2008).
13. М. Д. Борча, С. В. Баловсяк, И. М. Фодчук, В. Ю. Хоменко, В. Н. Ткач, *Металлофиз. новейшие технол.*, **35**, № 8: 1137 (2013).
14. M. D. Borchha, S. V. Balovsyak, I. M. Fodchuk, V. Yu. Khomenko, and V. N. Tkach, *Journal of Superhard Materials*, **35**, No. 4: 220 (2013).
15. M. D. Borchha, S. V. Balovsyak, I. M. Fodchuk, V. Yu. Khomenko, O. P. Kroitor, and V. N. Tkach, *Journal of Superhard Materials*, **35**, No. 5: 284 (2013).
16. I. M. Fodchuk, M. D. Borchha, V. Yu. Khomenko, S. V. Balovsyak, V. M. Tkach, and O. O. Statsenko, *Journal of Superhard Materials*, **38**, No. 4: 271 (2016).
17. I. Fodchuk, S. Balovsyak, M. Borchha, Ya. Garabazhiv, and V. Tkach, *phys. stat. sol. (a)*, **208**, No. 11: 2591 (2011).
18. M. Sanytsky, B. Rusyn, J. Halbiniak, and J. Szymańska, *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, **2**, No. 12: 96 (2013).
19. ДСТУ Б В.2.7-46:2010 «Цементы общестроительного назначения»: Технические условия.
20. DIN EN 206-1/DIN 1045-2 gilt für Beton, der für Ort beton bauwerke, vorgefertigte Bauwerke sowie Fertigteile für Gebäude und Ingenieur bauwerke verwendet wird.
21. ДСТУ Б В.2.7-96-2000 «Смеси бетонные»: Технические условия.
22. Х. Тейлор, *Химия цемента* (Москва: Мир: 1996) (пер. с англ.).

REFERENCES

1. K. Jayakumar, *International Symposium on Ultra High Performance Concrete (Kassel, Germany, September 13–15, 2004)*, p. 165.
2. A. V. Sumaryuk, V. F. Romankevich, and I. M. Fodchuk, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **16**, No. 1: 103 (2018) (in Russian).
3. J. F. Martirena, R. L. Day, B. Middendorf, M. Gehrke, L. Martinez, and J. M. Dopico, *International Symposium on Ultra High Performance Concrete (Kassel, Germany, September 13–15, 2004)*, p. 117.
4. A. S. Brykov, *Tsement i Ego Primenenie*, **4**: 36 (2012) (in Russian).
5. L. I. Dvorkin, N. V. Lushnikova, and R. F. Runova, *Metakaolin v Stroitel'nykh Rastvorakh i Tsementakh* [Metakaolin in Mortars and Concretes] (Kiev: Publishing House of the KNUBA: 2007) (in Russian).
6. Ya. Malolepshi and Z. Pitel, *Khimicheskie i Mineral'nyye Dobavki v Beton*:

- Sbornik Trudov* (Kharkov: Kolorit: 2005) (in Russian).
7. H. Li, H. Gang, X. Jie, J. Yuan, and J. Ou, *Composites: Part B*, **35**, No. 2: 185 (2004).
 8. X. He and X. Shi, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Academies: 2008), No. 2070, p. 13.
 9. T. Ji, *Cement and Concrete Research*, **35**, No. 10: 1943 (2005).
 10. M. Stechyshyn, M. Sanytsky, and O. Pozniak, *Journal of Enterprise Technologies*, **3/11**, No. 75: 49 (2015).
 11. V. V. Belov and M. A. Smirnov, *Vestnik Tsentralnogo Regionalnogo Otdeleniya RAASN*, **9**: 65 (2010) (in Russian).
 12. S. A. Udodov and V. F. Chernykh, *Sukhie Stroitel'nyye Smesi*, **2**: 68 (2008) (in Russian).
 13. M. D. Borcha, S. V. Balovsyak, I. M. Fodchuk, V. Yu. Khomenko, and V. N. Tkach, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **35**, No. 8: 1137 (2013) (in Russian).
 14. M. D. Borcha, S. V. Balovsyak, I. M. Fodchuk, V. Yu. Khomenko, and V. N. Tkach, *Journal of Superhard Materials*, **35**, No. 4: 220 (2013).
 15. M. D. Borcha, S. V. Balovsyak, I. M. Fodchuk, V. Yu. Khomenko, O. P. Kroitor, and V. N. Tkach, *Journal of Superhard Materials*, **35**, No. 5: 284 (2013).
 16. I. M. Fodchuk, M. D. Borcha, V. Yu. Khomenko, S. V. Balovsyak, V. M. Tkach, and O. O. Statsenko, *Journal of Superhard Materials*, **38**, No. 4: 271 (2016).
 17. I. Fodchuk, S. Balovsyak, M. Borcha, Ya. Garabazhiv, and V. Tkach, *phys. stat. sol. (a)*, **208**, No. 11: 2591 (2011).
 18. M. Sanytsky, B. Rusyn, J. Halbiniak, and J. Szymańska, *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, **2**, No. 12: 96 (2013).
 19. DSTU B B.2.7-46: 2010 *Tsementy Obshchestroitel'nogo Naznacheniya: Tekhnicheskie Usloviya* [Cements of the Genuinely Rewarding Confession: Technical Conditions] (in Russian).
 20. DIN EN 206-1/DIN 1045-2 gilt für Beton, der für Ort beton bauwerke, vorgefertigte Bauwerke sowie Fertigteile für Gebäude und Ingenieur bauwerke verwendet wird.
 21. DSTU B B.2.7-96-2000 *Smesi Betonnyye: Tekhnicheskie Usloviya* [Concrete Mixtures: Technical Conditions] (in Russian).
 22. H. F. W. Taylor, *Cement Chemistry* (Moscow: Mir: 1996) (Russian translation).

¹Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynsky Str.,
UA-58012 Chernivtsi, Ukraine

²V. M. Bakul Institute for Superhard Materials, N.A.S. of Ukraine
2, Avtozavodska Str.,
UA-04074 Kyiv, Ukraine

¹ TABLE 1. Chemical composition, size, and density of finely dispersed fillers.

² TABLE 2. Components of mixtures No. 1 and No. 2.

³ Fig. 1. Fragments of the raster electron images of the macro- and microstructures of the surface sections of the cement matrix: a) composition No. 1; б) composition No. 2.

⁴ TABLE 3. The spectral distribution of the main elements in the regions of sections of the cement matrix of composition No. 1 (Fig. 1, a).

⁵ **TABLE 4.** The distribution of elements in the regions for samples of composition No. 2 (Fig. 1, б).

⁶ **Fig. 2.** Diffractogram of cement stone modified with ultradispersed modifiers (composition No. 2).

⁷ **TABLE 5.** The components of the cement-stone composition No. 2 determined from the angular positions of the intensity maxima on the diffractogram in Fig. 2 and Fig. 3.

⁸ **Fig. 3.** Fragment of the X-ray diffractogram from Fig. 2 of cement-stone composition No. 2.